

Pertemuan XIV, XV

VIII. Stabilitas Lereng

VIII.1 Pendahuluan.

Jika komponen gravitasi lebih besar untuk menggerakkan lereng yang melampaui perlawanan terhadap pergeseran yang dikerahkan tanah pada bidang longsornya maka akan terjadi kelongsoran tanah.

Faktor – faktor yang mempengaruhi hasil hitungan stabilitas lereng ;

- Kondisi tanah yang berlapis
- Kuat geser tanah yang isotropis
- Aliran rembesan air dalam tanah.

Terzaghi (1950) membagi penyebab kelongsoran lereng ;

- Akibat pengaruh dalam, yaitu longsoran yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar atau gempa bumi.
- Akibat pengaruh luar, yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser tanpa adanya perubahan kuat geser tanah.

VIII.2 Teori analisa Stabilitas Lereng.

Maksud analisis stabilitas lereng adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor. Faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan atau,

$$F = \frac{\tau}{\tau_d}$$

dengan ;

τ = tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah

τ_d = tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor

F = faktor aman.

Mohr – Coulomb, tahanan geser (τ) yang dapat dikerahkan tanah sepanjang bidang longsornya dinyatakan ;

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Dimana nilai c dan ϕ adalah parameter kuat geser tanah disepanjang bidang longsornya.

Persamaan geser yang terjadi akibat beban tanah dan beban lain pada bidang longsornya ;

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

Dengan c_d dan ϕ_d adalah kohesi dan sudut gesek dalam yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsornya.

Sehingga persamaan menjadi ;

$$F = \frac{c + \sigma \tan \phi}{c_d + \sigma \tan \phi_d}$$

atau

$$c_d + \sigma \tan \phi_d = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan \phi}{F}$$

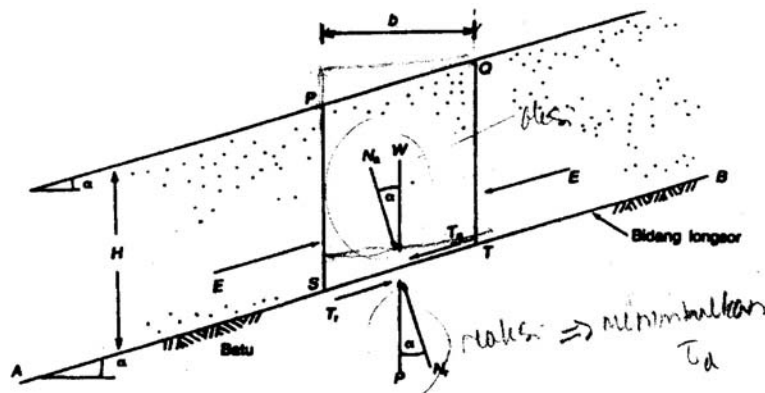
dengan ;

$$F_c = \frac{c}{c_d}$$

$$F_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

VIII.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan Bidang Longsor Datar.

A. Lereng tak berhingga dengan kondisi tanpa rembesan.



Gambar VIII.1 Lereng tak berhingga tanpa rembesan

Berat elemen PQTS adalah

$$W = \gamma b H$$

Gaya W dapat diuraikan ;

* Tegak lurus terhadap bidang longsor $N_a = W \cos \alpha = \gamma b H \cos \alpha$

* Searah pada bidang longsor $T_a = W \sin \alpha = \gamma b H \sin \alpha$

Tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi pada bidang AB persatuan lebar ;

$$\sigma = \frac{N_a}{b} = \frac{\gamma H \cos^2 \alpha}{\cos \alpha} \cdot 1$$

$$\tau = \frac{T_a}{\frac{b}{\cos \alpha} \cdot 1} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha$$

Dalam keadaan simbang $\tau_d = \tau = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha$, sehingga ;

$$\gamma H \sin \alpha \cos \alpha = c_d + \gamma H \cos^2 \alpha \tan \phi_d$$

$$\frac{c_d}{\gamma H} = \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \phi_d)$$

Dengan mengganti $\tan \phi_d = \frac{\tan \phi}{F}$ dan $c_d = \frac{c}{F}$ diperoleh ;

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

Kondisi kritis terjadi jika $F = 1$ maka untuk tanah yang mempunyai ϕ dan c ,

$$H_c = \frac{c}{\gamma \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \phi)}$$

dengan H_c ketebalan maksimum, dimana lereng dalam kondisi akan longsor (kondisi kritis)

Tanah granuler ($c = 0$) pada kondisi kritis, maka $F = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$

Lereng tak berhingga untuk tanah granuler selama $\alpha < \phi$, lereng masih dalam kondisi stabil.

Untuk lempung jenuh ($\phi = 0$) persamaan menjadi ;

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \tan \alpha}$$

Pada kondisi kritis $F = 1$, maka $\frac{c}{\gamma H} = \cos^2 \alpha \tan \alpha$

Contoh soal

Suatu lereng tak berhingga terbentuk dari tanah yang mempunyai berat volume $\gamma = 18,6$ kN/m³, $c = 18$ kN/m² dan $\phi = 20^\circ$, kondisi tanpa rembesan

- Jika $H = 8$ m dan $\alpha = 22^\circ$, tentukan faktor aman (F) terhadap bahaya longsor lereng
- Jika $\alpha = 25^\circ$, tentukan tinggi H maksimum untuk faktor aman $F = 1$

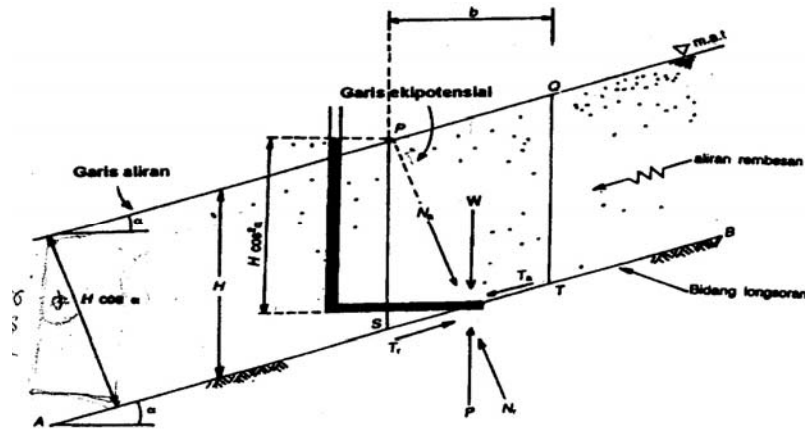
Penyelesaian

$$\begin{aligned} \text{a. } F &= \frac{c}{\gamma H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} = \frac{18}{18,6 \times 8 \times \cos^2 22^\circ \times \tan 22^\circ} + \frac{\tan 20^\circ}{\tan 22^\circ} = 0,348 + 0,901 \\ &= 1,25 \end{aligned}$$

$$b. \quad 1 = \frac{18}{18,6 \times H \times \cos^2 25^\circ \times \tan 25^\circ} + \frac{\tan 20^\circ}{\tan 25^\circ} \quad 1 = \frac{2,5266}{H} + 0,7805$$

$$0,2195 = \frac{2,5266}{H} \quad H = 11,51 \text{ m}$$

B. Lereng tak berhingga dengan kondisi dengan rembesan.



Gambar VIII.2 Lereng tak berhingga dengan rembesan

Dengan dilakukan penurunan seperti diatas diperoleh ;

$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \alpha}$$

Untuk tanah granuler ($c = 0$) maka faktor aman,

$$F = \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \alpha}$$

Untuk tanah kohesif ($\phi = 0$), faktor aman

$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha \tan \alpha}$$

Contoh soal

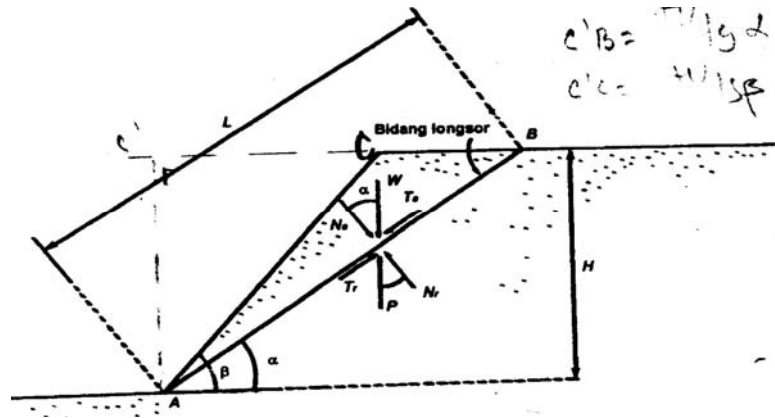
Suatu lereng tak berhingga dipengaruhi oleh rembesan air, muka air pada permukaan lereng. Tentukan faktor aman lereng terhadap longsor, jika diketahui $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$, $H = 8 \text{ m}$, $\alpha = 22^\circ$, $\phi = 20^\circ$, dan $c = 18 \text{ kN/m}^2$.

Penyelesaian ;

$$F = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \alpha \tan \alpha} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \alpha} = \frac{18}{20 \times 8 \times \cos^2 22^\circ \tan 22^\circ} + \frac{(20 - 9,81) \tan 20^\circ}{20 \tan 22^\circ}$$

$$= 0,324 + 0,459 = 0,783 < 1 \quad \text{maka lereng tidak stabil}$$

C. Lereng Terbatas (Finite Slope)



Gambar VIII.3 Analisis stabilitas timbunan diatas tanah miring

Pada gambar diatas, timbunan terletak pada tanah asli yang miring, akibatnya terjadi kelongsoran menurut bidang AB.

Berat massa tanah yang longsor ;

$$W = 1/2 H \overline{CB} \gamma (1) = 1/2 \gamma H \left(\frac{H}{\tan \alpha} - \frac{H}{\tan \beta} \right) = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left(\frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha} \right)$$

dengan ;

- W = berat tanah diatas bidang longsor (kN)
- α = sudut bidang longsor terhadap horizontal (derajat)
- β = sudut lereng timbunan (derajat)

Tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) terjadi akibat berat tanah ABC pada bidang AB adalah ;

$$\sigma = \frac{Na}{H / \sin \alpha (1)} = \frac{(1/2) \gamma H \sin \alpha \cos \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha}$$

$$\tau = \frac{Ta}{H / \sin \alpha (1)} = \frac{(1/2) \gamma H \sin^2 \alpha \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin \alpha}$$

Tegangan geser maksimum yang dapat dikerahkan tanah pada bidang AB, adalah

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Tegangan geser yang terjadi pada bidang AB, adalah

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

Pada saat keseimbangan batas tercapai ($F = 1$), $\tau = \tau_d$, substitusi dari persamaan diatas, diperoleh

$$c_d = (1/2)\gamma H \left\{ \frac{\sin(\beta - \alpha)(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi_d)}{\sin \beta} \right\}$$

Terlihat c_d adalah fungsi dari sudut α , sedangkan β , φ , H dan φ_d adalah konstan

Dengan mengambil $\frac{\delta c_d}{\delta \alpha} = 0$ diperoleh $\alpha_c = (\beta + \varphi_d)/2$

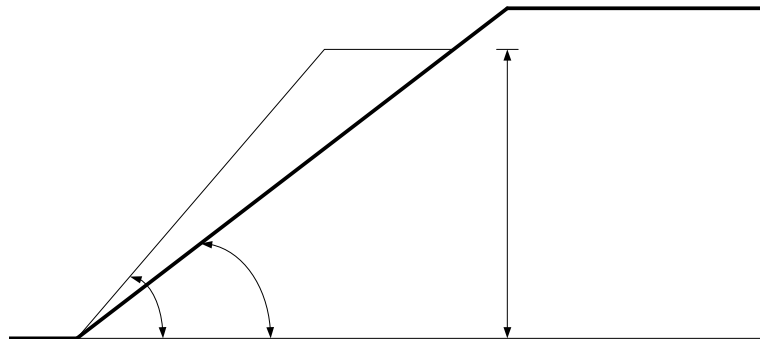
Substitusikan persamaan $\alpha = \alpha_c$, diperoleh $c_d = \left(\frac{1 - \cos(\beta - \varphi_d)}{\sin \beta \cos \varphi_d} \right) \frac{\gamma H}{4}$

Saat kondisi kritis $F = 1$. dari substitusi $c_d = c$ dan $\varphi_d = \varphi$ ke persamaan diatas diperoleh persamaan tinggi (H) kritis ;

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

Contoh soal - 1

Timbunan baru diletakan pada sebuah lereng timbunan lama seperti tergambar ;



Gambar CVIII. 1 Kondisi lereng sesuai dengan soal

Berapa tinggi timbunan baru bila faktor keamanan $F = 2$

Penyelesaian ;

$$F = F_c = F_\varphi = 2$$

$$F_c = c/c_d \quad \text{atau} \quad c_d = 25/2 = 12,5 \text{ kN/m}^2$$

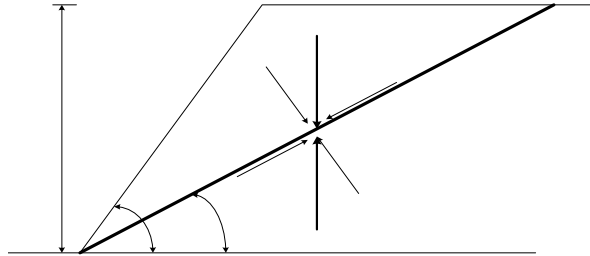
$$F_\varphi = \tan \varphi / \tan \varphi_d \quad \text{atau} \quad \tan \varphi_d = \tan 17^\circ / 2 = 0,15286534 \quad \varphi_d = 8,69^\circ$$

Tinggi maksimum yang terjadi adalah

$$\begin{aligned} H_c &= \frac{4 \times 12,5}{19,6} \left(\frac{\sin 48,5^\circ \cos 8,69^\circ}{1 - \cos(48,5^\circ - 8,69^\circ)} \right) = 2,55 (0,74/(1-0,768)) \\ &= 1,887/0,232 = 8,134 \text{ m} \end{aligned}$$

Contoh soal - 2

Suatu lereng seperti tergambar ;



Gambar CVIII.2 Kondisi lereng dimaksud soal

Tentukan faktor aman terhadap longsor

Penyelesaian ;

$$W = 1/2 \gamma H \left(\frac{H}{\tan \alpha} - \frac{H}{\tan \beta} \right) = 1/2 \times 19 \times 5 \left(\frac{5}{\tan 30^\circ} - \frac{5}{\tan 52^\circ} \right) = 47,5(8,66 - 3,91) = 225,6 \text{ kN}$$

$$T_a = 225,6 \sin 30 = 112,8 \text{ kN}$$

$$H = 5 \text{ m}$$

Tahanan geser yang dikerah tanah untuk keseimbangan

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

Gaya geser untuk menahan geseran adalah

$$Tr = (L \times 1)(c_d + \sigma \tan \phi_d) \text{ dimana luas bidang geser} = AB \times 1 = L \times 1$$

$$\beta = 52^\circ \quad \alpha = 30^\circ$$

Persamaan menjadi

A

$$Tr = L \left(\frac{c}{F} + \frac{Na}{L} \frac{\tan \phi}{F} \right) = \frac{1}{F} (Lc + Na \tan \phi)$$

Gaya normal pada bidang AB

$$Na = W \cos 30^\circ = 225,6 \cos 30^\circ = 195,38 \text{ kN}$$

$$L = 5 / \sin 30^\circ = 10 \text{ m}$$

Jadi

$$\begin{aligned} Tr &= 1/F (10 \times 25 + 195,38 \tan 12^\circ) \\ &= 291,53/F \end{aligned}$$

Pada kondisi seimbang,

$$Tr = Ta$$

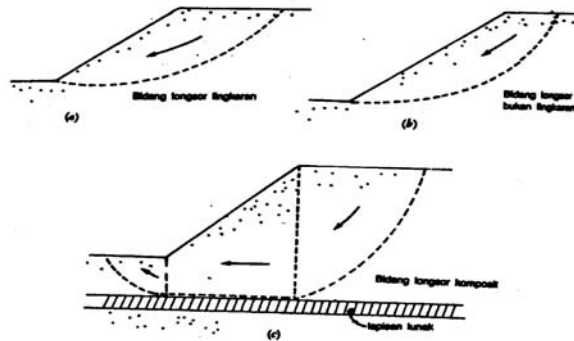
$$291,53/F = 112,8$$

$$F = 291,53/112,8$$

$$= 2,58 > 1 \quad \text{lereng stabil}$$

VIII.4 Analisis Stabilitas dengan Bidang Longsor Berbentuk Lingkaran

Collin (1846) menyatakan kebanyakan longsoran tanah membentuk bidang longsor berupa lengkungan. Pada tanah kohesif keruntuhan terjadi karena bertambahnya kadar air tanah. Lengkung longsor bisa berbentuk bidang lingkaran, spiral logaritmis atau kombinasi keduanya, contoh bentuk bidang longsor seperti dilihatkan oleh **Gambar VIII.4**.



Gambar VIII.4 Bentuk bentuk bidang longsor

Bentuk anggapan bidang longsor berupa lingkaran dimaksudkan untuk mempermudah hitungan analisis stabilitasnya secara matematik.

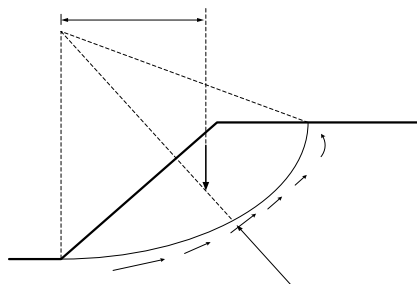
A. Analisis stabilitas lereng tanah kohesif

Jika lereng dari tanah lempung homogen, dengan analisis kuat geser undrained, maka hitungan dapat dilakukan secara langsung **Gambar VIII.5**, faktor aman ditentukan oleh ;

$$F = \frac{\text{Jumlah momen yang menahan}}{\text{Jumlah momen yang menggerakkan}} = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} = \frac{RcL_{AC}}{Wy}$$

dengan ;

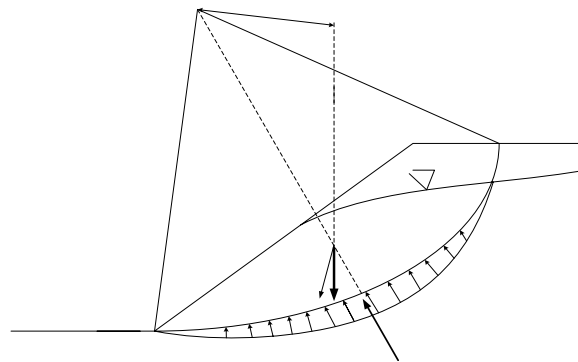
F	= faktor aman	W	= berat tanah yang longsor (kN)
L_{AC}	= panjang lengkungan (m)	c	= kohesi (kN/m ²)
R	= jari – jari longsor	y	= jarak pusat berat W terhadap O (m)



Gambar VIII.5 Analisis stabilitas lereng tanah lempung tanpa rembesan

Lereng yang dipengaruhi aliran air tanah, diperlukan gambar garis freatis dan sketsa jaring arus (flow-net). Garis-garis ekipotensial memotong bidang longsor dengan tinggi energi yang diketahui. Tekanan pada titik-titik dihitung dan digambarkan diagram tekanan air **Gambar VIII.6**. Jumlah tekanan air pori (U) dihitung cara integrasi, dimana titik tangkap U akan melewati titik O . Nilai gaya W' dapat diperoleh dengan cara menambahkan U dengan vektor W . Dengan cara keseimbangan diperoleh ;

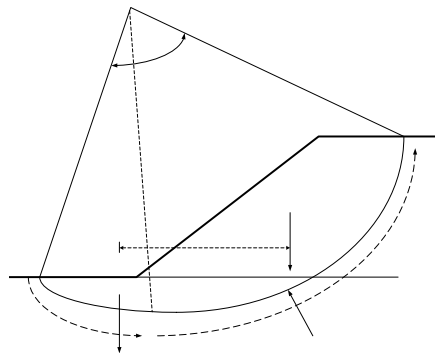
$$F = \frac{Rc L_{AC}}{W'y}$$



Gambar VIII.6 Analisis stabilitas lereng tanah lempung dengan pengaruh rembesan

B. Analisis Stabilitas Lereng Lempung ($\phi = 0$), menggunakan Diagram Taylor (1984)

Diagram stabilitas lereng lempung ($\phi = 0$), digunakan pada lempung homogen jenuh dengan kuat geser undrained konstan sembarang kedalaman. **Gambar VIII.7** untuk bidang longsor yang dipilih, komponen berat akan terdiri dari W_1 dan W_2 yaitu ;



Gambar VIII.7 Analisis stabilitas lereng $\phi = 0$ (Taylor, 1948)

$$W_1 = \text{luas EFCB} \times \partial \times 1 \qquad W_2 = \text{luas AEFD} \times \partial \times 1$$

Kelongsoran terjadi pada massa tanah dengan berat ($W_1 + W_2$), dengan bidang longsor berupa lingkaran berpusat di O . jumlah momen yang menggerakkan adalah ;

$$\Sigma M_d = W_1.y_1 - W_2.y_2$$

Momen yang menahan untuk keseimbangan adalah jumlah perkalian antara komponen kohesi sepanjang longsor dengan jarak R

$$\Sigma M_r = c_d L_{AEB} (R) = c_d R^2 \alpha$$

dengan ;

ΣM_r = jumlah momen penahan (kN.m)

R = jari – jari lingkaran longsor (m)

α = sudut seperti tergambar (radian)

Kondisi seimbang

$$\Sigma M_r = \Sigma M_d$$

$$c_d R^2 \alpha = W_1 \cdot y_1 - W_2 \cdot y_2$$

sehingga ;

$$c_d = \frac{(W_1 y_1 - W_2 y_2)}{R^2 \alpha}$$

dengan menerapkan faktor aman pada komponen kohesi tanahnya ,

$$c_d = \frac{c_u}{F}$$

Maka diperoleh faktor aman untuk analisis stabilitas lereng lempung homogen dengan $\phi = 0$ dan $c = c_u$, yaitu ;

$$F = \frac{c_u R^2 \alpha}{W_1 y_1 - W_2 y_2}$$

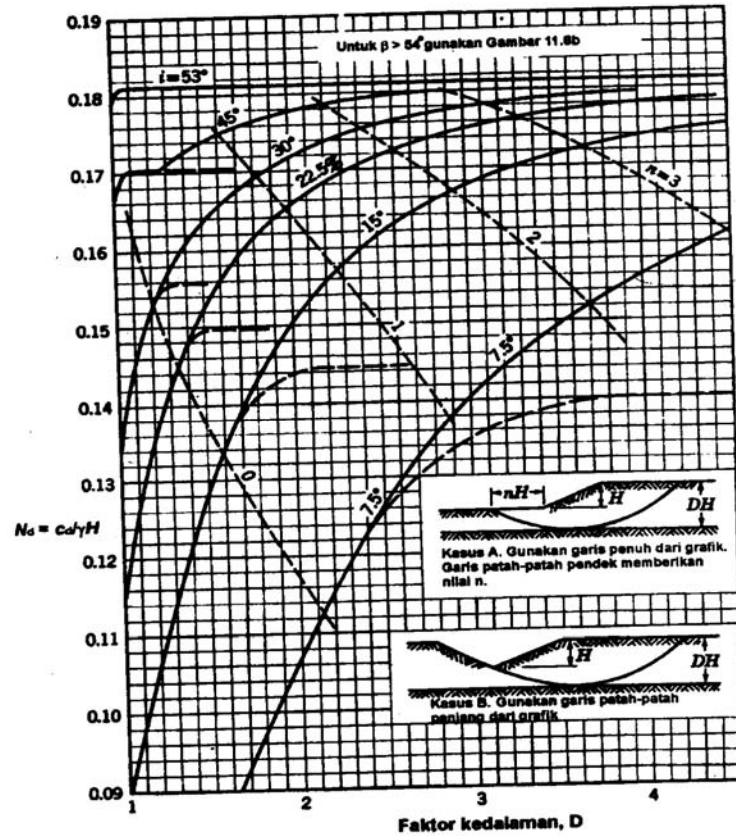
Taylor (1940) memberikan cara penyelesaian stabilitas lereng lempung homogen, c konstan dengan $\phi = 0$, analisisnya dilakukan dengan memperhatikan angka stabilitas (stability number), N_d dengan ;

$$N_d = \frac{c_u}{\gamma H} \quad \text{karena} \quad F = \frac{c_u}{c_d} \quad \text{maka} \quad N_d = \frac{c_u}{F \gamma H}$$

N_d adalah bilangan yang tidak berdimensi . Pada kondisi kritis ($F=1$), nilai $H = H_c$ dan $c_d = c_u$ maka ;

$$H_c = \frac{c_u}{\gamma N_d}$$

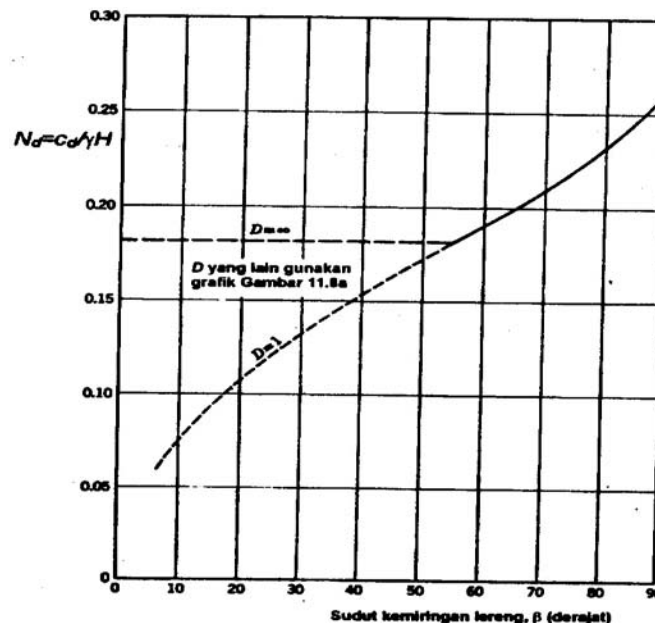
N_d merupakan fungsi dari sudut kemiringan lereng β (**Gambar VIII.8**). Pada gambar terlihat jika $\beta > 53^\circ$, lingkaran bidang longsor kritis selalu pada ujung kaki lereng. Jika $\beta < 53^\circ$ lingkaran bidang longsor kritis dapat terjadi pada kaki, lereng, atau diluar kaki lereng tergantung lokasi dari lapisan keras, jika lingkaran longsor diluar kaki lereng atau keruntuhan dasar (base failure), nilai angka stabilitas N_d maksimum adalah 0,181.



Gambar VIII.8 Diagram stabilitas $\phi = 0$ (Taylor, 1948)

Dalam Gambar VIII.8 didefinisikan nilai D adalah ;

$$D = \frac{\text{tinggi dari dasar lapisan ker as ke puncak lereng}}{\text{tinggi lereng}}$$



Gambar VIII.9 Diagram stabilitas $\phi = 0$ untuk $\beta > 54^\circ$

Contoh soal

Suatu galian sedalam 10 m dibuat pada lempung jenuh, $\gamma_{\text{sat}} = 18,5 \text{ kN/m}^3$, $c = 40 \text{ kN/m}^2$. lapisan tanah keras 12 m dibawah muka tanah, dengan menganggap $\phi = 0$, berapa kemiringan lereng (β) yang dibutuhkan agar faktor aman $F = 1,5$

Penyelesaian ;

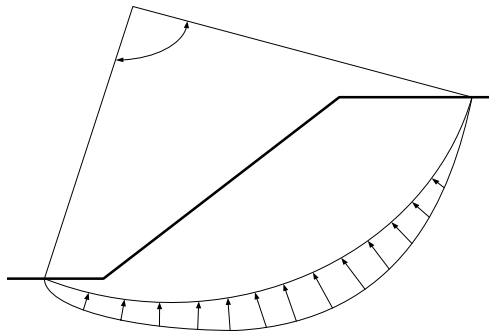
Faktor kedalaman $D = 12/10 = 1,2$

$$Nd = \frac{c}{F\gamma H} = \frac{40}{1,5 \times 18,5 \times 10} = 0,144$$

Dari **Gambar VIII.8** untuk $D = 1,2$; $\phi = 0$ diperoleh kemiringan $\beta = 23^\circ$

C. Analisis Stabilitas Lereng untuk Tanah $\phi > 0$ menggunakan Diagram Taylor (1948)

Untuk tanah mempunyai c dan ϕ penyelesaiannya lebih sulit dari tanah yang mempunyai c saja. Untuk tanah kohesif, tahanan geser sepanjang bidang longsor tidak bergantung pada tegangan normal pada bidang tersebut. Jadi dengan mengambil momen terhadap pusat lingkaran , dapat dievaluasi stabilitasnya. Jika tanah mempunyai ϕ komponen gaya normal mempengaruhi distribusi tegangan gesernya. Pada bidang longsor, tegangan normal yang bekerja tidak merata, akan tetapi merupakan fungsi dari besarnya sudut pusat lingkaran (θ). **Gambar VIII.10**



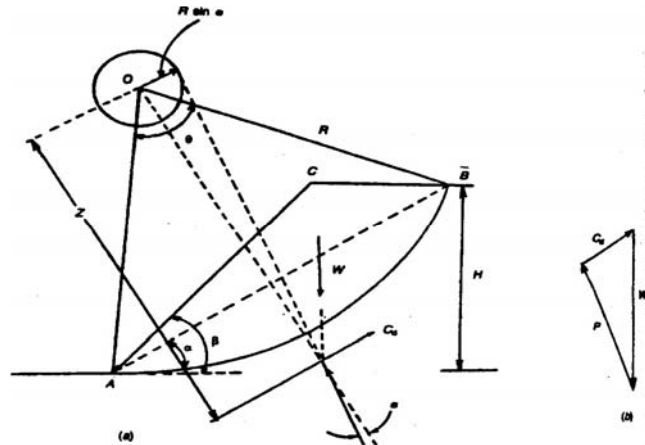
Gambar VIII.10 Distribusi tegangan normal pada bidang longsor.

Tegangan geser sembarang titik pada bidang longsor dinyatakan dengan persamaan Mohr - Coulomb ;

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Resultan tegangan normal dan komponen gesekan membuat sudut ϕ dengan arah garis normal. Garis yang ditarik lewat resultan kedua gaya ini akan berimpit dengan garis singgung

lingkaran yang berjari-jari $R \sin \phi$ yang berpusat di O. lingkaran ini disebut lingkaran ϕ (ϕ – circle) yang jari-jari lingkaran sebenarnya adalah lebih besar dari $R \sin \phi$.



Gambar VIII.11 Analisis stabilitas lereng tanah dengan $\phi > 0$

Taylor (1948) memberikan penyelesaian analisis stabilitas lereng pada tanah c dan ϕ , dimana tekanan air pori dianggap nol, dapat dinyatakan ;

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Gambar VIII.11 menunjukkan lingkaran AB adalah bidang longsor yang dicoba lewat kaki lereng. Lingkaran bidang longsor berpusat di titik O ber jari-jari R . Gaya-gaya yang bekerja pada massa tanah yang akan longsor per meter tegak lurus bidang gambar adalah ;

1. Gaya berat W = luas (ABC) x γ_b x 1
2. Kohesi sepanjang bidang longsor adalah $C_d = c_d \times (\text{panjang garis lurus AB})$. c_d tahanan geser dari komponen kohesi, resultan gaya C_d sejajar garis AB dan berjarak z dari O.

Tinjau $C_d' = c_d \times \text{panjang lengkung AB} \times R$, lengan momen z dapat dinyatakan oleh ;

$$\begin{aligned} z &= (c_d \times \text{panjang lengkung AB})R/C_d \\ &= R \times (\text{panjang lengkung AB})/(\text{panjang garis lurus AB}) \end{aligned}$$

3. Resultan gaya normal dan gaya gesek sepanjang lengkung AB, sebesar P dan membuat sudut ϕ terhadap arah garis normal pada lengkung AB. Untuk keseimbangan gaya P harus lewat titik dimana W dan C_d berpotongan.

Jika dianggap komponen gesekan dapat dikerahkan secara penuh ($\phi_d = \phi$), maka arah gaya P akan merupakan garis singgung pada lingkaran- ϕ . Karena arah gaya C_d , P dan W telah diketahui, poligon gaya dapat dibuat. Besar C_d diperoleh dari poligon gaya tersebut, kohesi yang dikerahkan untuk keseimbangan adalah ;

$$c_d = \frac{C_d}{\text{panjang garis AB}}$$

Penentuan c_d dengan coba-coba pada lingkaran longsornya, beberapa percobaan harus dilakukan untuk menentukan nilai C_d maksimum (kondisi kritis lereng). Kohesi yang dikerahkan sepanjang bidang longsor untuk keseimbangan adalah ;

$$c_d = \partial H [f(\alpha, \beta, \theta, \varphi)]$$

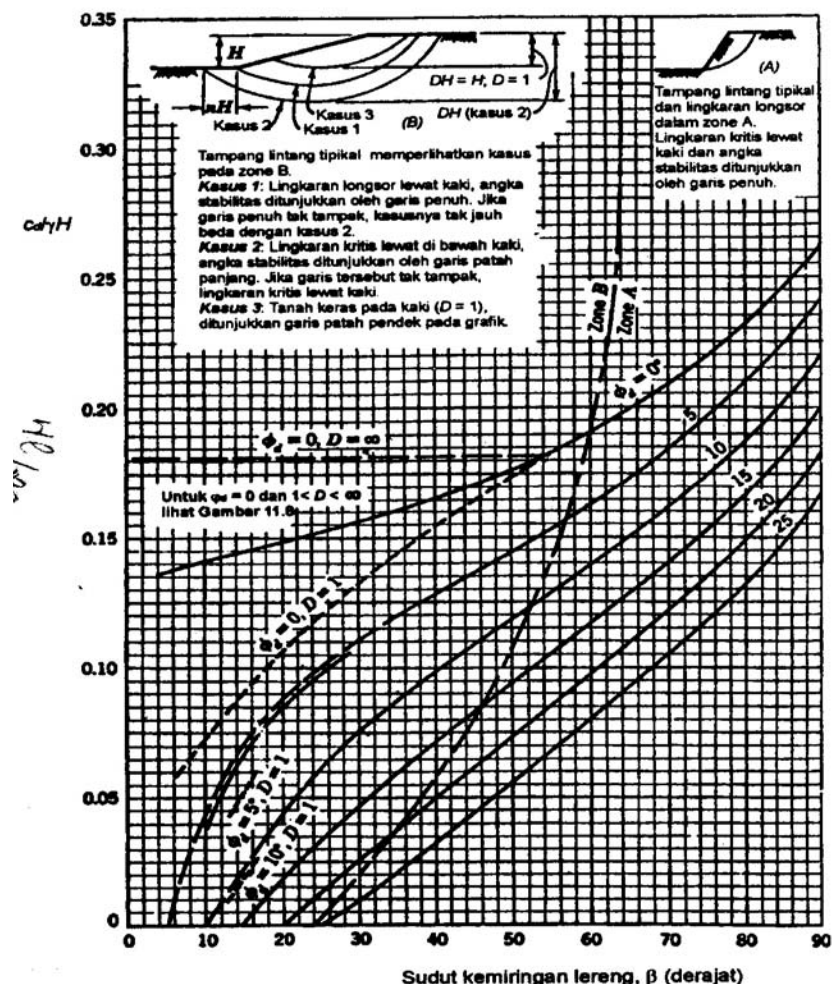
pada kondisi kritis $F = 1$, dan $H = H_c$ dan $c = c_d$ dan persamaan menjadi ;

$$c_d = \partial H_c [f(\alpha, \beta, \theta, \varphi)]$$

Bila dinyatakan dalam nilai banding angka stabilitas,

$$\frac{c}{\gamma H_c} = f(\alpha, \beta, \theta, \varphi)$$

Nilai $c/\partial H$ untuk beberapa nilai φ dan β dapat dilihat (**Gambar VIII.12**);



Gambar VIII. 12 Diagram stabilitas lereng untuk tanah dengan $\varphi > 0$ (Taylor, 1948)

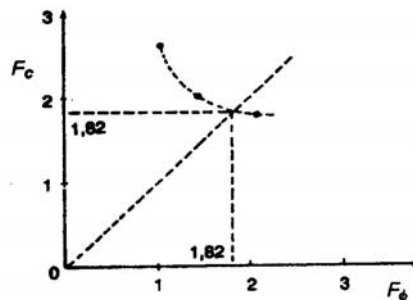
Gambar VIII.12 digunakan menentukan faktor aman terhadap nilai kohesinya saja dengan anggapan seluruh nilai sudut gesek dalam berkembang penuh ($F_\varphi = 1$) atau sebaliknya, maka cara coba-coba harus digunakan.

Contoh soal - 1

Suatu timbunan dengan tinggi $H = 12,2$ m, mempunyai kemiringan lereng $\beta = 30^\circ$, Permukaan tanah keras pada kedalaman tak berhingga. Kohesi $c = 38,3$ kN/m², sudut gesek dalam $\phi = 10^\circ$ dan berat volume total $\gamma = 15,7$ kN/m³. Tentukan faktor aman terhadap kohesi (F_c), terhadap gesekan (F_ϕ), dan faktor aman keseluruhan (F).

Penyelesaian ;

- Anggapan susut gesek dalam dikerahkan secara penuh , $\phi = 10^\circ$, dari **Gambar VIII.12** untuk $\beta = 30^\circ$, maka $c_d/\partial H = 0,075$, jadi $c_d = 0,075 \times 15,7 \times 12,2 = 14,4$ kN/m²
Faktor aman terhadap kohesi adalah $F_c = c/c_d = 38,3/14,4 = 2,67$
- Anggapan kohesi dikerahkan sepenuhnya, atau $c_d/\partial H = 38,3/(15,7 \times 12,2) = 0,2$ dengan $\beta = 30^\circ$ dalam **Gambar VIII.12** diperoleh $\phi < 0$, berarti $F_\phi = \sim$.
- Menentukan faktor aman terhadap geser, nilai faktor aman yang sama harus diberikan kepada komponen kohesi dan gesekan, F_c diasumsikan, dan $F_\phi = \tan \phi / \tan \phi_d$ ditentukan dari diagram. Dengan coba-coba faktor aman terhadap geser diperoleh saat $F_\phi = F_c$. Ini dapat ditentukan dengan menggambar hubungan F_ϕ dan F_c kemudian gambar garis 45° .

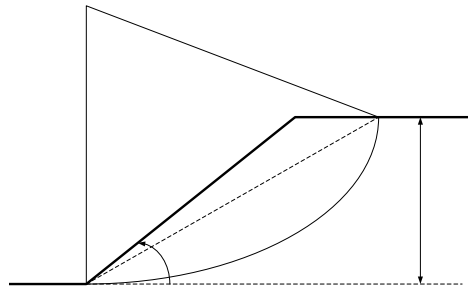
**Gambar CVIII.3** Hubungan F_c dan F_ϕ

Satu titik pada kurva F_c , F_ϕ telah dihitung, yaitu pada $F_c = 2,67$ dan $F_\phi = 1$, butuh 2 titik lagi untuk menggambar kurva. Anggap $F_c = c/c_d = 2$, $c_d = c/F_c = 38,3/2 = 19,2$; $c_d/\partial H = 19,2/(15,7 \times 12,2) = 0,1$. **Gambar VIII.12** diperoleh $\phi_d = 7^\circ$, $F_\phi = \tan 10^\circ / \tan 7^\circ = 1,44$, anggap $F_c = 1,8$ atau $c_d = 38,3/1,8 = 21,3$ kN/m³. $c_d/\partial H = 21,3/(15,7 \times 12,2) = 0,11$, **Gambar VIII.12** diperoleh $\phi_d = 5^\circ$, $F_\phi = \tan 10^\circ / \tan 5^\circ = 2,02$. Tarik garis melalui ketiga titik tersebut. Buat garis 45° dari titik asal, diperoleh faktor aman kuat geser adalah $F = 1,82$.

Contoh soal - 2

Potongan melintang suatu timbunan seperti **Gambar CVIII.4**. Hitunglah factor aman terhadap komponen kohesi, hitung juga factor aman dengan anggapan factor aman terhadap

kohesi dan gesekan sama. Berat volume tanah $\gamma = 18,4 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 17^\circ$ dan $c = 15,5 \text{ kN/m}^2$. pengaruh retak akibat tarikan diabaikan.



Gambar CVIII.4

Penyelesaian ;

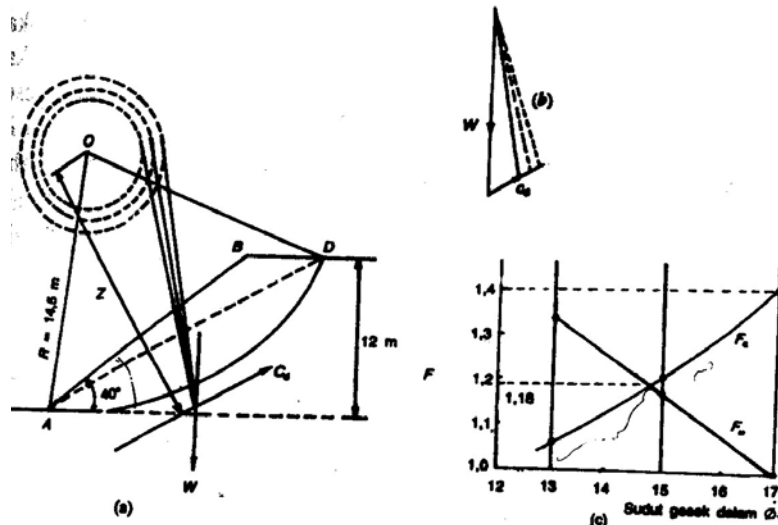
Sudut $AOD = 76^\circ = 1,32 \text{ radian}$ (diukur), Lengkung $AD = 1,32 \times 14,5 \text{ m} = 19,14 \text{ m}$, Luas $ABD = 57,60 \text{ m}^2$ (dihitung). Berat ABD per 1 m lebar $= 57,60 \times 1 \times 18,4 = 1060 \text{ kN}$

Gaya C_d akibat komponen kohesi yang bekerja pada bidang lengkung AD , digantikan dengan gaya C_d yang bekerja // garis AD pada jarak z dari O ,

$$z = 14,5 \times \frac{\text{panjang lengkung } AD}{\text{panjang garis } AD} = 14,5 \times \frac{19,14}{17,8} = 15,66 \text{ m}$$

$$R = 14,5 \text{ m}$$

Kemudian, tentukan titik berat dari luasan ABD



Gambar CVIII. 5 Analisis lereng

Gambarkan lingkaran ϕ dengan pusat O , dan jari-jari $= 14,5 \sin 17 = 4,24 \text{ m}$. Dari perpotongan gaya W dan C_d , gambarkan garis singgung ke lingkaran ϕ . Garis ini merupakan arah dari resultan gaya akibat gaya normal dan gaya gesek pada permukaan AD . Gambarkan

segitiga gaya dengan skala tertentu, diperoleh $C_d = 196 \text{ kN}$. Kohesi satuan yang dikerahkan $196/17,8 = 11 \text{ kN/m}^2$, maka faktor aman terhadap kohesi $= 15,5/11 = 1,4$

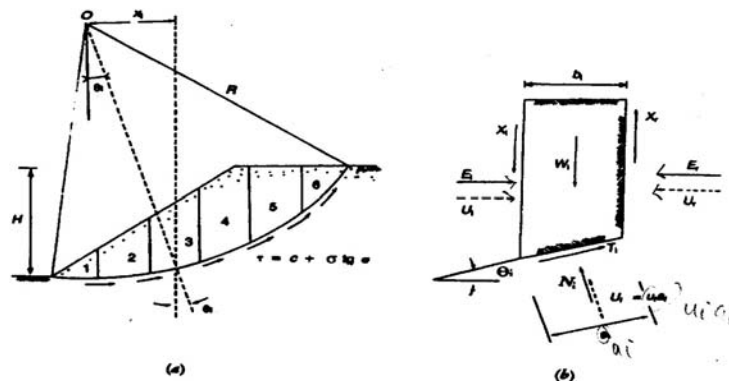
Untuk mendapatkan faktor aman sebenarnya, dianggap faktor aman terhadap kohesi dan gesekan sama, untuk itu ulangi perhitungan diatas dengan sudut gesek dalam 15° dan 13° . Dengan menghubungkan $F_\phi = F_c$, diperoleh perpotongan dua kurva dititik $F = 1,18$. Jadi faktor aman pada kondisi ini = 1,18. Hasil perhitungan seperti dibawah dimana $c = 15,5 \text{ kN/m}^2$

Tabel CVIII. 1

φ_1	R sin φ_1 (m)	$F_{\varphi} = \frac{tg\,17}{tg\,\varphi}$	C _d (kN)	c ₁ =C _d /17,8 (kN/m ²)	F _c = c/c ₁
17°	4,24	1,00	196	11	1,4
15°	3,78	1,14	228	12,8	1,2
13°	3,28	1,32	260	14,6	1,05

VI 5. Metode Irisan (Method of Slide)

Analisis sebelumnya cocok untuk tanah homogen, jika tanah tidak homogen dan ada aliran air tidak menentu, maka metode ini dipandang lebih cocok. Gaya normal suatu titik dilingkaran bidang longsor, dipengaruhi oleh berat tanah diatas titik tersebut, pada metode ini tanah yang akan longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan yang vertikal, kemudian keseimbangan tiap irisan diperhatikan.



Gambar VIII.13 Gaya gaya yang bekerja pada irisan.

Gambar VIII.13b memperlihatkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja, gaya tersebut adalah ;

X_1 dan X_r = gaya geser efektif disepanjang sisi irisan

E_l dan E_r = gaya normal efektif disepanjang sisi irisan

- T_i = resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
 N_i = resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan
 U_1, U_r = tekanan air pori yang bekerja dikedua sisi irisan
 U_i = tekanan air pori didasar irisan

A. Metode Fellinius

Fellinius (1927) menganggap gaya yang bekerja disisi kiri kanan sembarang irisan mempunyai resultan nol arah tegak lurus bidang longsor, keseimbangan arah vertikal adalah ;

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

Atau,

$$N_i = W_i \cos \theta_i - U_i = W_i \cos \theta_i - \mu_i a_i$$

Faktor aman didefinisikan ;

$$F = \frac{\text{Jumlah momen tahanan geser sepanjang bidang longsor}}{\text{Jumlah momen berat massa tanah yang longsor}} = \frac{\sum M_r}{\sum M_d}$$

Lengan momen dari berat massa tanah tiap irisan adalah $R \sin \theta$, maka momen dari massa tanah yang akan longsor adalah;

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

dengan,

R = jari-jari lingkaran bidang longsor

n = jumlah irisan

W_i = berat massa tanah irisan ke-i

θ_i = sudut antara jari-jari lingkaran dengan garis kerja massa tanah

Momen penahan longsor adalah ;

$$\sum M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (c a_i + N_i \tan \phi)$$

Sehingga persamaan menjadi ;

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c a_i + N_i \tan \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta}$$

Bila terdapat air pada lereng, akibat pengaruh tekanan air pori persamaan menjadi

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} c a_i + (W_i \cos \theta_i - \mu_i a_i) \tan \phi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

dengan ;

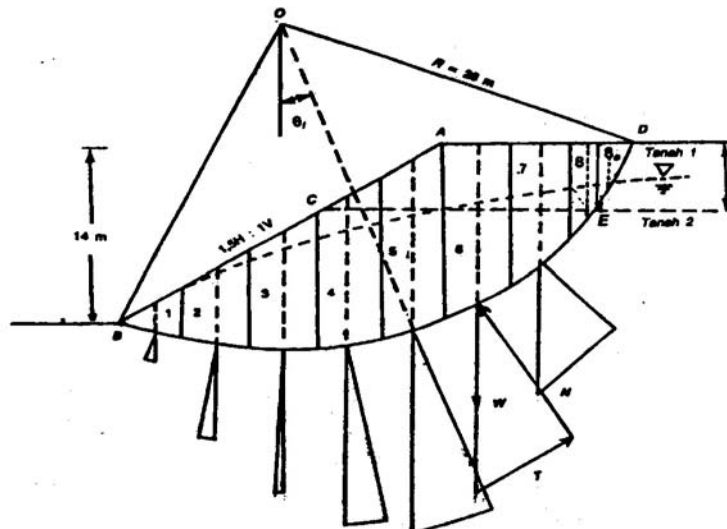
F	= faktor aman	c	= kohesi (kN/m ²)
φ	= sedut gesek dalam tanah (°)	a_i	= lengkungan irisan ke-i (m)
W_i	= berat irisan tanah ke-i (kN)	μ_i	= tekanan air pori ke-i (kN)
θ_i	= sudut antara jari-jari lengkung dengan garis kerja massa tanah		

Jika terdapat beban lain selain tanah, misalnya bangunan, maka momen akibat beban ini diperhitungkan sebagai M_d .

Contoh soal

Suatu tanah digali sedalam 14 m dengan kemiringan tebing 1,5H : 1V. Sampai kedalaman 5 m dibawah permukaan, tanah mempunyai $\theta = 17,7 \text{ kN/m}^3$, $c' = 25 \text{ kN/m}^2$, $\phi = 10^\circ$. dibawah lapisan ini tanah mempunyai $\theta = 19,1 \text{ kN/m}^2$, $c' = 34 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 24^\circ$ tanah dalam kondisi jenuh. Kondisi galian, lingkaran longsor dan permukaan air freatis seperti tergambar, hitung faktor aman dari lereng tersebut.

Penyelesaian ;



Gambar CVIII.6 Irisan pada lereng

Bidang longsor dibagi dalam 8 irisan. Panjang total bidang longsor (arah horizontal) = 34,5 m ; maka tiap irisan akan mempunyai lebar $34,5/8 = 4,31$ m, selanjutnya perhitungan seperti dalam **Tabel CVIII.2** . Cara perhitungan adalah misalnya lapisan no. **6**

Lapisan bawah tinggi $h_1 = 7,4$ m dan lapisan atas $h_2 = 5,0$ m, maka berat irisan = $5 \times 4,31 \times 17,7 + 7,4 \times 4,31 \times 19,1 = 991$ kN. Ordinat tekanan air pori diukur 7,50 m, tekanan air pori = $7,50 \times 9,81 = 75$ kN/m². Panjang garis longsor = 5,2 m, maka $U_i = 75 \times 5,2 = 390$ kN.

Tabel CVIII.2

Irisan No	Berat W_i (kN)	θ_i ($^\circ$)	$W_i \cos \theta_i$ (kN)	$W_i \sin \theta_i$ (kN)	$U_i = \mu_i a_i$ (kN)	$W_i \cos \theta_i - \mu_i a_i$ (kN)
1	196	-16,3	180	-55	90	90
2	519	-10,7	510	-90	225	285
3	781	1,10	780	15	310	470
4	965	10,75	945	180	365	580
5	1084	19,96	1020	370	385	635
6	991	31,31	855	515	390	465
7	721	43,90	535	500	305	230
8	232	53,00	139,6	185	78	<u>62</u>
						2817
8a	133	58	71	<u>106</u>	4	67
				1727		

Dengan memperhatikan jari-jari dan sudut yang diapit, panjang garis DE = 5,45 m dan BE = 35,6 m. Tahanan terhadap longsor yang dikerahkan oleh komponen kohesi ;

$$\Sigma c_i a_i = 25 \times 5,45 + 34 \times 35,6 = 1347 \text{ kN}$$

Tahanan longsor oleh komponen gesekan pada kedua lapisan ;

$$2817 \times \tan 24 + 67 \times \tan 10 = 1266 \text{ kN}$$

$$\text{Faktor aman} \quad F = \frac{1347 + 1266}{1727} = 1,51$$

B. Metode Bishop disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

Metode Bishop (1955) ini menganggap gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol arah vertikal. Persamaan kuat geser adalah ;

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - \mu) \frac{\tan \phi'}{F} \quad (1)$$

Untuk irisan ke-i, nilai $T_i = \tau a_i$, yaitu gaya geser yang dikerahkan tanah pada bidang longsor untuk keseimbangan batas, karenanya itu ;

$$\tau = \frac{c' a_i}{F} + (N_i - \mu_i a_i) \frac{\tan \phi'}{F} \quad (2)$$

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

$$\Sigma W_i x_i = \Sigma T_i R \quad (3)$$

Dengan x_i adalah jarak W_i ke pusat rotasi O, dapat diperoleh ;

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} [c' a_i + (N_i - \mu_i a_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (4)$$

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

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

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (5)$$

Dengan $N_i' = N_i - \mu_i a_i$ disubsitusikan ke persamaan (2) dan (5) diperoleh ;

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - \mu_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \phi' / F} \quad (6)$$

Substitusikan (6) ke (4) diperoleh ;

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} \left(c' a_i + \tan \phi' \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - \mu_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \phi' / F} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (7)$$

Penyederhanaan anggap $X_i - X_{i+1} = 0$, dan $x_i = R \sin \theta_i$, serta $b_i = a_i \cos \theta_i$, diperoleh,

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - \mu_i b_i) \tan \phi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (8)$$

dengan ;

F	= faktor aman	θ_i	= sudut (Gambar VIII.13)
c'	= kohesi tanah efektif (kN/m ²)	b_i	= lebar irisan ke-i (m)
W_i	= berat irisan tanah ke-i (kN)	ϕ'	= sudut gesek dalam efektif (°)
μ_i	= tekanan air pori irisan ke-i (kN/m ²)		

Rasio tekanan air pori,

$$r_u = \frac{\mu b}{W} = \frac{\mu}{\gamma h} \quad (9)$$

dengan ;

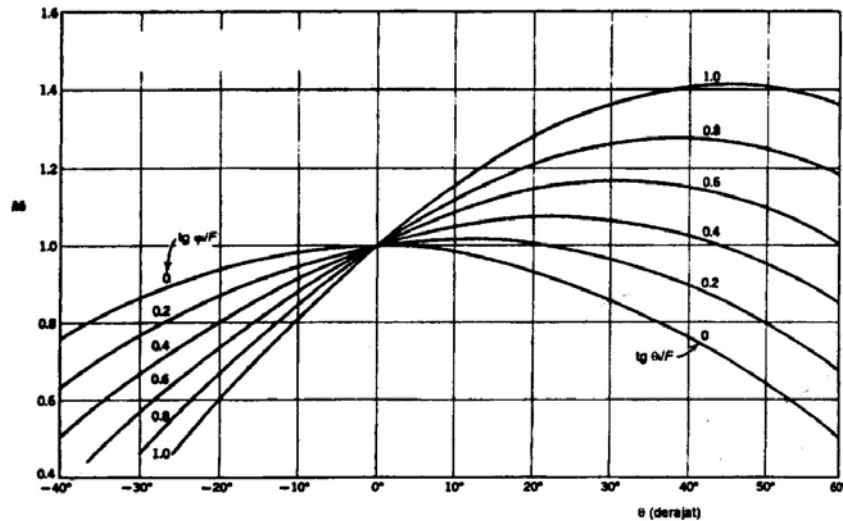
r_u	= rasio tekanan air pori	∂	= berat volume tanah (kN/m ³)
μ	= tekanan air pori (kN/m ²)	h	= tinggi irisan rata-rata (m)
b	= lebar irisan ke-i (m)		

dengan mensubsitusikan persamaan (8) ke persamaan (7) diperoleh ;

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \phi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (10)$$

Metode Bishop ini menggunakan cara coba-coba, tetapi hasil hitungan lebih teliti, untuk memudahkan perhitungan dapat digunakan nilai fungsi M_i dimana ;

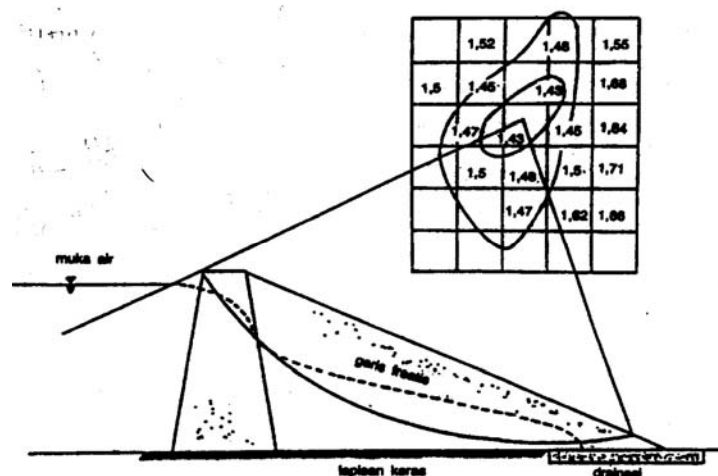
$$M_i = \cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi' / F) \quad (11)$$



Gambar VIII.14 Diagram menentukan nilai M_i (Janbu dkk, 1956)

Lokasi lingkaran longsor kritis Metode Bishop (1955), biasanya mendekati hasil lapangan, karena itu metode ini lebih disukai.

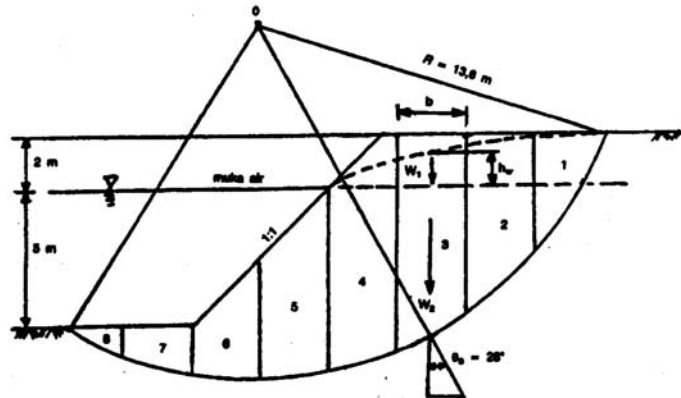
Cara coba-coba diperlukan untuk menentukan bidang longsor dengan F terkecil, buat kotak-kotak dimana tiap titik potong garisnya merupakan tempat kedudukan pusat lingkaran longsor. Pada pusat lingkaran longsor ditulis F yang terkecil pada titik tersebut, yaitu dengan mengubah jari-jari lingkarannya. Setelah F terkecil pada tiap titik pada kotaknya diperoleh, gambar garis kontur yang menunjukkan kedudukan pusat lingkaran dengan F yang sama (**Gambar VIII. 15**). Dari sini bisa ditentukan letak pusat lingkaran dengan F yang kecil.



Gambar VIII.15 Contoh kontur faktor aman

Contoh soal,

Suatu lereng seperti (**Gambar CVIII.7**), sifat tanah $\partial_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$, $\partial' = 10 \text{ kN/m}^3$, $\phi' = 30^\circ$ dan $c' = 15 \text{ kN/m}^2$. Hitung F dengan cara Bishop disederhanakan dengan pusat lingkaran seperti tergambar.



Gambar CVIII. 7 Gambar dimaksud soal

Penyelesaian ,

Anggap $\partial_w = 10 \text{ kN/m}^3$, maka

$$F = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=8} (W_1 + W_2) \sin \theta_i} \sum_{n=1}^{n=8} \left([c'b + (W_1 + W_2 - bu) \tan \phi'] \frac{1}{M_i} \right)$$

dengan ;

$W_1 = \partial b h_1$ = berat tanah di atas muka air di saluran (kN)

$W_2 = \partial' b h_2$ = berat efektif tanah terendam (kN)

b = lebar irisan arah horizontal (m)

$\mu = h_w \partial_w$ = tekanan air dihitung dari muka air saluran (kN/m²)

h_w = tinggi tekanan air rata-rata dalam irisan yang ditinjau (m)

Hitungan faktor aman (F) dari lereng secara tabelaris (**Tabel CVIII.3**);

Tabel CVIII.3 Hasil perhitungan

No. Irisan	b (m)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	θ_i (°)	$W_1 = \partial b h_1$ (kN)	$W_2 = \partial' b h_2$ (kN)	$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2$ (kN)
1	2	3	4	5	6	7	
1	2,50	1,70	0,70	61,0	85,00	17,50	102,50
2	2,50	2,00	3,75	42,0	100,00	93,75	193,75
3	2,50	2,00	5,50	28,0	100,00	137,50	237,50
4	2,50	1,20	6,50	17,0	60,00	162,50	222,50
5	2,50	0,00	5,75	5,8	0,00	143,75	143,75
6	2,50	0,00	3,25	-5,8	0,00	81,25	81,25
7	2,50	0,00	1,50	-16,5	0,00	37,50	37,50
8	2,00	0,00	0,50	-26,5	0,00	10,00	10,00

Tabel CVIII.3 lanjutan

$\sin \theta_i$ 8	$W_{tot} \sin \theta_i$ 9	h_w (m) 10	$\mu = hw\partial w$ 11	bu (kN) 12	$W_{tot}-bu$ (kN) 13	$(W_{tot}-bu)tg\phi'$ (kN) 14
0,875	89,69	1,75	17,50	43,75	58,75	33,92
0,669	129,62	1,60	16,00	40,00	153,75	88,77
0,470	111,63	1,26	12,60	31,50	206,00	118,93
0,292	64,97	0,50	5,00	12,50	210,00	121,24
0,101	14,52	0,00	0,00	0,00	143,75	82,99
-0,101	-8,21	0,00	0,00	0,00	81,25	46,91
-0,284	-10,65	0,00	0,00	0,00	37,50	21,65
-0,446	-4,46	0,00	0,00	0,00	10,00	5,77
387,10						

Tabel CVIII.3 lanjutan

$c'b$ (kN) 15	14+15(kN) 16	$M_i(F=2,2)$ 17	$M_i(F=2,23)$ 18	16:17 19	16:18 20	Hitungan F 21
37,50	71,42	0,71	0,71	99,96	100,39	
37,50	126,27	0,92	0,92	137,49	137,84	$F_1 = 864,74/387,10$
37,50	156,43	1,01	1,00	155,47	155,73	2,23
37,50	158,74	1,03	1,03	153,71	153,87	
37,50	120,49	1,02	1,02	117,94	117,99	$F_2 = 865,41/387,10$
37,50	84,41	0,97	0,97	87,17	87,13	2,24
37,50	59,15	0,88	0,89	67,01	66,77	
30,00	35,77	0,78	0,78	45,99	45,69	
				864,74	865,41	

Setelah hitungan diperoleh dengan dicoba $F = 2,2$ diperoleh $F_1 = 2,23$. dan dengan $F = 2,23$ diperoleh $F_2 = 2,24$ dengan nilai dianggap mendekati hasil coba-coba sebelumnya. Jadi faktor aman $F = 2,23$.

