

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Pendahuluan

Pada permukaan tanah yang tidak horizontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikerahkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi kelongsoran lereng. Analisis stabilitas pada permukaan tanah yang miring ini, disebut analisis stabilitas lereng.

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 dan aliran rembesan air dalam tanah.

Kelongsoran lereng biasanya disebabkan oleh adanya perubahan tegangan efektif yang disebabkan oleh perubahan tekanan air pori, dan bertambahnya berat sendiri tanah akibat infiltrasi air hujan ke dalam tanah. Hal-hal yang paling berpengaruh dalam kestabilan lereng adalah:

- 1.) Kuat geser tanah
- 2.) Geometri lereng
- 3.) Tekanan air pori atau gaya rembesan
- 4.) Kondisi pembebanan dan lingkungan.

#### 2.2. Parameter Tanah

Dalam setiap perencanaan konstruksi, selalu dibutuhkan nilai parameter tanah yang tentunya diharapkan dapat mempresentasikan kondisi tanah di lapangan. Data yang digunakanpun dapat berupa data pengujian laboratorium maupun pengujian *in situ*. Namun karena permasalahan waktu, biaya, maupun teknis di lapangan, terkadang sampel pengujian hanya diuji pada tempat-tempat

tertentu yang dianggap dapat mewakili nilai parameter tanah di lokasi rencana keseluruhan.

Kelengkapan data dalam penyelidikan lapangan menentukan akurasi dalam perencanaan, tetapi tidak semua data dapat diperoleh dengan lengkap. Hal tersebut terkait dengan masalah biaya pengambilan atau kendala nonteknis yang terjadi di lapangan. Oleh karena itu, perencana harus dapat mengambil asumsi yang dapat dipertanggungjawabkan dengan nilai kesalahan yang minimal. Asumsi tersebut diperoleh dari korelasi empiris yang telah dilakukan oleh ahli-ahli geoteknik dan mengacu pada pemahaman mekanika tanah yang baik.

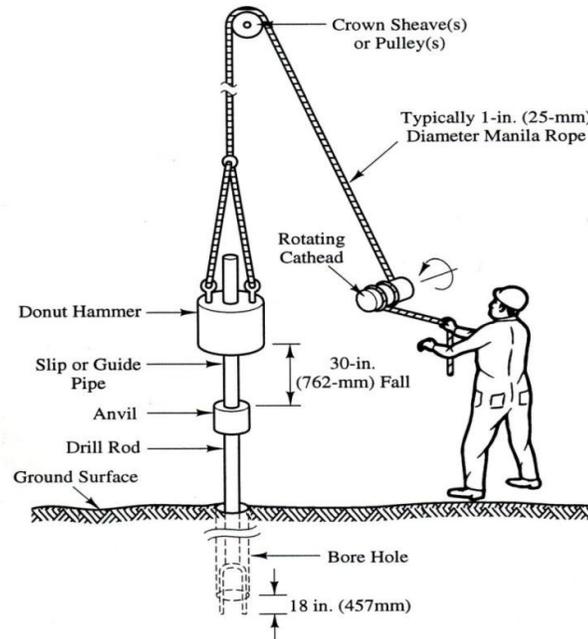
### **2.2.1. *Standard Penetration Test (SPT)***

Data parameter tanah yang digunakan sebagai acuan dalam stabilitas lereng biasanya menggunakan data SPT. (*standard penetration test*). Pengujian dilakukan dengan menjatuhkan batangan besi (pemukul) ke bor yang ada di dalam tanah dan menghitung jumlah pukulan yang diperlukan untuk memperdalam lubang bor sedalam 15 cm. Semakin banyak pukulan yang diperlukan, semakin keras tanah yang sedang diuji.

Standart Penetration Test (SPT) dilakukan untuk mengestimasi nilai kerapatan relatif dari lapisan tanah yang diuji. Untuk melakukan pengujian SPT dibutuhkan sebuah alat utama yang disebut *Standard Split Barrel Sampler* atau tabung belah standar. Alat ini dimasukkan ke dalam *Bore Hole* setelah dibor terlebih dahulu dengan alat bor. Alat ini diturunkan bersama-sama pipa bor dan diturunkan hingga ujungnya menumpu ke tanah dasar. Setelah menumpu alat ini kemudian dipukul (dengan alat pemukul yang beratnya 63,5 kg) dari atas.

Pada pemukulan pertama alat ini dipukul hingga sedalam 15 cm. Kemudian dilanjutkan dengan pemukulan tahap kedua sedalam 30 cm dan dilanjutkan sedalam 45. Pukulan kedua dan ketiga inilah muncul nilai "N" yang merupakan manifestasi jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk membuat tabung standar mencapai kedalaman 45 cm. Namun karena beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perbedaan nilai seperti faktor jenis *hammer*, diameter *bore hole* yang berbeda, panjang *rod* yang berbeda sehingga nilai N yang didapat dari

pengujian tidak dapat secara serta merta langsung digunakan untuk perhitungan dan memerlukan koreksi terlebih dahulu.



**Gambar 2.1.** *Standard Penetration Test*

(Sumber : [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org))

Adapun menurut Skempton (1986) variasi dalam prosedur pengujian mungkin setidaknya sebagian dikompensasi dengan mengkonversi kamu diukur N ke N<sub>60</sub> sebagai berikut:

$$N_{60} = \frac{E_m C_s C_b C_r N}{0.60} \quad (2.1)$$

- N<sub>60</sub> = nilai N koreksi
- E<sub>m</sub> = efisiensi nilai transfer energi dari *hammer*
- C<sub>s</sub> = faktor koreksi sampel
- C<sub>b</sub> = faktor koreksi diameter bor
- C<sub>r</sub> = faktor koreksi panjang rod
- N = nilai N terlampir

**Tabel 2.1.** Tabel Nilai Faktor-Faktor Koreksi N-SPT

<b>SPT Hammer Efficiencies</b>		
<b>Hammer Type</b>	<b>Hammer Release Mechanism</b>	<b>Efficiency, EM</b>
Automatic	Trip	0.70
Donut	Hand dropped	0.60
Donut	Cathead+2 turns	0.50
Safety	Cathead+2 turns	0.55-0.60
Drop/Pin	Hand dropped	0.45
<b>Borehole, Sampler and Rod Correction Factors</b>		
<b>Factor</b>	<b>Equipment Variables</b>	<b>Correction Factor</b>
Borehole Dia Factor, CB	65 – 115 mm (2.5-4.5 in)	1.00
	150 mm (6 in)	1.05
	200 mm (8 in)	1.15
Sampler Correction, CS	Standard sampler	1.00
	Sampler without liner (not recommended)	1.20
Rod Length Correction, CR	3 – 4 m (10-13 ft)	0.75
	4 – 6 m (13-20 ft)	0.85
	6 – 10 m (20-30 ft)	0.95
	>10 m (>30 ft)	1.00

(Sumber : Foundation Engineering Chapter 1, Manzur Rahman)

### 2.2.2. Berat Volume Tanah dan Hubungannya

Dalam tanah yang jenuh juga terdapat dua bagian yaitu bagian padat atau butiran dan air pori. Dalam keadaan tidak jenuh, tanah terdiri dari tiga bagian yaitu bagian dalam (butiran), pori-pori udara dan air pori.

$$V = V_s + V_a + V_w \quad (2.2)$$

$$V_v = V_a + V_w \quad (2.3)$$

Dengan:

$W_s$  = Berat butiran padat

$W_w$  = Berat air

$V_s$  = Volume butiran padat

$V_w$  = Volume air

$V_a$  = Volume udara

$V_v$  = Volume rongga

$V$  = Volume total

Hubungan–hubungan volume yang sering digunakan dalam stabilitas lereng adalah kadar air ( $w$ ), angka pori ( $e$ ), porositas ( $n$ ) dan derajat kejenuhan ( $s$ ).

Kadar air ( $w$ ) adalah perbandingan antara berat air ( $W_w$ ), dengan berat butiran padat ( $W_s$ ) dalam tanah tersebut dan dinyatakan dalam persen.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.4)$$

Porositas ( $n$ ) adalah perbandingan antara volume rongga ( $V_v$ ) dengan volume total ( $V$ ). Nilai  $n$  dapat dinyatakan dalam persen atau desimal.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.5)$$

Angka pori ( $e$ ), didefinisikan sebagai perbandingan antara volume rongga ( $V_v$ ) dengan volume butiran ( $V_s$ ), biasanya juga dinyatakan dengan desimal.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.6)$$

Berat volume basah ( $\gamma_m$ ) adalah perbandingan antara berat butiran tanah termasuk air dan udara ( $W$ ) dengan volume total tanah ( $V$ )

$$\gamma_m = \frac{W}{V} \quad (2.7)$$

dengan  $W = W_w + W_s + W_a$  ( $W_a = 0$ ) bila ruang udara terisi oleh air seluruhnya ( $V_a = 0$ ), maka tanah menjadi jenuh.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V} \quad (2.8)$$

Berat volume butiran padat ( $\gamma_s$ ) adalah perbandingan antara berat butiran padat ( $W_s$ ) dengan volume butiran padat ( $V_s$ ).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.9)$$

Berat spesifik atau berat jenis tanah (*specific gravity*) ( $G_s$ ) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air pada temperatur 4 °C.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.10)$$

Dari nilai pengujian SPT juga bisa didapatkan nilai berat volume dengan korelasi yang mendekati nilai asli dan memiliki akurasi yang cukup tinggi. Adapun hubungan nilai N-SPT dengan berat volume dirumuskan oleh Peck (1974) dan Bowles (1977) :

Untuk tanah kohesif,

$$\gamma_{sat} = 16.8 + 0.15N_{60} \text{ (kn/m}^3\text{)} \quad (2.11)$$

Untuk tanah non-kohesif,

$$\gamma_{moist} = 16.0 + 0.1N_{60} \text{ (kn/m}^3\text{)} \quad (2.12)$$

$$\gamma_{submerged} = 8.8 + 0.01N_{60} \text{ (kn/m}^3\text{)} \quad (2.13)$$

**Tabel 2.2.** Konsistensi Tanah dan Parameter Tanah Berdasarkan Data N-SPT untuk Tanah Non-kohesif

SPT N-value		0 to 4	4 to 10	10 to 30	30 to 50	>50
Compactness		very loose	loose	medium	dense	very dense
Relative Density, $D_r$ (%)		0 to 15	15 to 35	35 to 65	65 to 85	85 to 100
Angle of Internal Friction, $\phi$ (°)		<28	28 to 30	30 to 36	36 to 41	>41
Unit Weight (moist)	pcf	<100	95 to 125	110 to 130	110 to 140	>130
	kN/m <sup>3</sup>	<15.7	14.9 to 19.6	17.3 to 20.4	17.3 to 22.0	>20.4
Submerged unit weight	pcf	<60	55 to 65	60 to 70	65 to 85	>75
	kN/m <sup>3</sup>	<9.4	8.6-10.2	9.4 to 11.0	10.5 to 13.4	>11.8

(Sumber : Foundation Engineering Chapter 1, Manzur Rahman)

**Tabel 2.3.** Konsistensi Tanah dan Parameter Tanah Berdasarkan Data N-SPT untuk Tanah Kohesif

SPT N-value		0 to 2	2 to 4	4 to 8	8 to 16	16 to 32	>32
Consistency		very soft	soft	medium	stiff	very stiff	hard
Unconfined Comp. Test	lb/ft <sup>2</sup>	0 to 250	250 to 500	500 to 1000	1000 to 2000	2000 to 4000	>4000
	kPa	0 to 25	25 to 50	50 to 100	100 to 200	200 to 400	>400
Unit Weight (Saturated)	pcf	<100	100 to 120	110 to 125	115 to 130	120 to 140	>130
	kN/m <sup>3</sup>	<15.7	15.7 to 18.8	17.3 to 19.6	18.1 to 20.4	18.8 to 22.0	>20.4

(Sumber : *Foundation Engineering Chapter 1, Manzur Rahman*)

### 2.2.3. Kuat Geser Tanah

Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisis-analisis kapasitas dukung tanah, stabilitas lereng, dan gaya dorong pada dinding penahan tanah. Menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya.

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh:

- (1) Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak bergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
- (2) Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya.

**Tabel 2.4.** Hubungan secara pendekatan  $c_u$  dengan N-SPT untuk lempung (AASHTO, 1998)

Nilai pendekatan $c_u$ (kPa)	Peneliti
$c_u = 12,5$ N	Sanglerat (1972)
$c_u = 7$ N	Reese et al. (1976)
$c_u = 4 - 6$ N	Stroud & Butler (1975)
$c_u = 6$ N	Kulhawy & Mayne b(1990)

(Sumber : Analisis dan Perancangan Pondasi II hal. 425, Hary Christady. H)

Untuk pendekatan nilai kohesi dengan N-SPT bias juga dapat dihitung dengan hubungan jenis tanah

**Tabel 2.5.** Hubungan secara pendekatan  $c_u$  dengan deskripsi tanah (Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, 2007)

Description	USCS	Cohesion [kPa]	
		min	max
Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90
Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20
Silt Loam - Compacted	ML, OL, MH, OH	60	90
Silt Loam - Saturated	ML, OL, MH, OH	10	20
Clay Loam, Silty Clay Loam - Compacted	ML, OL, CL, MH, OH, CH	60	105
Clay Loam, Silty Clay Loam - Saturated	ML, OL, CL, MH, OH, CH	10	20
Silty clay, clay - compacted	OL, CL, OH, CH	90	105
Silty clay, clay - saturated	OL, CL, OH, CH	10	20

(Sumber : [www.geotechdata.info](http://www.geotechdata.info))

Nilai kuat geser tanah yang mempengaruhi dalam analisa stabilitas lereng selain kohesi adalah sudut geser tanah. Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material tanah atau batuan. Sudut geser dalam adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya.

Pendekatan sudut geser dalam terhadap N-SPT dikemukakan oleh Peck (1974) dan Bowles (1977), yakni :

$$\phi = 27 + 0.3(N_{60}), \text{ untuk tanah non kohesif} \quad (2.14)$$

Sudut geser untuk tanah kohesif seringkali dianggap tidak ada (nol), tetapi untuk beberapa kasus nilai sudut geser pada lempung sebenarnya tidaklah nol. Nilai sudut geser dapat dihubungkan dengan jenis tanah. Tabel berikut memaparkan hubungan antara sudut geser dalam dengan jenis tanah.

**Tabel 2.6.** Hubungan secara pendekatan sudut geser dengan deskripsi tanah (*Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, 2007*)

Description	USCS	Soil friction angle [°]	
		min	max
Inorganic silts of high plasticity	MH	23	33
Clayey silts - compacted	MH		25
Silts and clayey silts - compacted	ML		32
Inorganic clays of high plasticity	CH	17	31
Clays of high plasticity - compacted	CH		19
Organic clays of high plasticity	OH	17	35
Silt Loam	ML, OL, MH, OH	25	32
Clay Loam, Silty Clay Loam	ML, OL, CL, MH, OH, CH	18	32
Silty clay	OL, CL, OH, CH	18	32
Clay	CL, CH, OH, OL	18	28

(Sumber : [www.geotechdata.info](http://www.geotechdata.info))

### 2.3. Model-model Keruntuhan (Longsoran)

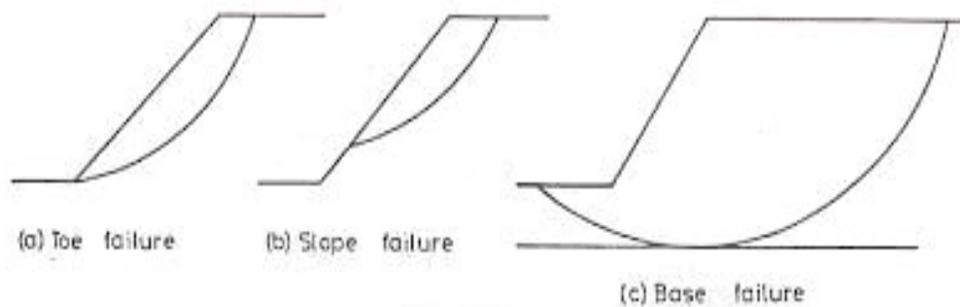
Longsoran sering didefinisikan sebagai gerakan yang terdiri dari tegangan geser dan perpindahan sepanjang bidang longsoran dimana massa berpindah dari tempat semula dan terpisah dari massa tanah yang mantap, atau dapat juga diartikan longsor merupakan suatu proses perpindahan massa tanah/batuan dengan arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukannya semula karena pengaruh gravitasi, arus air dan beban luar sehingga terpisah dari massa yang mantap. Bentuk longsoran sangat dipengaruhi oleh geometri dari lereng,

Dilihat dari bentuk bidang longsor tanah, maka terdapat beberapa bentuk longsor yaitu :

### 2.3.1. *Rotational Slides*

Biasanya terjadi pada lereng-lereng alam dan timbunan yang terdiri dari tanah yang homogen. Longsor akan berkumpul di kaki lereng dan akan berhenti bila massa tanah yang terkumpul sudah banyak. Bentuk bidang mendekati busur lingkaran, biasanya berupa deep slides (bidang gesernya dalam) atau surface slides (bidang gesernya dangkal). Rotational slides ini merupakan kasus yang paling umum dalam melongsorkan tanah atau lereng. Dilihat dari bentuk bidang longsor tanah, maka terdapat beberapa bentuk longsor yaitu :

- a. Slope Failure (Longsor Talud) : terjadi di atas kaki lereng.
- b. Toe Failure (Longsor Dalam) : terjadi di ujung kaki lereng.
- c. Base Failure (Longsor Bawah) : terjadi di bawah lereng.

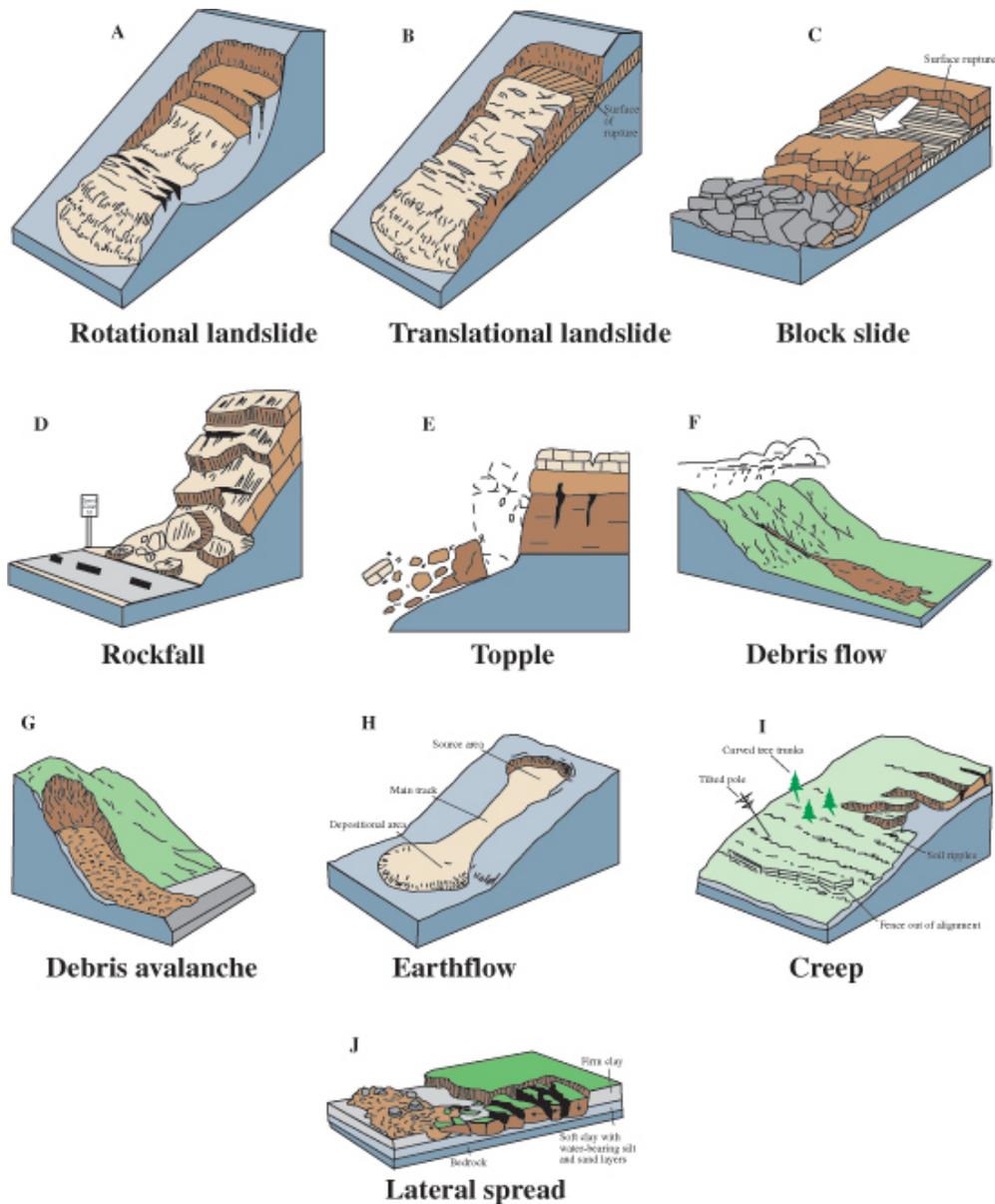


**Gambar 2.2.** Bentuk-bentuk bidang gelincir

(Sumber : [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org))

### 2.3.2. *Translation Slides*

Dimana bidang gelincirnya hampir lurus dan sejajar dengan muka tanah. Hal ini biasanya terjadi pada lereng alam, dimana tanah dari lereng tersebut mempunyai lapisan yang berbeda-beda. Bidang longsor terjadi sepanjang lapisan tanah yang lemah dan dapat terjadi sampai jarak jauh.



**Gambar 2.3.** Jenis-jenis keruntuhan lereng

(Sumber : [www.pubs.usgs.gov](http://www.pubs.usgs.gov))

### 2.3.3. Longsoran blok (*Block Slide*)

Biasanya terjadi pada lereng alam dan lereng buatan, dimana tanah tidak homogeny. Bagian-bagian tanah yang jelek menyebabkan pergeseran massa tanah tersebut, dan massa tanah itu memberikan aksi pada tanah di sebelahnya, sehingga tanah di sebelahnya akan ikut longsor.

#### **2.3.4. Longsoran mengalir (*Flow*)**

Longsoran ini disebabkan tanah yang tidak padat. Keadaan tanah yang demikian adanya dengan sendirinya tanah tersebut akan mengalir, seperti contohnya: earthflow, debris flow.

#### **2.3.5. Longsoran menyebar (*Lateral Spread*)**

Longsoran ini hamper sama dengan longsoran translasi, hanya pada keadaan ini penyebarannya ke segala arah. Salah satu penyebabnya adalah gempa.

#### **2.3.6. Longsoran Puing (*Debris Avalanche*)**

Aliran campuran masa tanah dan batuan (*Debris avalanche*): suatu aliran yang meluncur dari debris batuan pada celah yang sempit dan berlereng terjal.

### **2.4. Konsep Umum Kestabilan Lereng**

Analisis stabilitas lereng umumnya didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Maksud dari analisis stabilitas adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan dibuat, yaitu:

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

## **2.5. Perhitungan Kestabilan Lereng**

### **2.5.1. Prinsip Keseimbangan Batas**

Metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) digunakan dalam menganalisis stabilitas lereng. Dianggap bahwa keruntuhan (*failure*) terjadi pada titik di sepanjang permukaan runtuh yang diasumsikan maupun yang diketahui. Dengan membandingkan kuat geser yang dibutuhkan untuk mempertahankan kondisi keseimbangan batas dengan kuat geser yang ada pada tanah, maka akan didapatkan faktor keamanan rata-rata sepanjang permukaan runtuh.

### **2.5.2. Analisis Faktor Keamanan dengan Metode Irisan**

Metode irisan merupakan metode yang sangat populer dalam analisis kestabilan lereng. Metode ini telah terbukti sangat berguna dan dapat diandalkan dalam praktek rekayasa serta membutuhkan data yang relatif sedikit dibandingkan dengan metode lainnya, seperti metode elemen hingga (*finite element*), metode beda hingga (*finite difference*) atau metode elemen diskrit (*discrete element*).

Ide untuk membagi massa di atas bidang runtuh ke dalam sejumlah irisan telah digunakan sejak awal abad 20. Pada tahun 1916, Peterson melakukan analisis kestabilan lereng pada beberapa dinding dermaga di Gothenberg, Swedia, dimana bidang runtuh dianggap berbentuk sebuah busur lingkaran dan kemudian massa di atas bidang runtuh dibagi ke dalam sejumlah irisan vertikal. Dua puluh tahun kemudian, Fellenius (1936) memperkenalkan metode irisan biasa. Setelah itu muncul beberapa metode irisan lainnya, antara lain yang dikembangkan oleh: Janbu (1954, 1957); Bishop (1955); Morgenstern dan Price (1965); Spencer (1967); Sarma (1973, 1979); Fredlund dan Krahn (1977), Fredlund, dkk (1981); Chen dan Morgenstern (1983); Zhu, Lee dan Jiang (2003).

Terdapatnya beberapa macam variasi dari metode irisan disebabkan oleh adanya perbedaan asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan. Asumsi tersebut dipergunakan karena analisis kestabilan lereng merupakan persoalan statika taktentu (*indefinite statics*) sehingga diperlukan beberapa asumsi tambahan yang diperlukan dalam perhitungan faktor keamanan.

Semua metode irisan menyatakan kondisi kestabilan suatu lereng dinyatakan dalam suatu indeks yang disebut faktor keamanan (F), yang didefinisikan sebagai berikut:

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{kekuatan geser material yang tersedia}}{\text{kekuatan geser yang diperlukan agar tepat setimbang}} \quad (2.15)$$

Faktor keamanan diasumsikan mempunyai nilai yang sama untuk setiap irisan.

Kekuatan geser material yang tersedia untuk menahan material sehingga lereng tidak longsor dinyatakan dalam kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb sebagai berikut:

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' \quad (2.16)$$

dimana:

s = Kekuatan geser

c' = kohesi efektif

$\phi'$  = sudut gesek efektif

$\sigma_n$  = tegangan normal total

u = tekanan air pori

Kekuatan geser tersebut dianggap tidak tergantung pada kondisi tegangan-regangan yang ada pada lereng.

Besarnya tahanan geser yang diperlukan agar lereng berada dalam kondisi tepat setimbang [ $S_m$ ] dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_m = \frac{s \beta}{F} = \frac{(c' + (\sigma_n - u) \tan \phi') \beta}{F}$$

$$S_m = \frac{c' \beta + (N - u \beta) \tan \phi'}{F} \quad (2.17)$$

Karakteristik lainnya yaitu geometri dari bidang gelinciran harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Untuk menyederhanakan perhitungan, bidang runtuh biasanya dianggap berbentuk sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa segmen garis lurus. Ilustrasi beberapa bentuk bidang runtuh tersebut dan gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan ditunjukkan pada gambar 1 sampai gambar 3.





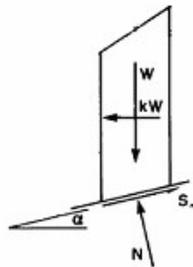
- $b$  = Lebar irisan.
- $\beta$  = Panjang dasar irisan [ $\beta = b \sec \alpha$ ].
- $a$  = Jarak vertikal dari gaya hidrostatik terhadap pusat momen.
- $A$  = Gaya hidrostatik pada retakan tarik.
- $\alpha$  = Sudut kemiringan dari garis singgung pada titik di tengah dasar irisan terhadap bidang horisontal. Sudut kemiringan bernilai positif apabila searah dengan kemiringan lereng, dan bernilai negatif apabila berlawanan arah dengan kemiringan lereng.

Setelah geometri dari bidang runtuh ditentukan kemudian selanjutnya massa di atas bidang runtuh dibagi ke dalam sejumlah irisan tertentu. Tujuan dari pembagian tersebut adalah untuk mempertimbangkan terdapatnya variasi kekuatan geser dan tekanan air pori sepanjang bidang runtuh.

Penjelasan yang lebih detail dari beberapa metode irisan diberikan pada beberapa subbab berikut.

#### A. Metode Irisan Biasa (Metode Fellenius)

Metode irisan biasa (Fellenius, 1936) merupakan metode yang paling sederhana diantara beberapa metode irisan. Metode ini juga dinamakan sebagai metode lingkaran Swedia. Asumsi yang digunakan dalam metode ini adalah resultan gaya antar irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh, serta bidang runtuh berupa sebuah busur lingkaran. Kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi oleh metode ini hanya kesetimbangan momen untuk semua irisan pada pusat lingkaran runtuh.



**Gambar 2.7** Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Fellenius.

(Sumber: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku kompilasi tidak diterbitkan, 2008)

Gaya normal total ditentukan dengan menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah tegak lurus dasar irisan, besarnya yaitu:

$$N = W \cos \alpha - kW \sin \alpha \quad (2.18)$$

Dengan merujuk pada Gambar 2.4, kesetimbangan momen pada pusat lingkaran runtuh untuk semua irisan adalah sebagai berikut :

$$\sum_{i=1}^n (WR \sin \alpha + kW(R \cos \alpha - h_c)) - \sum_{i=1}^n (S_m R) + Aa = 0 \quad (2.19)$$

dimana  $h_c$  adalah tinggi pusat massa irisan dari titik tengah pada dasar irisan.

Gaya geser yang diperlukan agar lereng berada dalam kondisi setimbang adalah:

$$S_m = \frac{c' \beta + (N - u\beta) \tan \phi'}{F} \quad (2.20)$$

Apabila persamaan di atas disubstitusikan ke dalam persamaan (2.7) akan diperoleh persamaan untuk menghitung faktor keamanan (F) sebagai berikut:

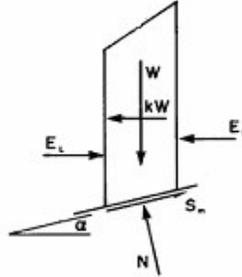
$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [c' \beta + (N - u\beta) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n [W \sin \alpha + kW(\cos \alpha - \frac{h_c}{R})] + \frac{Aa}{R}} \quad (2.21)$$

Apabila dibandingkan dengan metode lainnya yang lebih teliti, seperti Metode Bishop atau Metode Spencer, faktor keamanan yang dihitung dengan metode ini pada umumnya mempunyai nilai yang lebih rendah sebesar 5% sampai 20%. Bahkan untuk lereng landai dengan tekanan air pori yang tinggi, perbedaannya dapat mencapai sekitar 60%. Untuk lereng dengan material yang mempunyai sudut gesek sama dengan nol ( $\phi = 0$ ) metode ini dapat memberikan nilai faktor keamanan yang sama akuratnya dengan Metode Bishop Yang Disederhanakan. Untuk lereng dengan material yang mempunyai sudut gesek lebih besar daripada nol, metode ini sebaiknya tidak digunakan karena dapat menghasilkan rancangan lereng yang tidak ekonomis.

## **B. Metode Bishop Yang Disederhanakan (*Simplified Bishop Method*)**

Diantara metode irisan lainnya, metode Bishop yang disederhanakan (Bishop, 1955) merupakan metode yang paling populer dalam analisis kestabilan lereng. Asumsi yang digunakan dalam metode ini yaitu besarnya gaya geser antar-irisan sama dengan nol ( $X=0$ ) dan bidang runtuh berbentuk sebuah busur lingkaran. Kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi oleh metode ini adalah

kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan dan kesetimbangan momen pada pusat lingkaran runtuh untuk semua irisan, sedangkan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal tidak dapat dipenuhi.



**Gambar 2.8** Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Bishop.

(Sumber: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku kompilasi tidak diterbitkan, 2008)

Kesetimbangan gaya dalam arah vertikal menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - W = 0 \quad (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.5) ke persamaan (2.10) akan menghasilkan persamaan untuk gaya normal total (N) sebagai berikut:

$$N = \frac{W - \frac{c' \beta \sin \alpha - u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (2.23)$$

Dengan merujuk pada Gambar 2.4, kesetimbangan momen pada pusat lingkaran runtuh untuk semua irisan adalah sebagai berikut:

$$\sum_{t=1}^n (WR \sin \alpha + kW(R \cos \alpha - h_c)) - \sum_{t=1}^n (S_m R) + A\alpha = 0 \quad (2.24)$$

dimana  $h_c$  adalah tinggi pusat massa irisan dari titik tengah pada dasar irisan. Gaya geser antar-irisan dihilangkan dari persamaan di atas karena resultan momen dari gaya-gaya tersebut saling menghilangkan.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) ke dalam persamaan di atas akan menghasilkan persamaan untuk menghitung faktor keamanan (F) sebagai berikut:

$$F = \frac{\sum_{t=1}^n [c' \beta + (N - u \beta) \tan \phi']}{\sum_{t=1}^n [W \sin \alpha + kW \left( \cos \alpha - \frac{h_c}{R} \right)] + A \frac{\alpha}{R}} \quad (2.25)$$

dimana N dihitung menggunakan persamaan (2.11).

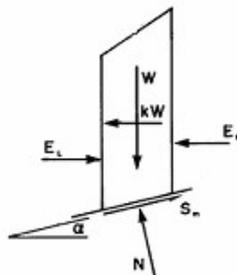
Pada persamaan (2.13) variabel faktor keamanan (F) terdapat pada kedua sisi persamaan sehingga perhitungan nilai F tidak dapat dilakukan secara langsung

dan harus dihitung dengan menggunakan aproksimasi berulang (iterasi). Aproksimasi berulang dilakukan beberapa kali sampai nilai perbedaan dari  $F$  pada kedua sisi persamaan lebih kecil dari nilai toleransi yang diberikan.

Metode Bishop yang disederhanakan merupakan metode sangat populer dalam analisis kestabilan lereng dikarenakan perhitungannya yang sederhana, cepat dan memberikan hasil perhitungan faktor keamanan yang cukup teliti. Kesalahan metode ini apabila dibandingkan dengan metode lainnya yang memenuhi semua kondisi kesetimbangan seperti Metode Spencer atau Metode Kesetimbangan Batas Umum, jarang lebih besar dari 5%. Metode ini sangat cocok digunakan untuk pencarian secara otomatis bidang runtuh kritis yang berbentuk busur lingkaran untuk mencari faktor keamanan minimum.

### C. Metode Janbu Yang Disederhanakan (*Simplified Janbu Method*)

Metode Janbu yang disederhanakan (Janbu, 1954, 1973) juga termasuk salah satu metode yang populer dan sering digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Asumsi yang digunakan dalam metode ini yaitu gaya geser antar irisan sama dengan nol. Metode ini memenuhi kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan dan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal untuk semua irisan, namun kesetimbangan momen tidak dapat dipenuhi. Sembarang bentuk bidang runtuh dapat dianalisis dengan metode ini.



**Gambar 2.9** Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Janbu.

(Sumber: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku kompilasi tidak diterbitkan, 2008)

Kesetimbangan gaya dalam arah vertikal menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - W = 0 \quad (2.26)$$

Substitusi persamaan (2.5) ke persamaan (2.14) akan menghasilkan persamaan untuk gaya normal total (N) sebagai berikut:

$$N = \frac{w - \frac{c' \beta \sin \alpha - u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (2.27)$$

Kesetimbangan gaya pada arah horisontal untuk semua irisan adalah sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^n (E_L - E_R) - \sum_{i=1}^n (N \sin \alpha - S_m \cos \alpha + kW) = 0 \quad (2.28)$$

Berdasarkan prinsip aksi reaksi diperoleh bahwa resultan gaya-gaya normal antar irisan akan saling menghilangkan. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_R[j-1] = E_L[j] \quad (2.29)$$

dimana j adalah nomor irisan. Syarat batas untuk gaya normal antar-irisan pada sisi kiri irisan ke-1 dan pada sisi kanan irisan ke-n, adalah sebagai berikut:

$$E_L[1] = 0 \quad (2.30)$$

$$E_R[n] = A \quad (2.31)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.17), (2.18) dan (2.19) maka persamaan (2.16) dapat ditulis sebagai berikut:

$$-A - \sum_{i=1}^n (N \sin \alpha - S_m \cos \alpha + kW) = 0 \quad (2.32)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan [3] ke dalam persamaan di atas maka akan diperoleh persamaan untuk menghitung faktor keamanan (F) sebagai berikut:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n [c' \beta + (N - u \beta) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n [N \sin \alpha + kW] + A} \quad (2.33)$$

Faktor keamanan (F) terdapat pada kedua sisi dari persamaan di atas sehingga perhitungannya harus dilakukan dengan menggunakan aproksimasi berulang, sampai diperoleh nilai perbedaan dari F pada sisi kiri dan kanan lebih kecil dari nilai toleransi yang diberikan.

Faktor keamanan yang dihitung dengan persamaan (2.16) merupakan faktor keamanan yang belum dikoreksi, sehingga setelah F dihitung dengan persamaan (2.21) kemudian harus dikalikan dengan faktor koreksi  $f_0$ .

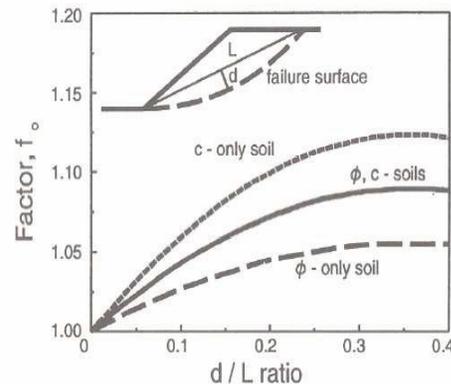
$$F_{janbu} = f_0 \cdot F \quad (2.34)$$

Faktor koreksi dimasukkan sebagai koreksi dari pengabaian gaya geser antar irisan, yang dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f_o = 1 + t \left( \frac{d}{L} - 1.4 \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right) \quad (2.35)$$

Besarnya nilai t bervariasi sesuai dengan jenis tanah yaitu sebagai berikut:

- $t = 0.69$  untuk tanah dengan  $c \neq 0$  dan  $\phi = 0$
- $t = 0.31$  untuk tanah dengan  $c = 0$  dan  $\phi \neq 0$
- $t = 0.50$  untuk tanah dengan  $c \neq 0$  dan  $\phi \neq 0$



**Gambar 2.10** Faktor koreksi untuk Metode Janbu Yang Disederhanakan.

(Sumber: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku kompilasi tidak diterbitkan, 2008)

Faktor keamanan yang dihitung dengan metode ini apabila dibandingkan dengan metode yang teliti, seperti metode Kestimbangan Batas Umum dan Morgenstern-Price, pada umumnya lebih rendah sekitar 30%, akan tetapi kadang dapat juga lebih besar sekitar 5%.

#### D. Metode Morgenstern-Price

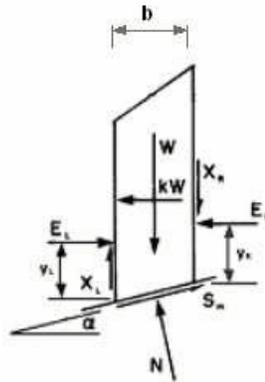
Metode Morgenstern-Price (Morgenstern & Price, 1965) dikembangkan terlebih dahulu daripada metode kesetimbangan batas umum. Metode ini dapat digunakan untuk semua bentuk bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kesetimbangan.

Metode Morgenstern-Price menggunakan asumsi yang sama dengan metode kesetimbangan batas umum yaitu terdapat hubungan antara gaya geser antar-irisan

dan gaya normal antar-irisan, yang dapat dinyatakan dengan persamaannya sebagai berikut:

$$X = \lambda f(x)E \quad (2.36)$$

Bentuk beberapa fungsi  $f(x)$  yang dapat digunakan dapat dilihat pada gambar 2.12



**Gambar 2.11** Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan metode Morgenstern-Price.

(Sumber: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Irisan. Buku kompilasi tidak diterbitkan, 2008)

Terdapat perbedaan cara perhitungan faktor keamanan diantara metode Morgenstern-Price dan metode kesetimbangan batas umum. Dalam metode kesetimbangan batas umum, perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan kesetimbangan gaya dalam arah horisontal dan kesetimbangan momen pada pusat gelinciran untuk semua irisan. Sementara itu metode Morgenstern-Price, perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan kondisi kesetimbangan gaya dan momen dari setiap irisan.

#### **Persamaan Kesetimbangan Gaya**

Kesetimbangan gaya dalam arah vertikal untuk setiap irisan adalah sebagai berikut:

$$(X_L - X_R) + N \cos \alpha + S_m \sin \alpha - W = 0 \quad (2.37)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) ke dalam persamaan di atas menghasilkan persamaan untuk gaya normal total ( $N$ ) untuk setiap irisan sebagai berikut:

$$N = \frac{(X_L - X_R) + W - \frac{c' \beta \sin \alpha - u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (2.38)$$

Besarnya gaya normal antar-irisan pada sisi kanan irisan ( $E_R$ ) dapat ditentukan dari kesetimbangan gaya pada arah horisontal untuk setiap irisan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_R = E_L - N \sin \alpha + S_m \cos \alpha - kW \quad (2.39)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.5), maka persamaan (2.38) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$E_R = E_L - N \sin \alpha + \left( \frac{c' \beta (N - u \beta) \tan \phi'}{F} \right) \cos \alpha - kW \quad (2.40)$$

Gaya geser antar-irisan pada sisi kiri dan kanan untuk setiap irisan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$X_L = \lambda f(x_L) E_L \quad (2.41)$$

$$X_R = \lambda f(x_R) E_R \quad (2.42)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.37), (2.39), (2.40), dan (2.41) maka gaya normal antar-irisan pada sisi kanan ( $E_R$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_R = \frac{(1 - \lambda f(x_L) z_\alpha)}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha)} E_L + \frac{(W z_\alpha - kW)}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha)} + \frac{(\cos \alpha - z_\alpha \sin \alpha) \left( \frac{c' \beta - u \beta \tan \phi'}{F} \right)}{(1 - \lambda f(x_R) z_\alpha)} \quad (2.43)$$

dimana:

$$z_\alpha = \frac{\tan \phi' \cos \alpha - F \sin \alpha}{\tan \phi' \cos \alpha + F \sin \alpha} \quad (2.44)$$

### Persamaan Kesetimbangan Momen

Persamaan kesetimbangan momen pada titik tengah dasar irisan adalah sebagai berikut:

$$E_L \left( y_L - \frac{1}{2} b \tan \alpha \right) - E_R \left( y_L + \frac{1}{2} b \tan \alpha \right) + \frac{1}{2} b (X_L + X_R) - W k h_c = 0 \quad (2.45)$$

dimana  $h_c$  adalah tinggi pusat massa irisan dari titik tengah pada dasar irisan. Dari persamaan di atas, titik kerja gaya antar-irisan pada sisi kanan irisan ( $y_R$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$y_R = \frac{1}{E_R} \left[ E_L \left( y_L - \frac{1}{2} b \tan \alpha \right) + \frac{1}{2} b (X_L + X_R) - W k h_c \right] - \frac{1}{2} b \tan \alpha \quad (2.46)$$

### Perhitungan Faktor Keamanan

Persamaan (2.42) dan (2.45) adalah sistem persamaan yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan. Kedua persamaan tersebut harus digunakan

secara serentak, dimulai dari irisan persamaan sampai irisan terakhir. Dalam perhitungan tersebut digunakan syarat batas untuk irisan pertama sebagai berikut:

$$E_L[1] = E_0 = 0 \quad (2.47)$$

$$y_L[1] = y_0 = 0 \quad (2.48)$$

Untuk irisan terakhir syarat batas adalah sebagai berikut

$$E_R[n] = E_n = \frac{1}{2} \gamma_w h_w^2 \quad (2.49)$$

$$y_R[n] = y_n = \frac{1}{2} h_w \quad (2.50)$$

dimana  $h_w$  adalah tinggi air yang mengisi retakan tarik. Apabila tidak ada air yang mengisi retakan tarik maka  $E_n = 0$  dan  $y_n = 0$ .

Prinsip dari perhitungan faktor keamanan dalam metode Morgenstern-Price adalah mencari pasangan nilai faktor keamanan dan faktor skala, sehingga syarat batas pada irisan terakhir dapat dipenuhi. Persyaratan lainnya yang harus dipenuhi adalah tidak ada gaya normal pada dasar irisan yang mempunyai nilai negatif dan semua titik kerja gaya antar irisan harus berada di dalam massa gelinciran.

**Tabel 2.7.** Asumsi tiap metode perhitungan stabilitas lereng

Metode	Asumsi
Irisan Biasa (Fellenius)	Resultan gaya antar-irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh.
Bishop Yang Disederhanakan	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol ( $X=0$ ).
Janbu Yang Disederhanakan	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol ( $X=0$ ). Faktor koreksi digunakan sebagai faktor empiris untuk memasukkan efek dari gaya geser antar irisan.
Lowe-Karafiath	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan sama dengan rata-rata dari kemiringan permukaan lereng dan kemiringan bidang runtuh
Corps of Engineers	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan besarnya sama dengan: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kemiringan permukaan lereng, atau</li> <li>• Kemiringan dari kaki bidang runtuh ke puncak bidang runtuh</li> </ul>
Spencer.	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan adalah sama untuk semua irisan
Morgenstern-Price.	Kemiringan gaya geser antar irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan.
Keseimbangan Batas Umum	Sudut gaya antar irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan.

### E. Metode Spencer

Spencer (1967) menganggap resultan gaya antar irisan pada semua irisan mempunyai sudut kemiringan tertentu yang sama. Hal ini secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{X}{E} = \tan(\theta) = \lambda \quad (2.51)$$

dimana  $\theta$  adalah sudut kemiringan dari resultan gaya antar-irisan. Oleh karena itu metode Spencer dapat dianggap sebagai kasus khusus dari metode Morgenstern-Price dimana  $f(x) = 1$ . Metode Spencer dapat digunakan untuk sembarang bentuk bidang runtuh dan memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan kesetimbangan momen pada setiap irisan.

**Tabel 2.8.** Kesetimbangan yang diperhitungkan pada masing-masing metode

Metode	Kesetimbangan Momen	Kesetimbangan Gaya
Ordinary Fellenius	Ya	Tidak
Bishop's Simplified	Ya	Tidak
Janbu's Simplified	Tidak	Ya
Morgenstern-Price	Ya	Ya
Spencer	Ya	Ya
Sarma	Ya	Ya

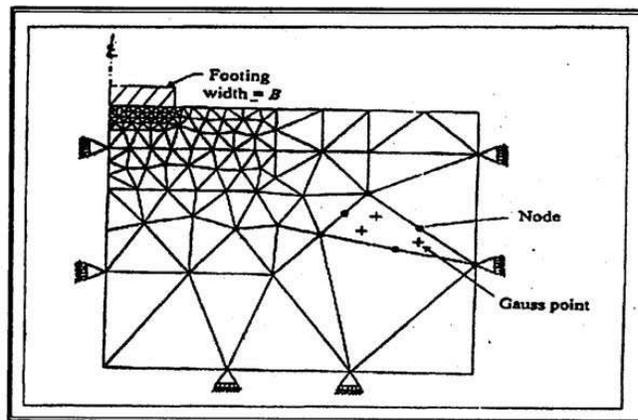
**Tabel 2.9.** Gaya antar irisan yang bekerja pada masing-masing metode

Metode	Gaya Normal Antar Irisan (E)	Gaya Geser Antar Irisan (X)	Kemiringan Resultan X/E dan hubungan antar X-E
Ordinary Fellenius	Tidak	Tidak	Tidak ada gaya antar irisan
Bishop's Simplified	Ya	Tidak	Horisontal
Janbu's Simplified	Ya	Tidak	Horisontal
Morgenstern-Price	Ya	Ya	<i>Variable; user function</i>
Spencer	Ya	Ya	Konstan
Sarma	Ya	Ya	$X = c + E \tan \phi$

### 2.5.3 Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Elemen Hingga

Metode lain yang dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng adalah dengan metode elemen hingga. Penggunaan metode elemen hingga dapat memberi keuntungan berupa:

- Tidak dibutuhkan asumsi bentuk dan letak bidang longsor. Keruntuhan terjadi secara alami melalui daerah dalam massa tanah dimana kuat geser tanah tidak kuat untuk menahan tegangan geser yang bekerja.
- Metode elemen hingga tetap mempertahankan keseimbangan global hingga keruntuhan terjadi.
- Jika data kompresibilitas tanah tersedia, solusi metode elemen hingga akan memberikan informasi mengenai deformasi pada tingkat tegangan kerja.
- Metode elemen hingga dapat memonitor keruntuhan yang sedang berlangsung serta mencakup keseluruhan keruntuhan geser.



**Gambar 2.12.** Contoh jaring-jaring dari metode elemen hingga

Menurut Aswandi dan Ishan dalam skripsi Halim (2010): “Jika dibandingkan dengan hasil analisis keseimbangan batas yang mana umumnya tidak memperhitungkan urutan pembebanan, pengalaman menunjukkan bahwa prediksi faktor keamanan tidak sensitif terhadap bentuk pembebanan gravitasi ketika menggunakan model *elastic perfectly plastic* Mohr-Culomb. Faktor keamanan hanya peka / sensitif terhadap rangkaian pembebanan ketika mengimplementasikan hukum-hukum konstitutif yang kompleks, seperti mencoba mengusahakan untuk menghasilkan perubahan volume secara akurat pada lingkungan tak terairi ataupun terairi sebagian.”

Data yang diperlukan dalam analisis menggunakan metode elemen hingga dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

1. Perilaku tegangan-regangan nonlinier

Pada umumnya, *software* komputer geoteknik dengan metode elemen hingga menggunakan perilaku tegangan-regangan tanah non linier. Tegangan-regangan merupakan faktor penting yang diperlukan dalam perhitungan:

- Tegangan awal (sebelum pembebanan)
- Kekuatan dan perilaku tegangan-regangan nonlinier
- Urutan pelaksanaan konstruksi yang menunjukkan kondisi pembebanan saat analisis

2. Tegangan tanah

Perilaku tegangan-regangan tanah bergantung pada tegangan pada tanah. Ketika tanah tidak elastik, regangan dan perpindahan yang terjadi tergantung pada urutan perubahan beban, seperti besaran beban. Data yang dibutuhkan untuk analisis elemen hingga dapat ditentukan dari studi detail yang sama dari jenis pengujian yang dibutuhkan untuk analisis konvensional seperti pada analisa penurunan atau stabilitas.

3. Parameter

Parameter yang dibutuhkan untuk model tegangan regangan tanah yang digunakan dalam analisis elemen hingga dapat ditentukan dari hasil uji laboratorium, misalnya uji triaksial, uji geser langsung, atau uji konsolidasi. Hasil uji lapangan (SPT, CPT, DMT) juga dapat digunakan untuk jenis tanah yang sama, untuk mengestimasi parameter tegangan-regangan. Ada enam parameter tanah yang digunakan dalam metode elemen hingga, yaitu:

- Sudut geser,  $\phi$
- Kohesi,  $c$
- Sudut dilatasi,  $\psi$
- Modulus Young,  $E$
- Poisson rasio,  $\nu$
- Berat unit tanah,  $\gamma$

Sudut dilatansi  $\psi$  mempengaruhi perubahan volume tanah saat runtuh. Sebaiknya diketahui bahwa perubahan volume yang diperlihatkan oleh tanah pada saat runtuh sangat bervariasi. Parameter elastis adalah modulus elastisitas tanah ( $E$ ) dan rasio poisson ( $\nu$ ). Parameter  $c$  dan  $\phi$  menunjukkan parameter kuat geser tanah. Kriteria Mohr-Coulomb tetap digunakan secara luas di bidang geoteknik, kriteria tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$F = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \Phi' - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - c' \cos \Phi' \quad (2.52)$$

dimana  $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$  adalah tegangan efektif utama mayor dan minor.

Untuk nilai  $F < 0$ , tegangan dalam selubung keruntuhan (elastik), untuk  $F = 0$ , tegangan pada selubung keruntuhan (yielding), sedangkan untuk  $F > 0$ , tegangan diluar selubung (yielding) dan harus didistribusi ulang.

Suatu program komputer yang dikembangkan berdasarkan cara pengurangan kekuatan adalah PLAXIS dan Geo Studio. Pada Plaxis menggunakan metode langsung (*direct method*), yaitu metode perhitungan stabilitas lereng menggunakan elemen hingga dengan cara pengurangan kekuatan geser atau dikenal dengan Phi-C reduction. Cara ini menunjukkan hasil yang sebanding dengan metode irisan dan atau metode keseimbangan batas. Pengali total  $\sum Msf$  digunakan untuk menjelaskan nilai parameter kuat geser yang diberikan pada tahap analisis.

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (2.53)$$

Dimana parameter kuat geser dengan subskrip input menunjukkan sifat material yang diatur dan parameter dengan subskrip reduced menunjukkan nilai parameter yang tereduksi dalam analisis.  $\sum Msf$  diatur sampai 1, pada saat perhitungan seluruh kekuatan material tidak tereduksi. Parameter kuat geser akan dapat tereduksi secara otomatis hingga terjadi keruntuhan struktur. Pada titik ini faktor keamanan diberikan dengan persamaan:

$$SF = \frac{\text{available strength}}{\text{strength at failure}} = \text{value of } \sum Msf \text{ at failure} \quad (2.54)$$

Sedangkan Geo Studio Office adalah sebuah paket aplikasi untuk pemodelan geoteknik dan geo lingkungan. Software ini melingkupi SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W,QUAKE/W,TEMP/W, dan CTRAN/W yang sifatnya terintegrasi sehingga memungkinkan untuk menggunakan hasil dari satu produk ke produk yang lain. Fitur ini cukup unik dan memberikan fleksibilitas untuk digunakan dalam menyelesaikan berbagai macam permasalahan geo teknik dan geo lingkungan.

SLOPE/W merupakan produk perangkat lunak untuk menghitung faktor keamanan tanah dan kemiringan batuan. Dengan SLOPE/W dapat dilakukan analisis masalah baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan salah satu dari delapan metode kesetimbangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi tekan pori air, sifat tanah dan beban terkonsentrasi. Selain itu dapat juga digunakan elemen tekan pori air yang terbatas, tegangan statis atau tegangan dinamik pada analisis kestabilan lereng serta dapat juga dikombinasikan dengan analisis probabilistik.

## II.6. Penelitian Sebelumnya yang Serupa

Dengan menggunakan studi pustaka pada penelitian sebelumnya yang serupa dapat diambil kesimpulan, yakni :

1. Dari skripsi “Studi Stabilisasi Tanah pada Lereng Menggunakan Campuran Semen (Kasus: Kelongsoran Ruas Jalan Singkawang-Bengkayang pada Kilometer +196-300 Gunung Mendering Kabupaten Bengkayang)” oleh Desi Herawati (2004) diambil kesimpulan bahwa analisis stabilitas lereng sebelum adanya perkuatan struktur penahan tanah menunjukkan lereng tidak stabil dimana faktor keamanannya lebih kecil dari satu. Hal ini menunjukkan perlunya suatu struktur penahan tanah.
2. Dari skripsi “Kajian Stabilitas Lereng pada Jalan Akses Jembatan Tayan dan Penanggulangannya” oleh Robie Asta (2013) diambil kesimpulan bahwa analisa kestabilan lereng baik menggunakan manual, SLOPE/W pada GeoStudio maupun PLAXIS menunjukkan bahwa lereng pada kajian skripsi tersebut tidak stabil pada *Toe Failure* dan *Base Failure*. Hal ini

menunjukkan bahwa dari ketiga metode yang digunakan memiliki kesimpulan yang sama dan hasil angka keamanan yang tidak jauh berbeda.

3. Dari skripsi “Kajian Keruntuhan Lereng di Pinggir Sungai Melawi Desa Baning Dianalisa Menggunakan *Finite Element*” oleh Melza Hirsafitri (2011) diambil kesimpulan bahwa melalui perhitungan manual dengan metode Bishop dan metode Fellenius menunjukkan bahwa lereng yang dikaji dinyatakan kritis karena rata rata  $FK < 1,5$  sedangkan pada program PLAXIS 8.2 menyatakan lereng yang dikaji tersebut rawan karena rata-rata  $1,5 < FK < 1,8$ . Dan dikatakan dalam kesimpulan lainnya yakni selisih perhitungan program dan secara manual sekitar 50%.