

---

**BAB III**

---

**LANDASAN TEORI**

---

**3.1 Tinjauan Umum**

Pada permukaan tanah yang tidak horizontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah kebawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsonya terlampaui, maka akan terjadi kelongsoran lereng (*slip*). Analisis stabilitas pada permukaan tanah yang miring ini, disebut analisis stabilitas lereng. Analisis ini sering digunakan dalam perancangan-perancangan bangunan seperti: jalan kereta api, jalan raya, bandara, bendungan urugan tanah, saluran dan lain-lainnya. Umumnya, analisis stabilisasi dilakukan untuk mengecek keamanan dari lereng alam, lereng galian dan lereng urugan tanah.

Analisis stabilitas lereng tidak mudah, karena terdapat banyak faktor yang sangat mempengaruhi hasil hitungan. Faktor-faktor tersebut misalnya, kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah dan lain-lainnya. Terzaghi (1950) membagi penyebab longsor lereng terjadi dari akibat pengaruh 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 lereng, memperdalam galian tanah ataupun faktor alam seperti erosi sungai. Pengaruh dalam, yaitu longsor yang terjadi dengan tanpa

## 3.2 Lereng

---

Lereng merupakan suatu permukaan tanah yang memiliki perbedaan elevasi cukup besar pada kedua titik yang berjarak relatif kecil sehingga menimbulkan sudut tertentu terhadap bidang horizontal dan tidak dilindungi.

### 3.2.1. Bentuk lereng

Lereng atau talud dapat terjadi secara alamiah atau buatan. Berikut ini adalah macam-macam lereng menurut kejadiannya;

#### 1. Lereng Alam

Lereng alam terbentuk karena proses alam. Lereng-lereng alam yang telah ada selama bertahun-tahun dapat tiba-tiba runtuh dikarenakan adanya perubahan topografi, gempa, aliran air tanah, hilangnya kuat geser, perubahan tegangan, dan cuaca. Biasanya keruntuhan-keruntuhan tersebut tidak dipahami secara baik karena sedikitnya studi yang dilakukan pada lereng-lereng alam itu.

Mengetahui adanya bidang runtuh lama pada lereng alam dapat memudahkan untuk memahami dan memprediksi perilaku lereng tersebut. Selain sering kali disebabkan oleh aktivitas tektonik dan longsoran tanah sebelumnya, bidang runtuh juga dapat disebabkan oleh pengaruh sungai glacial dan fenomena glacial seperti pengembangan/pemuaiian tanah lempung yang tidak seragam.

#### 2. Lereng buatan tanah asli

Lereng ini dibuat dari tanah asli dengan memotong tanah tersebut untuk pembuatan jalan atau saluran air untuk irigasi

#### 3. Lereng buatan tanah yang di padatkan

Tanah di padatkan untuk tanggul-tanggul jalan raya atau bendungan.

### 3.2.2. Penyebab kelongsoran lereng

Pada penjelasan di depan telah disebutkan dua penyebab utama kelongsoran

lereng yaitu akibat pengaruh dalam (*internal effect*) dan akibat pengaruh luar (*external effect*). Namun secara rinci beberapa penyebab kelongsoran suatu lereng adalah sebagai berikut:

1. Penambahan beban pada lereng. Tambahan beban lereng dapat berupa bangunan baru, tambahan beban oleh air yang masuk ke pori-pori tanah maupun yang menggenangi di permukaan tanah dan beban dinamis oleh tumbuh-tumbuhan yang tertiuap angin dan lain-lain.
2. Penggalian dan pemotongan tanah pada kaki lereng.
3. Penggalian yang mempertajam kemiringan lereng.
4. Perubahan posisi muka air secara cepat (*rapid drawdown*) (pada bendungan, sungai dan lain-lain).
5. Kenaikan tekanan lateral oleh air (air yang mengisi retakan akan mendorong tanah ke arah lateral).
6. Gempa bumi.
7. Penurunan tahanan geser tanah pembentuk lereng oleh akibat kenaikan kadar air, kenaikan tekanan air pori, tekanan rembesan oleh genangan air di dalam tanah, tanah pada lereng mengandung lempung yang mudah kembang susut dan lain-lain.

Selain beberapa bentuk penyebab di atas, kelongsoran lereng juga terjadi akibat adanya beberapa pengaruh. Antara lain:

#### 1. Pengaruh Iklim

Di dekat permukaan tanah, kuat geser tanah berubah dari waktu ke waktu bergantung pada iklim. Beberapa jenis tanah mengembang saat musim hujan,

dan menyusut pada musim kemarau. Pada musim hujan kuat geser tanah ini menjadi sangat rendah dibandingkan dengan musim kemarau. Oleh karena itu,

kuat geser tanah yang dipakai pada analisis stabilitas lereng harus didasarkan pada kuat geser tanah yang terendah yaitu pada musim hujan, atau kuat geser pada saat tanah jenuh air.

## 2. Pengaruh Air

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

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

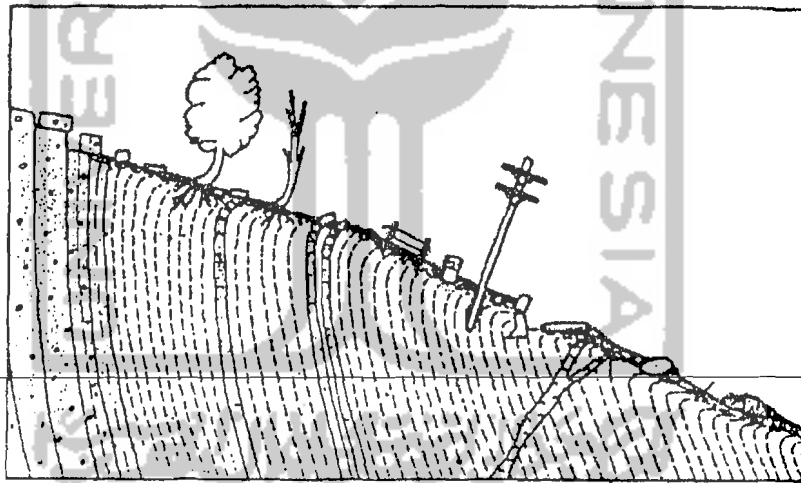
Jika pada lereng terjadi penurunan muka air tanah dalam lereng atau di dekat lereng, contohnya penurunan muka air mendadak pada saluran atau sungai, maka terjadi pengurangan gaya angkat air pada massa tanah, yang menambah beban lereng. Kenaikan beban menyebabkan kenaikan tegangan geser, yang bila tahanan 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 tanah besar, menyebabkan masa tanah dalam kedudukan *liquefaction* (tegangan efektif nol), sehingga tanah dapat mengalir seperti cairan.

### 3. Pengaruh Rangkak (*creep*)

Di dekat permukaan tanah yang miring, tanah dipengaruhi siklus kembang susut. Siklus ini dapat terjadi oleh akibat perubahan temperatur, perubahan dari musim kemarau ke musim hujan, dan di daerah dingin dapat diakibatkan oleh pengaruh pembekuan air. Saat tanah mengembang, tanah naik sehingga melawan gaya-gaya gravitasi. Saat tanah menyusut, tanah turun dibantu oleh gaya gravitasi. Hasil dari gerakan keduanya adalah gerakan perlahan lereng turun ke arah bawah.

Kedalaman zona rangkak bervariasi dari beberapa sentimeter sampai beberapa meter bergantung pada sifat tanah dan kondisi iklim. Kenampakan gerakan lereng akibat rangkak diilustrasikan oleh Taylor (1962) dalam **Gambar 3.1**.



**Gambar 3.1.** Kenampakan lereng akibat rangkak (*creep*) (Taylor, 1962).

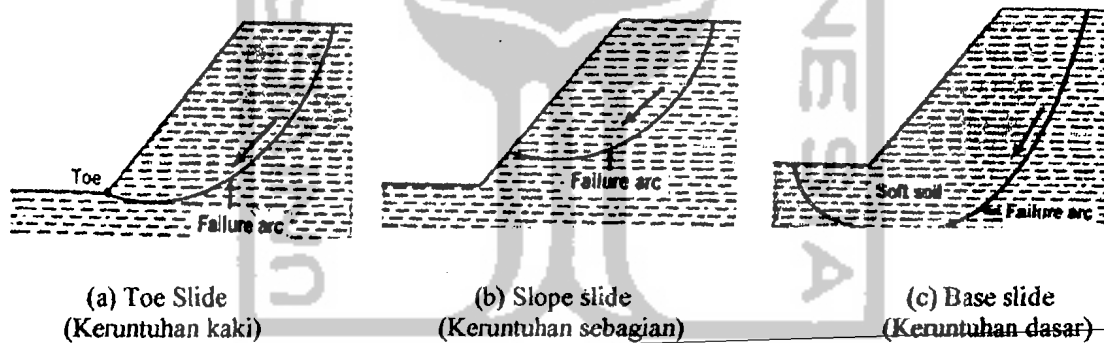
Seperti ditunjukkan pada gambar di atas, rangkak dapat menyebabkan hal-hal berikut:

1. Blok batuan bergerak.
2. Pohon-pohon melengkung ke atas.
3. Bagian bawah lereng melengkung dan menarik batuan.
4. Bangunan menara, monumen dan lain-lain miring.

5. Dinding penahan tanah dan fondasi bergerak dan retak.
6. Jalan raya dan rel keluar dari alurnya.
7. batu-batu besar menggelinding dan lain-lain.

Apabila terjadi suatu kelongsoran dalam tanah lempung, seringkali didapat merupakan sepanjang suatu busur lingkaran, dan karenanya bentuk inilah yang dianggap terjadi pada waktu mempelajari stabilitas suatu lereng. Busur lingkaran ini dapat memotong permukaan lereng, melalui titik kaki lereng (*toe*), atau memotong dasar lereng (*deep-started*) dan menyebabkan pengangkatan pada dasar. Ramalan bidang gelincir yang paling mungkin terjadi, sangat tergantung pada pengalaman, berdasarkan pada studi kasus-kasus yang telah lalu.

Beberapa tipe keruntuhan lereng dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2 Tipe-tipe keruntuhan pada lereng (Craig, 1989)

### 3.2.3. Angka Keamanan (*Safety Factor*)

Dalam analisis kemantapan lereng dengan permukaan gelincir yang diasumsikan sebagai lengkungan lingkaran, maka gaya yang mendorong massa tanah di atas lengkungan lingkaran sehingga menggelincir harus dibandingkan dengan gaya geser sepanjang lengkungan lingkaran yang menahan longsoran itu.

Karena gaya dorong dan gaya tahan berbeda sehubungan dengan kedudukan dan jari-jari lengkungan lingkaran, maka harus dilakukan analisa kemantapan dengan mengubah-ubah kedudukan dan jari-jari lengkungan lingkaran untuk beberapa harga dengan cara coba-coba. Berbagai metode diusulkan untuk perbandingan antara gaya dorong dan gaya penahan. Sehingga angka aman adalah :

$$SF = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya yang menggelincirkan}}$$

Bila faktor keamanan didapat 1, ini berarti bahwa lereng sudah hampir dalam bahaya keruntuhan lereng/longsor. Akibatnya, untuk mendapatkan lereng yang dimantapkan maka persamaan berikut harus digunakan,

$$SF \geq 1,0$$

Dalam banyak hal, harus dipertimbangkan pula perbedaan antara anggapan-anggapan yang tak terelakan yang digunakan dalam perhitungan, termasuk semua kesalahan dari konstanta-konstanta mekanika tanah dengan harga sebenarnya dari lapisan tanah, sehingga biasanya digunakan  $SF \geq 1,25$ .

Studi-studi menyeluruh tentang keruntuhan lereng (dengan kemiringan 1:2 dan tinggi 40 ft) menunjukkan bahwa:

Tabel 3.1. Pengaruh jenis lereng terhadap besarnya  $SF$

Jenis lereng	$SF$
tanpa tekanan air pori, tanpa lapisan tanah lemah, tanpa tanah keras	2,071 – 2,085
Tanpa tekanan air pori, dengan lapisan tanah lemah dan tanah keras	1,338 – 1,394
Dengan $R_u = 0,25$ , tanpa lapisan tanah lemah, tanpa tanah keras	1,756 – 1,772
Dengan $R_u = 0,25$ , dengan lapisan tanah lemah dan tanah keras	1,081 – 1,137
Dengan garis muka air tanah, tanpa lapisan tanah lemah, tanpa tanah keras	1,827 – 1,838
Dengan garis muka air tanah, dengan lapisan tanah lemah dan tanah keras	1,212 – 1,265

Dalam penelitiannya, Bishop (1955) mendapatkan data hubungan tentang angka aman dan kejadian keruntuhan.

**Tabel 3.2.** Hubungan angka keamanan dengan kejadian keruntuhan

Angka aman ( $SF$ )	Kejadian
$F \leq 1,07$	Keruntuhan biasa terjadi
$1,07 < F \leq 1,25$	Keruntuhan pernah terjadi
$F > 1,25$	Keruntuhan jarang terjadi

#### 3.2.4. Perbaikan stabilitas lereng

Banyak cara dapat dilakukan untuk menambah stabilitas lereng, antara lain: pemotongan lereng, pembuatan berm, menurunkan muka air tanah, pemasangan tiang-tiang dan lain-lainnya. Beberapa cara perbaikan stabilitas lereng diilustrasikan pada Gambar 3.3.

Umumnya metode perbaikan stabilitas lereng dapat dibagi dalam tiga kelompok, yaitu:

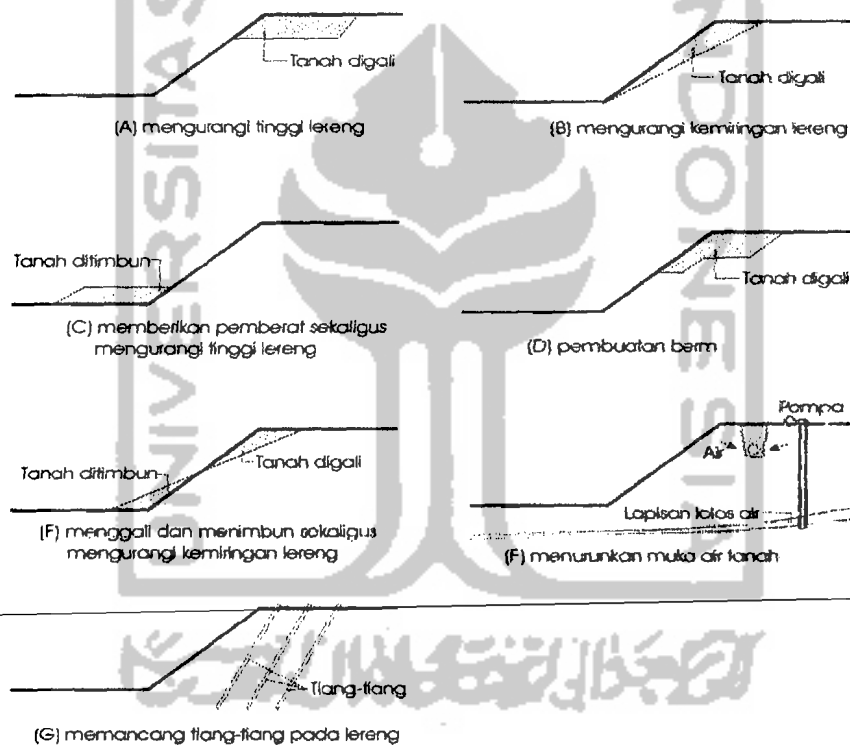
1. Metode geometri, yaitu perbaikan lereng dengan cara merubah geometri lereng, antara lain dengan cara:
  - a. Mengurangi tinggi lereng, dapat dilakukan dengan cara pemotongan lereng di bagian atas atau penimbunan di kaki lereng.
  - b. Pembuatan berm, dilakukan dengan cara memotong bagian puncak lereng menjadi berundak-undak, hal ini bertujuan untuk mengurangi tinggi lereng sehingga massa tanah pada bagian atas lereng berkurang yang mengakibatkan tegangan yang dipikul lereng pun berkurang.
  - c. Pengurangan kemiringan lereng.
  - d. Menggali di bagian atas dan menimbun di bagian bawah sekaligus mengurangi kemiringan lereng.



2. Metode hidrologi, yaitu dengan cara menurunkan muka air tanah atau menurunkan kadar air tanah pada lereng.

3. Metode-metode kimia dan mekanis, antara lain dengan cara:

- a. Menambah kuat geser tanah dengan menambahkan bahan kimia tertentu, seperti: *grouting* semen, belerang, kapur, karbid dan lain-lain.
- b. Menambahkan bahan tertentu di dalam tanah untuk menambah kekuatan dukung tanah, seperti: memasang tiang-tiang, menambahkan angkur, geotextil, dll.



Gambar 3.3. Beberapa metode perbaikan stabilitas lereng (Christady, H, 1994).

### 3.3 Distribusi Tegangan di Dalam Tanah

Hitungan tegangan-tegangan yang terjadi di dalam tanah berguna untuk analisis tegangan-regangan (*stress-strain*) dan penurunan (*settlement*). Sifat-sifat tegangan-regangan dan penurunan bergantung pada sifat tegangan-regangan tanah bila mengalami pembebanan.

Tegangan-tegangan di dalam massa tanah dapat disebabkan oleh beban yang bekerja di permukaan maupun oleh beban akibat berat sendiri tanah. Tegangan yang berasal dari beban pada permukaan tanah berkurang bila kedalaman bertambah. Sebaliknya, tegangan yang berasal dari berat sendiri tanah bertambah bila kedalamannya bertambah.

Regangan volumetric pada material yang bersifat elastis dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.1)$$

dengan:

$\Delta V$  = perubahan volume ( $m^3$ )

$V$  = volume awal ( $m^3$ )

$\mu$  = angka Poisson

$E$  = modulus elastis

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  = tegangan-tegangan dalam arah x, y dan z. ( $kN/m^2$ )

Dalam persamaan 3.1, bila pembebanan yang mengakibatkan penurunan terjadi pada kondisi tanpa drainasi (*undrained*), yaitu penurunan terjadi pada volume konstan, maka  $\Delta V/V = 0$ . Untuk kondisi ini,  $\mu = 0,5$ . Jika pembebanan menyebabkan perubahan volume (seperti contohnya penurunan akibat proses konsolidasi), dengan  $\Delta V/V > 0$ , maka  $\mu < 0,5$ .

### 3.3.1. Beban Titik

Analisis tegangan yang terjadi di dalam massa tanah akibat pengaruh beban titik di permukaan telah diberikan oleh Boussinesq (1885). anggapan-anggapan yang dipakai pada teori Boussinesq adalah:

1. Tanah merupakan bahan yang bersifat elastis, homogen, isotropis, dan semi tak terhingga (*semi-infinite*).
2. Tanah tidak mempunyai berat.
3. Hubungan tegangan-regangan mengikuti Hukum Hooke.
4. Distribusi tegangan akibat beban yang diterapkan tidak tergantung pada jenis tanah.
5. Distribusi tegangan simetri terhadap sumbu z (vertikal).
6. Perubahan volume tanah diabaikan.
7. Tanah tidak sedang mengalami tegangan sebelum beban Q diterapkan.

Telah diamati bahwa tegangan vertikal tidak bergantung pada modulus elastis (E) dan angka Poisson ( $\mu$ ). Akan tetapi, tekanan lateral bergantung pada angka Poisson dan tidak bergantung pada modulus elastis. Dalam hitungan-hitungan distribusi tegangan akibat beban struktur, tegangan yang terjadi biasanya dinyatakan dalam istilah tambahan tegangan (*stress increment*), yaitu  $\Delta\sigma$ . Karena pada kenyataannya, tegangan yang diakibatkan oleh beban struktur merupakan tambahan tegangan pada tekanan *overburden* (tekanan vertikal akibat berat tanahnya sendiri). Jadi, sebenarnya tanah sudah menderita tegangan sebelum beban struktur bekerja.

Teori Boussinesq untuk tambahan tegangan vertikal akibat beban titik dianalisis dengan meninjau sistem tegangan pada koordinat silinder (Gambar 3.4.). Dalam teori ini, tambahan tegangan vertikal ( $\Delta\sigma_z$ ) pada suatu titik A di dalam tanah akibat beban titik Q di permukaan dinyatakan oleh persamaan:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \left( \frac{1}{1 + (r/z)^2} \right)^{5/2} \quad (3.2)$$

Tambahan tegangan mendatar dalam arah radial:

$$\Delta\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left( \frac{3r^2z}{(r^2+z^2)^{5/2}} - \frac{1-2\mu}{r^2+z^2+z(r^2+z^2)^{1/2}} \right) \quad (3.3)$$

Tambahan tegangan mendatar arah Tangensial:

$$\Delta\sigma_\theta = -\frac{Q}{2\pi} (1-2\mu) \left( \frac{z}{(r^2+z^2)^{3/2}} - \frac{1}{r^2+z^2+z(r^2+z^2)^{1/2}} \right) \quad (3.4)$$

Tegangan geser:

$$\tau_{rz} = \frac{3Q}{2\pi} \left( \frac{rz^2}{(r^2+z^2)^{5/2}} \right) \quad (3.5)$$

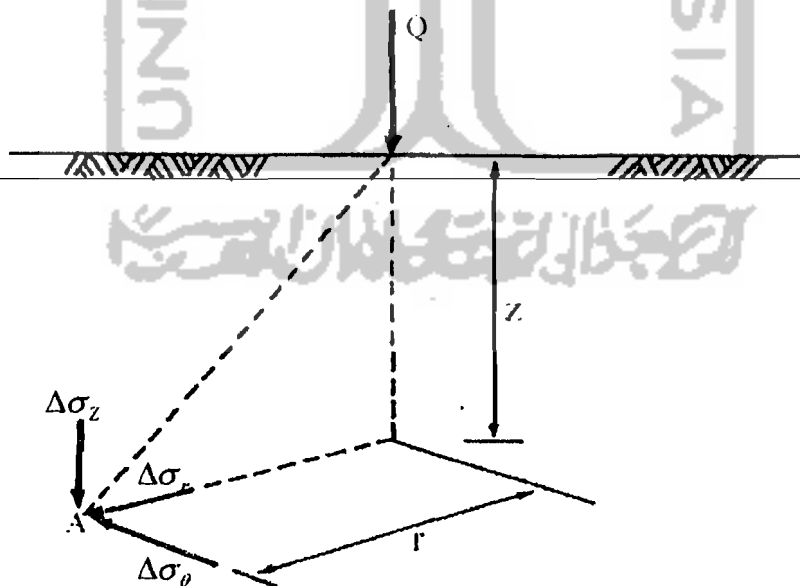
dengan:

Q = Beban titik (kN)

$\mu$  = Angka Poisson

z = Distribusi tegangan simetri terhadap sumbu vertikal (m)

r = Jarak horizontal dari z ke titik A



Gambar 3.4. Tegangan akibat beban titik (Christady, H, 1994).

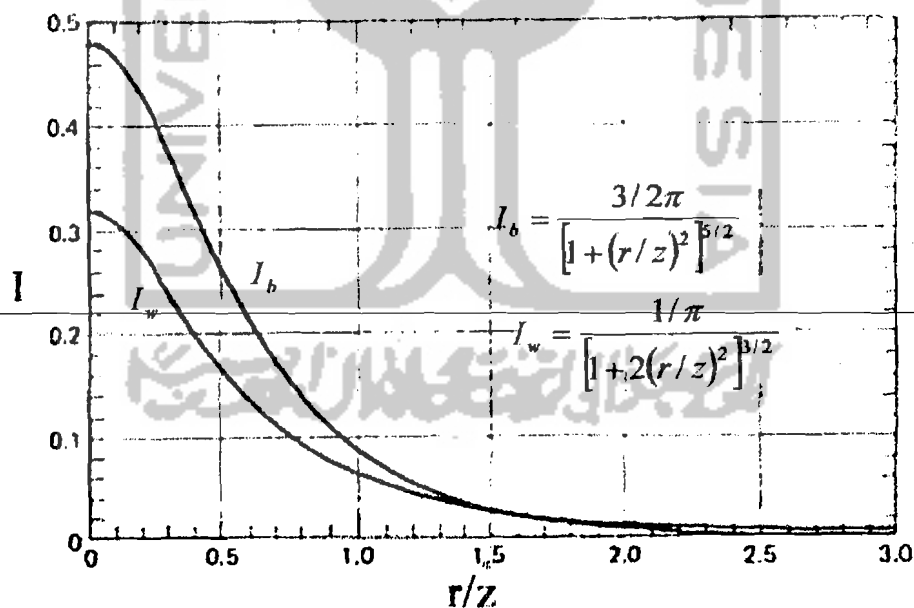
Bila  $\mu = 0,50$ , maka suku persamaan kedua dari persamaan 3.3 sama dengan nol, dan pada persamaan 3.4, nilai  $\sigma_\theta = 0$ . Jika faktor pengaruh untuk beban titik untuk teori Boussinesq didefinisikan sebagai:

$$I_B = \frac{3}{2\pi} \left( \frac{1}{1+(r/z)^2} \right)^{5/2} \quad (3.6)$$

maka persamaan 3.2 akan menjadi:

$$\Delta\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B \quad (3.7)$$

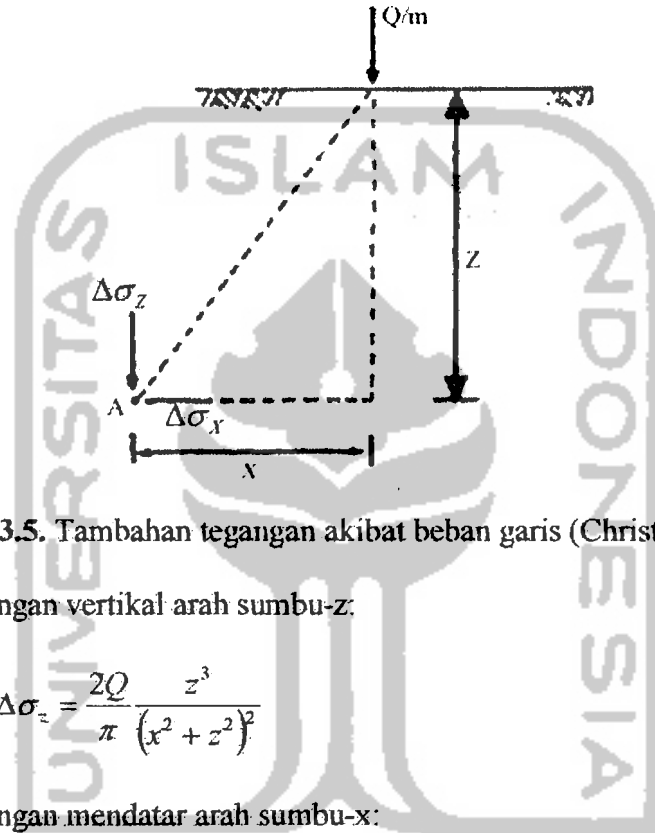
Nilai  $I_B$  yang disajikan dalam bentuk grafik diberikan dalam Grafik 3.1. Dalam gambar ini, nilai pengaruh beban titik ( $I_B$ ) untuk teori Boussinesq digambarkan bersama-sama dengan faktor pengaruh beban titik ( $I_W$ ) untuk teori Wastergaard.



**Grafik 3.1.** Faktor pengaruh untuk beban titik didasarkan teori Boussinesq ( $I_B$ ) dan teori Wastergaard ( $I_W$ ). (Taylor, 1948)

### 3.3.2. Beban Garis

Tambahan tegangan akibat beban garis  $Q$  per satuan panjang (Gambar 3.5) pada sembarang titik di dalam tanah dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut:



Gambar 3.5. Tambahan tegangan akibat beban garis (Christady. H, 1994)

Tambahan tegangan vertikal arah sumbu-z:

$$\Delta\sigma_z = \frac{2Q}{\pi} \frac{z^3}{(x^2 + z^2)^2} \quad (3.8)$$

Tambahan tegangan mendatar arah sumbu-x:

$$\Delta\sigma_x = \frac{2Q}{\pi} \frac{x^2 z}{(x^2 + z^2)^2} \quad (3.9)$$

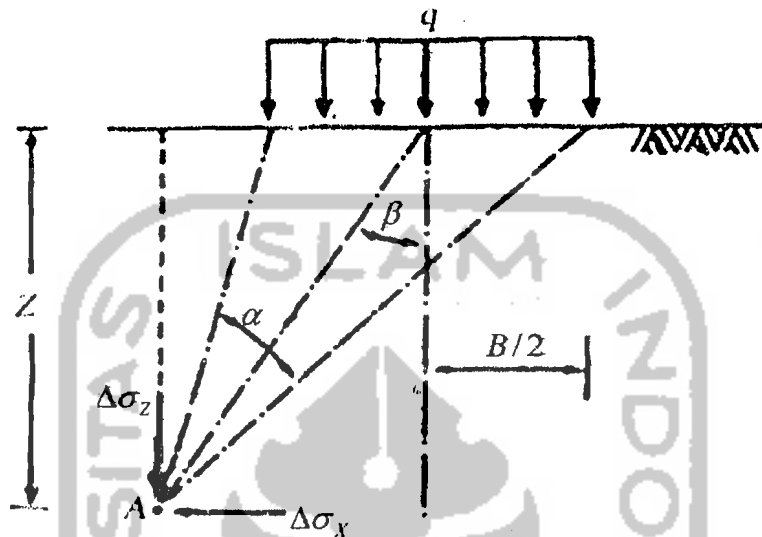
Tegangan geser:

$$\tau_{zx} = \frac{2Q}{\pi} \frac{xz^2}{(x^2 + z^2)^2} \quad (3.10)$$

### 3.3.3. Beban Terbagi Rata Memanjang

Tegangan pada titik A di dalam tanah akibat beban terbagi rata  $q$  yang

berbentuk jalur memanjang (Gambar 3.6) dinyatakan oleh persamaan berikut ini:



**Gambar 3.6.** Tegangan akibat beban terbagi rata memanjang (Christady. H, 1994)

Tambahan tegangan vertikal pada arah sumbu-z:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi}(\alpha + \sin \alpha \cos 2\beta) \quad (3.11)$$

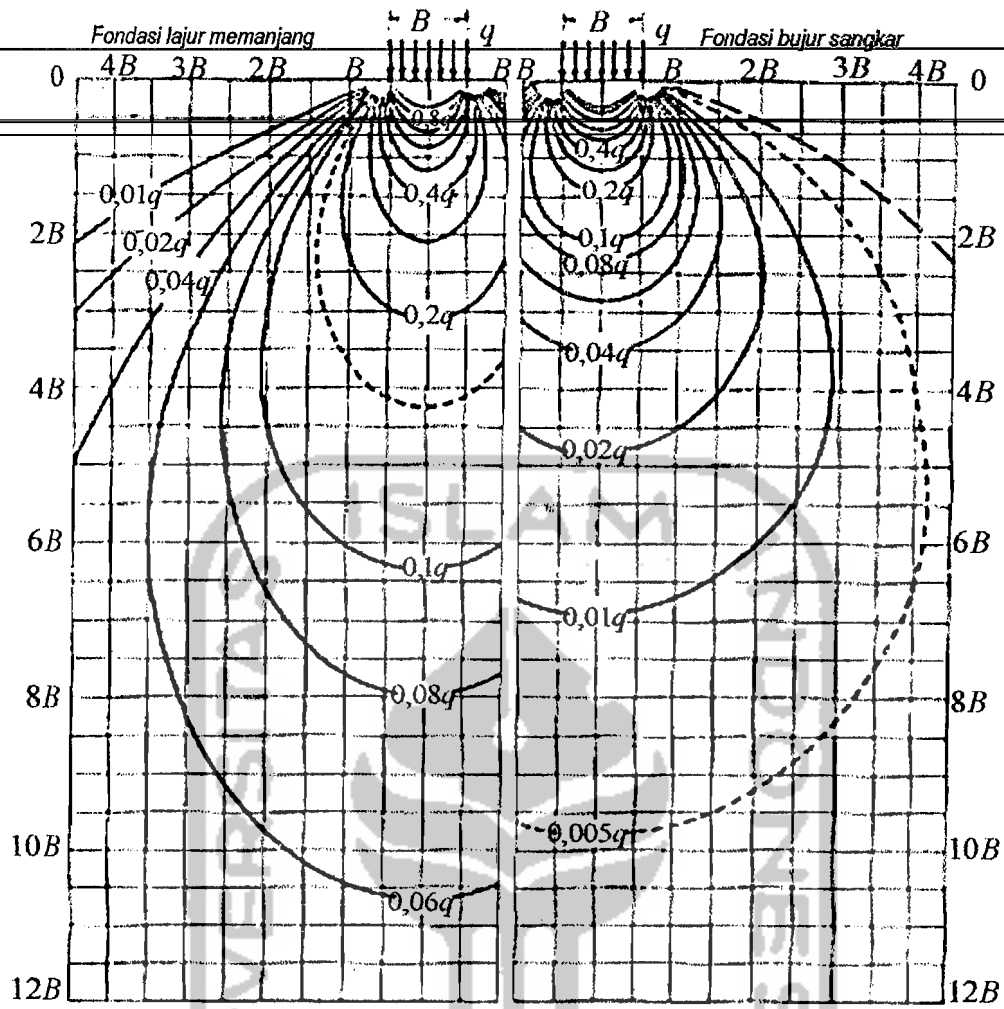
Tambahan tegangan mendatar pada arah sumbu-x:

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}(\alpha - \sin \alpha \cos 2\beta) \quad (3.12)$$

Tegangan geser:

$$\tau_{zx} = \frac{q}{\pi}(\sin \alpha \cos 2\beta) \quad (3.13)$$

dengan  $\alpha$  dan  $\beta$  dalam radial, yaitu sudut yang ditunjukkan dalam Gambar 3.6. Isobar tegangan yang menunjukkan tempat kedudukan titik-titik yang mempunyai tegangan vertikal yang sama ditunjukkan dalam Grafik 3.2.



**Grafik 3.2.** Isobar tegangan untuk beban terbagi rata memanjang dan bujur sangkar didasarkan teori Boussinesq. (Taylor, 1948)



### 3.4 Teori Analisis Stabilitas Lereng

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

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

$$SF = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (3.14)$$

keterangan:

$\tau$  = tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah ( $\text{kN/m}^2$ )

$\tau_d$  = tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor ( $\text{kN/m}^2$ )

$SF$  = faktor aman

Menurut teori Mohr-Coulomb, tahanan geser ( $\tau$ ) yang dapat dikerahkan oleh tanah, di sepanjang bidang longsohnya, dinyatakan oleh:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3.15)$$

keterangan:

$\tau$  = tahanan geser ( $\text{kN/m}^2$ )

$c$  = kohesi ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma$  = tegangan normal pada bidang runtuh ( $\text{kN/m}^2$ )

$\varphi$  = sudut gesek dalam tanah (derajat)

Nilai-nilai  $c$  dan  $\varphi$  adalah parameter kuat geser tanah di sepanjang bidang longsor.

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

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \varphi_d \quad (3.16)$$

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

Jika persamaan 3.15 dan 3.16 disubstitusikan ke persamaan 3.14, akan diperoleh persamaan faktor aman:

$$SF = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \varphi}{c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d} \quad (3.17)$$

Yang dapat dituliskan juga dalam bentuk:

$$c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\operatorname{tg} \varphi}{F} \quad (3.18)$$

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

$$SF_c = \frac{c}{c_d} \quad (3.19)$$

$$SF_\varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_d} \quad (3.20)$$

keterangan:

$SF_c$  = faktor aman pada komponen kohesi

$SF_\varphi$  = faktor aman pada komponen gesekan

### 3.5 Metode Stabilitas lereng

Suatu analisis stabilitas lereng berisi perkiraan dari model keruntuhan dan kuat gesernya. Model keruntuhan akan memerlukan peramalan dari berat/beban yang harus ditahan termasuk pengaruh air. Perkiraan air membutuhkan pertimbangan mengenai gaya-gaya rembesan dan berat satuan jenuh serta efektif. Bentuk model keruntuhan biasanya dapat ditentukan dengan cukup baik walaupun untuk pusat

rotasi, ia mungkin memerlukan beberapa kali percobaan untuk mendapatkan kasus terburuk.

Dalam beberapa aplikasi, tujuan utama analisis stabilitas lereng adalah untuk memperoleh desain konstruksi-konstruksi tanah yang aman dan ekonomis. Beberapa tujuan analisis stabilitas lereng adalah:

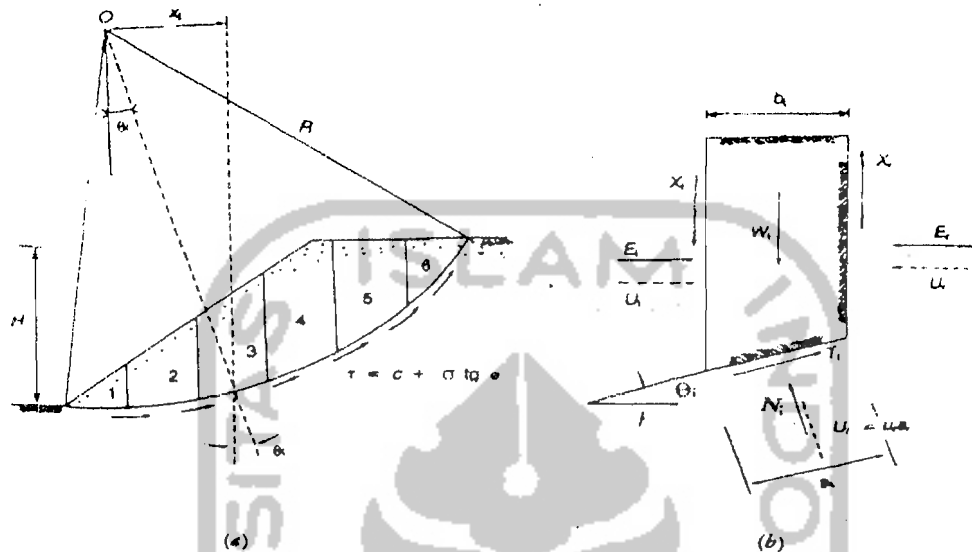
1. Memahami pembangunan dan pembentukan lereng alam dan lereng buatan.
2. Menganalisis stabilitas lereng untuk kondisi jangka pendek (biasanya selama kegiatan konstruksi) juga kondisi jangka panjang.
3. Untuk mengetahui kemungkinan keruntuhan lereng alam maupun buatan.
4. Menganalisis keruntuhan dan memahami mekanisme keruntuhannya serta pengaruhnya pada lingkungan sekitar.
5. Melakukan desain ulang terhadap lereng yang telah runtuh, termasuk merencanakan dan mendesain lereng dalam upaya tindakan pencegahan.
6. Mempelajari efek beban akibat gempa pada lereng dan tanggul.

### 3.5.1. Metode Irisan (*Method of Slice*)

Untuk tanah yang tidak homogen dan aliran rembesan terjadi di dalam tanah tidak menentu, cara yang paling cocok adalah dengan metode irisan (*method of slice*).

Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam metode irisan, massa tanah yang longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan vertikal. Kemudian, keseimbangan di tiap-tiap irisan diperhatikan. Gambar 3.7 memperlihatkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja padanya. Gaya-gaya ini terdiri dari gaya geser ( $X_r$  dan  $X_l$ ) dan gaya normal efektif ( $E_r$  dan  $E_l$ ) di sepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif ( $T_i$ ) dan resultan gaya normal efektif ( $N_i$ ) yang bekerja di sepanjang

dasar irisan. Tekanan air pori ( $U_l$  dan  $U_r$ ) bekerja di kedua sisi irisan, dan tekanan air pori  $U_i$  bekerja pada dasarnya. Dianggap tekanan air pori sudah diketahui sebelumnya.



Gambar 3.7. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan (Christady, H, 1994).

### 3.5.2. Metode Bishop Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)

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

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

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - u) \frac{tg \varphi'}{F} \quad (3.21)$$

dengan  $\sigma$  adalah tegangan normal total pada bidang longsor dan  $u$  adalah tekanan air pori, sedangkan untuk tanah yang tidak kohesif, maka rumus kuat geser yang berlaku adalah:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi \quad (3.21a)$$

Kuat geser untuk tanah yang kohesif adalah:

$$\tau = c \quad (3.21b)$$

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

$$T = \frac{c' a_i}{F} + (N_i - u_i a_i) \frac{\text{tg } \varphi'}{F} \quad (3.22)$$

Kondisi keseimbangan momen dengan pusat rotasi  $O$  antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total yang dikerahkan tanah pada dasar bidang longsor, dinyatakan oleh persamaan (Gambar 3.7):

$$\sum W_i x_i = \sum T_i R \quad (3.23)$$

dengan  $x_i$  adalah jarak  $W_i$  ke pusat rotasi  $O$ . dari persamaan 3.21 dan 3.23, dapat diperoleh:

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} [c' a_i + (N_i - u_i a_i) \text{tg } \varphi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (3.24)$$

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

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

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \quad (3.25)$$

dengan  $N_i' = N_i - u_i a_i$ , substitusi persamaan 3.22 ke persamaan 3.25, dapat diperoleh persamaan:

$$N_i = \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \text{tg } \varphi' / F} \quad (3.26)$$

Substitusi Persamaan 3.26 ke Persamaan 3.24, diperoleh:

$$SF = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} \left( \frac{c' a_i + \text{tg } \varphi' \frac{W_i + X_i + X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i / F}{\cos \theta_i + \sin \theta_i \text{tg } \varphi' / F} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (3.27)$$

(3.27)

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

$$x_i = R \sin \theta_i \quad (3.28)$$

$$b_i = a_i \cos \theta_i \quad (3.29)$$

Substitusi persamaan 3.28 dan 3.29 ke persamaan 3.27, diperoleh persamaan faktor

aman:

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \text{tg } \varphi'] \left( \frac{1}{\cos \theta_i (1 + \text{tg } \theta_i \text{tg } \varphi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.30)$$

dengan:

$SF$  = faktor aman

$c'$  = kohesi tanah efektif ( $\text{kN/m}^2$ )

$\varphi'$  = sudut gesek dalam tanah efektif (derajat)

$b_i$  = lebar irisan ke- $i$  (m)

$W_i$  = berat irisan tanah ke- $i$  (kN)

$\theta_i$  = sudut yang didefinisikan dalam Gambar 3.7 (derajat)

$u_i$  = tekanan air pori pada irisan ke- $i$  ( $\text{kN/m}^2$ )

Rasio tekanan pori (*pore pressure ratio*) didefinisikan sebagai:

$$r_u = \frac{ub}{W} = \frac{u}{\gamma h} \quad (3.31)$$

dengan:

$r_u$  = rasio tekanan pori

$u$  = tekanan air pori ( $\text{kN/m}^2$ )

$b$  = lebar irisan (m)

$\gamma$  = berat volume tanah ( $\text{kN/m}^3$ )

$h$  = tinggi irisan rata-rata (m)

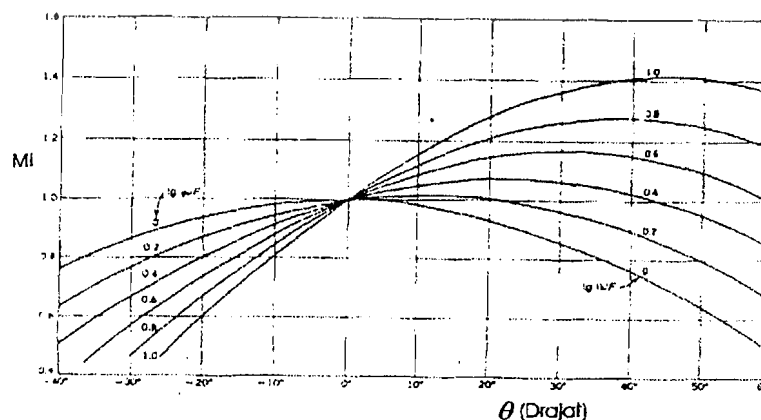
Dari substitusi persamaan 3.31 ke persamaan 3.30 bentuk lain dari persamaan faktor aman untuk analisis stabilitas lereng cara Bishop:

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \gamma \varphi'] \left( \frac{1}{\cos \theta_i (1 + \text{tg } \theta_i \text{ tg } \varphi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (3.32)$$

Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode lainnya. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba (*trial and error*), karena nilai faktor aman  $F$  nampak di kedua sisi persamaannya. Akan tetapi, cara ini telah terbukti menghasilkan nilai faktor aman yang mendekati hasil hitungan dengan cara lain yang lebih teliti. Untuk mempermudah hitungan secara manual, Grafik 3.3

dapat digunakan untuk menentukan fungsi  $M_i$ , dengan:

$$M_i = \cos \theta_i (1 + \text{tg } \theta_i \text{ tg } \varphi' / F) \quad (3.33)$$



Grafik 3.3. Diagram untuk menentukan  $M_i$ , (Janbu dkk, 1956)

Lokasi lingkaran longsor kritis dari metode Bishop (1955), biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Karena itu, walaupun metode Bishop lebih susah dalam perhitungannya, namun metode inilah yang lebih disukai.

Dalam praktek, diperlukan 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 di mana tiap titik potong garis-garisnya merupakan tempat kedudukan pusat lingkaran longsor. Pada titik-titik potong garis yang merupakan pusat lingkaran longsor, dituliskan nilai faktor aman terkecil pada titik tersebut. Perlu diketahui bahwa pada tiap titik pusat lingkaran harus dilakukan pula hitungan faktor aman untuk menentukan nilai faktor aman yang terkecil dari bidang longsor dengan pusat lingkaran pada titik tersebut, yaitu dengan cara mengubah jari-jari lingkarannya. Kemudian, setelah faktor aman terkecil pada tiap-tiap titik pada kotaknya diperoleh, digambarkan garis kontur yang menunjukkan tempat kedudukan dari titik-titik pusat lingkaran yang mempunyai faktor aman yang sama.

Hitungan secara manual memerlukan waktu sangat lama. Pada saat ini telah banyak program-program komputer untuk hitungan faktor aman stabilitas lereng. Salahsatunya adalah program Geo-Slope.

### 3.6 Program GEO-SLOPE (SLOPE/W)

SLOPE/W adalah sebuah program yang di operasikan *under* Microsoft Windows 98. SLOPE/W menggunakan teori keseimbangan batas (*limit equilibrium theory*) untuk menghitung faktor aman lereng tanah maupun batuan serta dapat di gunakan untuk analisis dan desain di bidang sipil (geoteknik).



4. *Points* digunakan untuk menentukan koordinat dalam pembuatan permodelan lereng.
5. *Line* untuk mendefinisikan batas tiap lapisan tanah.

### 3.6.2. SLOPE/W SOLVE dan SLOPE/W CONTOUR

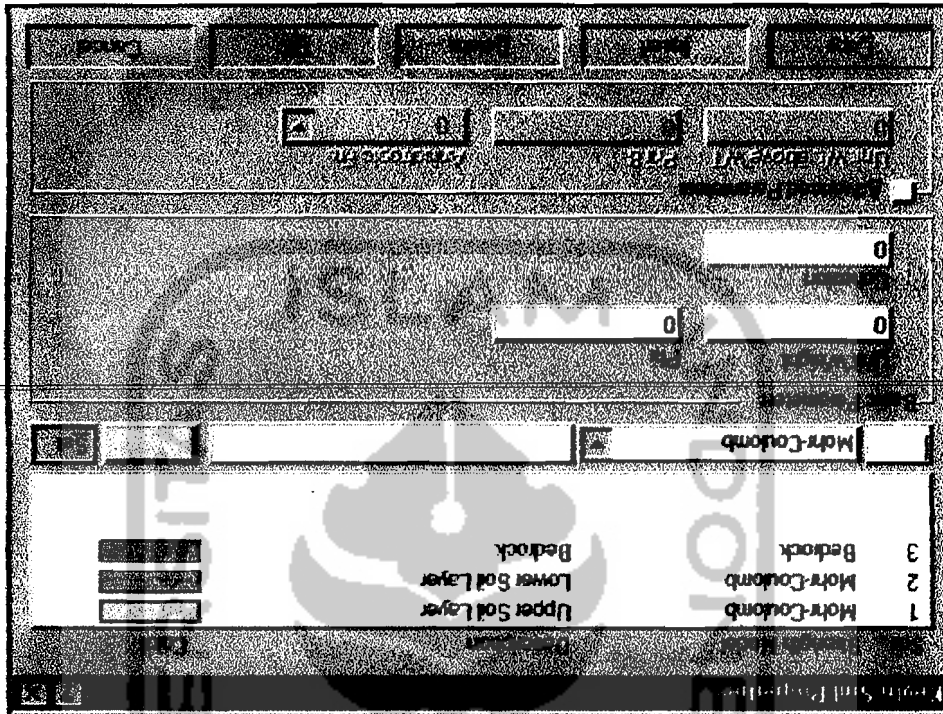
SLOPE/W SOLVE merupakan langkah eksekusi (*running*) program untuk menghitung nilai faktor aman (SF) dari kasus yang didefinisikan dalam DEFINE. Sedangkan dalam SLOPE/W CONTOUR dapat ditampilkan hasil analisis serta grafis diantaranya berupa gambar bidang longsor. SOLVE dan CONTOUR dapat dinamakan sebagai *executable program* terdiri ataupun dapat secara praktis di-*run* dengan menu Tool; CONTOUR dalam DEFINE. Untuk menampilkan hasil analisis dengan metode yang di pakai berikut nilai SF-nya digunakan tombol di Toolbar yang telah disediakan.

### 3.6.3. Proses Analisis Program GEO-SLOPE

#### A. Input data dan Proses analisis

Langkah awal dalam proses analisis yaitu dengan memasukkan input data yang terdapat pada menu *Key-In (soil properties)*. Input data yang di butuhkan yaitu parameter tanah yang berupa kohesi, sudut gesek dalam, serta kepadatan tanah. Dalam menu tersebut juga didefinisikan jumlah lapisan tanah, jenis tanah yang di gunakan. Tampilan menu tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan 3.9 di bawah ini.

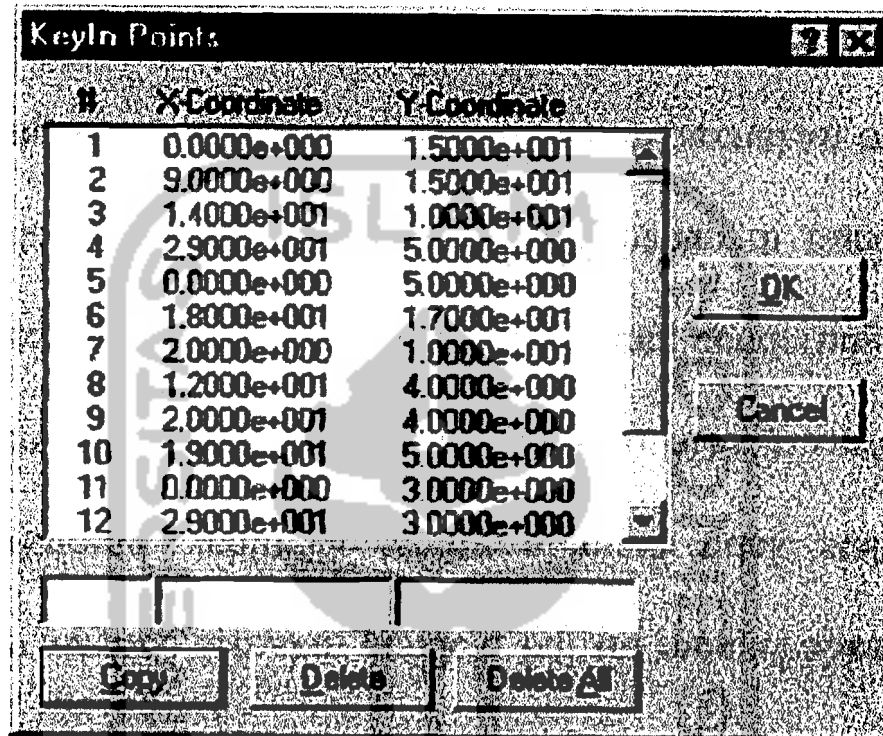
Gambar 3.9. Soil Properties dalam menu Key-In



Gambar 3.8. Tampilan awal SLOPE/W DEFINE

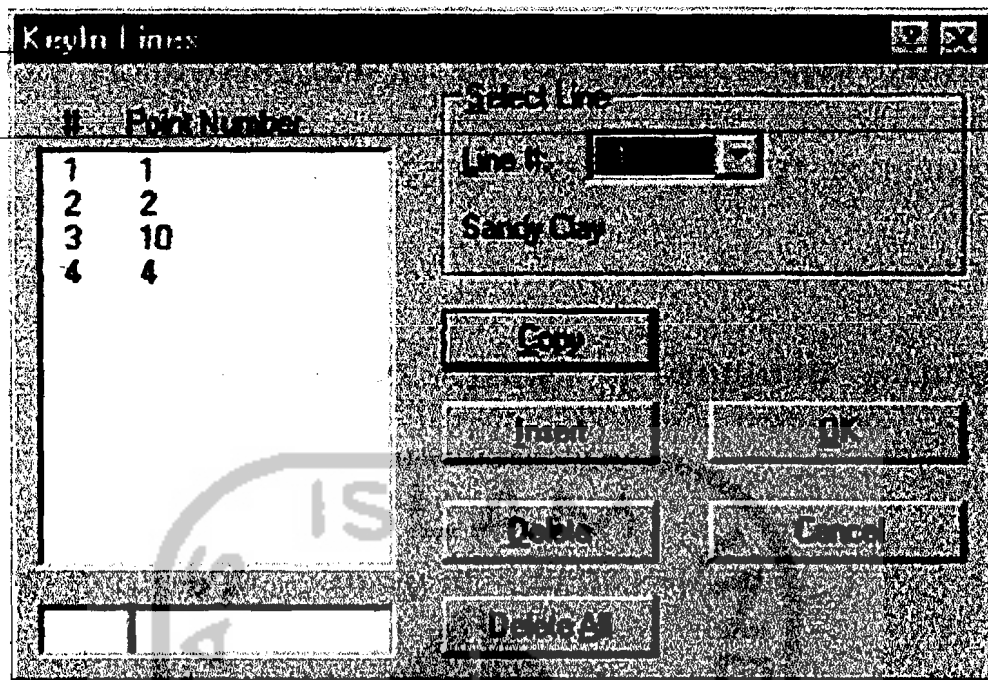


Langkah selanjutnya dalam proses analisis ini mendefinisikan titik-titik koordinat yang terdapat dalam menu *Key-In (point)*. Titik ini digunakan untuk menentukan titik akhir dari bagian garis, *grid* titik pusat dan semua data lain yang diperlukan dalam SLOPE/W.



Gambar 3.10. *Points* dalam menu *Key-In*

Langkah selanjutnya yaitu mendefinisikan batas tiap lapis tanah yang terdapat dalam menu *Key-In lines*.



Gambar 3.11. Lines dalam menu Key-In

Setelah proses input data selesai, langkah selanjutnya yaitu mendefinisikan pusat dan radius untuk bidang longsor berbentuk lingkaran dan komposit yang terdapat dalam menu *key-in (slip surface)*. Cara praktis untuk mendefinisikan *grid* dan *radius lines* dengan menu *draw slip surface (grid)* dan *draw slip surface (radius)*.

**Key-In Slip Surface**

**Grid Corner Points**

Upper Left: 19

Lower Left: 17      Lower Right: 18

**# of Grid Increments**

X: 2      Y: 3

**Radius Corner Points**

Upper Left: 13      Upper Right: 14

Lower Left: 15      Lower Right: 16

**# of Radius Increments:** 2

**Projection Angles**

Use Left (Active) Angle of: 0.00

Use Right (Passive) Angle of: 0.00

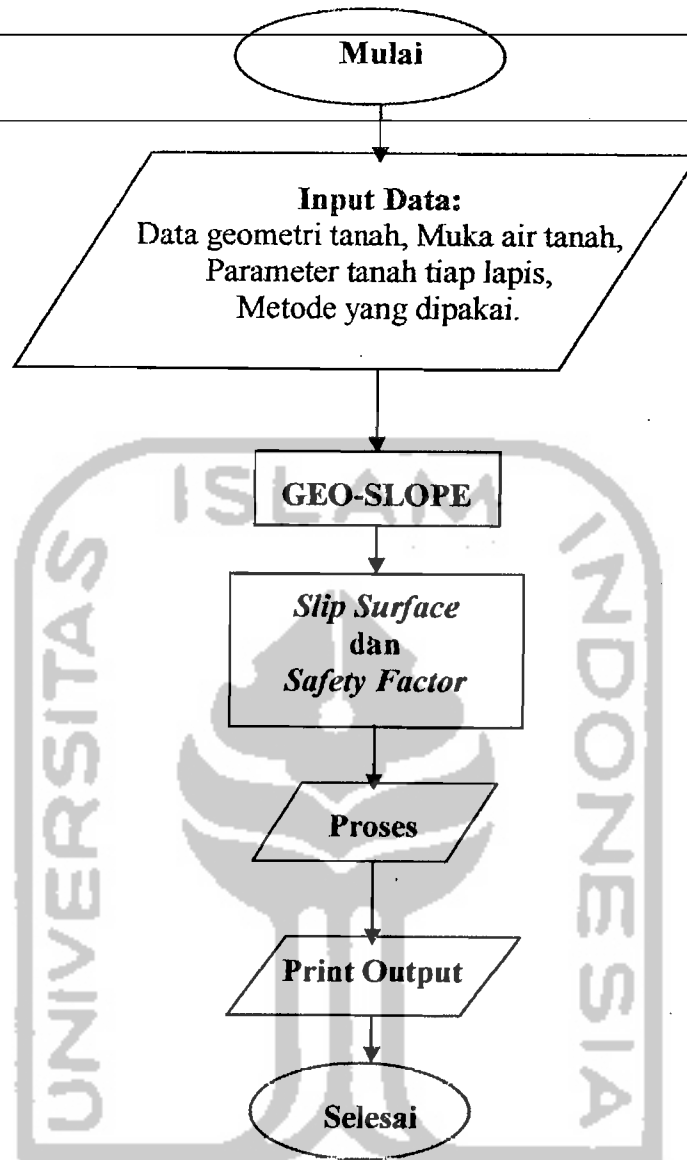
OK      Cancel

Gambar 3.12. Slip Surface Grid dan Radius dalam menu Key-In

#### B. Hasil Analisis (Out put)

Dari hasil *running* program yang terdapat dalam menu SOLVE, didapatkan hasil nilai faktor aman (SF). Untuk menampilkan hasil analisis kita dapat menggunakan menu *Tools Contour* dalam *Define*.

Untuk lebih jelasnya tentang urutan pengerjaan menggunakan program Geo-Slope, diilustrasikan pada bagan alir Geo-Slope di bawah ini:



Gambar 3.13. Bagan Alir Geo-Slope

### 3.7 Perkuatan Lereng dengan Angkur Tanah

Pada point 3.2.4 di depan telah disebutkan beberapa jenis metode perbaikan yang dapat dilakukan untuk menambah stabilitas suatu lereng. Metode-metode perbaikan tersebut dibagi 3 kelompok. Yaitu metode hidrologi, geometri dan mekanis atau kimiawi. Pada penelitian kami, ada beberapa model lereng yang diberi perkuatan. Jenis perkuatan yang digunakan adalah angkur tanah. Sehingga, pada bagian ini akan dijelaskan sedikit tentang pengankuran tanah.

Sebuah angkur tanah lazimnya terdiri dari sebuah kabel atau batang baja bermutu tinggi, yang disebut tendon, di mana salah satu ujungnya ditanamkan dengan kuat pada suatu massa adukan semen atau tanah yang diberi adukan semen (*digrout*) dan ujung yang lain diangkurkan pada sebuah pelat dudukan (*bearing plate*) pada unit struktur yang disangga. Penerapan utama dari angkur tanah ini adalah pada konstruksi batang pengikat (*tie-back*) untuk dinding-dinding diafragma atau turap. Penerapan lainnya adalah pada struktur yang mengalami guling, gelincir, atau pengapungan, dalam rangka memperoleh reaksi untuk uji pembebanan di lapangan dan pada pembebanan awal (*pre-loading*) atau mereduksi penurunan. Angkur tanah dapat dibangun di pasir (termasuk pasir berkerikil dan pasir berlanau) dan lempung kaku, dan angkur tersebut dapat digunakan untuk situasi-situasi dimana diperlukan penyangga temporer maupun permanen.

Panjang tendon yang *digrout*, melalui mana gaya disalurkan ke tanah di sekitarnya, disebut panjang angkur terjepit (*fixed anchor length*). Panjang tendon antara angkur jepit dengan pelat dudukannya disebut panjang angkur bebas (*free anchor length*): tidak terdapat gaya yang disalurkan ke tanah di sepanjang bagian ini. Untuk angkur sementara, tendonnya biasanya diminyaki dan dibungkus dengan pita plastik pada seluruh panjang bebasnya. Ini akan memungkinkan tendon untuk

bergerak dengan bebas dan melindungi tendon dari karat. Untuk angkur permanent, tendon lazimnya diminyaki dan dilapisi dengan polythene di pabrik. Di lapangan, tendon tersebut dikupas dan minyaknya dikeringkan pada bagian yang akan dijepit (panjang angkur terjepit).

Beban ultimit yang dapat dipikul oleh sebuah angkur tergantung pada tahanan tanah (pada prinsipnya friksi kulit) yang termobilisasi didekat panjang angkur terjepit. (ini diasumsikan bahwa tidak akan terdapat keruntuhan sebelumnya pada pertemuan antara adukan dan tendon atau pada tendon itu sendiri). Angkur-angkur biasanya diprategang untuk mereduksi gerakan yang diperlukan untuk memobilisasi tahanan tanah. Tiap angkur perlu diuji dengan uji pembebanan setelah dipasang: angkur sementara biasanya diuji sampai 1,2 kali beban kerja dan angkur permanen sampai 1,5 kali beban kerja. Akhirnya dilakukan proses pemberian prategang pada angkur-angkur tersebut. Perpindahan akibat rangkakan akan terjadi pada angkur tanah dengan pembebanan konstan. Koefisien rangkakan, yang didefinisikan sebagai perpindahan tiap satuan log waktu, dapat ditentukan dengan uji pembebanan. Telah diusulkan bahwa koefisien ini tidak boleh lebih besar dari 1 mm untuk 1,5 kali beban kerja.

Sebuah penyelidikan tanah yang cukup luas perlu dilakukan di lokasi-lokasi dimana angkur-angkur tanah akan dimanfaatkan. Profil tanah harus ditentukan secara teliti, dimana setiap variasi pada elevasi dan tebal lapisan tanah tersebut sangat penting untuk diketahui. Pada pasir, distribusi ukuran partikel perlu ditentukan, agar permeabilitas dan ekseptabilitas adukan semen dapat diperkirakan. Kerapatan relative pasir juga perlu diketahui untuk membuat suatu perkiraan nilai  $\phi'$ . Pada lempung



### 3.7.1. Angkur pada pasir

Secara umum urutan pembangunannya adalah sebagai berikut. Sebuah lobang bor berselubung (*cased*) (dengan diameter sekitar 75 – 125 mm) dibuat sepanjang kedalaman yang diperlukan. Tendon kemudian diatur dalam lubang tersebut dan adukan semen disuntikan dengan tekanan tertentu pada seluruh panjang angkur terjepit sambil mencabut selubung lubang bor. Adukan tersebut berpenetrasi ke tanah di sekeliling lubang bor, sejauh jarak tertentu yang tergantung pada permeabilitas tanah dan tekanan suntikan, membentuk suatu zona tanah yang di-grout, di mana diameternya dapat mencapai empat kali diameter lubang bor (gambar 3.14). Ini perlu dilakukan dengan sangat hati-hati untuk memastikan bahwa tekanan suntikan tidak melebihi tekanan akibat tanah di atas angkur, bila tidak maka akan terjadi tonjolan (*heaving*) atau celah-celah pada tanah. Ketika adukan tersebut telah mencapai kekuatan yang memadai, ujung lain dari tendon diangkurkan pada pelat dudukan. Ruang antara selongsong tendon dan sisi-sisi lubang bor, pada seluruh panjang angkur bebas, biasanya diisi dengan adukan semen (dengan tekanan rendah) sehingga memberikan tambahan perlindungan terhadap karat pada tendon.

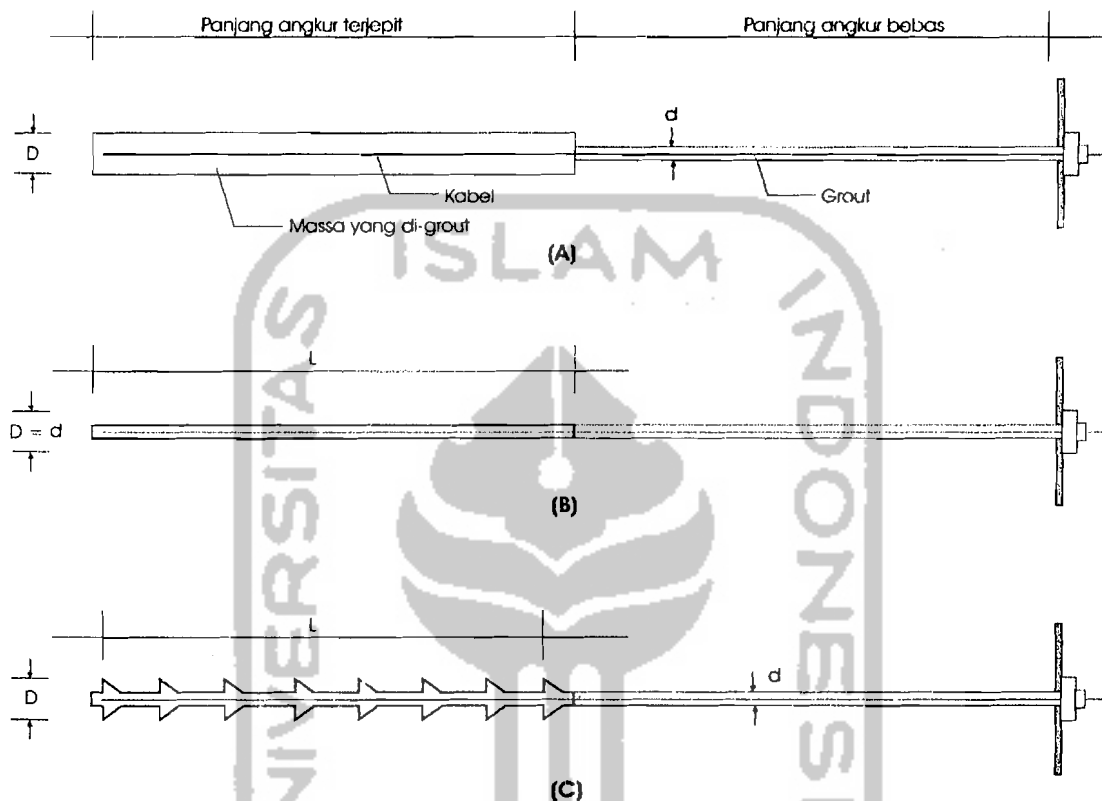
Tahanan ultimit dari sebuah angkur untuk tercabut keluar sama dengan jumlah tahanan sisi dan tahanan ujung dari massa yang di-grout. Persamaan teoritis berikut ini diusulkan oleh Littlejohn (1970):

$$Q_f = A\gamma' \left( h + \frac{L}{2} \right) \pi D L \tan \phi' + B\gamma' h \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (3.34)$$

di mana  $Q_f$  = kapasitas beban ultimit angkur,  $A$  = rasio tekanan normal pada daerah pertemuan terhadap tekanan efektif akibat tanah di atasnya,  $B$  = faktor daya dukung,  $h$  = kedalaman lapisan tanah di atasnya,  $L$  = panjang angkur terjepit,  $D$  = diameter angkur terjepit, dan  $d$  = diameter lubang bor.

Sedangkan besarnya gaya yang harus ditahan oleh keseluruhan angkur adalah:

$$F = \frac{\lambda - 1}{\lambda} W \left( \frac{\sin \phi}{\cos(\phi + \alpha)} \right) \quad (3.35)$$



**Gambar 3.14.** Jenis-jenis angkur tanah: (a) massa yang di-grout yang dibentuk dengan suntikan tekanan, (b) silinder adukan semen, (c) angkur dengan pelebaran ujung majemuk (Craig, 1989).

Telah diusulkan bahwa nilai  $A$  lazimnya berada dalam rentang 1 sampai 2. Faktor  $B$  analog dengan faktor daya dukung  $Nq$  dalam kasus tiang pancang dan telah diusulkan bahwa rasio  $Nq/B$  berada dalam rentang 1,3 sampai 1,4, dengan memakai nilai  $Nq$  dari Berezantzev, Khristoforov, dan Golubkov. Tetapi, persamaan di atas tidak cukup mewakili semua faktor yang relevan dalam sebuah permasalahan yang kompleks. Tahanan ultimit juga tergantung pada rincian teknik pemasangan dan sejumlah rumus empiris yang telah diusulkan oleh kontraktor-kontraktor khusus, yang layak untuk dipakai dengan teknik-teknik utama mereka.

