

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. TINJAUAN UMUM

Sesuai dengan tuntutan perkembangan jaman, maka pekerjaan konstruksi yang ada semakin kompleks. Adanya kompleksitas inilah maka tidak jarang ditemui berbagai masalah dalam suatu pekerjaan konstruksi. Tanah sebagai dasar berdirinya suatu pekerjaan konstruksi sering mengalami masalah pergerakan tanah, terutama terjadi pada tanah-tanah dengan kondisi lunak.

Masalah pergerakan tanah khususnya di Indonesia sering terjadi karena keadaan geografi di berbagai tempat yang memiliki curah hujan cukup tinggi dan daerah potensi gempa, disamping faktor lain yang masih perlu diperhatikan seperti topografi daerah setempat, struktur geologi, sifat kerembesan tanah dan morfologi serta tahap perkembangannya. Hal ini masih diperparah lagi dengan minimnya kesadaran masyarakat akan bahaya gerakan tanah dengan melakukan tindakan yang memicu terjadinya kelongsoran atau pergerakan tanah.

2.2. PERSOALAN TANAH

Secara garis besar beberapa persoalan tanah diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Hal keseimbangan atau stabilitas, untuk itu perlu diketahui mengenai :
 - a. Beban / muatan yang bekerja pada tanah
 - b. Besar dan distribusi tekanan akibat muatan terhadap tanah
 - c. Perlawanan dari tanah.
- Muatan yang bekerja pada tanah tergantung dari tipe / macam struktur dan berat tanah.
- Tanah dianggap material yang isotropis, tekanan dapat dihitung secara analisa matematik.
- Perlu adanya pengambilan contoh tanah untuk penyelidikan di laboratorium untuk mengetahui karakteristik / sifat tanah.

2. Deformasi, dapat dalam keadaan plastis atau elastis, sehubungan dengan hal tersebut, perlu diketahui :
 - a. Muatan yang bekerja (beban bekerja)
 - b. Besar dan distribusi tekanan yang berpengaruh
 - c. Besar dan perbedaan penurunan
3. Drainase, menyangkut hal deformasi dan stabilitas

2.3. SIFAT-SIFAT TANAH

Sifat tanah yang perlu diperhatikan untuk sebuah proyek tergantung pada jenis / fungsi proyek. Sesuai dengan sifat-sifatnya, penting diketahui tipe proyek yang dilaksanakan.

Adapun sifat-sifatnya antara lain :

1. Permeabilitas (*Permeability*)

Sifat ini untuk mengukur/menentukan kemampuan tanah dilewati air melalui pori-porinya. Sifat ini penting dalam konstruksi bendung tanah urugan (*earth dam*) dan persoalan drainase.

2. Konsolidasi (*Consolidation*)

Pada konsolidasi dihitung dari perubahan isi pori tanah akibat beban. Sifat ini dipergunakan untuk mengetahui keruntuhan. sifat ini diperhitungkan untuk menentukan penurunan (*settlement*).

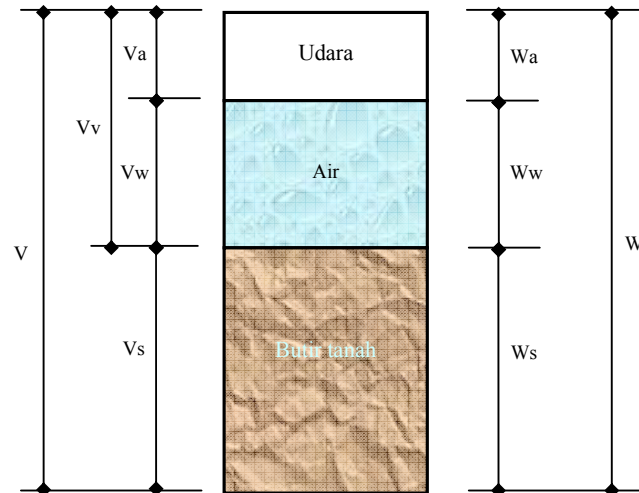
3. Tegangan geser (*Shear Strength*)

Untuk menentukan kemampuan tanah menahan tekanan tanpa mengalami keruntuhan. Sifat ini dibutuhkan dalam perhitungan stabilitas pondasi/dasar yang dibebani, stabilitas tanah isian atau timbunan di belakang bangunan penahan tanah dan stabilitas timbunan tanah.

4. Sifat-sifat fisik lainnya

Tanah terdiri dari dua bagian, yaitu bagian padat dan bagian rongga. Bagian padat terdiri dari partikel-partikel padat, sedangkan bagian berongga terisi air atau udara sepenuhnya bila tanah tersebut jenuh atau kering. Apabila gumpalan tanah tidak sepenuhnya dalam keadaan

basah (jenuh), maka rongga tanah akan terisi oleh air dan udara. Keseluruhan bagian tersebut dapat terlihat dalam diagram fase pada Gambar 2.1:



Gambar 2.1 Diagram Fase Tanah

Keterangan :

V : volume total = $V_a + V_w + V_s$

V_a : volume udara (dalam bagian berongga)

V_w : volume air (dalam bagian berongga)

V_s : volume butir tanah

V_v : volume rongga = $V_a + V_w$

W : berat total = $W_s + W_w$

W_s : berat butiran padat

W_w : berat air

W_a : berat udara = 0

Hubungan yang umum dipakai untuk suatu elemen tanah adalah :

1. Angka pori (*void ratio*)

Didefinisikan sebagai perbandingan antara volume rongga dengan volume butir tanah (bagian padat).

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

2. Porositas (n)

Menyatakan perbandingan antara volume pori dengan volume tanah total yang dinyatakan persen.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

3. Derajat kejenuhan (S)

Menyatakan perbandingan antara volume air dengan volume rongga.

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

4. Kadar air (W)

Disebut juga sebagai *water content* yang didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air dengan berat air butiran padat dari volume tanah yang diselidiki.

$$W = \frac{W_w}{W_s}$$

5. Berat jenis tanah (G)

Menyatakan perbandingan antara berat isi butir tanah (γ_s) dan berat isi air (γ_w).

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

6. Berat isi air (γ_w)

Menyatakan perbandingan antara berat air (W_w) dengan volume air (V_w)

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

7. Berat isi butir (γ_s)

Menyatakan perbandingan antara berat butiran tanah (W_s) dengan volume butir tanah (V_s)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

8. Berat isi tanah (γ)

Menunjukkan perbandingan antar berat tanah dengan isi tanah.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Rumus tersebut berlaku untuk berat volume basah

9. Berat volume kering (*dry unit weight*)

Berat volume kering (γ_d) adalah berat kering persatuan volume, atau

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Hubungan antara berat volume, berat volume kering, kadar air adalah sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W}$$

10. Berat isi celup tanah (γ_{sub})

Menyatakan suatu harga dari berat isi jenuh dikurangi berat isi air.

$$\gamma_{sub} = \frac{\gamma_w (G - 1)}{(1 + e)}$$

11. Batas-batas konsistensi (*Atterberg Limits*)

Batas-batas atterberg tergantung pada air yang terkandung dalam massa tanah, ini dapat menunjukkan beberapa kondisi tanah, seperti : cair – kental – plastis – semi plastis – padat, perubahan dari keadaan yang satu ke keadaan lainnya sangat penting diperhatikan sifat

fisiknya. Batas kadar air tanah dari keadaan satu menuju keadaan berikutnya dikenal sebagai batas-batas kekentalan / konsistensi. Menurut Hary Christady Hardiyatmo (2002) batas – batas Atterberg adalah sebagai berikut :

a. Batas cair (*Liquid Limit*) = LL

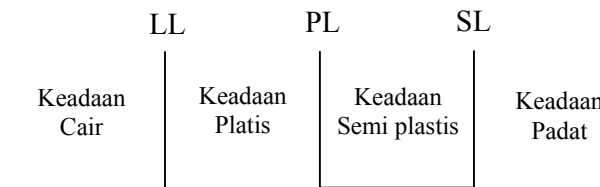
Menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dapat mengalir dibawah beratnya atau kadar air tanah pada batas antara keadaan cair ke keadaan plastis.

b. Batas plastis (*Plastis Limit*) = PL

Menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dalam keadaan plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung-gulung sampai diameter 3,1 mm atau (1/8 inchi).

c. Batas susut (*Shrinkage Limit*) = SL

Menyatakan batas dimana sesudah kehilangan kadar air, selanjutnya tidak menyebabkan penyusutan volume tanah lagi. Batas-batas Atterberg tersebut seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 :



Gambar 2.2 Batas – batas Atterberg

Disamping itu hal penting lainnya antara lain :

d. Indeks plastis (*Plasticity Index*) = PI

Menunjukkan sejumlah kadar air pada saat kondisi tanah dalam kondisi plastis, dimana harga ini adalah selisih antara batas cair dan batas plastis.

$$PI = LL - PL$$

Sedangkan hubungan Antara Indeks Plastis (*Plasticity Index*) Dengan Tingkat Plastisitas dan Jenis Tanah dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut

Tabel 2.1. Hubungan Antara Indeks Plastis Dengan Tingkat Plastisitas dan Jenis Tanah Menurut Atterberg (Sumber : Hary Christady Hardiyatmo, 2002)

PI	TINGKAT PLASTISITAS	JENIS TANAH
0	Tidak plastis / Non PI	Pasir
$0 < PI < 7$	Plastisitas rendah	Lanau (<i>Silt</i>)
7 – 17	Plastisitas sedang	<i>Silty – Clay</i>
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung (<i>Clay</i>)

e. Indeks cair (*Liquidity Index*) = LI

Menyatakan perbandingan dalam prosentase antara kadar air tanah dikurangi batas plastis dengan indeks plastis.

$$LI = \frac{W - PL}{PI}$$

f. Konsistensi relatif (*Relative Consistency*) = RC

Menunjukkan perbandingan antara batas cair dikurangi kadar air tanah dengan indeks plastis

$$RC = \frac{LL - W}{PI}$$

g. Indeks pengaliran (*Flow Index*) = I_f

Indeks pengaliran adalah kemiringan lengkung aliran.

$$I_f = \frac{W_1 - W_2}{\log N_1 - \log N_2}$$

h. Indeks kekasaran (*Toughness Index*) = I_t

Adalah nilai perbandingan antara indeks plastis dan indeks pengaliran.

$$I_t = \frac{PI}{I_f}$$

i. Nilai susut (*Shrinkage Ratio*) = SR

Adalah perbandingan antara selisih isi (dinyatakan dalam prosentase isi kering) dengan kadar air yang bersangkutan.

2.4 Parameter Tanah

2.4.1 Data Sondir

Alat sondir *Dutch Cone Penetrometer test* (CPT) merupakan alat penyelidikan tanah yang paling sederhana, murah, praktis dan sangat populer digunakan di Indonesia. Alat sondir dari Belanda ini memberikan tekanan konus dengan atau tanpa hambatan pekat (*friction resistance*) yang dapat dikorelasikan pada parameter tanah seperti *undrained shear strength*, kompresibilitas tanah dan dapat memperkirakan jenis lapisan tanah.

Uji sondir ditujukan untuk :

- Identifikasi, stratigrafi, klasifikasi lapisan tanah, kekuatan lapisan tanah.
- Kontrol pemadatan tanah timbunan.
- Perencanaan pondasi dan settlement.
- Perencanaan stabilitas lereng dan galian / timbunan.

Hubungan antara konsistensi terhadap tekanan konus dan *undrained cohesion* adalah sebanding dimana semakin tinggi nilai c dan q_c maka semakin keras tanah tersebut. Seperti yang terlihat dalam Tabel 2.2 :

Tabel 2.2. Hubungan Antara Konsistensi Dengan Tekanan Konus (Sumber : Begeman, 1965)

Konsistensi tanah	Tekanan Konus q_c (kg/cm^2)	Undrained Cohesion (T/m^2)
Very Soft	< 2,50	< 1,25
Soft	2,50 – 5,0	1,25 – 2,50
Medium Stiff	5,0– 10,0	2,50 – 5,0
Stiff	10,0– 20,0	5,0 – 10,0
Very Stiff	20,0– 40,0	10,0 – 20,0
Hard	> 40,0	> 20,0

Begitu pula hubungan antara kepadatan dengan *relative density*, nilai N SPT, q_c dan ϕ adalah sebanding. Hal ini dapat dilihat dalam pada Tabel 2.3 :

Tabel 2.3. Hubungan Antara Kepadatan, *Relative Density*, Nilai N SPT, q_c dan ϕ (Sumber : Mayerhof, 1965)

Kepadatan	Relatif Density (γ_d)	Nilai N SPT	Tekanan Konus q_c (kg/cm^2)	Sudut Geser (ϕ)
Very Loose (sangat lepas)	< 0,2	< 4	< 20	< 30
Loose (lepas)	0,2 – 0,4	4 – 10	20 – 40	30 – 35
Medium Dense (agak kompak)	0,4 – 0,6	10 – 30	40,0 – 120	35 – 40
Dense (kompak)	0,6 – 0,8	30 – 50	120 – 200	40 – 45
Very Dense (sangat kompak)	0,8 – 1,0	> 50	> 200	> 45

2.4.2 Modulus Young

Dengan menggunakan data sondir, booring dan grafik triaksial dapat digunakan untuk mencari besarnya nilai elastisitas tanah. Nilai yang dibutuhkan adalah nilai q_c atau *cone resistance*. Yaitu dengan menggunakan rumus :

$$E = 2 \cdot q_c \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 3 \cdot q_c \quad (\text{untuk pasir})$$

$$E = 2 \text{ sampai } 8 \cdot q_c \quad (\text{untuk lempung})$$

Nilai yang dibutuhkan adalah nilai N . Modulus elastisitas didekati dengan menggunakan rumus :

$$E = 6 (N + 5) \quad \text{k/ft}^2 \quad (\text{untuk pasir berlempung})$$

$$E = 10 (N + 15) \quad \text{k/ft}^2 \quad (\text{untuk pasir})$$

Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah menurut Bowles dapat dilihat pada Tabel 2.4 :

Tabel 2.4. Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah (Bowles, 1997)

Macam Tanah	E (Kg/cm ²)
LEMPUNG	
Sangat Lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Berpasir	300 – 425
PASIR	
Berlanau	50 – 200
Tidak Padat	100 – 250
Padat	500 – 1000
PASIR DAN KERIKIL	
Padat	800 – 2000
Tidak Padat	500 – 1400
LANAU	
LOSES	
CADAS	
	1400 - 14000

2.4.3 *Poissons Ratio*

Poissons ratio sering dianggap sebesar 0,2 – 0,4 dalam pekerjaan – pekerjaan mekanika tanah. Nilai sebesar 0,5 biasanya dipakai untuk tanah jenuh dan nilai 0 sering dipakai untuk tanah kering dan tanah lainnya untuk kemudahan dalam perhitungan. Ini disebabkan nilai *Poissons ratio* sukar untuk diperoleh untuk tanah. Nilai perkiraan angka poisson tanah menurut Bowles dapat lihat pada Tabel 2.5 :

Tabel 2.5. Nilai Perkiraan Angka *Poissons* Tanah (Bowles,1997)

Macam Tanah	ν (angka poisson tanah)
Lempung Jenuh	0,40 – 0,50
Lempung Tak Jenuh	0,10 – 0,30
Lempung Berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir Padat	0,20 – 0,40
Pasir Kasar	0,15
Pasir Halus	0,25
Batu	0,10 – 0,40
Loses	0,10 – 0,30

2.4.4 Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam bersama dengan kohesi merupakan faktor dari kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Nilai dari sudut geser dalam didapat dari *engineering properties* tanah, yaitu dengan *Triaxial Test* dan *Shear Test*.

2.4.5 Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser tanah, kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang

menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Nilai dari kohesi didapat dari engineering properties, yaitu dengan triaxial test dan direct shear test.

2.5 KEKUATAN GESER TANAH

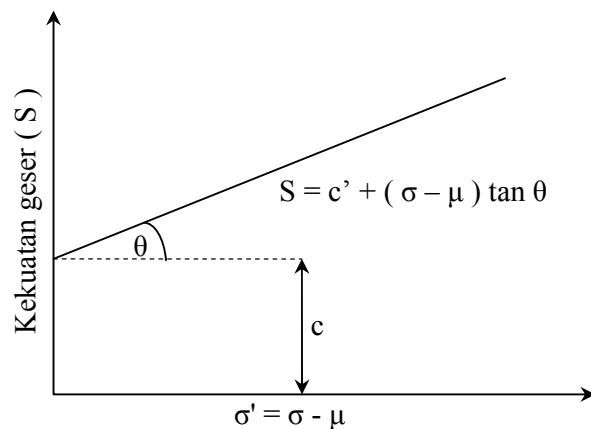
Kekuatan geser tanah diperlukan untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*), tegangan tanah terhadap dinding penahan (*earth pressure*) dan kestabilan lereng. Kekuatan geser tanah dalam tugas akhir ini pada ruas jalan Kaliurang dan Ketep menggunakan 2 (dua) analisa yaitu *Direct Shear Test* dan *Triaxial Test*. Kekuatan geser tanah terdiri dari dua parameter yaitu :

1. Bagian yang bersifat kohesi c yang tergantung dari macam
2. Bagian yang mempunyai sifat gesekan / *frictional* yang sebanding dengan tegangan efektif (σ) yang bekerja pada bidang geser.

Menurut Hvorslev (1937), Hubungan antar kekuatan geser tanah dengan kemantapan lereng dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$S = c' + (\sigma - \mu) \tan \theta$$

Sedangkan hubungan persamaan ini dapat dibuat secara grafis seperti terlihat dalam Gambar 2.3 :



Gambar 2.3 Gambar Hubungan Kuat Geser Tanah dengan Kemantapan Lereng

Dimana : S = kekuatan geser
 c = kohesi tanah efektif
 σ' = tegangan normal efektif
 σ = tegangan total pada bidang geser
 μ = tegangan air pori = $\gamma_w \cdot h$
 θ = sudut geser dalam efektif

Nilai C_u (*Undrained shear strenght /Kuat Geser Tanah Tak Terdrainase*) dapat dicari dengan menggunakan nilai q_c dari sondir.

$$C_u = \frac{q_c - \sigma_v}{N_k}$$

Dimana :

q_c : tekanan konus
 σ_v : *total overburden pressure*
 N_k : factor konus

2.6 DAYA DUKUNG TANAH

Dalam perencanaan konstruksi bangunan sipil, daya dukung tanah mempunyai peranan yang sangat penting, daya dukung tanah merupakan kemampuan tanah untuk menahan beban pondasi tanpa mengalami keruntuhan akibat geser yang juga ditentukan oleh kekuatan geser tanah. Tanah mempunyai sifat untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan gesernya apabila menerima tekanan. Apabila beban yang bekerja pada tanah pondasi telah melampaui daya dukung batasnya, tegangan geser yang ditimbulkan dalam tanah pondasi melampaui kekuatan geser tanah maka akan mengakibatkan keruntuhan geser tanah tersebut. Perhitungan daya dukung tanah dapat dihitung berdasarkan teori Terzaghi :

- Daya dukung tanah untuk pondasi lajur

$$q_{ult} = c \times N_c + \gamma \times D \times N_q + \frac{1}{2} \times \gamma \times B \times N_\gamma$$

- Daya dukung tanah untuk pondasi bujur sangkar

$$q_{ult} = 1.3 \times c \times N_c + \gamma \times D \times N_q$$

Dimana :

D	=	Kedalaman pondasi
B	=	Lebar pondasi
γ	=	Berat isi tanah
N_c, N_q, N_γ	=	Faktor daya dukung yang tergantung pada sudut Geser

2.7 TEORI KELONGSORAN

Gerakan tanah merupakan proses perpindahan massa tanah atau batuan dengan arah tegak, mendatar atau miring terhadap kedudukan semula karena pengaruh air, gravitasi, dan beban luar. Untuk mempermudah pengenalan tipe gerak tanah dan membantu dalam menentukan penyebab serta cara penanggulangannya maka perlu adanya pengklasifikasian tanah berdasar material yang bergerak, jenis gerakan dan mekanismenya. Adapun macam-macam gerakan tanah yaitu :

1. Aliran Cepat (*Rapid Flowage*)

Gerakan tanah jenis aliran pada umumnya material yang bergerak terlihat cepat dan dapat diikuti dengan kecepatan mata melihat. Umumnya terjadi pada material lunak yang jenuh air dan terdapat pada daerah berlereng. Jika ditinjau dari jenis material yang bergerak dapat dibedakan menjadi :

- a. Aliran tanah (*earth flow*), jika material yang bergerak berupa tanah.
- b. Aliran lumpur (*mud flow*), jika material yang bergerak berupa lumpur.

2. Amblesan (*subsidence*)

Merupakan jenis gerakan tanah yang berupa turunnya permukaan tanah secara bersama-sama secara cepat atau lambat tergantung kondisi geologi maupun topografi daerah tersebut. Umumnya terjadi

pada daerah yang lunak serta terdapat beban di atasnya atau pada daerah yang dibawahnya terdapat goa atau akibat struktur geologi, mungkin juga terjadi akibat aktivitas manusia seperti penambangan bawah tanah, penyedotan air tanah yang berlebihan, proses pemadatan tanah, dan sebagainya.

3. Runtuhan

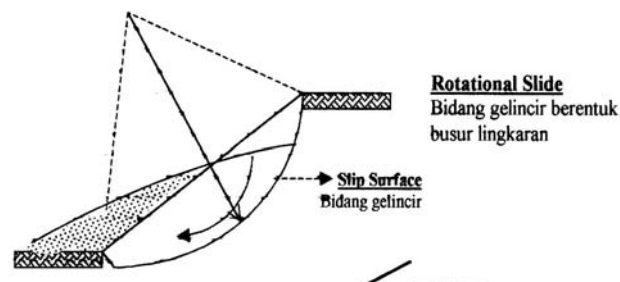
Gerakan tanah ini disebabkan oleh keruntuhan tarik yang diikuti dengan tipe gerakan jatuh bebas akibat gravitasi yang bergerak cepat. Material tanah atau batuan lepas dari tebing curam dengan sedikit pergeseran atau tanpa terjadi pergeseran kemudian meluncur sebagian besar diudara seperti jatuh bebas, loncat atau menggelundung. Runtuhan biasanya terjadi pada penggalian batu, tebing pantai yang curam, tebing jalan.

4. Longsoran (*sliding*)

Gerakan tanah ini terjadi akibat regangan geser dan perpindahan dari sepanjang bidang longsoran dimana massa berpindah dari tempat semula dan berpisah dari massa yang mantap, material yang bergerak kadang terlihat sangat cepat dan tiba – tiba atau dapat juga bergerak lambat.

Jenis gerakan ini dapat dibedakan menjadi :

- a. *Rotational slide*, jika bidang longsoran mempunyai bentuk seperti busur derajat, *log spiral*, dan bentuk lengkung yang tidak teratur. Pada umumnya kelongsoran ini berhubungan dengan kondisi tanah yang homogen seperti terlihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



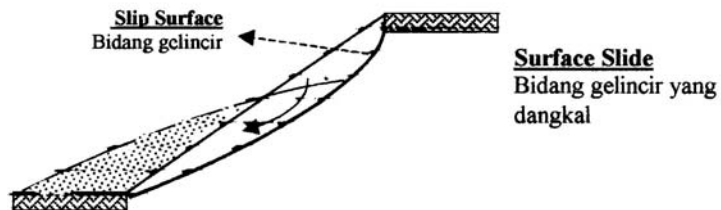
Gambar 2.4 *Rotational Slide*

- b. *Translation slide*, jika bidang longsor cenderung datar atau sedikit bergelombang. Kelongsoran ini terjadi bila bentuk permukaan runtuh dipengaruhi adanya kekuatan geser yang berbeda pada lapisan tanah yang berbatasan seperti terlihat pada Gambar 2.5 dibawah ini.



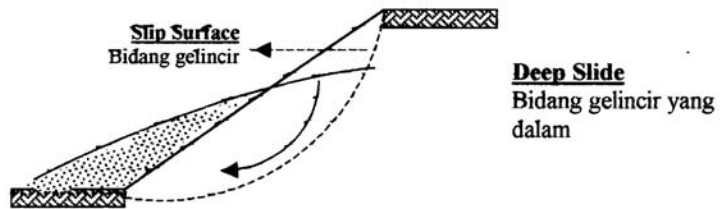
Gambar 2.5 *Translation Slide*

- c. *Surface slide*, terjadi jika bidang gelincirnya terletak dekat dengan permukaan tanah seperti terlihat pada Gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 *Surface Slide*

- d. *Deep slide*, terjadi jika bidang gelincirnya terletak jauh dibawah permukaan tanah seperti terlihat pada Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 *Deep Slide*

Kelongsoran (*land slide*) khususnya untuk tanah merupakan perpindahan massa tanah dari kedudukan semula akibat pengaruh gravitasi sehingga terpisah dari massa yang mantap, dimana perpindahan ini bisa diakibatkan oleh likuefaksi sebagai pengaruh gempa bumi. Penyebab lain adakah sifat tanah yang mengandung mineral yang mampu kembang susut seperti lempung dan lanau yang sering kali dalam keadaan retak-retak atau bercelah, sehingga tekanan air pori dapat membahayakan stabilitasnya. Selain itu bisa diakibatkan oleh pengaruh tipe perlapisan khusus misalnya antara pasir dan lempung, tekanan beban berlebihan pada kepala lereng atau pemotongan kaki lereng, dan dalam beberapa kasus struktur tanah umumnya diperlemah oleh proses fisika dan kimia.

Pada permukaan tanah yang tidak horisontal, 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 stabilitas pada lereng yang miring ini disebut analisis stabilitas lereng. Analisis ini sering digunakan dalam perancangan bangunan seperti, jalan raya, jembatan, urugan tanah, saluran dan lain-lain. Umumnya analisis ini sering digunakan dalam pengecekan keamanan dari lereng alam, lereng galian dan lereng urugan tanah.

Analisis stabilitas lereng tidaklah mudah karena terdapat banyak faktor yang mempengaruhi hasil hitungan. Faktor-faktor tersebut misalnya, kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah dan lain-lain. Terzaghi (1950) membagi penyebab longsoran terdiri dari akibat pengaruh dari dalam (*internal effect*) dan pengaruh luar (*external effect*). Pengaruh luar yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya perubahan kuat geser tanah. Contohnya, akibat perbuatan manusia mempertajam kemiringan tebing atau memperdalam galian tanah dan erosi sungai. Pengaruh dalam, yaitu longsoran yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar atau gempa bumi. Contoh yang umum untuk kondisi ini adalah pengaruh bertambahnya tekanan air pori di dalam lereng.

2.8 FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB KELONGSORAN

2.8.1 Faktor penyebab dari dalam

Faktor penyebab terjadi longsor yang berasal dari dalam adalah pengaruh dari karakteristik tanah itu sendiri yang dapat menyebabkan terjadinya longsor. Faktor – faktor itu antara lain adalah:

1. Penambahan kadar air dalam tanah.

Pada saat musim penghujan maka kadar air didalam tanah akan bertambah sehingga bobot massa tanah juga akan meningkat akibat terisinya rongga antar butir dalam tanah. Hal ini akan memicu gerak tanah terutama pada lokasi rawan longsor.

2. Pelarutan bahan perekat.

Air yang masuk ke dalam tanah (air hujan, rembesan bendung, bocoran saluran pada lereng, dsb) akan dapat melarutkan bahan perekat pada batuan sedimen. Hal ini mampu melongsorkan material terutama pada daerah rawan gerak tanah.

3. Kondisi batuan.

Kodisi fisik batuan seperti tingginya tingkat kelulusan air / porositas akan semakin mempercepat terjadinya longsor, demikian juga dengan kondisi plastisitas tanah karena semakin tinggi tingkat plastisitas maka tanah akan cepat mengembang sehingga mampu memicu gerak tanah.

4. Kondisi struktur geologi.

Kondisi geologi seperti retakan batuan, adanya patahan, perlapisan miring batuan atau pada batas lapisan batuan yang lolos air (tidak kedap air).

2.8.2 Faktor Penyebab dari luar

Faktor penyebab terjadinya longsor yang berasal dari luar adalah faktor – faktor yang berasal dari luar struktur tanah tersebut namun secara langsung dapat mempengaruhi stabilitas tanah sehingga dapat menimbulkan terjadinya longsor.

1. Adanya getaran
Sumber getaran dapat berasal dari gempa bumi, kendaraan berat, mesin-mesin yang bekerja, ledakan dinamit, dsb yang mampu menyebabkan terjadinya gerakan tanah. Hal ini dapat terjadi pada daerah berlereng atau daerah yang labil.
2. Curah hujan
Curah hujan yang meliputi intensitas dan lamanya hujan. Hujan dengan intensitas kecil tetapi berlangsung dalam kurun waktu yang lama mampu memicu gerakan tanah.
3. Adanya pembebanan tambahn
Aktivitas manusia seperti pembuatan bangunan pada sekitar tebing dapat menyebabkan terjadinya gerakan tanah.
4. Hilangnya penguat lereng
Kejadian ini terjadi seperti lereng-lereng yang menjadi curam akibat pengikisan sungai, penambangan material tanah / batuan, dll.
5. Hilangnya tumbuhan penutup
Akibat penebangan dan kebakaran hutan, tumbuhan penutup akan berkurang sehingga akan terbentuk alur-alur air dipermukaan tanah. Hal ini mampu memicu terjadinya gerakan tanah.
6. Penataan lahan yang kurang tepat
Penataan lahan yang kurang tepat seperti pembukaan areal pemukiman tanpa memperhitungkan kondisi struktur tanah dan kurang memperhatikan lingkungan. Hal ini jika berlangsung dalam kurun waktu yang lama dapat menyebabkan terjadinya gerakan tanah terutama pada daerah yang mempunyai kemiringan tinggi.

2.8.3 Pengaruh iklim

Di dekat permukaan tanah, kuat geser tanah berubah dari waktu ke waktu bergantung pada iklim. Beberapa jenis tanah mengembang pada saat musim hujan dan menyusut pada musim kemarau. Pada musim hujan kuat geser tanah ini menjadi sangat rendah dibandingkan dengan pada musim kemarau. Oleh karena

itu kuat geser yang dipakai dalam analisis stabilitas lereng harus didasarkan pada kuat geser tanah dimusim hujan atau kuat geser tanah pada saat tanah jenuh air.

2.8.4 Pengaruh Air

Pengaruh aliran atau rembesan air menjadi faktor sangat penting dalam stabilitas lereng, namun pengaruh ini sulit diidentifikasi dengan baik. Telah dipelajari bahwa rembesan air yang terjadi di dalam tanah menyebabkan gaya rembesan yang sangat berpengaruh terhadap stabilitas lereng.

Erosi permukaan lereng dapat menyebabkan terkikisnya tanah permukaan yang mengurangi tinggi lereng, sehingga menambah stabilitas lereng. Sebaliknya, erosi yang mengikis kaki lereng dapat menambah tinggi lereng sehingga mengurangi stabilitas lereng.

Jika pada lereng terjadi penurunan permukaan air tanah dalam lereng atau didekat lereng, contohnya penurunan permukaan air mendadak pada saluran atau sungai maka terjadi pengurangan gaya angkat air pada massa tanah, yang menambah beban lereng. Kenaikan beban menyebabkan kenaikan tegangan geser yang bila tahanan geser tanah terlampaui akan mengakibatkan longsoran lereng. Hal ini banyak terjadi pada lereng yang tanahnya berpermeabilitas rendah.

Gaya geser yang terjadi pada volume konstan dapat diikuti oleh berkurangnya gaya intergranuler dan naiknya tekanan air pori. Kelongsoran tanah dapat terjadi, bila pengurangan gaya intergranuler terlalu besar, menyebabkan masa tanah dalam kedudukan liquefaction (tegangan efektif nol) sehingga tanah dapat mengalir seperti cairan.

2.8.5 Pengaruh rangkax (*Creep*)

Terdapat didekat permukaan tanah yang miring, tanah dipengaruhi siklus kembang susut. Siklus ini dapat terjadi akibat perubahan temperatur, perubahan dari musim kemarau ke musim penghujan dan didaerah dingin dapat dipengaruhi oleh pengaruh pembekuan air. Saat tanah mengembang, tanah naik sehingga melawan gaya-gaya gravitasi. Saat tanah menyusut, tanah turun dibantu oleh

gravitasi. Hasil dari gerakan keduanya adalah gerakan perlahan lereng turun kearah bawah.

Kedalaman zona rangkai bervariasi dari beberapa sentimeter sampai beberapa meter tergantung pada sifat tanah dan kondisi iklim. Menurut Taylor (1962), rangkai dapat menyebabkan:

1. Blok batuan bergerak
2. Pohon-pohon melengkung ke atas
3. Bagian lereng melengkung dan menarik batuan
4. Bangunan yang menjulang keatas menjadi miring
5. Dinding penahan tanah dan pondasi bergerak dan retak
6. Jalan raya dan jalan rel keluar dari alurnya
7. Batu-batu besar menggelinding dan sebagainya

2.9 PEKERJAAN PENANGGULANGAN KELONGSORAN

Pekerjaan penanggulangan longsor meliputi pekerjaan pengendalian (*control works*) dan pekerjaan penambatan (*restraint works*). Adapun pekerjaan pengendalian ini dimaksudkan untuk mengurangi resiko terjadinya longsor dengan cara mengubah kondisi alam atau topografi atau keadaan air di bawah permukaan, seperti :

1. Pengendalian air permukaan (*surface water drainage*) dengan cara perencanaan tata saluran permukaan, penanaman vegetasi, perbaikan permukaan lereng dan menutup rekahan.
2. Pengendalian air rembesan (*ground water drainage*) dengan saluran terbuka, pengalir tegak (*vertical drain*), pengalir datar (*horizontal drain*), pengalir parit pencegat (*interceptor drain*).
3. Pekerjaan peningkatan counter weight

Sedangkan pekerjaan penambatan dilaksanakan dengan membangun konstruksi yang mampu menjaga kestabilan massa tanah/batuan, seperti :

1. Penambatan tanah dengan membangun dinding penahan tanah (*retaining wall*), bronjong (*gabion*), sumuran, tiang pancang, dsb.

2. Penambatan batuan dengan tumpuan beton, baut batuan (*rock bolt*), pengikat beton, jangkar kabel (*rock anchor*) jala kawat dan beton semprot (*shotcrete*).

Jika kondisi penanggulangan diatas tidak efektif dan efisien untuk dilaksanakan maka dapat diambil alternatif lainya yang lebih baik seperti penggunaan bahan ringan, penggantian material,maupn relokasi.

2.10 STABILITAS LERENG

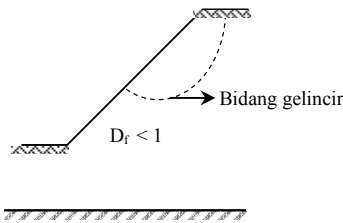
Pada tempat dimana terdapat dua permukaan tanah yang berbeda ketinggiannya, maka akan ada gaya-gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi kedudukanya cenderung bergerak kebawah. Disamping gaya yang mendorong kebawah terdapat pula gaya-gaya dalam tanah yang bekerja melawan sehingga kedudukan tanah tetap stabil. Gaya pendorong berupa gaya berat, gaya tiris/muatan dan gaya-gaya inilah penyebab terjadinya kelongsoran. Gaya penahan berupa gaya gesekan/geseran, lekatan (dari kohesi), kekuatan geser tanah. Antara permukaan dari tanah yang lebih tinggi ke permukaan yang lebih rendah dihubungkan suatu permukaan yang disebut lereng. Dalam bidang teknik sipil, kita mengenal 3 jenis lereng yang perlu diperhatikan :

1. Lereng alam, yaitu lereng yang terbentuk oleh proses alamiah seperti lereng perbukitan.
2. Lereng yang dibuat dalam tanah asli, misalnya pengeprasan tanah untuk keperluan pembuatan jalan maupun saluran untuk irigasi.
3. Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan misalmya pembuatan tanggul untuk jalan atau bendungan urugan.

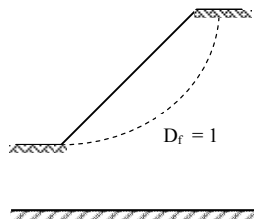
Kelongsoran pada lereng umumnya terjadi dalam suatu bidang lengkung. Dalam perhitungan stabilitas, lengkungan yang riil ini dianggap sebagai lingkaran spiral logaritmis. Bidang ini disebut bidang gelincir.

Ada tiga jenis dasar kelongsoran yang terjadi pada lereng semacam ini yaitu :

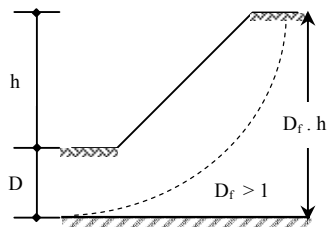
- a. Kelongsoran muka, bila kelongsoran terjadi sepanjang bidang gelincir yang masih terletak dalam batas lereng



- b. Kelongsoran dasar, bila bidang gelincir longsor melewati ujung bawah lereng



- c. Kelongsoran ujung kaki, bila bidang gelincir longsor terletak pada ujung bawah lereng



Kemantapan lereng (*slope stability*) sangat dipengaruhi oleh kekuatan geser tanah untuk menentukan kemampuan tanah menahan tekanan tanpa mengalami keruntuhan.

Dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan batas plastis (*limit plastic equilibrium*). Adapun maksud analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam laporan tugas akhir ini, dasar-dasar teori yang dipakai untuk menyelesaikan masalah tentang stabilitas longsor dan daya dukung tanah menggunakan teori metode irisan (*Method of Slice*), metode Bishop's (*Bishop's Method*) dan Metode Fellinius.

Dalam menganalisis stabilitas lereng digunakan beberapa anggapan yaitu:

- Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dianggap sebagai masalah bidang dua dimensi.
- Masa tanah yang longsor dianggap sebagai benda massif
- Tahanan geser tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis
- Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor potensial dan kuat geser tanah sepanjang permukaan longsor. Jadi kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih besar dari 1.
- Hukum Coulomb berlaku untuk kondisi runtuh $\tau_r' = C_r' + \sigma_r' \tan \phi_r'$
- Bentuk tegangan adalah lurus
- Semua gaya yang bekerja telah diketahui
- Berlaku hukum tegangan total dan tegangan efektif $\sigma' = \sigma + u$

Bentuk umum untuk perhitungan stabilitas lereng adalah mencari angka keamanan (η) dengan membandingkan momen-momen yang terjadi akibat gaya yang bekerja (lihat Gambar 2.7).

$$\eta = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Penggerak}} = \frac{Rc.L_{AC}}{W.y}$$

dimana

η = Faktor keamanan

W = Berat tanah yang akan longsor (kN)

L_{AC} = Panjang lengkungan (m)

c = Kohesi (kN/m^2)

R = Jari-jari lingkaran bidang longsor yang ditinjau (m)

Y = Jarak pusat berat W terhadap O (m)

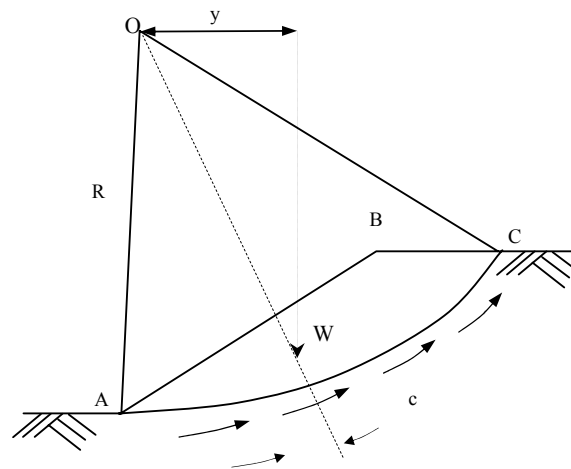
jika :

$\eta < 1$, lereng tidak stabil

$\eta = 1$, lereng dalam keadaan kritis artinya dengan sedikit gangguan atau tambahan momen penggerak maka lereng menjadi tidak stabil.

$\eta > 1$, lereng tidak stabil

Untuk memperoleh nilai angka keamanan (η) suatu lereng, maka perlu dilakukan 'trial and errors' terhadap beberapa bidang longsor yang umumnya berupa busur lingkaran dan kemudian diambil nilai η minimum sebagai indikasi bidang longsor kritis. Analisis stabilitas lereng dapat dilihat pada Gambar 2.8 :



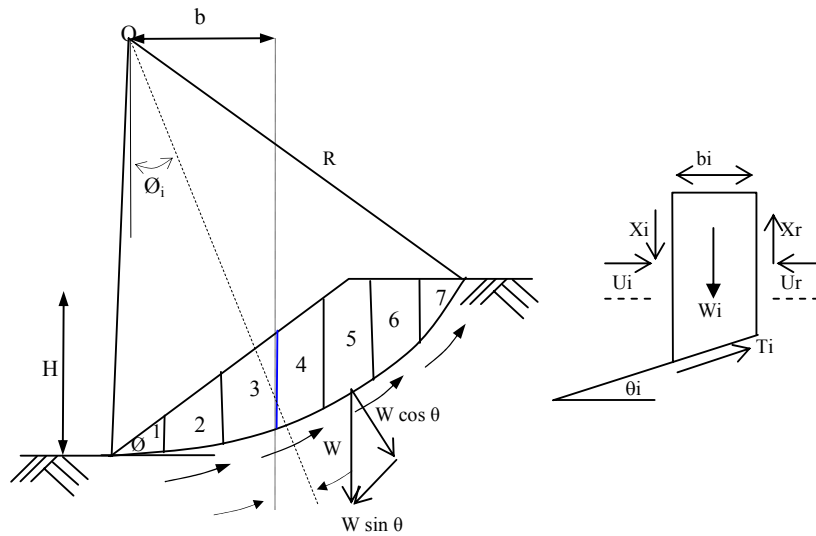
Gambar 2.8 Analisis Stabilitas Lereng

2.10.1 Metode Irisan (*Method of Slice*)

Metode irisan merupakan cara-cara analisa stabilitas yang telah dibahas sebelumnya hanya dapat digunakan bila tanah homogen. Bila tanah tidak homogen dan aliran rembesan terjadi didalam tanahnya memberikan bentuk aliran dan berat volume tanah yang tidak menentu, cara yang lebih cocok adalah dengan metode irisan (*method of slice*)

Gaya normal yang bekerja pada suatu titik dilingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam metode irisan ini, massa tanah yang longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan (pias) vertikal. Kemudian, keseimbangan dari tiap-tiap irisan diperhatikan. Gaya-gaya ini terdiri dari gaya geser (X_r dan X_l) dan gaya normal efektif (E_r dan E_l)

disepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif (T_1) dan resultan gaya normal efektif (N_1) yang bekerja disepanjang dasar irisannya. Pada irisannya, tekanan air pori U_1 dan U_r bekerja di kedua sisinya, dan tekanan air pori U_1 bekerja pada dasarnya. Dianggap tekanan air pori sudah diketahui sebelumnya. Seperti yang terdapat pada Gambar 2.9 :



Gambar 2.9 Gaya-gaya yang Bekerja Pada Irisan Bidang Longsor

2.10.2 Metode Bishop's (*Bishop's Method*)

Metode Bishop's ini merupakan dasar metode bagi aplikasi program Mira Slope dan merupakan penyederhanaan dari metode irisan Sliding Metode Bishop's menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal.

Persamaan kuat geser dalam tinjauan tegangan efektif yang dapat dikerahkan, sehingga tercapainya kondisi keseimbangan batas dengan memperhatikan faktor keamanan.

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - u) \frac{tg \phi'}{P}$$

Dimana :

σ = Tegangan normal total pada bidang longsor

u = Tekanan air pori

Untuk irisan (pias) yang ke-i, nilai $T_i = \tau a$, yaitu nilai geser yang berkembang pada bidang longsor untuk keseimbangan batas, karena itu :

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

Kondisi keseimbangan momen terhadap pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total pada dasar bidang longornya dapat dinyatakan dengan :

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

Dimana :

- F = Faktor Keamanan
- C' = Kohesi tanah efektif
- θ' = Sudut geser dalam tanah efektif
- b_i = Lebar irisan ke – i
- W_i = Berat irisan tanah ke – i
- θ_i = Sudut yang diasumsikan (didefinisikan) dalam **Gambar 2.9**
- U_i = Tekanan air pori pada irisan ke – i

Nilai banding tekanan pori (*pore pressure ratio*) didefinisikan sebagai :

$$r_u = \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma h}$$

Dimana :

- r_u = Nilai banding tekanan pori
- u = Tekanan air pori
- b = Lebar irisan
- γ = Berat volume tanah
- h = Tinggi irisan rata-rata

Adapun bentuk persamaan Faktor Keamanan untuk analisis stabilitas lereng cara Bishop, adalah

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \operatorname{tg} \theta'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \operatorname{tg} \theta_i \operatorname{tg} \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode lain seperti metode *Fellini*. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba (*trial and error*), karena nilai faktor aman F nampak di kedua sisi persamaanya. Akan tetapi, cara ini telah terbukti memberikan nilai faktor aman yang mendekati nilai faktor aman dari perhitungan yang dilakukan dengan cara lain yang mendekati (lebih teliti). Untuk mempermudah perhitungan dapat digunakan untuk menentukan nilai fungsi M_i , dengan rumus.

$$M_i = \cos \theta_i (1 + \operatorname{tg} \theta_i \operatorname{tg} \phi' / F)$$

Lokasi lingkaran sliding (longsor) kritis pada metode Bishop (1955), biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Karena itu, walaupun metode *Fellini* lebih mudah, metode *Bishop* (1995) lebih disukai karena menghasilkan penyelesaian yang lebih teliti.

Dalam praktek, diperlukan untuk melakukan cara coba-coba dalam menemukan bidang longsor dengan nilai faktor aman yang terkecil. Jika bidang longsor dianggap lingkaran, maka lebih baik kalau dibuat kotak-kotak dimana tiap titik potong garis-garisnya merupakan tempat kedudukan pusat lingkaran longsornya. Pada titik-titik potongan garis yang merupakan pusat lingkaran longsornya dituliskan nilai faktor aman terkecil pada titik tersebut. Kemudian, setelah faktor aman terkecil pada tiap-tiap titik pada kotaknya diperoleh, digambarkan garis kontur yang menunjukkan tempat kedudukannya dari titik-titik pusat lingkaran yang mempunyai faktor aman yang sama. Dari faktor aman pada setiap kontur tentukan letak kira-kira dari pusat lingkaran yang menghasilkan faktor aman yang paling kecil.

2.10.3 Metode *Fellinius*

Analisis stabilitas lereng cara *Fellinius* (1927) menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan-kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsornya. Faktor keamanan didefinisikan sebagai :

$$F = \frac{\text{Jumlah Momen dari Tahanan Geser Sepanjang Bidang Longsor}}{\text{Jumlah Momen dari Berat Massa Tanah yang Longsor}}$$

$$= \frac{\sum Mr}{\sum Md}$$

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

$$\sum Md = R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i$$

Dimana :

R = Jari-jari bidang longsor

N = Jumlah irisan

W_i = Berat massa tanah irisan ke- i

θ_i = Sudut yang didefinisikan pada gambar diatas

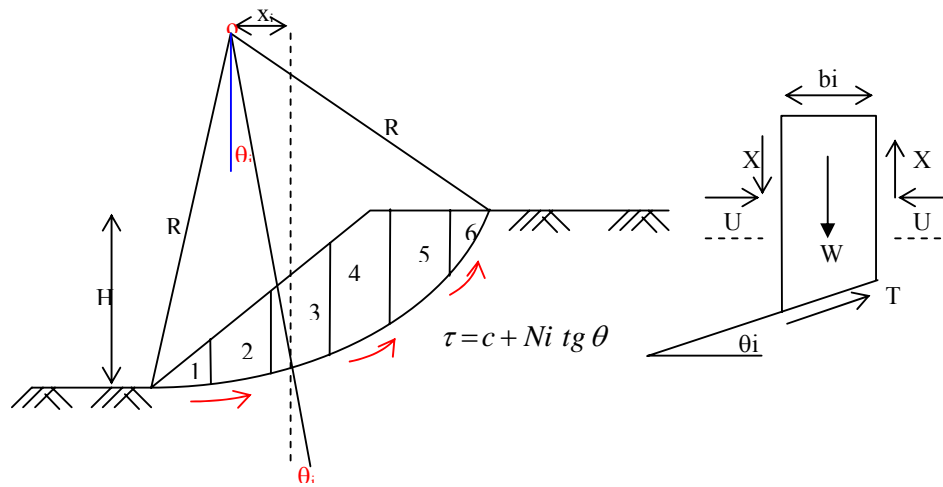
Dengan cara yang sama, momen yang menahan tanah yang akan longsor, adalah :

$$\sum Mr = R \sum_{i=1}^{i=n} (c a_i + N_i \operatorname{tg} \phi)$$

karena itu, faktor keamanannya menjadi :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (c a_i + N_i \operatorname{tg} \phi)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

Gaya-gaya dan asumsi bidang pada tiap pias bidang longsor seperti terdapat pada Gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10 Gaya-gaya dan Asumsi Bidang Pada Tiap Pias Bidang Longsor

Bila terdapat air pada lerengnya, tekanan air pori pada bidang longsor tidak berpengaruh pada Md, karena resultante gaya akibat tekanan air pori lewat titik pusat lingkaran. Substitusi antara persamaan yang sudah ada.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \text{tg } \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

Dimana :

F = faktor keamanan

C = kohesi tanah

ϕ = sudut geser 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

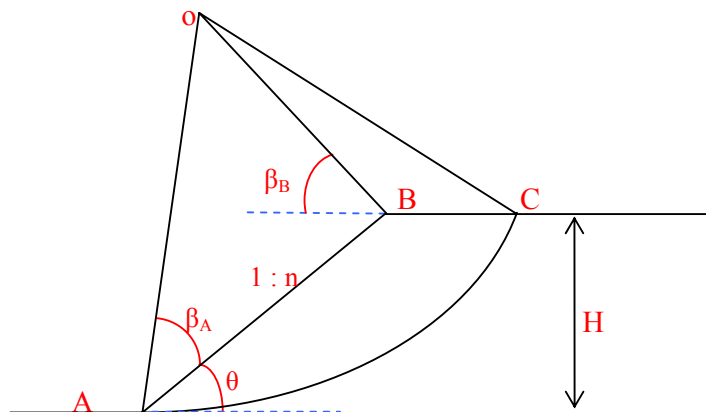
θ_i = sudut yang didefinisikan dalam gambar.

Jika terdapat gaya-gaya selain berat lereng tanahnya sendiri, seperti beban bangunan di atas lereng, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai Md.

Metode *Fellenius* memberikan faktor aman yang relatif lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas-batas nilai kesalahan dapat mencapai kira-kira 5 sampai 40% tergantung dari factor 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 prakteknya. Karena cara hitungannya yang sederhana dan kesalahan yang terjadi pada sisi yang aman.

□ **Menentukan Lokasi Titik Pusat Bidang Longsor**

Untuk memudahkan usaha *trial and error* terhadap stabilitas lereng maka titik-titik pusat bidang longsor yang berupa busur lingkaran harus ditentukan dahulu melalui suatu pendekatan (lihat Gambar 2.11). Fellenius memberikan petunjuk-petunjuk untuk menentukan lokasi titik pusat busur longsor kritis yang melalui tumit suatu lereng pada tanah kohesif (*c-soil*) seperti pada Tabel 2.6.



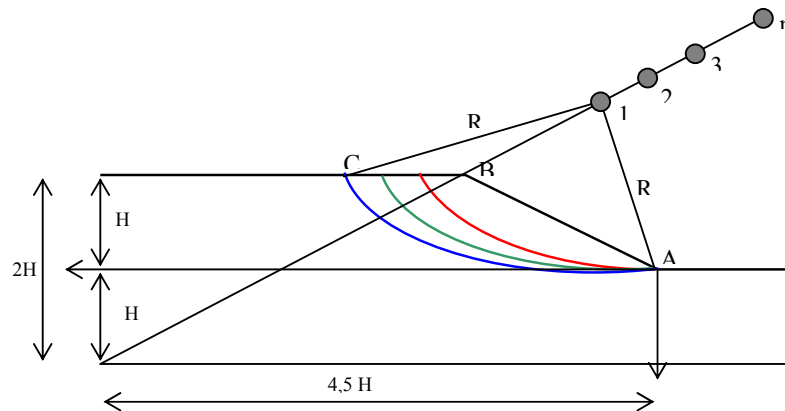
Gambar 2.11 Lokasi Pusat Busur Longsor Kritis Pada Tanah Kohesif (*c-soil*)

Tabel 2.6. Sudut-sudut petunjuk menurut Fellenius

Lereng 1 : n	Sudut Lereng 'derajat'	Sudut – sudut petunjuk	
		β_a	β_a
$\sqrt{3} : 1$	60°	$\sim 29^\circ$	$\sim 40^\circ$
1 : 1	45°	$\sim 28^\circ$	$\sim 38^\circ$
1 : 1,5	$33^\circ 41'$	$\sim 26^\circ$	$\sim 35^\circ$
1 : 2	$25^\circ 34'$	$\sim 25^\circ$	$\sim 35^\circ$
1 : 3	$18^\circ 26'$	$\sim 25^\circ$	$\sim 35^\circ$
1 : 5	$11^\circ 19'$	$\sim 25^\circ$	$\sim 37^\circ$

Pada tanah $\phi - c$ untuk menentukan letak titik pusat busur lingkaran sebagai bidang longsor yang melalui tumit lereng dilakukan secara coba-coba dimulai dengan bantuan sudut-sudut petunjuk dari Fellenius untuk tanah kohesif ($\phi = 0$)

Grafik Fellenius menunjukkan bahwa dengan meningkatnya nilai sudut geser (ϕ) maka titik pusat busur longsor akan bergerak naik dari O_0 yang merupakan titik pusat busur longsor tanah c ($\phi = 0$) sepanjang garis $O_0 - K$ yaitu $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$. Titik K merupakan koordinat pendekatan dimana $X = 4,5H$ dan $Z = 2H$, dan pada sepanjang garis $O_0 - K$ inilah diperkirakan terletak titik-titik pusat busur longsor. Dan dari busur-busur longsor tersebut dianalisa masing-masing angka keamanannya untuk memperoleh nilai n yang paling minimum sebagai indikasi bidang longsor kritis, untuk lebih jelasnya lihat Gambar 2.12.



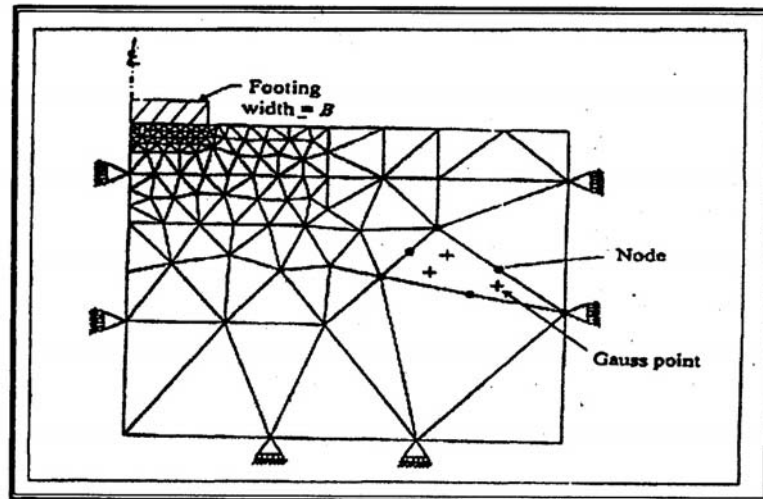
Gambar 2.12 Posisi titik pusat busur longsor pada garis O_0-k

2.11 METODE ELEMEN HINGGA

2.11.1 Uraian Umum

Metode elemen hingga adalah prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik inti dari metode tersebut adalah membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai – nilai pada titik – titik diskrit pada bagian yang dievaluasi. Persamaan metode elemen hingga dibuat dan dicari solusinya dengan sebaik mungkin untuk menghindari kesalahan pada hasil akhirnya.

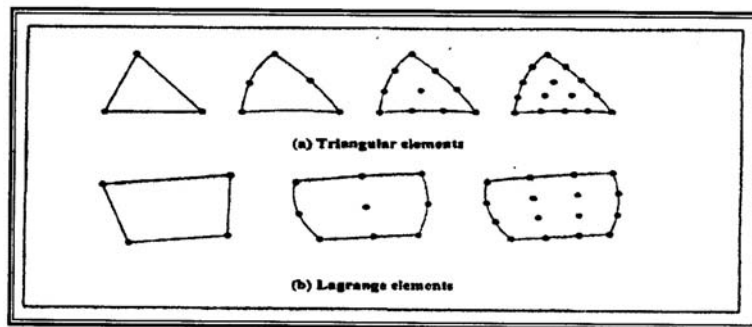
Jaring (*mesh*) terdiri dari elemen – elemen yang dihubungkan oleh node (Gambar 2.13). *Node* merupakan titik- titik pada jaring di mana nilai dari variabel primernya dihitung. Misalkan untuk analisa *displacement*, nilai variabel primernya adalah nilai dari displacement. Nilai – nilai node displacement diinterpolasikan pada elemen agar didapatkan persamaan aljabar untuk displacement, dan regangan, melalui jaring – jaring yang terbentuk



Gambar 2.13 Contoh jaring – jaring dari elemen hingga

2.11.2 Elemen Untuk Analisa Dua Dimensi

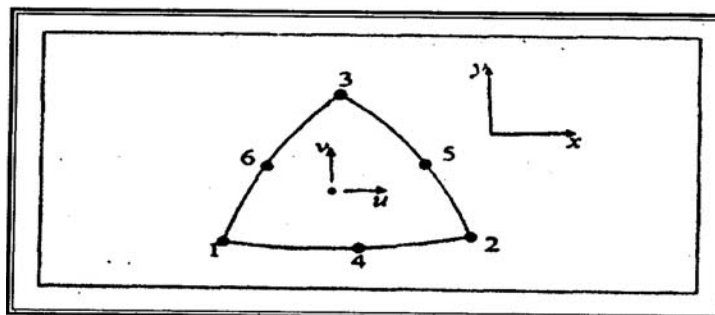
Analisa dua dimensi pada umumnya merupakan analisa yang menggunakan elemen triangular atau *quadrilateral* (Gambar 2.14). Bentuk umum dari elemen – elemen tersebut berdasarkan pada pendekatan Iso – *Parametric* dimana fungsi interpolasi polynomial dipakai untuk menunjukkan displacement pada elemen.



Gambar 2.14 Elemen – elemen Triangular dan Lagrange

2.11.3 Interpolasi *Displacement*

Nilai – nilai *node displacement* pada solusi elemen hingga dianggap sebagai *primary unknown*. Nilai ini merupakan nilai displacement pada nodes. Untuk mendapatkan nilai – nilai tersebut harus menginterpolasikan fungsi – fungsi yang biasanya merupakan polymial.



Gambar 2.15 Elemen dan *Six – Nodded Triangular*

Anggap sebuah elemen seperti pada Gambar 2.15, U dan V adalah *displacement* pada titik di elemen pada arah x dan y. *Displacement* ini didapatkan dengan menginterpolasikan *displacement* pada nodes dengan menggunakan persamaan polynomial :

$$U(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y^2 + a_3x^3 + a_4xy + a_5y$$

$$U(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y^2 + b_3x^3 + b_4xy + b_5y$$

Konstanta a_1, a_2, \dots, a_5 dan b_1, b_2, \dots, b_5 tergantung pada nilai node *displacement*. Jika jumlah nodes yang menjabarkan elemen bertambah maka fungsi interpolasi untuk *polynomial* yang juga akan bertambah.

2.11.4 Regangan

Regangan pada elemen dapat diturunkan dengan memakai definisi standar. Sebagai contoh untuk *Six- node triangle* :

$$\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x = a_1 + a_3 + a_4y$$

$$\varepsilon_{yy} = \partial v / \partial y = b_2 + 2b_4x + 2b_5y$$

$$\varepsilon_{xy} = (\partial u / \partial y) + (\partial v / \partial x) = (b_1 + a_2) + (a_4 + 2b_3)x + (2a_5x + b_4)y$$

Persamaan yang menghubungkan regangan dengan *node displacement* ditulis dalam bentuk persamaan matrix :

$$\varepsilon = \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}^e$$

Vektor regangan ε dan vector *node displacement* masing – masing dihubungkan dengan \mathbf{U}^e :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \mathbf{U}^e = \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ U_2 \\ \dots \\ \dots \\ U_6 \\ V_6 \end{bmatrix}$$

2.11.5 Hukum Konstitutif (*Constitutive Law*)

Constitutive law diformulasikan untuk membuat matrik hubungan antara tegangan (vektor σ) dengan regangan (vektor ϵ) :

$$\sigma = D \cdot \epsilon$$

Di mana :

D : Matrik kekakuan material

Untuk kasus elastisitas *isotropic* regangan bidang linear, matrixnya :

$$D = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Di mana :

E : Modulus Young

ν : Poissons ratio

2.11.6 Matrix kekakuan Elemen

Gaya pada tanah yang diaplikasikan pada elemen dianggap sebagai gaya yang bekerja pada nodes. *Vektor nodal forces* P^e Ditulis :

$$P^e = \begin{bmatrix} P_{1,x} \\ P_{1,y} \\ P_{2,x} \\ P_{2,y} \\ \dots \\ \dots \\ P_{6,x} \\ P_{6,y} \end{bmatrix}$$

Nodal forces yang bekerja pada titik I di arah x dan y adalah P_{ix} dan P_{iy} , dan dihubungkan dengan nodal *displacement* dengan matrik :

$$K^e U^e = P^e$$

Sedangkan K^e Merupakan Matrik kekakuan Elemen yang ditulis :

$$K^e = B^t . D . B . dv$$

Dimana :

D : Matrik kekakuan material

B : Matrik penghubung *nodal displacement* dengan regangan

dv : Elemen dari volume

2.11.7 Matrik Kekakuan Global

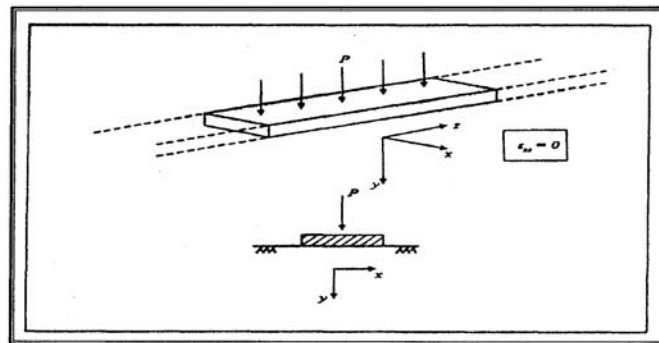
Matriks kekakuan K untuk jaring (*mesh*) elemen hingga dihitung dengan menggabungkan matrik – matrik kekakuan elemen di atas.

$$K.U = P$$

Dimana U merupakan vector yang mempunyai unsur *displacement* pada semua titik pada jaring elemen hingga.

2.11.8 Analisa Elastis Dua Dimensi

Dalam mencari solusi numerik dua dimensi kondisi model yang dianalisa tersebut harus seperti pada kondisi tiga dimensi. Pendekatan yang digunakan adalah tegangan bidang atau *plane strain* (Gambar 2.16). Pendekatan yang sering digunakan dalam analisa tanah adalah kondisi tegangan bidang.



Gambar 2.16 Analisa tegangan bidang

Pada analisa tegangan bidang, nilai tegangan yang terletak di luar bidang (*out – of plane*), dalam hal ini bidang z, adalah nol.