

## BAB VI

### PEMBAHASAN DAN SOLUSI

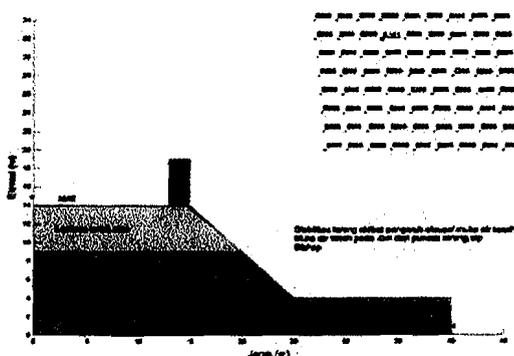
#### 6.1 Tinjauan Umum

Dalam analisis stabilitas lereng menggunakan program Geo-Slope, dimana angka keamanan (SF) dihitung dengan memasukkan data parameter-parameter tanah dan geometri lereng yang dianalisis. Dari data parameter tersebut, penulis dapat mengetahui kecenderungan perilaku lereng akibat pengaruh kemiringan, elevasi muka air tanah, dan pembebanan pada puncak lereng, yang ditunjukkan dengan perubahan *slip surface* terhadap *safety factor*.

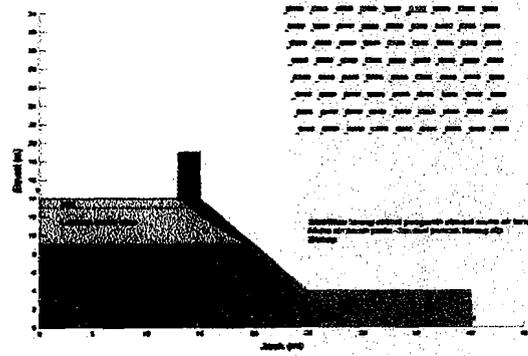
#### 6.2 Pembahasan

##### 6.2.1. Analisis Hubungan Angka Keamanan terhadap Pengaruh Elevasi Muka Air Tanah

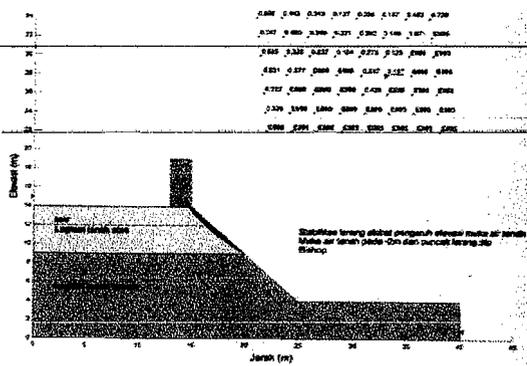
Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh muka air tanah terhadap angka keamanan pada lereng, maka dilakukan pemodelan dengan variabel tinggi muka air tanah. Hasil aplikasi dari program Geo-Slope yang berupa angka aman (*safety factor*) dan bidang longsor (*slip surface*) dapat dilihat pada Gambar 6.1 di bawah ini:



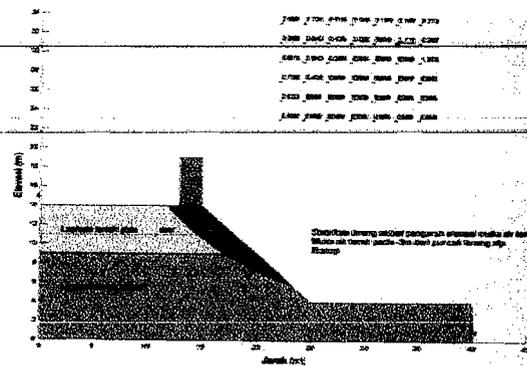
(a) Lereng dengan MAT  $\pm$  0.00 m



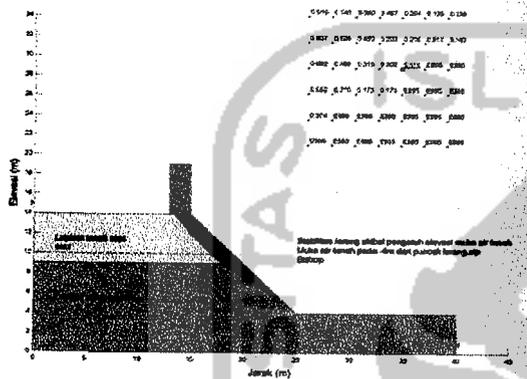
(b) Lereng dengan MAT - 1.00 m



(c) Lereng dengan MAT - 2.00 m



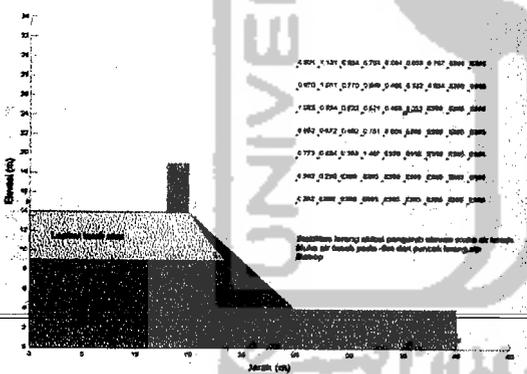
(d) Lereng dengan MAT - 3.00 m



(e) Lereng dengan MAT - 4.00 m



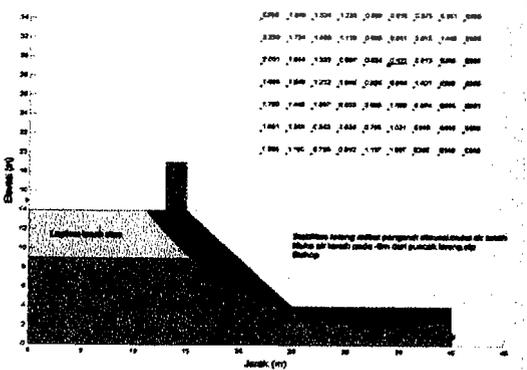
(f) Lereng dengan MAT - 5.00 m



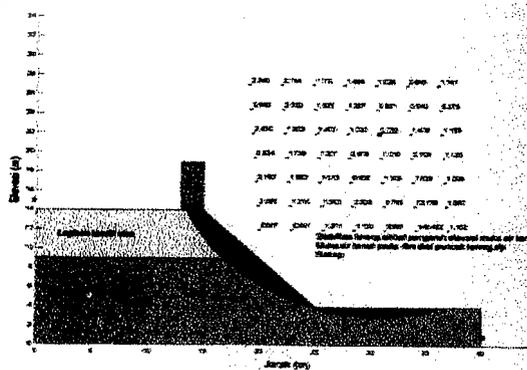
(g) Lereng dengan MAT - 6.00 m



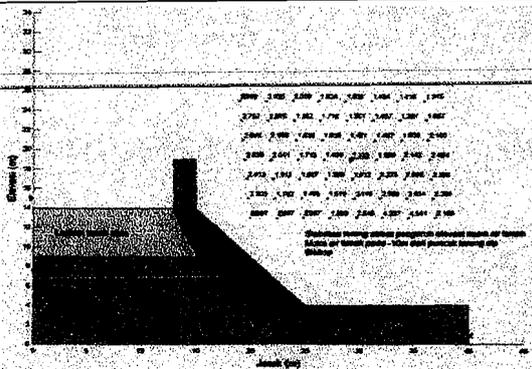
(h) Lereng dengan MAT - 7.00 m



(i) Lereng dengan MAT - 8.00 m



(j) Lereng dengan MAT - 9.00 m



**Gambar 6.1.** Hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang dipengaruhi perubahan elevasi muka air tanah (dari +0.00 m hingga -10.00 m dari puncak lereng)

(k) Lereng dengan MAT - 10.00 m

Untuk lebih jelasnya, hasil dari analisis menggunakan Geo-Slope dapat dilihat pada gambar-gambar di lampiran 2, sedangkan dari gambar di atas didapatkan nilai angka aman, jenis keruntuhan dan dimensi bidang longsor yang ditabelkan pada Tabel 6.1 di bawah ini.

**Tabel 6.1.** Perubahan *safety factor* dan dimensi *Slip Surface* akibat pengaruh elevasi muka air tanah.

muka air tanah (m)	<i>safety factor</i>	Jenis keruntuhan	Dimensi <i>Slip Surface</i>
			Lebar x pjg lengkung longsor
± 0.00	0.101	Keruntuhan sebagian	0.24381 x 3.5825
- 1.00	0.102	Keruntuhan sebagian	1.75 x 9.23905
- 2.00	0.107	Keruntuhan sebagian	0.31971 x 7.43088
- 3.00	0.116	Keruntuhan sebagian	3.14285 x 14.21136
- 4.00	0.118	Keruntuhan sebagian	1.46624 x 13.1257
- 5.00	0.198	Keruntuhan sebagian	1.62452 x 14.6065
- 6.00	0.223	Keruntuhan sebagian	0 x 12.61195
- 7.00	0.340	Keruntuhan sebagian	0 x 7.98138
- 8.00	0.405	Keruntuhan dasar	3.7524 x 32.86
- 9.00	0.756	Keruntuhan dasar	1.567 x 27.771
- 10.00	1.333	Keruntuhan dasar	2.03379 x 29.94697

Pada model lereng dengan elevasi muka air tanah pada -8, -9 dan -10 m dari puncak lereng didapatkan bidang longsor yang jauh melewati kaki lereng, dengan kata lain terjadi keruntuhan dasar. Sehingga, sangat tidak dianjurkan masyarakat

untuk mendirikan bangunan pada daerah kaki lereng. Namun, untuk kasus lereng dengan elevasi muka air tanah pada -10 m, lereng cenderung stabil, dikarenakan angka aman yang cukup besar.

Pada Grafik 5.1 dapat diketahui bahwa angka keamanan menurun dengan naiknya elevasi muka air tanah, hal ini dikarenakan: air tanah akan mengisi pori diantara butiran-butiran tanah dan akan mengikis sedimen yang ada di sekitar butiran, akibatnya kontak antar-butiran tanah akan berkurang dan tegangan efektif dari tanah juga akan berkurang, sehingga stabilitas lereng juga akan ikut menurun. Dengan naiknya muka air tanah, maka pori akan terisi air, hal ini menyebabkan massa tanah akan bertambah berat. Dengan bertambahnya massa tanah, maka tanah akan mempunyai kecenderungan bergerak ke bawah (longsor) akibat adanya pengaruh gaya gravitasi. Pada lereng dengan muka air tanah pada -9 dan -10 m angka aman naik dengan pesat, karena tanah di atasnya yang cenderung lebih ringan dibandingkan tanah yang berada di bawahnya yang lebih berat karena dipengaruhi oleh massa air ( $\gamma_w$ ).

a. Konsolidasi Satu Dimensi (*One Dimensional Consolidation*)

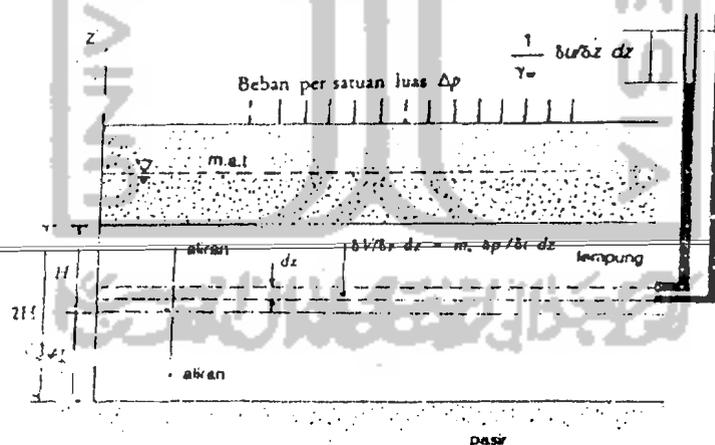
Cara menentukan distribusi kelebihan tekanan air pori (*pore water pressure*) dalam lapisan yang sedang berkonsolidasi, pada sembarang waktu sesudah bekerjanya beban, beserta drajat konsolidasi ditunjukkan oleh Terzaghi (1925). Teori ini disebut *teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi*. Beberapa anggapan dalam analisis konsolidasi satu dimensi, adalah:

1. Tanah adalah homogen.
2. Tanah lempung dalam keadaan jenuh sempurna.
3. Partikel padat dan air tidak mudah mampat.

4. Arah pemampatan dan aliran air pori vertikal (satu dimensi).
5. Regangan kecil.
6. Hukum Darcy berlaku pada seluruh gradient hidrolis.
7. Koefisien permeabilitas ( $k$ ) dan koefisien perubahan volume ( $m_v$ ) konstan selama proses konsolidasi.
8. Ada hubungan khusus yang tidak tergantung waktu, antara angka pori dan tegangan efektif.

Ditinjau lapisan lempung setebal  $dz$  yang padanya bekerja tekanan  $\Delta p$  (Gambar 6.2). Jika kelebihan tekanan air pori pada sembarang titik di dalam lapisan lempung adalah  $u$ , maka ketidakseimbangan tekanan hidrostatik di dalam tanah dengan ketebalan  $dz$ , dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$u + \frac{\delta u}{\delta z} dz - u = \frac{\delta u}{\delta z} dz \quad (6.1)$$



Gambar 6.2. Kondisi tekanan hidrostatik pada lapisan mampat (Christady. H, 2003)

Persamaan diferensial dari tiap-tiap proses konsolidasi dalam kondisi drainasi linier (untuk luas satuan = 1) adalah:

$$\frac{\delta V}{\delta z} = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (6.2)$$

Persamaan tersebut dimudahkan dengan substitusi nilai:

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (6.3)$$

dengan  $C_v$  adalah koefisien konsolidasi, maka akan diperoleh persamaan:

$$\frac{\delta u}{\delta t} = C_v \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} \quad (6.4)$$

Persamaan 6.4 adalah dasar persamaan teori konsolidasi Terzaghi. Kondisi batas untuk menentukan konsolidasi lapisan tanah yang mengijinkan drainasi ke arah atas dan bawah adalah (Gambar 6.2):

1. Saat  $t = 0$ , pada lapisan lempung setebal  $dz$ , kelebihan tekanan hidrostatik (kelebihan tekanan air pori) sama dengan  $\Delta p$ .
2. Untuk sembarang waktu ( $t$ ) saat konsolidasi masih berlangsung, pada permukaan drainasi  $z = 2H$  dan  $z = 0$ , kelebihan tekanan hidrostatik adalah 0.
3. Sesudah waktu yang lama, pada sembarang kedalaman  $z$ , kelebihan tekanan hidrostatik sama dengan nol.

Pada kondisi tanah yang memungkinkan drainasi ke atas dan ke bawah, penyelesaian dari Persamaan 6.4 dengan  $C_v$  konstan dan pada kondisi awal  $u_i$  sebagai

fungsi  $z$ , adalah:

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left( \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \left\{ \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \exp \frac{-n^2 \pi^2 C_v t}{4H^2} \quad (6.5)$$

dengan:

$H$  = Jarak lintasan drainasi terpanjang.

$U_i$  = Distribusi kelebihan tekanan air pori awal yang bentuknya dapat berupa lengkung Sinus, atau bentuk-bentuk lainnya.

Untuk kasus tertentu dimana  $u_i$  konstan di seluruh lapisan lempung, maka:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_i}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \left\{ \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \exp \frac{-n^2 \pi^2 C_v t}{4H^2} \quad (6.6)$$

Diselesaikan dengan cara substitusi:

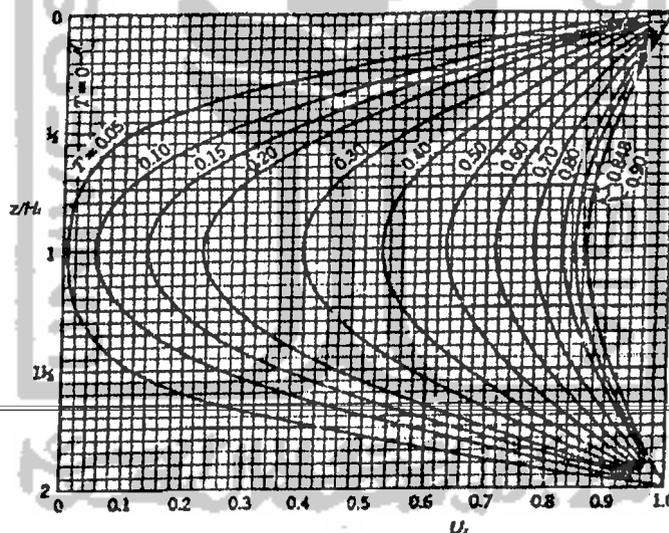
$$n = 2m + 1 \quad \text{dan} \quad M = (\pi/2)(2m + 1)$$

dan 
$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (6.7)$$

dengan  $T_v$  adalah besaran tanpa dimensi, yang disebut faktor waktu (*time factor*).

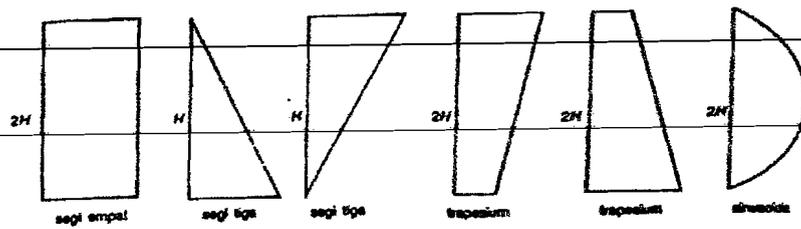
Dari substitusi Persamaan 6.7 ke Persamaan 6.6, maka:

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_i}{M} \left( \sin \frac{Mz}{H} \right) \exp (-M^2 T_v) \quad (6.8)$$



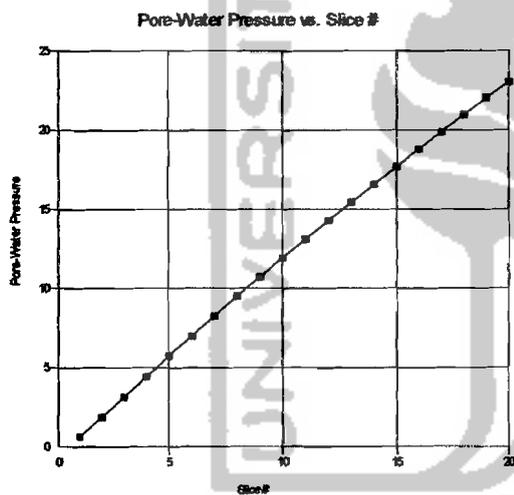
**Grafik 6.1.** Hubungan drajat konsolidasi  $U_z$  pada kedalaman tertentu terhadap faktor waktu  $T_v$ . (Christady. H, 2003)

Perkembangan proses konsolidasi dapat ditentukan dengan menggambar kurva-kurva  $u$  terhadap  $z$  pada waktu  $t$  yang berlainan. Kurva-kurva ini disebut isokron (*isochrone*) yang bentuknya tergantung pada distribusi kelebihan tekanan air pori dan kondisi drainasi lapisan lempung (drainasi dobel atau tunggal).

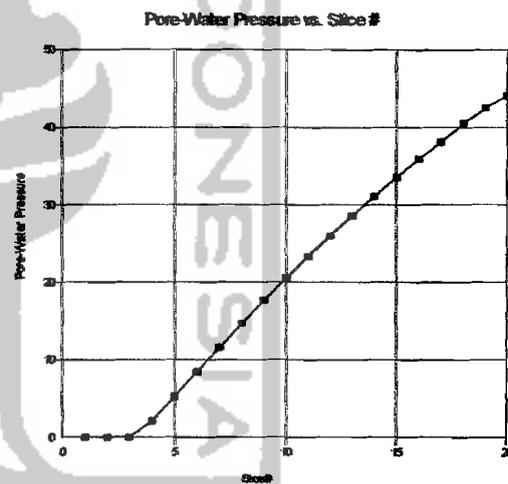


Gambar 6.3. Macam-macam diagram tekanan air pori awal. (Christady. H, 2003).

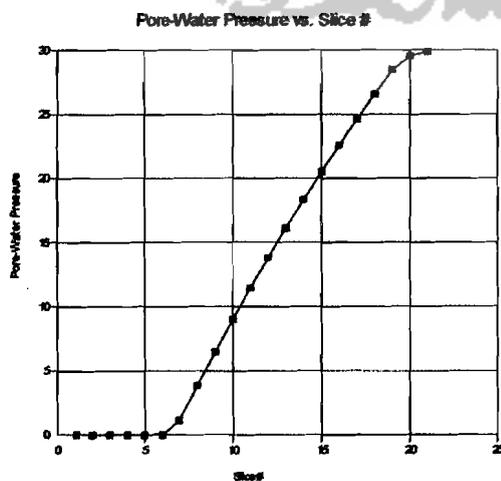
Di bawah ini adalah grafik perbandingan tekanan air pori yang terjadi pada setiap irisan untuk keseluruhan model lereng yang dipengaruhi perubahan elevasi muka air tanah, sedangkan grafik perbandingan antara tegangan geser pada tiap irisan dapat dilihat pada lampiran 2.



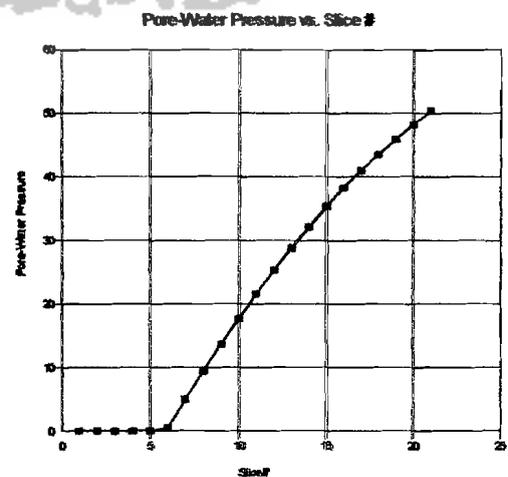
(a) MAT pada  $\pm 0.00$  m



(b) MAT pada - 1.00 m

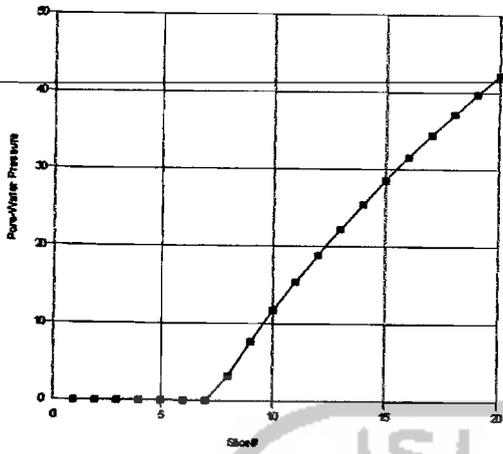


(c) MAT pada - 2.00 m



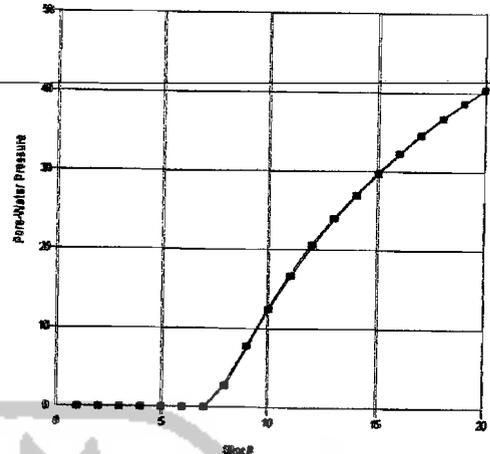
(d) MAT pada - 3.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #



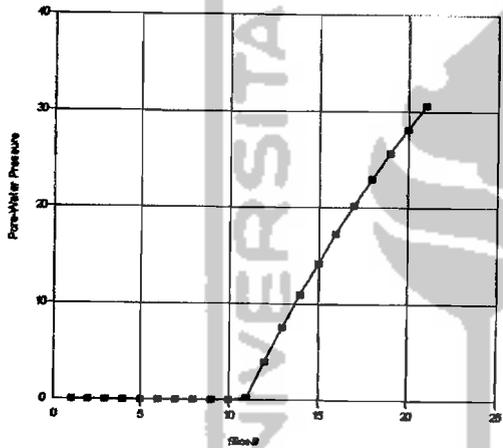
(e) MAT pada - 4.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #



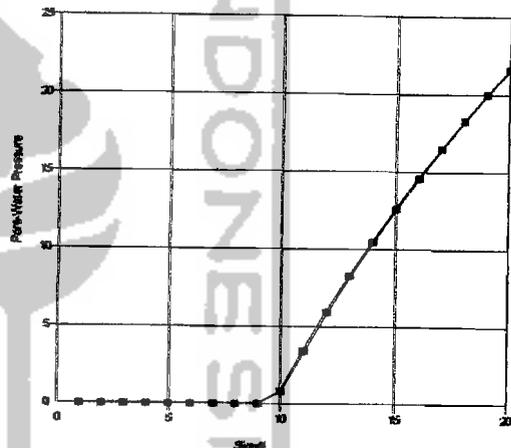
(f) MAT pada - 5.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #



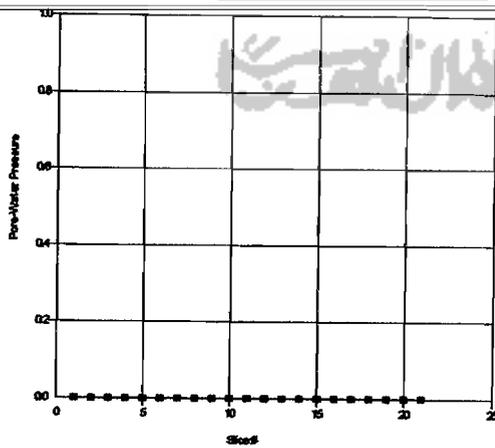
(g) MAT pada - 6.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #



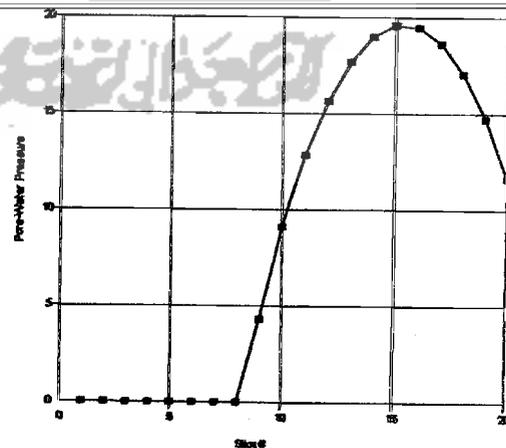
(h) MAT pada - 7.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #

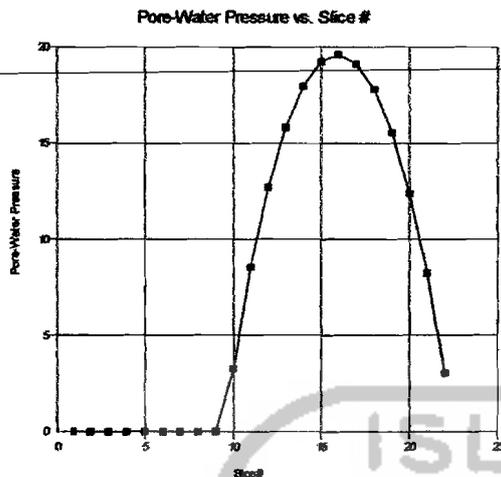


(i) MAT pada - 8.00 m

Pore-Water Pressure vs. Slice #



(j) MAT pada - 9.00 m

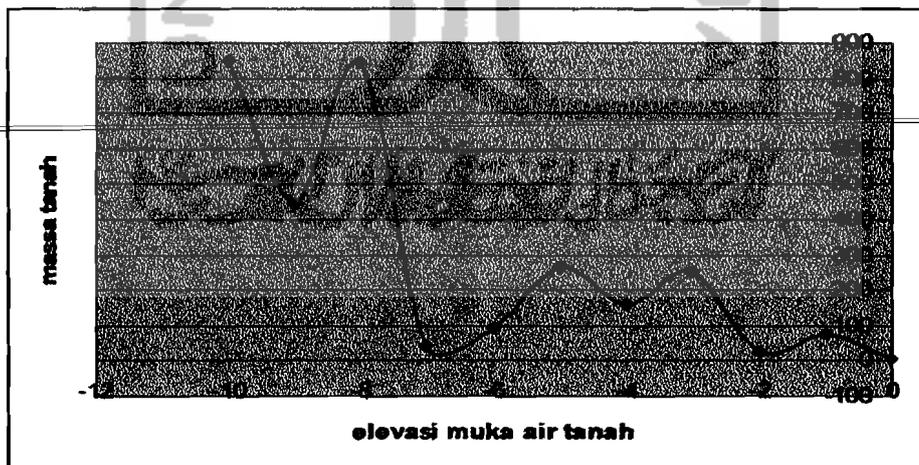


**Grafik 6.2.** Perbandingan tekanan air pori (*pore water pressure*) di setiap irisan pada model lereng dengan perubahan elevasi muka air tanah (dari +0.00 m hingga -10.00 m dari puncak lereng).

(k) MAT pada -10.00 m

Dari grafik di atas, dapat diketahui bahwa tekanan air pori konstan pada irisan yang berada di atas muka air tanah (tidak terpengaruh), sedangkan pada irisan yang berada di bawah muka air tanah, nilai tekanan air porinya akan terus naik.

Untuk pengaruh perubahan elevasi muka air tanah terhadap massa tanah dapat dilihat pada Grafik 6.3.



**Grafik 6.3.** Perbandingan massa tanah dengan elevasi muka air tanah

Berdasarkan analisis menggunakan program Geo-Slope, didapat gambar-gambar keruntuhan lereng dipengaruhi elevasi muka air tanah yaitu pada lampiran 2a

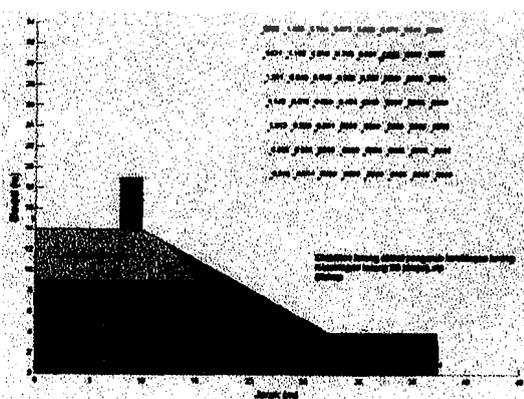
sampai dengan 2i. Pada gambar tersebut suatu lereng dikatakan aman atau stabil apabila kekuatan geser yang dimiliki lereng lebih besar dari gaya geser yang terjadi.

Pada lereng dengan elevasi muka air tanah pada -8 m, -9 m dan 10 m, posisi slip surface memotong bagian dasar ujung kaki lereng. Dengan kata lain, tanah di bawah tinggi (level) ujung kaki lereng tidak mampu memikul berat bahan yang ada di atasnya, maka keruntuhan terjadi di sepanjang permukaan yang terletak di bawah ujung kaki dari lereng, keruntuhan semacam ini disebut keruntuhan dasar (*base failure*), sedangkan keruntuhan sebagian (*slope failure*) terjadi ketika slip surface memotong lereng pada atau di atas ujung kaki lereng, seperti terlihat pada gambar lereng dengan elevasi muka air tanah pada +0 m, -1 m, -2 m, -3 m, -4 m, -5 m, -6 m dan -7 m.

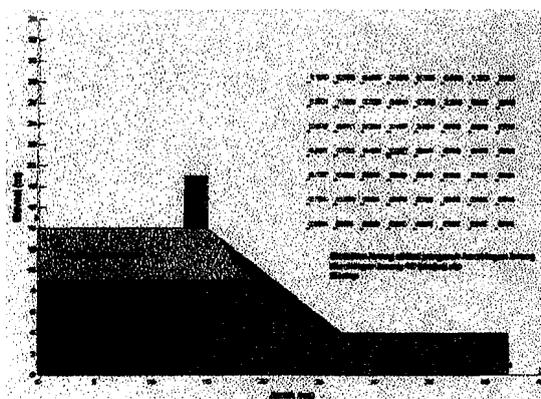
### 6.2.2. Analisis Hubungan Angka Keamanan terhadap Pengaruh Kemiringan Lereng ( $\beta$ )

Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kemiringan lereng terhadap angka keamanan, maka dilakukan pemodelan dengan variabel sudut kemiringan lereng.

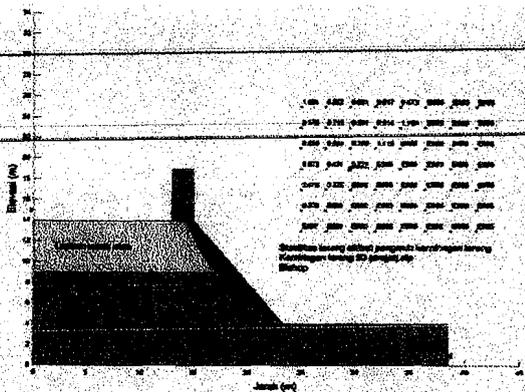
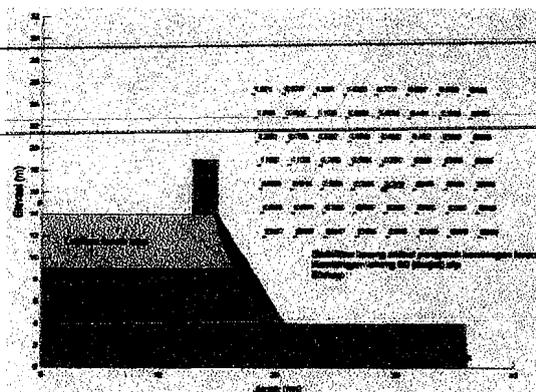
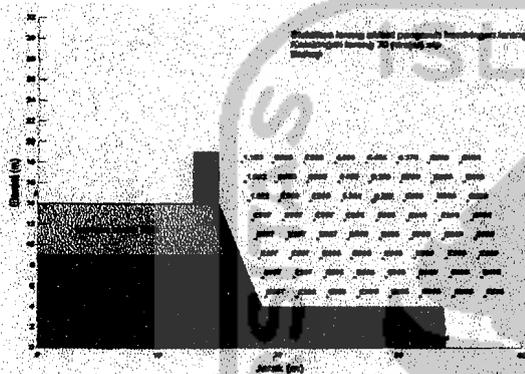
Hasil aplikasi dari program Geo-Slope yang berupa angka aman (*safety factor*) dan bidang longsor (*slip surface*) dapat dilihat pada Gambar 6.4 di bawah ini:



(a) Lereng dengan kemiringan  $30^{\circ}$



(b) Lereng dengan kemiringan  $40^{\circ}$

(c) Lereng dengan kemiringan  $50^{\circ}$ (d) Lereng dengan kemiringan  $60^{\circ}$ (e) Lereng dengan kemiringan  $70^{\circ}$ 

Gambar 6.4. Hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang dipengaruhi perubahan kemiringan ( $\beta = 30^{\circ}$  hingga  $\beta=70^{\circ}$ ).

Untuk lebih jelasnya, hasil dari analisis menggunakan Geo-Slope dapat dilihat pada gambar-gambar di lampiran 3, sedangkan dari gambar di atas didapatkan nilai angka aman, jenis keruntuhan dan dimensi bidang longsor yang ditabalkan pada Tabel 6.2 di bawah ini.

Tabel 6.2. Perubahan *safety factor* dan Dimensi *Slip Surface* akibat pengaruh kemiringan lereng ( $\beta$ ).

Kemiringan ( $^{\circ}$ )	<i>safety factor</i>	Jenis keruntuhan	Dimensi <i>Slip Surface</i>
			Lebar x pjg lengkung longsor
30	0.265	Keruntuhan sebagian	0 x 16.6656
40	0.227	Keruntuhan sebagian	0 x 12.8456
50	0.221	Keruntuhan sebagian	0.62758 x 13.36904
60	0.210	Keruntuhan sebagian	0.18976 x 10.8235
70	0.209	Keruntuhan sebagian	0.4255 x 9.72623

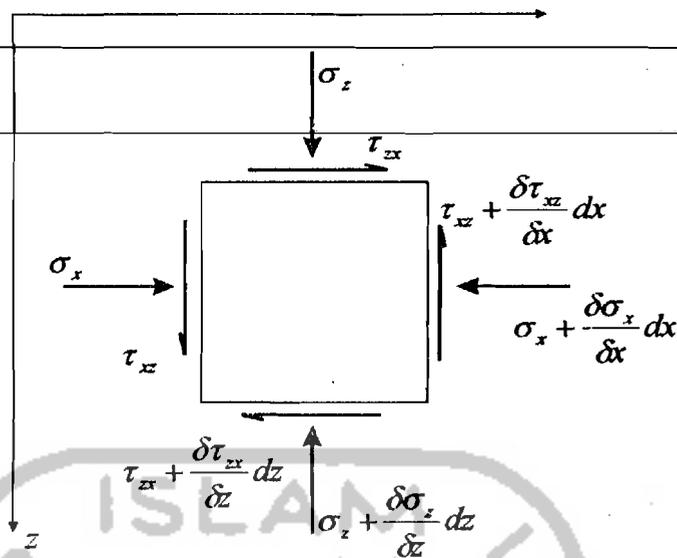
Walaupun panjang lengkung bidang longsor cenderung lebih panjang, namun pada lereng dengan kemiringan 30° dan 40° masyarakat akan aman jika mendirikan bangunan di puncak lereng, dikarenakan bidang longsor yang tidak menyentuh puncak lereng dan angka aman yang cenderung lebih besar, sedangkan pada lereng dengan kemiringan 50°, 60° dan 70°, adalah berbahaya jika mendirikan bangunan di puncak lereng karena dapat terbawa longsor.

a. Tegangan Normal ( $\sigma_n$ )

Tegangan dan perpindahan pada massa tanah dapat diakibatkan oleh adanya pembebanan. Banyak persoalan dapat diselesaikan dengan analisis dalam dua dimensi, yaitu hanya tegangan dan perpindahan dalam satu bidang yang diperhitungkan. Tegangan normal total dan tegangan geser pada arah  $x$  dan  $z$  pada suatu elemen tanah diilustrasikan pada Gambar 6.5, di mana tegangan-tegangan mempunyai tanda positif sesuai dengan arah sumbu  $x$  dan  $z$ . Besarnya tegangan-tegangan tersebut berbeda pada setiap potongan. Besarnya perubahan tegangan normal pada sumbu  $x$  dan  $z$  berturut-turut adalah  $\delta\sigma_x/\delta x$  dan  $\delta\sigma_z/\delta z$ ; besarnya perubahan tegangan gesernya adalah  $\delta\tau_{xz}/\delta x$  dan  $\delta\tau_{zx}/\delta z$ . Setiap elemen dari suatu massa tanah harus dalam keadaan keseimbangan statis. Dengan menyamakan momen-momen terhadap titik pusat elemen, dan mengabaikan diferensiasi orde tinggi, didapatkan bahwa  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ . Dengan menyamakan gaya-gaya pada arah  $x$  dan  $z$ , didapatkan persamaan-persamaan berikut:

$$\frac{\delta\sigma_x}{\delta x} + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta z} - X = 0 \quad (6.9a)$$

$$\frac{\delta\tau_{xz}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_z}{\delta z} - Z = 0 \quad (6.9b)$$



Gambar 6.5. Keadaan tegangan dua-dimensi pada suatu elemen (Craig, 1989).

Untuk tegangan pada setiap titik pada bidang longsor, dengan muka air tanah pada permukaan adalah:

$$\sigma = \gamma_{sat} z \cos^2 \beta \quad (6.10)$$

dengan  $z$  adalah tinggi bidang longsor dan  $\beta$  adalah kemiringan lereng.

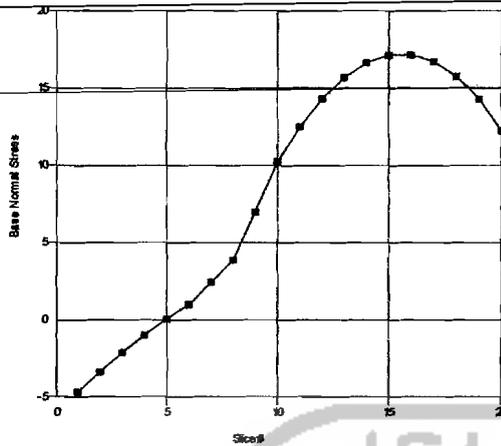
Sedangkan untuk tegangan normal pada dasar tiap irisan adalah:

$$\sigma_n = \frac{N}{B} \quad (6.11)$$

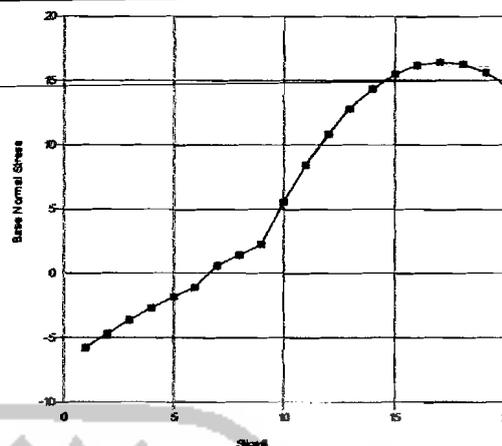
dengan  $N$  = gaya normal total pada dasar irisan, dan  $B$  = lebar dasar irisan.

Di bawah ini adalah grafik perbandingan tegangan normal pada dasar yang terjadi pada setiap irisan untuk keseluruhan model lereng yang dipengaruhi perubahan kemiringan lereng ( $\beta$ ), sedangkan grafik perbandingan antara tegangan geser pada tiap irisan dapat dilihat pada lampiran 3.

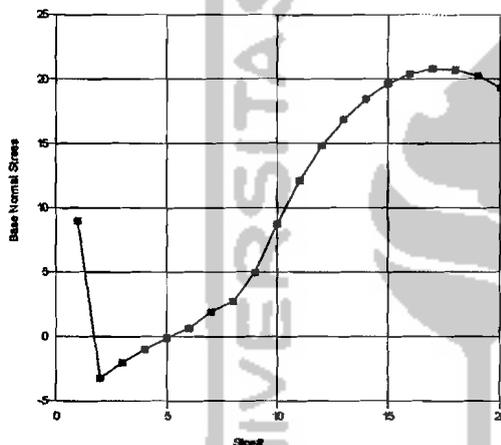
Base Normal Stress vs. Slice #

(a) Lereng dengan kemiringan  $30^{\circ}$ 

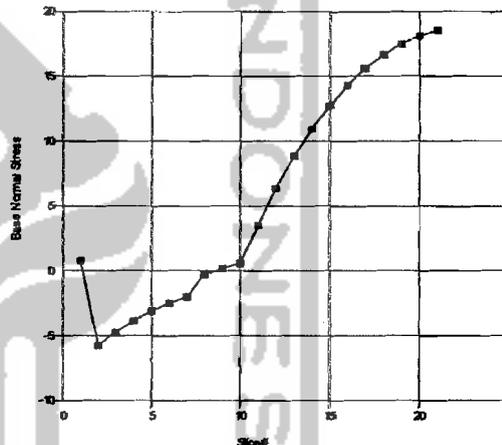
Base Normal Stress vs. Slice #

(b) Lereng dengan kemiringan  $40^{\circ}$ 

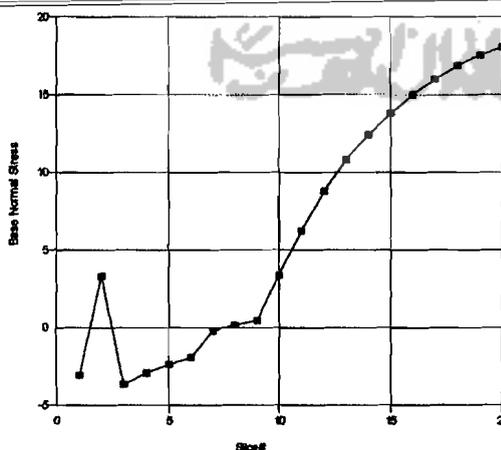
Base Normal Stress vs. Slice #

(c) Lereng dengan kemiringan  $50^{\circ}$ 

Base Normal Stress vs. Slice #

(d) Lereng dengan kemiringan  $60^{\circ}$ 

Base Normal Stress vs. Slice #

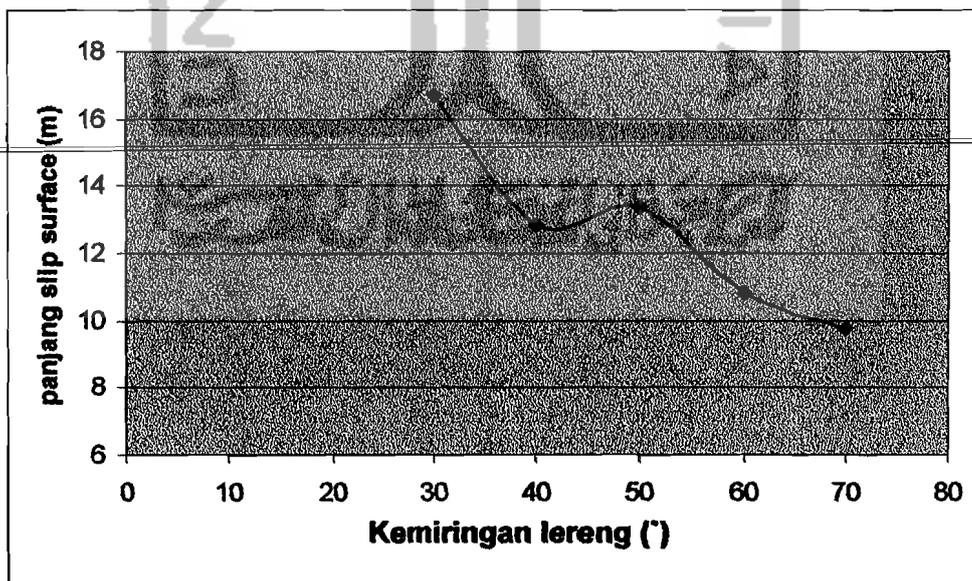
(e) Lereng dengan kemiringan  $70^{\circ}$ 

Grafik 6.4. Perbandingan tegangan normal pada dasar (*Base normal stress*) tiap irisan pada model lereng dengan perubahan kemiringan lereng ( $\beta=30^{\circ}$  hingga  $\beta=70^{\circ}$ ).

Dari grafik di atas, diketahui bahwa besarnya tegangan normal pada dasar irisan terus naik. Namun nilai tegangan normal akan jauh lebih besar jika irisan tersebut dipengaruhi beban di atasnya.

Pada Grafik 5.2, dapat dilihat bahwa angka keamanan (*safety factor*) menurun dengan bertambahnya sudut kemiringan lereng, dan juga dipengaruhi oleh bidang longsor yang tidak sampai bagian atas lereng, sehingga beban yang bekerja di puncak lereng tidak berpengaruh, dan juga dikarenakan semakin besar sudut kemiringan lereng (lereng semakin curam) maka *slip surface* semakin pendek, hal ini menyebabkan tahanan gesek (*friction*) menjadi berkurang, sehingga lereng menjadi tidak stabil, sebaliknya pada lereng yang memiliki sudut kemiringan kecil (landai) *slip surface* semakin panjang maka tahanan gesek (*friction*) besar, sehingga lereng cenderung stabil.

Perubahan panjang *slip surface* akibat pengaruh kemiringan dapat dilihat pada Grafik 6.5 berikut ini.



Grafik 6.5. Perbandingan kemiringan lereng dengan panjang *slip surface*

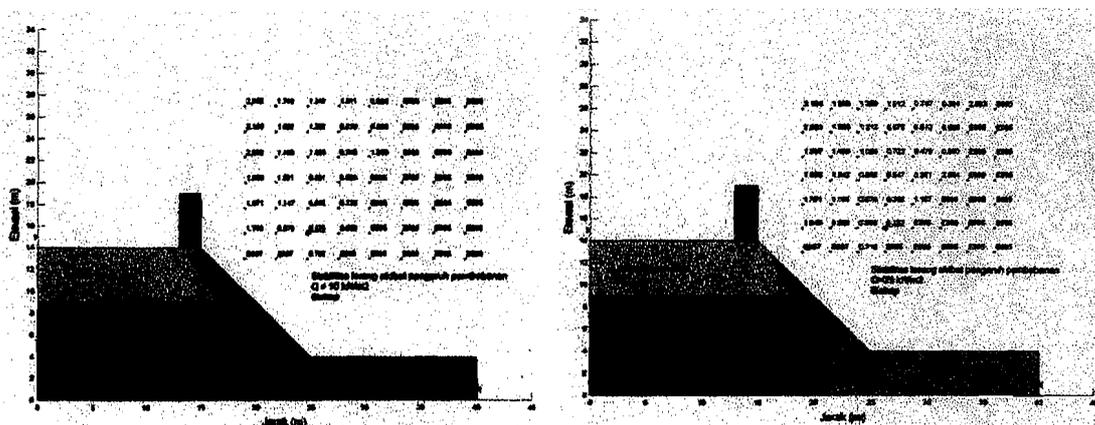
Dari Grafik 6.5 dapat dilihat bahwa semakin besar sudut kemiringan, panjang permukaan bidang runtuh (*slip surface*) akan menjadi semakin pendek, akibatnya tahanan geseknya semakin kecil pula.

Dari penelitian yang pernah dilakukan ditemukan bahwa kemiringan 1:1,5 adalah kemiringan yang dapat dikatakan aman. Namun kemiringan ini tidak berlaku untuk tanah pasir ( $c = 0$ ).

### 6.2.3. Analisis Hubungan Angka Keamanan terhadap Pengaruh Pembebanan

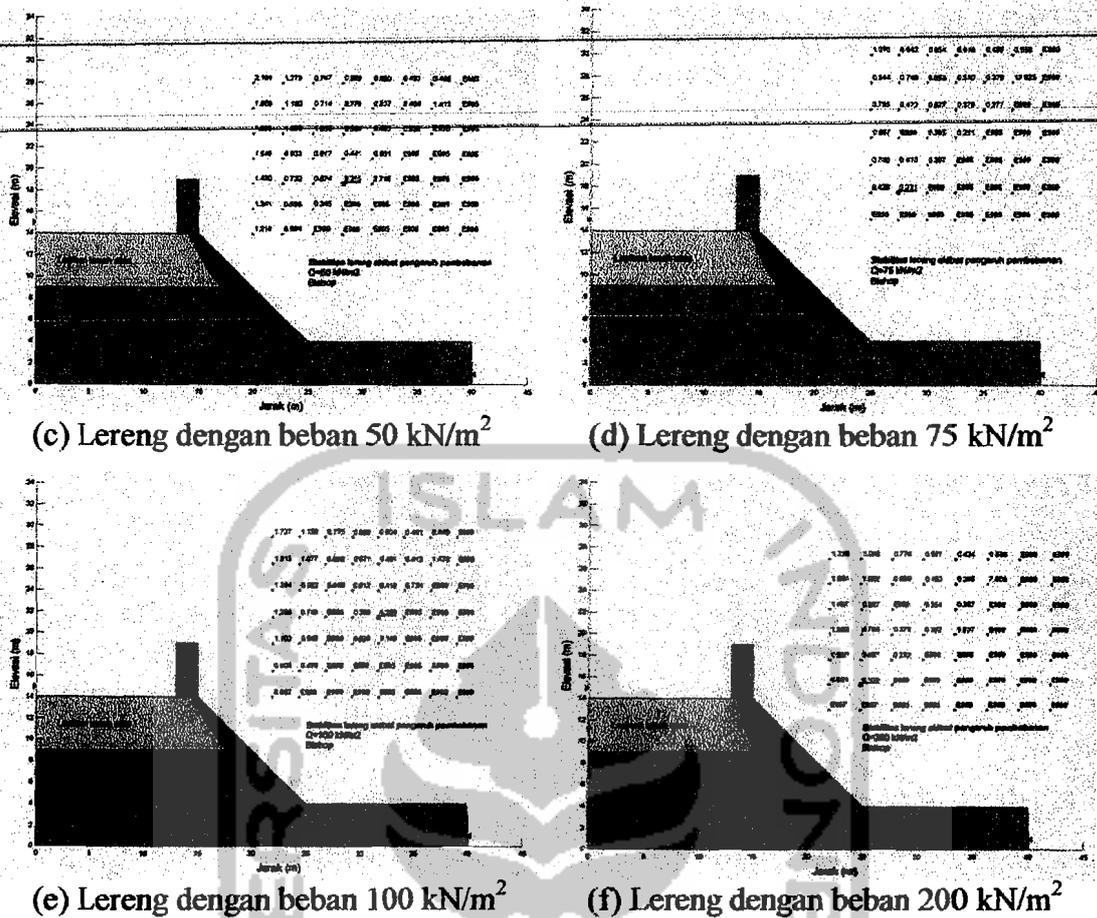
Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pembebanan pada lereng terhadap angka keamanan, maka penulis melakukan pemodelan dengan variabel beban. Beban dikerjakan mulai dari  $10 \text{ kN/m}^2$ ,  $25 \text{ kN/m}^2$ ,  $50 \text{ kN/m}^2$ ,  $75 \text{ kN/m}^2$ ,  $100 \text{ kN/m}^2$  dan  $200 \text{ kN/m}^2$  terhadap model lereng yang sama untuk mengetahui pengaruhnya pada stabilitas lereng dan kemudian ditambah dengan variasi beban titik (P) sebesar 1 kPa, 1,5 kPa, 2 kPa, 2,5 kPa dan 3 kPa pada jarak 0,5 m, 1 m dan 1,5 m dari tepi lereng.

Hasil aplikasi dari program Geo-Slope yang berupa angka aman (*safety factor*) dan bidang longsor (*slip surface*) pada lereng yang dipengaruhi perubahan beban terbagi rata saja dapat dilihat pada Gambar 6.6 di bawah ini:



(a) Lereng dengan beban  $10 \text{ kN/m}^2$

(b) Lereng dengan beban  $25 \text{ kN/m}^2$



**Gambar 6.6.** Hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang dipengaruhi perubahan beban terbagi rata saja ( $Q = 10 \text{ kN/m}^2$  hingga  $Q = 200 \text{ kN/m}^2$ ).

Untuk lebih jelasnya, hasil dari analisis menggunakan Geo-Slope dapat dilihat

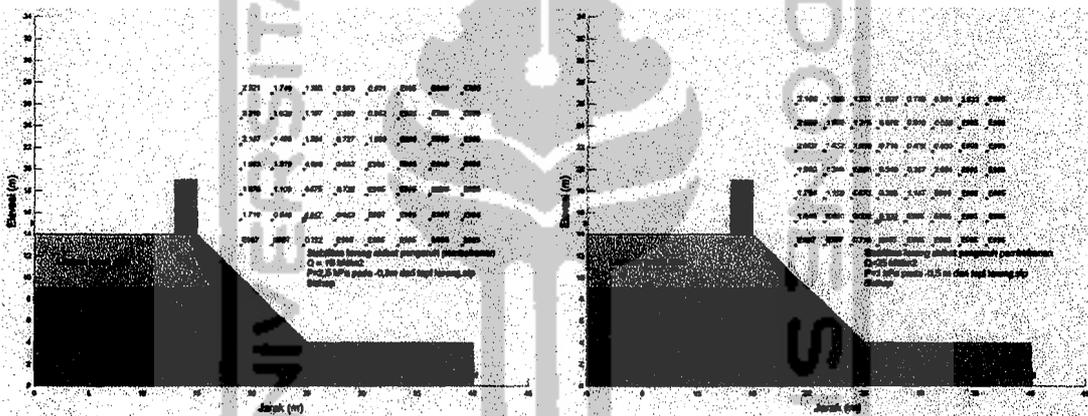
pada gambar-gambar di lampiran 4, sedangkan dari gambar di atas didapatkan nilai angka aman, jenis keruntuhan dan dimensi bidang longsor yang ditabelkan pada Tabel 6.3 di bawah ini.

**Tabel 6.3.** Perubahan *safety factor* dan Dimensi *Slip Surface* akibat pengaruh perubahan beban terbagi rata ( $Q$ ) saja.

Beban ( $\text{kN/m}^2$ )	<i>safety factor</i>	Jenis keruntuhan	Dimensi <i>Slip Surface</i>
			Lebar x pig lengkung longsor
10	0.576	Keruntuhan sebagian	0.52266 x 14.1458
25	0.330	Keruntuhan sebagian	0 x 11.155
50	0.315	Keruntuhan sebagian	0.76158 x 14.6608
75	0.231	Keruntuhan kaki	0.727 x 15.3739
100	0.200	Keruntuhan kaki	0.45065 x 14.8171
200	0.189	Keruntuhan kaki	1.42962 x 17.3562

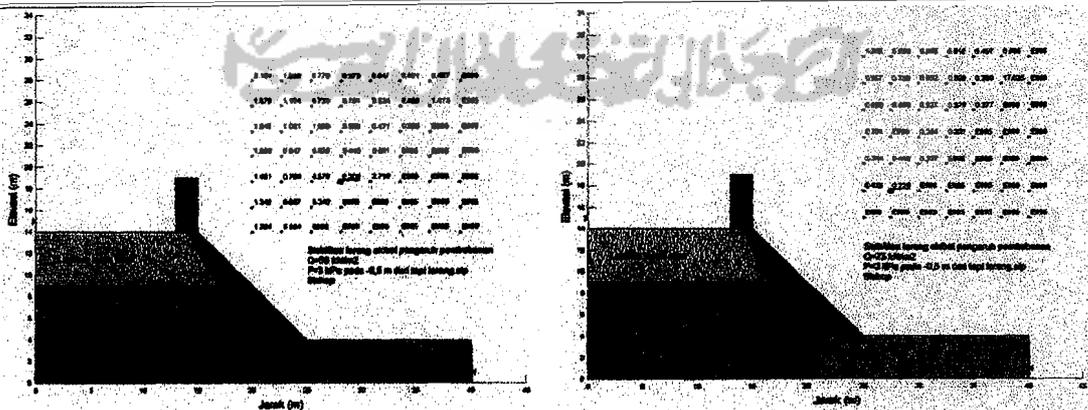
Dari tabel di atas diketahui bahwa tidak aman jika mendirikan suatu bangunan di puncak – tepi lereng. Dikarenakan bidang longsor yang mencapai 1,5 m dari tepi lereng. Namun akan aman jika bangunan tersebut berupa beban terbagi rata dengan lebar yang besar, sehingga titik berat bangunan berada di luar daerah bidang longsor.

Untuk hasil aplikasi dari program Geo-Slope yang berupa angka aman (*safety factor*) dan bidang longsor (*slip surface*) pada lereng yang selain dipengaruhi perubahan beban terbagi rata juga dipengaruhi perubahan beban titik dapat dilihat pada Gambar 6.7 di bawah ini:



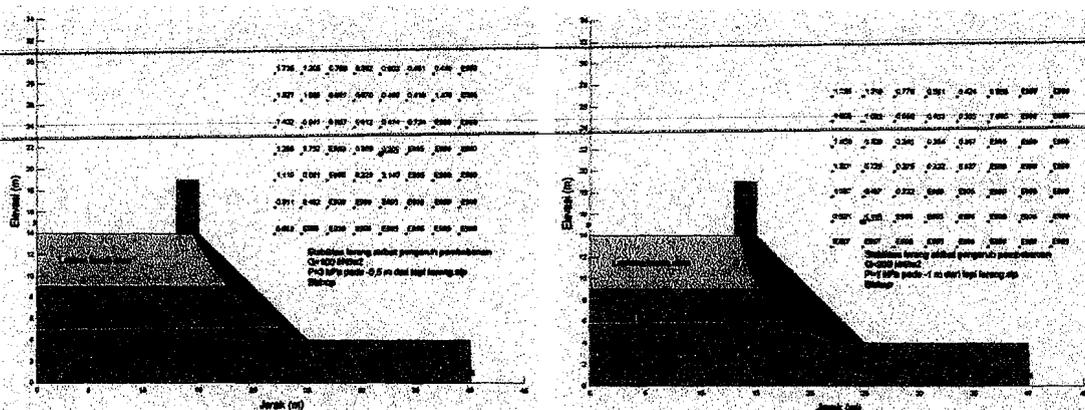
(a) Lereng dengan  $Q=10 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 2,5 \text{ kPa}$  pada 0,5m dari tepi lereng

(b) Lereng dengan  $Q=25 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 1 \text{ kPa}$  pada 0,5m dari tepi lereng



(c) Lereng dengan  $Q=50 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 3 \text{ kPa}$  pada 0,5m dari tepi lereng

(d) Lereng dengan  $Q=75 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 3 \text{ kPa}$  pada 0,5m dari tepi lereng



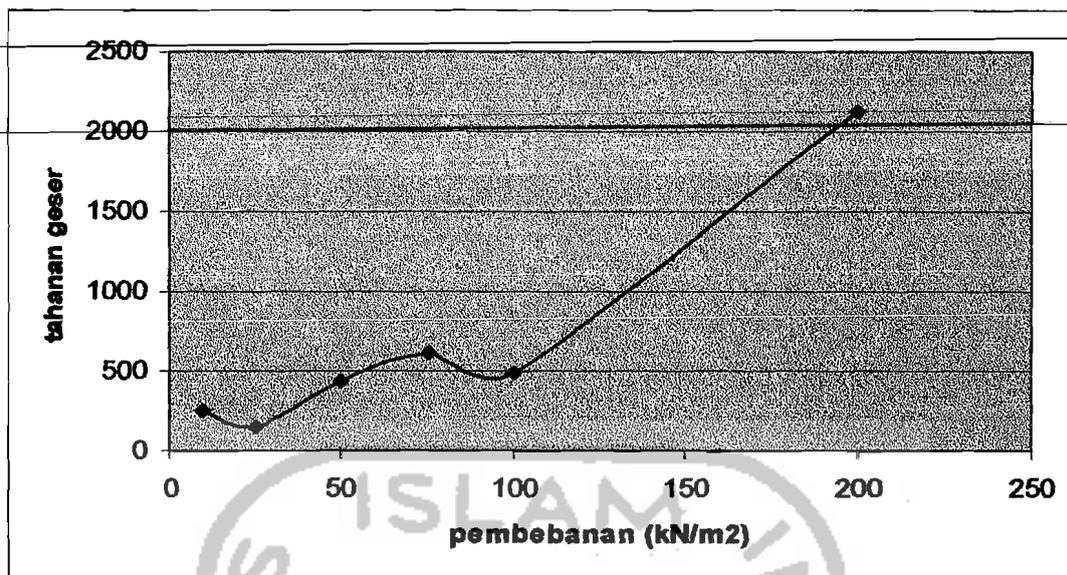
(e) Lereng dengan  $Q=100 \text{ kN/m}^2$  dan  $P=3 \text{ kPa}$  pada  $0,5 \text{ m}$  dari tepi lereng

(f) Lereng dengan  $Q=200 \text{ kN/m}^2$  dan  $P=1 \text{ kPa}$  pada  $1 \text{ m}$  dari tepi lereng

**Gambar 6.7.** Sebagian hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang dipengaruhi perubahan beban terbagi rata dan beban titik.

Untuk keseluruhan hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang dipengaruhi perubahan beban terbagi rata dan beban titik dapat dilihat pada lampiran 4. Dari Gambar 6.7 di atas juga secara keseluruhan nilai angka amannya di tabelkan pada Tabel 5.4.

Pada Grafik 5.3 dapat dilihat bahwa angka keamanan (SF) cenderung menurun seiring bertambahnya beban. Bila tanah mengalami tekanan yang diakibatkan oleh beban, maka angka pori tanah akan berkurang, selain itu tekanan akibat beban juga dapat mengakibatkan perubahan sifat mekanik tanah, seperti menambah tahanan geser tanah. Pertambahan tahanan geser tanah akibat pengaruh beban dapat dilihat pada Grafik 6.6 di bawah ini.



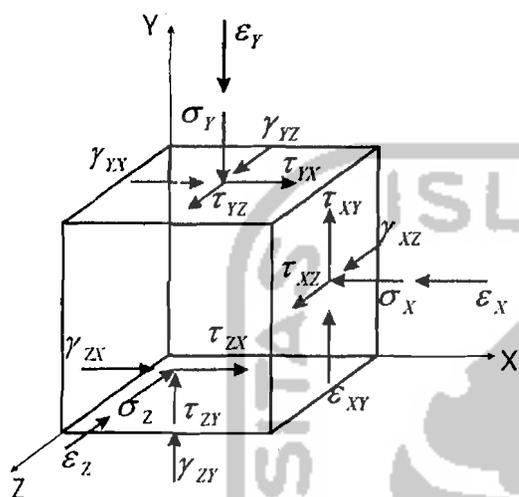
**Grafik 6.6.** Perbandingan antara besarnya pembebanan dengan tahanan geser

Pada Grafik 6.6 di atas, tahanan geser tanah cenderung bertambah jika beban yang bekerja pada lereng tanah diperbesar. Angka keamanan (*safety factor*) merupakan perbandingan antara kuat geser (*shear strength*) yang dimiliki tanah dengan tegangan geser (*shear stress*) yang bekerja pada tanah tersebut. Apabila tegangan geser yang terjadi lebih besar dari kuat geser yang dimiliki tanah/lereng, maka lereng tersebut akan runtuh (*failure*).

a. Tegangan dan Regangan umum pada sebuah titik

Gambar 6.8 memperlihatkan tegangan-tegangan pada elemen berbeda dengan enam sisi di dalam suatu massa tanah. Sedangkan pada Gambar 6.9 memperlihatkan orientasi dari elemen pada Gambar 6.8 sedemikian sehingga tidak ada timbul tegangan-tegangan geser pada sisi-sisi elemen. Orientasi ini menghasilkan sumbu-sumbu utama dan tegangan-tegangan normal pada bagian depan yang merupakan *tegangan-tegangan utama*; dengan analogi terdapat pula kumpulan sumbu-sumbu utama untuk *regangan-regangan utama*.

Diperlihatkan pada Gambar 6.9a keadaan tegangan tekan secara umum yang ada di dalam tanah sebelum bekerjanya beban pada tanah yang mengakibatkan pertambahan dalam tegangan  $\Delta\sigma_i$ . Sebaliknya Gambar 6.9b menunjukkan keadaan tegangan setelah mengalami pertambahan tegangan  $\Delta\sigma_i$ .



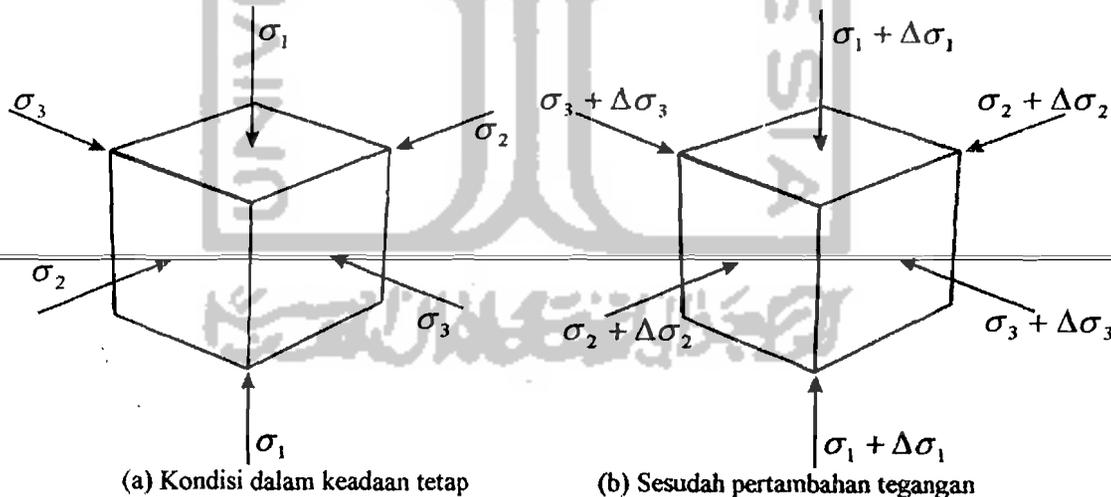
Subskripsi umum :

$\Gamma_{xy}, \Gamma_{xz}$  = tegangan geser atau regangan geser yang normal pada sumbu x dan berarah ke sumbu z.

$\Gamma_{yx}$  = tegangan geser yang normal terhadap sumbu y dan berarah ke sumbu x.

$\sigma_{x,cx}$  = tegangan atau regangan normal yang sejajar dengan sumbu x

**Gambar 6.8.** Tegangan dan regangan pada elemen tanah dengan sumbu koordinat yang diperlihatkan sesuai dengan apa yang dikehendaki (Bowles, 1986)



**Gambar 6.9.** Elemen tanah yang mengalami pertambahan tegangan utama (Bowles, 1986)

Biasanya kita ingin mengetahui deformasi akibat bekerjanya pertambahan tegangan ini. Deformasi berhubungan dengan regangan sebagai:

$$\text{Deformasi } \delta = \int_0^M \epsilon \, dM \tag{6.12}$$

di mana  $M$  dapat berupa suatu panjang atau volume dengan  $\varepsilon$  merupakan regangan linier atau regangan volumetric yang berkaitan dengan itu.

Regangan dihasilkan dari suatu tegangan yang didefinisikan sebagai:

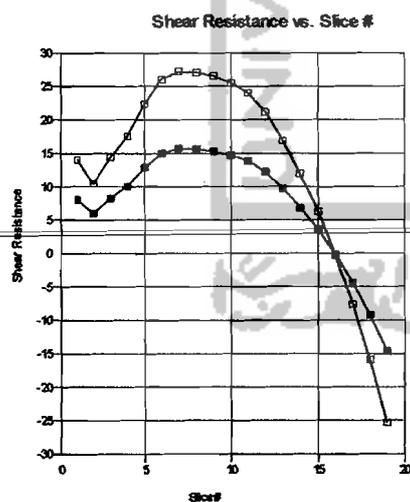
$$\sigma = \frac{\text{Gaya}}{\text{Luas}} \quad (6.13)$$

sedangkan rumus kuat geser tanah adalah:

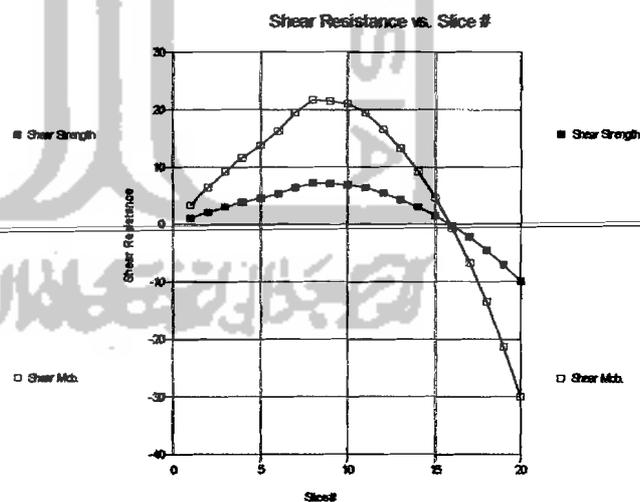
$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (6.14)$$

dengan  $c'$  = kohesi efektif,  $\phi'$  = sudut gesek dalam efektif,  $\sigma_n$  = tegangan normal total dan  $u$  = tekanan air pori.

Di bawah ini adalah grafik perbandingan tegangan geser yang terjadi pada setiap irisan untuk keseluruhan model lereng yang dipengaruhi perubahan beban terbagi rata ( $Q$ ). Sedangkan untuk grafik yang juga dipengaruhi oleh beban titik dapat dilihat pada lampiran 4.

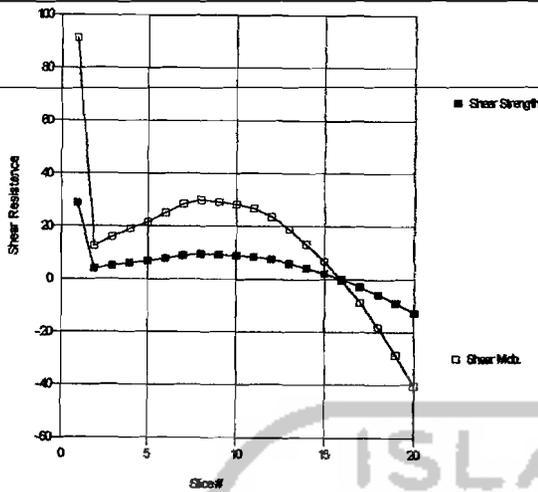


(a) Lereng dengan  $Q = 10 \text{ kN/m}^2$



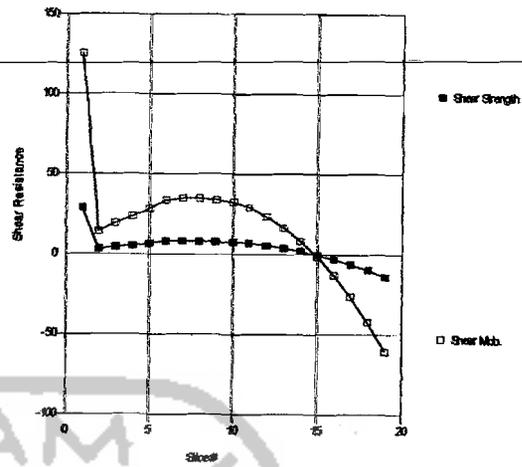
(b) Lereng dengan  $Q = 25 \text{ kN/m}^2$

Shear Resistance vs. Slice #



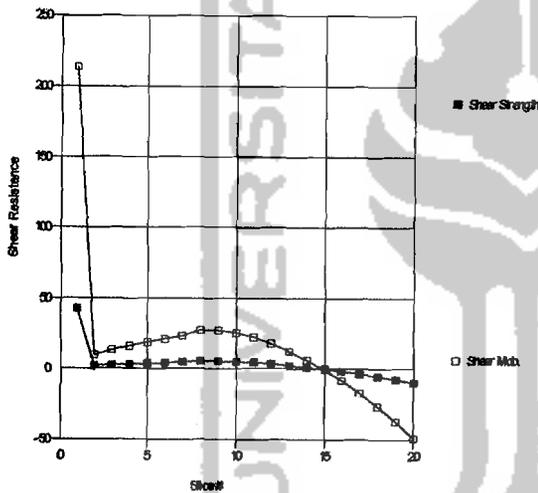
(c) Lereng dengan  $Q = 50 \text{ kN/m}^2$

Shear Resistance vs. Slice #



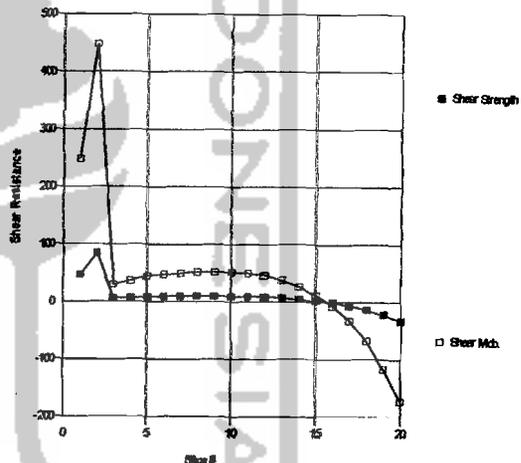
(d) Lereng dengan  $Q = 75 \text{ kN/m}^2$

Shear Resistance vs. Slice #



(e) Lereng dengan  $Q = 100 \text{ kN/m}^2$

Shear Resistance vs. Slice #



(f) Lereng dengan  $Q = 200 \text{ kN/m}^2$

—■— : Shear Strength

—□— : Shear Mob.

**Grafik 6.7.** Perbandingan tegangan geser tiap irisan pada model lereng dengan perubahan beban terbagi rata ( $Q = 10 \text{ kN/m}^2$  hingga  $Q = 200 \text{ kN/m}^2$ ).

### 6.3 Solusi

Sebagian besar model lereng di atas mempunyai angka aman yang kecil ( $SF < 1$ ), sehingga diperlukan cara-cara perbaikan stabilitas pada lereng tersebut sebagai usaha untuk meningkatkan angka aman. Usaha perbaikan stabilitas lereng dilakukan berdasarkan jenis keruntuhannya. Di bawah ini adalah sedikit penjelasan tentang metode perbaikan stabilitas lereng yang akan dilakukan:

1. Keruntuhan sebagian: metode perbaikannya adalah dengan metode geometri, yaitu dengan cara membuat *berm*. Metode pembuatan *berm* adalah sama seperti pembuatan terasering, dengan cara memotong lereng menjadi berundak.
2. Keruntuhan kaki: metode yang dilakukan adalah metode mekanis, pada kasus ini dilakukan dengan cara menanamkan perkuatan angkur secara horizontal atau diagonal ke dalam badan lereng.
3. Keruntuhan dasar: metode yang dilakukan adalah metode mekanis, dengan cara menanamkan tiang-tiang pancang secara vertikal pada bagian dasar lereng.

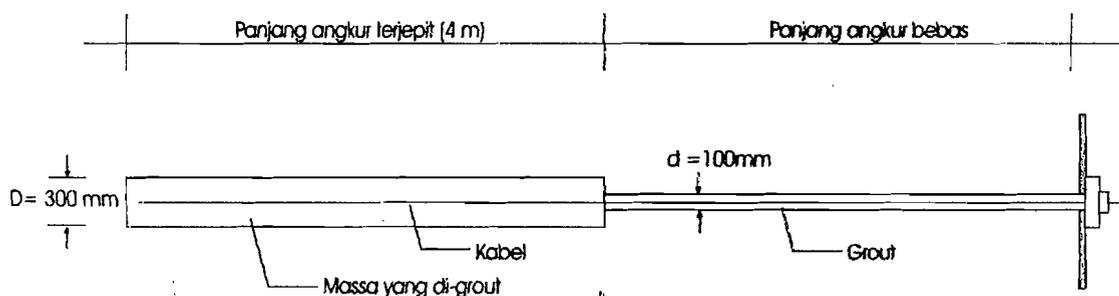
Pada bagian ini yang akan dianalisis adalah perbaikan menggunakan perkuatan angkur saja, yaitu perkuatan yang dilakukan pada lereng dengan keruntuhan yang mencapai kaki lereng (*toe*).

Analisis dilakukan dengan cara menambahkan angkur pada semua model lereng di atas. Angkur yang digunakan adalah angkur dengan tahanan ultimit tiap angkur ( $Q_f$ ) = 300 kN/m<sup>2</sup>, sehingga terjadi perubahan pada angka aman (*Safety factor*) dan bidang longsor (*Slip Surface*). Nilai  $Q_f$  didapat dari rumus:

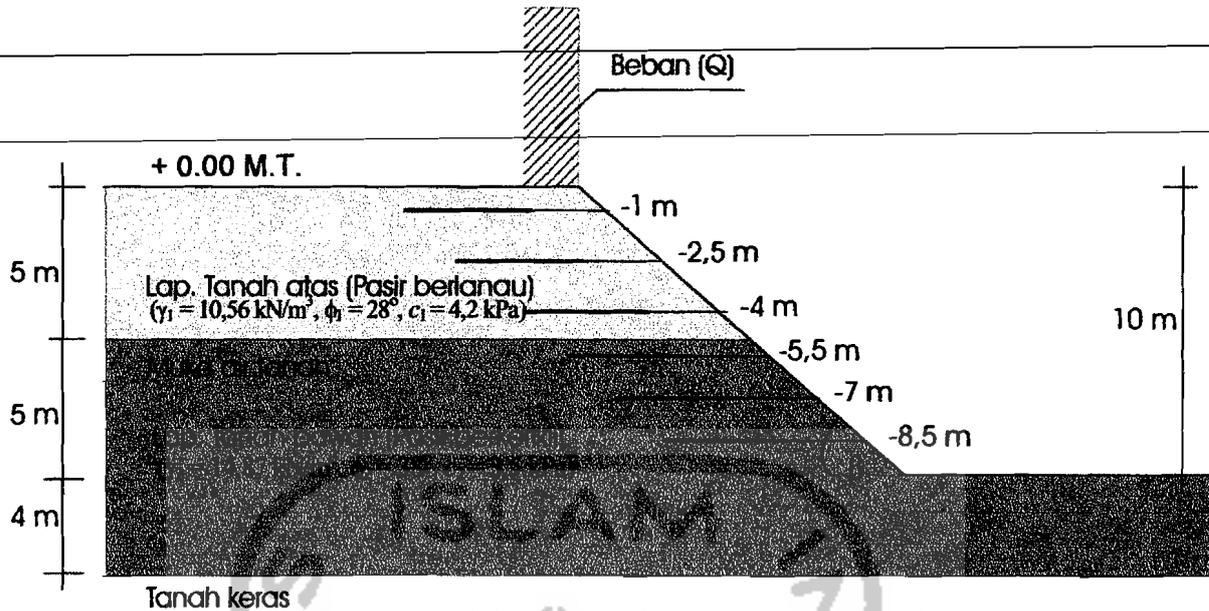
$$Q_f = A\gamma' \left( h + \frac{L}{2} \right) \pi D L \tan \phi' + B\gamma' h \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (6.15)$$

Rumus diatas adalah untuk tanah berpasir, dengan  $Q_r$  = kapasitas beban ultimit angkur,  $A$  = rasio tekanan normal pada daerah pertemuan terhadap tekanan efektif akibat tanah diatasnya (diusulkan antara 1 – 2) (diambil = 1,5),  $B$  = faktor daya dukung yang merupakan analog dari faktor daya dukung  $N_q$  dalam kasus tiang pancang diusulkan bahwa rasio  $N_q/B$  antara 1,3 - 1,4 (dari Berezantzev, Khristoforov, dan Golubkov dengan  $\phi = 38^\circ$  didapat  $N_q = 89$ , sehingga nilai  $B = 63,87$ ),  $h$  = kedalaman lapisan tanah diatas angkur (diambil 1,5 m),  $L$  = panjang angkur terjepit (4 m),  $d$  = diameter lubang bor (sekitar 75 – 125 mm, diambil 100 mm),  $D$  = diameter angkur terjepit (mencapai 4 kali dari lubang bor, dipakai  $3d = 300$  mm), sedangkan properties tanah ( $\phi$  dan  $\gamma$ ) digunakan yang terbesar, dan untuk panjang angkur bebas disesuaikan dengan lebar bidang keruntuhan.

Angkur yang digunakan adalah berupa kabel yang kemudian disebut tendon, di mana salah satu ujungnya ditanamkan dengan kuat pada suatu massa adukan semen atau tanah yang diberi adukan semen (digROUT). Adukan semen dimasukan kedalam tanah dengan cara disuntikan melewati lubang bor, penyuntikan dilakukan dengan tekanan tertentu pada seluruh panjang angkur terjepit sambil mencabut selubung lubang bor. Jenis angkur yang digunakan diilustrasikan pada Gambar 6.10. sedangkan pemodelan lereng dengan perkuatan angkur diilustrasikan pada Gambar 6.11.



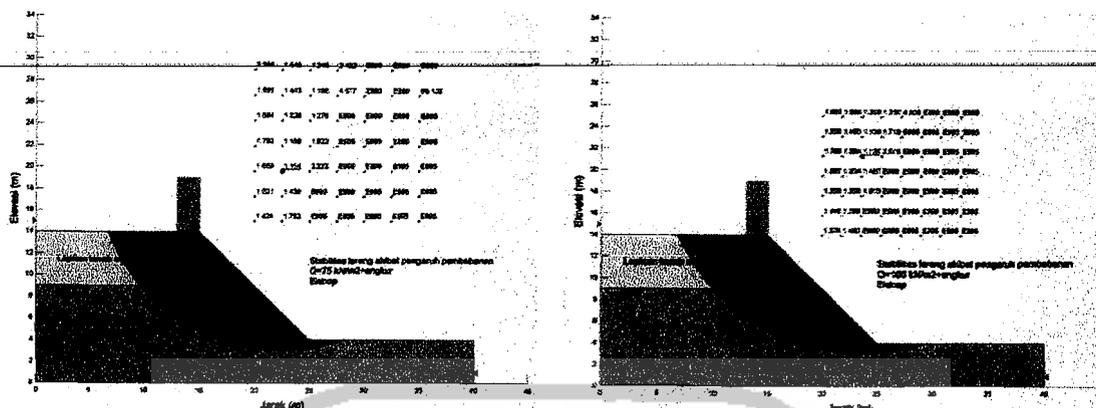
**Gambar 6.10.** Jenis dan dimensi angkur



Gambar 6.11. Pemodelan lereng dengan perkuatan angkur

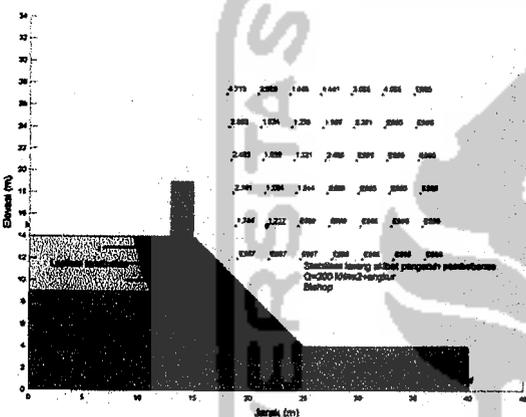
Jumlah angkur yang digunakan disesuaikan hingga mencapai  $SF > 1,00$ , pada kasus lereng dengan besarnya beban terbagi rata ( $Q$ ) =  $100 \text{ kN/m}^2$  dan  $200 \text{ kN/m}^2$  digunakan jumlah angkur sebanyak 6 buah, sedangkan pada lereng dengan  $Q = 75 \text{ kN/m}^2$  jumlah angkur yang digunakan adalah sebanyak 5 buah, dikarenakan cukup dapat meningkatkan angka aman hingga  $> 1,00$ . yang membedakan untuk setiap model lereng adalah panjang angkur bebas, karena disesuaikan dengan lebar bidang kelongsoran (*slip surface*).

Sebagian hasil aplikasi dari program Geo-Slope yang berupa angka aman (*safety factor*) dan bidang longsor (*slip surface*) pada lereng yang selain dipengaruhi perubahan beban terbagi rata juga dipengaruhi perubahan beban titik dapat dilihat pada Gambar 6.12. Untuk lebih lengkapnya hasil analisis menggunakan Geo-Slope dapat dilihat pada lampiran 5.



(a) Lereng dengan  $Q= 75 \text{ kN/m}^2$

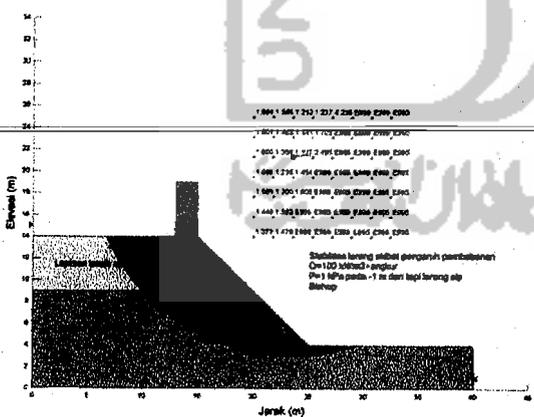
(b) Lereng dengan  $Q= 100 \text{ kN/m}^2$



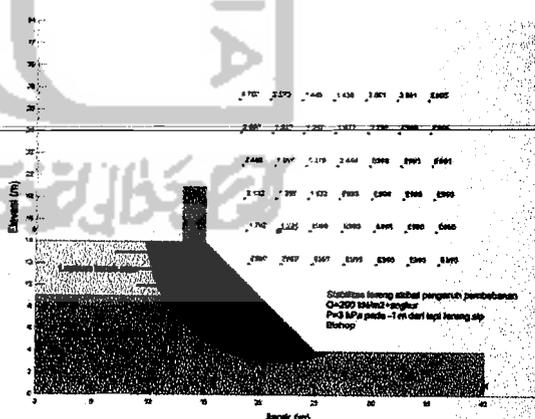
(c) Lereng dengan  $Q= 200 \text{ kN/m}^2$



(d) Lereng dengan  $Q= 75 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 1 \text{ kPa}$  pada 0,5 m dari tepi lereng



(e) Lereng dengan  $Q= 100 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 1 \text{ kPa}$  pada 1m dari tepi lereng



(f) Lereng dengan  $Q= 200 \text{ kN/m}^2$  dan  $P= 3 \text{ kPa}$  pada 1m dari tepi lereng

**Gambar 6.12.** Sebagian hasil analisis menggunakan Geo-Slope pada lereng yang diperkuat dengan angkur

Dari gambar di atas juga besarnya perubahan angka aman dengan penggunaan angkur dapat dilihat pada Tabel 6.4.

**Tabel 6.4.** Persentase Perubahan *safety factor* akibat pengaruh penggunaan angkur ( $\beta = 45^\circ$ ) pada lereng dengan perubahan beban terbagi rata saja.

Model lereng	Safety factor		% kenaikan angka aman
	Tanpa angkur	Dengan angkur	
Beban ( $\text{kN/m}^2$ )			
75	0.231	1.164	403.8961
100	0.200	1.128	464
200	0.189	1.232	551.8519

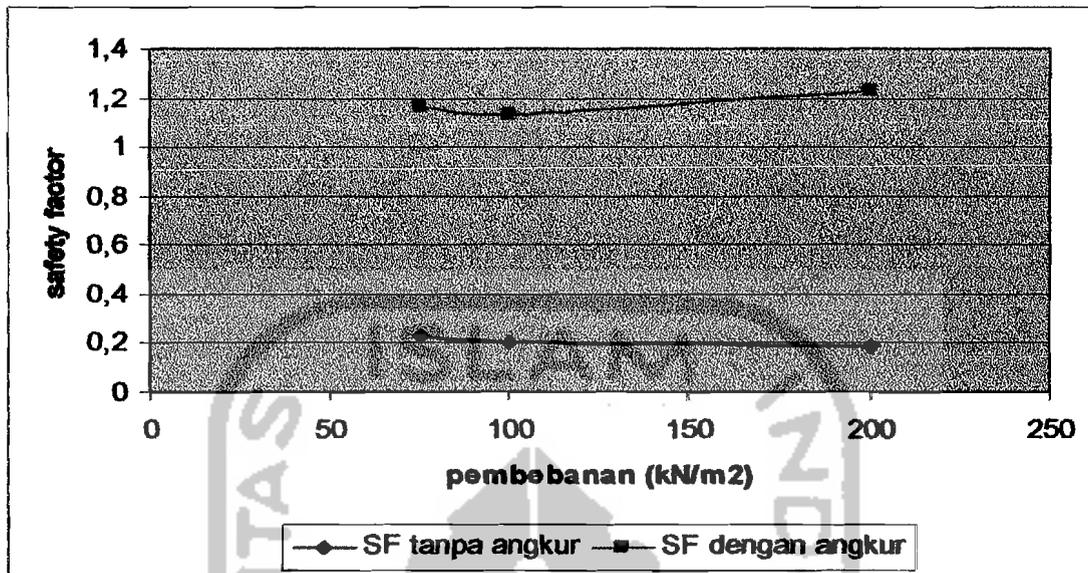
**Tabel 6.5.** Persentase Perubahan *safety factor* akibat pengaruh penggunaan angkur ( $\beta = 45^\circ$ ) pada lereng dengan perubahan beban terbagi rata dan beban titik.

Lereng dengan beban terbagi rata ( $Q$ ) = $75 \text{ kN/m}^2$					
Jarak dari tepi lereng (m)	Beban titik (P)				
	1 kPa	1,5 kPa	2 kPa	2,5 kPa	3 kPa
0,5	1,166	1,167	1,167	1,168	1,169
1	1,165	1,166	1,166	1,167	1,167
1,5	1,165	1,165	1,165	1,165	1,165
Lereng dengan beban terbagi rata ( $Q$ ) = $100 \text{ kN/m}^2$					
Jarak dari tepi lereng (m)	Beban titik (P)				
	1 kPa	1,5 kPa	2 kPa	2,5 kPa	3 kPa
0,5	1,128	1,128	1,129	1,130	1,130
1	1,127	1,128	1,128	1,128	1,129
1,5	1,127	1,127	1,127	1,127	1,127
Lereng dengan beban terbagi rata ( $Q$ ) = $200 \text{ kN/m}^2$					
Jarak dari tepi lereng (m)	Beban titik (P)				
	1 kPa	1,5 kPa	2 kPa	2,5 kPa	3 kPa
0,5	1,231	1,230	1,230	1,230	1,229
1	1,230	1,230	1,229	1,229	1,228
1,5	1,230	1,229	1,228	1,227	1,226

Untuk hasil analisis menggunakan Geo-Slope dapat dilihat pada lampiran 5. begitu juga grafik perbandingan tegangan gesernya.

Trend peningkatan *Safety factor* pada lereng dengan perkuatan ankur dapat

dilihat pada Grafik 6.8.



**Grafik 6.8.** Persentase kenaikan *safety factor* akibat penggunaan perkuatan ankur

Dari data di atas, terbukti bahwa penggunaan perkuatan ankur sangat efektif untuk menaikkan stabilitas suatu lereng. Kenaikan angka aman setelah menggunakan perkuatan ankur mencapai 5 kali lipat dari angka aman sebelum menggunakan perkuatan ankur.

Di bawah ini adalah macam-macam lereng yang sudah dianalisis jenis keruntuhan, sehingga didapat metode perbaikan stabilitasnya.

Tabel 6.6. Metode perbaikan lereng berdasarkan jenis keruntuhannya

Model lereng	Jenis keruntuhan	Solusi
Kemiringan (°)		
30	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
40	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
50	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
60	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
70	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
muka air tanah (m)		
+0	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-1	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-2	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-3	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-4	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-5	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-6	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-7	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
-8	Keruntuhan dasar	Tiang pancang vertikal
-9	Keruntuhan dasar	Tiang pancang vertikal
-10	Keruntuhan dasar	Tiang pancang vertikal
Beban (kN/m <sup>2</sup> )		
10	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
25	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
50	Keruntuhan sebagian	Pembuatan <i>Berm</i>
75	Keruntuhan kaki	Perkuatan angkur
100	Keruntuhan kaki	Perkuatan angkur
200	Keruntuhan kaki	Perkuatan angkur