

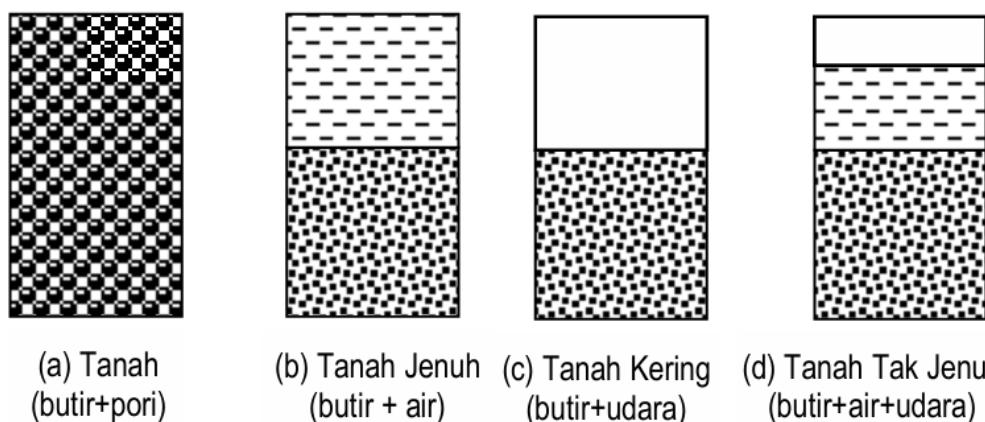
2 LANDASAN TEORI

2.1 Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (M. Das, 1995).

Istilah pasir (*sand*), lempung (*clay*), lanau (*silt*), dan lumpur (*mud*) digunakan untuk menggambarkan sifat fisik tanah serta menggambarkan ukuran partikel dalam batas ukuran partikel tertentu. Misalnya, tanah lempung merupakan jenis tanah yang bersifat plastis dan kohesif, sedangkan pasir merupakan jenis tanah yang bersifat non-plastis dan non-kohesif. Namun, di alam sangat sedikit tanah yang hanya tersusun atas satu ukuran partikel saja, tanah merupakan campuran partikel-partikel dengan berbagai viskositas (Darwis, 2018).

Material tanah dapat terdiri atas dua atau tiga unsur, yakni butiran, air, dan udara. Pada dalam kondisi tanah jenuh terdapat dua unsur, yakni butiran dan air, dan pada tanah yang kering juga hanya terdapat dua unsur yakni butiran dan udara. Sedangkan pada tanah dengan kondisi tak jenuh terdapat tiga unsur, yakni butiran, air dan udara (Darwis, 2018). Ketiga kondisi tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2.1 Komposisi Tanah dalam Berbagai Kondisi

2.2 Stratifikasi Tanah

Interpretasi tanah dimulai dengan menentukan stratifikasi tanah yang akan dianalisis. Penentuan stratifikasi tanah merupakan hasil interpretasi data tanah hasil pengeboran teknik. Interpretasi data tanah dilakukan untuk menentukan tipe tanah, konsistensi tanah, kedalaman tanah, dan nilai *Standard Penetration Test* (N-SPT) yang kemudian dapat dikorelasikan untuk penentuan parameter tanah. Stratifikasi tanah dapat dilakukan dengan menentukan klasifikasi tanah dan parameter kuat geser tanah untuk analisis stabilitas lereng sebagai berikut.

2.2.1 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah suatu cara untuk mengelompokkan berbagai jenis tanah yang berbeda tetapi memiliki sifat yang serupa ke dalam beberapa kelompok berdasarkan pemakaiannya. Klasifikasi ini merupakan cara sederhana untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terperinci (M. Das, 1995).

Klasifikasi tanah dapat ditentukan berdasarkan beberapa faktor diantaranya ukuran butiran partikel tanah, plastisitas serta kepadatan dan konsistensi tanah. Beberapa organisasi telah mengembangkan batasan-batasan aturan golongan jenis tanah (*soil separate size limit*) untuk menerangkan tentang tanah berdasarkan partikelnya (M. Das, 1995) yang digambarkan pada Tabel 2.1 (M. Das, 1995) berikut:

Tabel 2.1 Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

No.	Organisasi	Ukuran Butiran (mm)			
		Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
1	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (MIT)	> 2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	< 0,002
2	<i>U.S. Department of Agriculture</i> (USDA)	> 2	2 – 0,05	0,05 – 0,002	< 0,002

No.	Organisasi	Ukuran Butiran (mm)			
		Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
3	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)</i>	76, – 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	< 0,002
4	<i>Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, and American Society for Testing and Materials) (USCS)</i>	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu Lanau dan Lempung) < 0,0075	

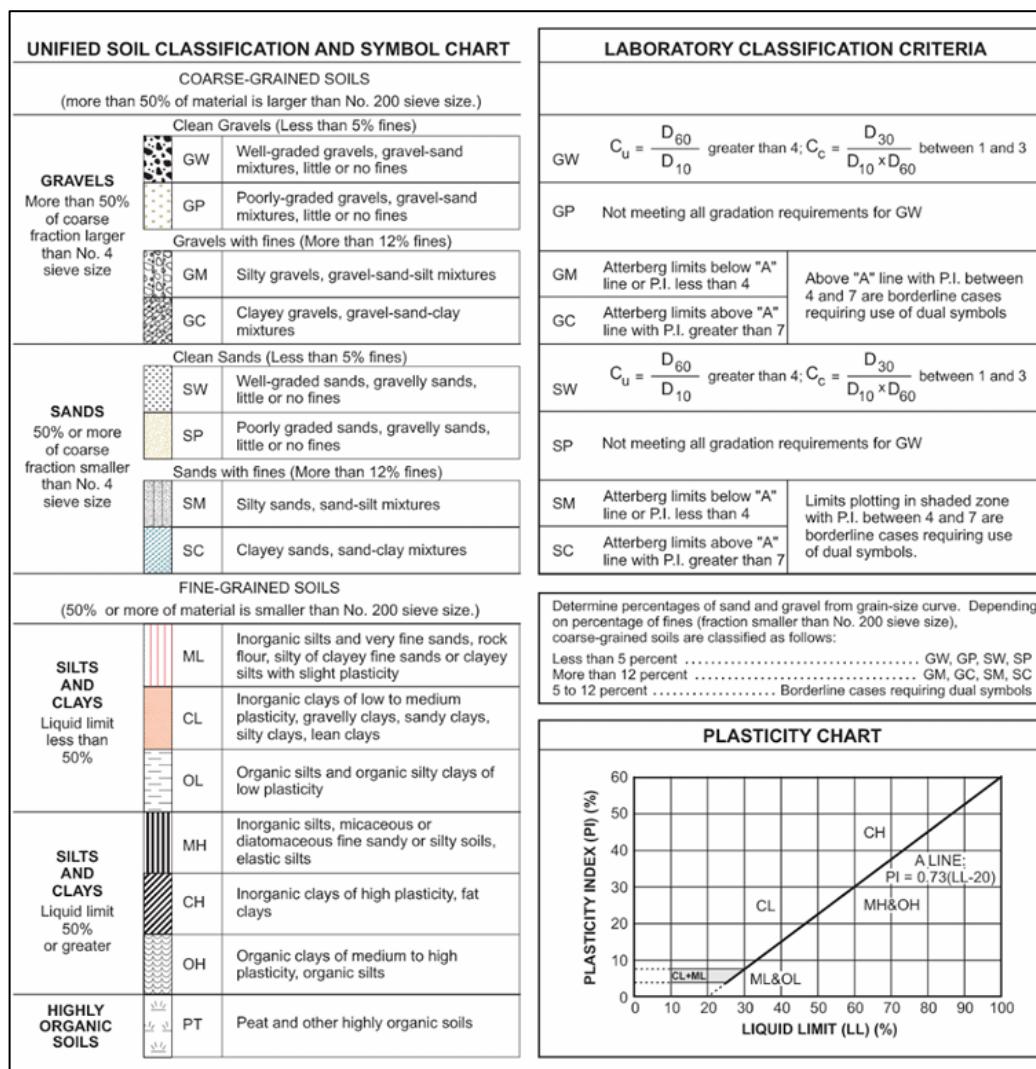
Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan yaitu, Sistem *Unified Soil Classification System* (USCS) dan Sistem *American of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Sistem USCS digunakan untuk pengelompokan tanah secara universal, sedangkan sistem AASHTO lebih digunakan untuk mengklasifikasikan tanah Subgrade (Ditjen Bina Marga, 2019).

2.2.1.1 Sistem Klasifikasi Menurut USCS

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande dalam tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang. Pada masa kini, sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik. Sistem USCS mengklasifikasikan tanah pada 2 kelompok besar yaitu:

1. Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*) yaitu: tanah kerikil dan pasir di mana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G (*gravel*) atau S (*Sand*).

2. Tanah berbutir-halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah di mana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah lain dengan kadar organik tinggi (Ditjen Bina Marga, 2019). Secara detail klasifikasi tanah sistem USCS dapat dilihat pada Gambar 2.2 (Bina Marga, 2006) berikut :



Gambar 2.2 Sitem Klasifikasi USCS

2.2.1.2 Sistem Klasifikasi Menurut AASTHO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan dalam tahun 1929 sebagai *Public Road Administration Classification System*. Pada sistem ini, tanah diklasifikasikan ke

dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir yang 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Tanah yang lebih dari 35% butirannya lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Secara detail, klasifikasi tanah sistem AASHTO dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Ditjen Bina Marga, 2019) berikut:

General Classification		Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)											
Group Classification	A-1	A-3			A-2								
		A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					
<i>Sieve analysis (Percentage passing)</i>													
No. 10	50 max.												
No. 40	30 max.	50 max.	51 min.										
No. 200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.						
<i>Character of friction Passing No. 40</i>													
Liquid Limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.						
Plasticity Index	6 max.		NP	10 max	10 max.	11 min.	11 min.						
Usual types of significant Constituent materials	Stone fragments, gravel and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand									
<i>General subgrade rating</i>													
Excellent to good													
General Classification		Granular materials (35% or less of total sample passing No. 200)											
Group Classification	A-4	A-5	A-6	A-7				A-7-5* A-7-6*					
				36 min.	36 min.	36 min.	36 min.						
<i>Sieve analysis (percentage passing)</i>													
No. 10.													
No. 40													
No. 200				36 min.	36 min.	36 min.	36 min.						
<i>Character of friction Passing No. 40</i>													
Liquid Limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.						
Plasticity Index				10 max.	10 max.	11 min.	11 min.						
Usual types of significant Constituent materials				Silty soils		Clayey soils							
<i>General subgrade rating</i>													
Fair to poor													

*For A-7-5, $PI \leq LL - 30$
*For A-7-6 $PI > LL - 30$

Gambar 2.3 Sistem Klasifikasi AASTHO

Setelah ditentukannya klasifikasi tanah berdasarkan hasil pengujian, maka dapat ditentukan konsistensi dan nilai N-SPT berdasarkan klasifikasi dan kedalaman tanah yang telah diketahui dari hasil pengujian. Untuk tanah berjenis lempung, konsistensi dan nilai N-SPT dapat ditentukan atau dikelompokkan berdasarkan rentang konsistensi yang tercantum pada Tabel 2.2 yang mengacu pada standar korelasi empirik antara nilai N-SPT dan tingkat kekerasan atau kekakuan tanah lempung yang dikembangkan oleh Terzaghi dan Peck (1967) (Ameratunga dkk., 2016).

Tabel 2.2 Nilai N-SPT untuk Konsistensi Tanah Lempung

Consistency	N-SPT
<i>Very Soft</i>	0 – 2
<i>Soft</i>	2 – 4
<i>Medium</i>	4 – 8
<i>Stiff</i>	8 – 15
<i>Very Stiff</i>	15 – 30
<i>Hard</i>	>30

2.2.2 Kuat Geser Tanah

Pada umumnya, tanah kohesif seperti tanah lempung, lempung kelanauan, lempung kepasiran ataupun berkerikil, kuat gesernya ditentukan dari nilai kohesinya. Keruntuhan pada suatu lereng dengan tanah kohesif banyak terjadi karena meningkatnya kadar pada air tanah. Longsoran dapat terjadi apabila tidak adanya kuat geser tanah yang cukup untuk menahan gerakan tanah pada bidang longsornya (Sitorus & Wulandari, 2022).

Kuat geser tanah dapat ditentukan di laboratorium dengan melakukan suatu uji terhadap *specimen* tanah yang diambil dari lapangan, setelah itu dianalisis menggunakan teori yang digunakan. Terdapat dua teori yang biasa digunakan yaitu teori leleh dan teori kegagalan. Teori leleh menyatakan bahwa kekuatan batas tanah dicapai setelah tanah mengalami leleh, yaitu ketika tanah berada dalam kondisi deformasi plastis. Sebaliknya, teori kegagalan menyatakan bahwa kekuatan batas tanah tercapai apabila tanah mulai kehilangan ketahanan gesernya.

Pada tanah lempung, kekuatan geser tidak hanya dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan ukuran butirannya, tetapi juga oleh faktor-faktor lain seperti konsistensi (kadar air), mineral lempung yang terkandung dalam tanah (termasuk struktur, jenis kation yang teradsorpsi, dan sifat-sifat khas mineral), serta susunan fabrik (yang juga dipengaruhi oleh kadar air) yang ada.

Untuk menentukan nilai kuat geser tanah dapat dilakukan dengan dua cara yaitu: (1) membuat grafik hubungan yang didapatkan dari data laboratorium serta (2) melakukan korelasi atau perhitungan dengan persamaan empiris.

Data geoteknik yang diperoleh dari lapangan atau laboratorium memerlukan biaya yang cukup mahal sehingga akses data lapangan pun terbatas. Dikarenakan pada titik tinjau lokasi penelitian ini tidak terdapat uji laboratorium yang menjadi acuan perhitungan maka dilakukanlah korelasi empiris dari data bor di lapangan. Penggunaan korelasi empiris merupakan salah satu upaya untuk memaksimalkan hasil pengujian dari laboratorium dan ketersediaan data penyelidikan lapangan yang terbatas (Ameratunga dkk., 2016).

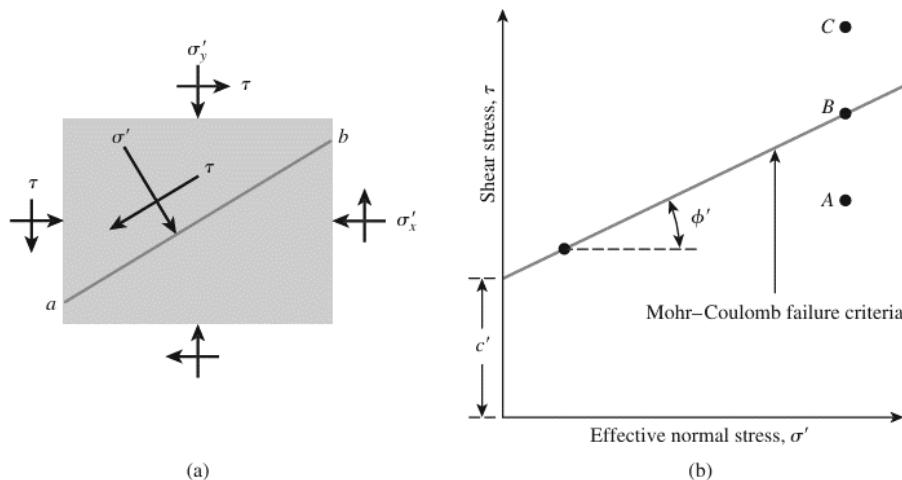
Menurut Teori *Mohr-Coulomb* kuat geser tanah didefinisikan dengan persamaan (2.1) berikut:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

Keterangan :

- τ = kuat geser tanah (kN/m^2)
- σ = tegangan total pada bidang geser (kN/m^2)
- c = kohesi tanah (kN/m^2)
- ϕ = sudut geser dalam efektif ($^\circ$)

Persamaan ini menunjukkan bahwa kuat geser suatu tanah dipengaruhi oleh kohesi internal material tanah serta gaya gesek dalam yang timbul akibat tegangan normal pada bidang geser.



Gambar 2.4 Konsep Kuat Geser Mohr Coulomb

Teori ini digunakan sebagai dasar dalam analisis stabilitas lereng karena menggambarkan hubungan antara gaya-gaya yang bekerja pada bidang gelincir dan ketahanan geser tanah terhadap kelongsoran. Nilai kuat geser yang dihitung melalui rumus ini akan menentukan seberapa besar lereng mampu menahan beban tanpa mengalami kegagalan.

Namun sebelum menghitung kuat geser tanah, diperlukan penentuan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) sebagai komponen utama dari kekuatan geser tanah. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan menggunakan rumus perkiraan korelasi empiris parameter tanah, seperti ditunjukkan pada persamaan (2.2) sebagai berikut:

$$Y = \frac{(N - N_b)}{(N_a - N_b)} \times (Y_a - Y_b) + Y_b \quad (2.2)$$

Keterangan :

N = nilai N-SPT

N_a = rentang maksimum nilai N berdasarkan konsistensinya

N_b = rentang minimum nilai N berdasarkan konsistensinya

Y_a = rentang maksimum nilai korelasi

Y_b = rentang minimum nilai korelasi

Persamaan rumus empiris tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter kuat geser yang akan digunakan dalam analisis stabilitas lereng, diantaranya:

1. Berat Isi Tanah (γ)

Berat isi tanah merupakan perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah yang bertujuan untuk mengetahui kepadatan suatu tanah. Berat isi tanah dapat diperoleh dari pengujian yang dilakukan di laboratorium dengan rumus empiris menggunakan Tabel 2.3 (Ameratunga dkk., 2016) berat isi tanah juga berpengaruh terhadap besarnya tegangan dan gaya-gaya yang bekerja pada tanah terutama pada stabilitas tanah.

Tabel 2.3 Nilai Perkiraan Berat Isi Tanah

<i>Soil Type</i>		<i>Bulk Unit Weight</i> (kN/m ³)		<i>Saturated Unit Weight</i> (kN/m ³)	
		<i>Loose</i>	<i>Dense</i>	<i>Loose</i>	<i>Dense</i>
<i>Granular Soil</i>	<i>Gravel</i>	16,0	18,0	0,0	21,0
	<i>Well graded sand and gravel</i>	19,0	21,0	1,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	0,0	21,5
	<i>Well graded sand</i>	18,0	21,0	1,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	0,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	9,5	21,0
	<i>Brick hardcore</i>	13,0	17,5	6,5	19,0
	<i>Slag fill</i>	12,0	15,0	8,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	3,0	15,0
<i>Cohesive Soil</i>	<i>Peat (high variability)</i>		12,0		12,0
	<i>Organic Clay</i>		15,0		15,0
	<i>Soft Clay</i>		17,0		17,0
	<i>Firm Clay</i>		18,0		18,0
	<i>Stiff Clay</i>		19,0		19,0
	<i>Hard Clay</i>		20,0		20,0
	<i>Stiff or hard glacial clay</i>		21,0		21,0

Nilai berat isi tanah untuk lapisan batuan ditentukan berdasarkan referensi pada Tabel 2.4 berikut (Look, 2007). Penetapan ini menggunakan pendekatan dari data sekunder dan untuk nilai yang digunakan disesuaikan dengan jenis batuan yang ditemukan serta mempertimbangkan tingkat pelapukan dan kepadatannya.

Tabel 2.4 Rentang Berat Isi Tanah Kering untuk Batuan

Origin	Rock Type	Unit Weight Range (kN/m ³)			
		XW	DW	SW	FR
Sedimentary	Shale	20 – 22	21 – 23	22 – 24	23 – 25
	Sandstone	18 – 21	20 – 23	22 – 25	24 – 26
	Limestone	19 – 21	21 – 23	23 – 25	25 – 27
Metamorphic	Schist	23 – 25	24 – 26	25 – 27	26 – 28
	Gneiss	23 – 26	24 – 27	26 – 28	27 – 29
Igneous	Granite	25 – 27	26 – 27	27 – 28	28 – 29
	Basalt	20 – 23	23 – 26	25 – 28	27 – 30

2. Kohesi (C_u) dan Sudut Geser (ϕ) Tanah

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam tanah, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi tanah akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Nilai kohesi (c) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*) dan pengujian triaxial (*triaxial test*). Kohesi berbanding lurus dengan kerapatan suatu benda, sehingga bila kerapatan semakin besar maka kohesi yg akan didapatkan semakin besar.

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 rekanan 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. (Look, 2007) menunjukkan nilai kohesi tanah lempung. Nilai kohesi dan sudut geser tanah ini sangat berpengaruh terhadap kekuatan geser tanah karena merupakan dua parameter utama dalam kriteria kegagalan *Mohr-Coulomb*. Tabel 2.5 menunjukkan rentang nilai kohesi untuk jenis tanah lempung seperti berikut.

Tabel 2.5 Nilai kohesi (Cu) dari N-SPT untuk Tanah Lempung

Consistency	N-SPT	Cu (kN/m²)
<i>Very Soft</i>	0 – 2	< 12
<i>Soft</i>	2 – 4	12 – 25
<i>Medium</i>	4 – 8	25 – 50
<i>Stiff</i>	8 – 15	50 – 100
<i>Very Stiff</i>	15 – 30	100 – 200
<i>Hard</i>	>30	>200

Nilai kohesi dan sudut geser tanah untuk batuan ditentukan berdasarkan rentang nilai pada Tabel 2.6 dengan mengacu pada korelasi empiris. Penetapan ini dilakukan berdasarkan pendekatan data sekunder dari referensi (Look, 2007). Nilai tersebut disesuaikan dengan jenis batuan yang ditemukan di lokasi, serta tingkat pelapukan dan rekahan batuannya.

Tabel 2.6 Besar Nilai Kohesi dan Sudut Geser Batuan

Origin	Rock Type	Shear Strength	
		Cohesion (kN/m ²)	Friction Angle (°)
<i>Sedimentary – Soft</i>	<i>Sandstone (triassic), coal, chalk, shale, limestone (triassic)</i>	1 – 20	25 – 35
<i>Sedimentary – Hard</i>	<i>Limestone, dolomite, greywacke sandstone (carboniferous), Limestone (carboniferous)</i>	10 – 30	35 - 45
<i>Metamorphic – non-foliated</i>	<i>Quartzite, marble, gneiss</i>	20 – 40	30 – 40
<i>Metamorphic – foliated</i>	<i>Schist, slate, phyllite</i>	10 – 30	25 – 35
<i>Igneous – acid</i>	<i>Granite</i>	30 – 50	45 – 55
<i>Igneous – basic</i>	<i>Basalt</i>	30 – 50	30 – 40

3. Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

Nilai dari korelasi parameter sudut geser efektif dan kohesi efektif dapat dihitung dengan interpolasi berdasarkan nilai korelasi yang disesuaikan dengan nilai N-SPT setiap lapisan tanah. Besar nilai korelasinya terdapat pada Tabel 2.7 (Ameratunga dkk., 2016) berikut:

Tabel 2.7 Kohesi Efektif dan Sudut Geser Efektif Tanah

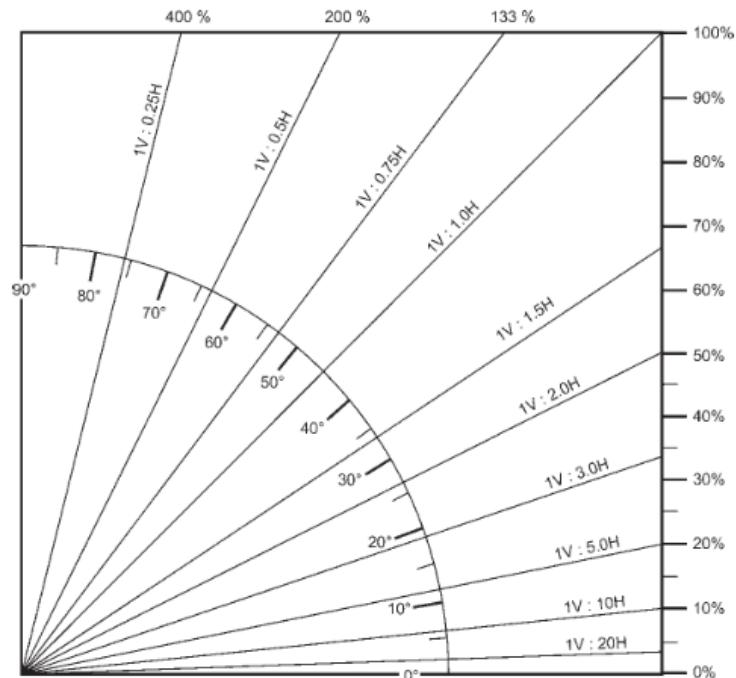
<i>Soil Group</i>	<i>Typical Soils in Group</i>	<i>Soil Parameters</i>	
		c' (kPa)	ϕ' (degrees)
<i>Poor</i>	<i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts</i>	0 - 5	17 - 25
<i>Average</i>	<i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills</i>	0 – 10	26 -32
<i>Good</i>	<i>Gravelly sands; compacted sands; controlled crushed sandstone and graveled fills; dense well graded sands</i>	0 – 5	32 - 37
<i>Very Good</i>	<i>Weak weathered rock; controlled fills of road base; gravel and recycled concrete</i>	0 – 25	36 – 43

2.3 Lereng

Lereng adalah permukaan tanah yang miring dan membentuk sudut tertentu terhadap bidang horizontal dan tidak terlindungi (M. Das, 1995). Lereng umumnya dinyatakan dalam bentuk perbandingan antara vertikal dan horizontal, seperti 1V : 2H, yang berarti setiap kenaikan vertikal 1 meter disertai jarak horizontal 2 meter (Look, 2007). Pengukuran ini lebih mudah diterapkan di lapangan, sedangkan untuk keperluan analisis dan desain digunakan pengukuran dalam bentuk sudut kemiringan (derajat), radian, tangen, atau persentase kemiringan.

Berdasarkan sudut kemiringan dan persentasenya, lereng dapat diklasifikasikan sebagai berikut dan ditunjukkan pada Gambar 2.5.

- Datar = 0° (0%)
- Sedang = $5^\circ - 10^\circ$ (9% - 18%)
- Curan = $11.3^\circ - 25^\circ$ (20% - 47%)
- Sangat Curam = $26.6^\circ - 35^\circ$ (50% - 70%)
- Eksterim Curam = $45^\circ - 65^\circ$ (100% - 214%)
- Sub-Vertikal hingga Vertikal = $70^\circ - 90^\circ$ (275% - ∞)



Gambar 2.5 Definisi Lereng Berdasarkan Kemiringan dan Persentasenya

Di lokasi dengan dua permukaan tanah yang memiliki ketinggian berbeda, terdapat gaya-gaya yang mendorong sehingga tanah pada ketinggian lebih tinggi cenderung bergerak ke bawah. Gaya ini disebut gaya potensial gravitasi dan menyebabkan terjadinya longsor. Pada setiap kasus tanah yang tidak datar, akan menghasilkan suatu komponen gravitasi dari berat yang cenderung menggerakkan massa tanah dari elevasi tinggi ke elevasi rendah (Amri dkk., 2021).

Gaya-gaya yang bekerja pada lereng dapat menyebabkan stabilitas tanah terganggu apabila tahanan geser tanah lebih kecil dari tegangan geser yang terjadi. Perbedaan elevasi pada permukaan tanah seperti lereng dapat menyebabkan massa

tanah bergerak dari area dengan elevasi tinggi ke area dengan elevasi lebih rendah. Pergerakan massa tanah ini juga bisa dipengaruhi oleh air dan gempa bumi. Gaya atau pergerakan tersebut menghasilkan tegangan geser yang berfungsi sebagai gaya penahan. Jika berat massa tanah yang bertindak sebagai gaya pendorong lebih besar dari tegangan geser tersebut, maka kelongsoran akan terjadi.

Pembagian lereng menurut (Abramson dkk., 1996) dibedakan menjadi dua kategori yaitu lereng alam (*natural slopes*) dan lereng buatan (*engineered slopes*)

2.3.2 Lereng Alam (*Natural Slopes*)

Lereng alam terbentuk akibat kegiatan alam (erosi, gerakan tektonik, dan sebagainya). Material yang membentuk lereng memiliki kecenderungan tergelincir akibat beratnya sendiri dan gaya-gaya luar yang ditahan oleh kuat geser tanah dari material tersebut. Gangguan terhadap kestabilan terjadi bilamana tahanan geser tanah tidak dapat mengimbangi gaya yang menyebabkan gelincir pada bidang longsor. (SNI 8460:2017, 2017)

Lereng alam yang telah stabil selama bertahun-tahun dapat saja mengalami longsor akibat hal-hal berikut:

1. Kenaikan tekanan air pori (akibat naiknya muka air tanah) karena hujan yang berkepanjangan, pembangunan dan pengisian waduk, gangguan pada sistem drainase, dan lain-lain.
2. Penurunan kuat geser tanah secara progresif akibat deformasi sepanjang bidang yang berpotensi longsor.
3. Proses pelapukan yang diakibatkan oleh pelapukan batuan dan dapat mengalami degradasi.
4. Gempa dapat menimbulkan gaya inersia yang bergerak searah dengan getaran, yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan pada lereng.
5. Gangguan luar akibat pemotongan atau timbunan baru
6. Material yang sering ditemukan pada lereng alam yang cenderung tidak stabil adalah tanah lempung (*clay*) dan batuan *shale*, yang dapat terlepas seiring waktu akibat pengaruh cuaca dan perubahan lingkungan.

2.3.3 Lereng Buatan (*Engineered Slopes*)

Lereng buatan adalah lereng yang dibentuk oleh manusia dengan cara memodifikasi tanah atau struktur alam untuk tujuan tertentu, seperti pembuatan jalan, saluran irigasi, atau konstruksi lainnya. Jenis lereng buatan diantaranya:

1. Lereng Galian (*Excavated Slopes*) dan Pemotongan Lereng (*Cut Slopes*)

Lereng galian adalah lereng yang terbentuk akibat penggalian tanah seperti yang dilakukan untuk pembuatan saluran air atau pembangunan jalan raya. Sedangkan pemotongan lereng terbentuk melalui pemotongan tebing tanah atau batuan untuk pembuatan struktur atau infrastruktur lainnya. Perancangan pemotongan lereng galian yang dimaksud adalah usaha untuk membuat suatu lereng dengan kemiringan tertentu yang cukup aman dan ekonomis. Stabilitas pemotongan lereng ditentukan oleh kondisi geologi, sifat teknis tanah, tekanan air akibat rembesan, dan cara pemotongan (SNI 8460:2017, 2017).

Aspek penting dari stabilitas lereng galian diantaranya :

- (a) Kuat geser pada bagian galian.
- (b) Berat isi tanah.
- (c) Tinggi lereng.
- (d) Kemiringan lereng.
- (e) Tekanan air pori.

Ketentuan pemotongan kemiringan lereng galian berdasarkan (Hoerner, 1990) dalam buku (Look, 2007).ditunjukkan pada **Error! Not a valid bookmark self-reference.** berikut.

Tabel 2.8 Kemiringan Umum Lereng Galian

Material	Kemiringan Lereng (Vertikal : Horintal)	
	Permanen	Sementara
Batuan masif (<i>Massive Rock</i>)	1,5V : 1H terhadap vertikal	1,5V : 1H terhadap Vertical
Batuan berlapis/bersekat (<i>Well jointed/bedded rock</i>)	1V : 2H - 2V : 1H	1V : 2H - 2V : 1H
Kerikil (<i>Gravel</i>)	1V : 2H - 1V : 1,5H	1V : 2H - 1V : 1H

Material	Kemiringan Lereng (Vertikal : Horintal)	
	Permanen	Sementara
Pasir (<i>Sand</i>)	1V : 2,5H - 1V : 1,5H	1V : 2,5H - 1V : 1H
Lempung (<i>Clay</i>)	1V : 6H - 1V : 2H	1V : 2H - 2V : 1H

2. Lereng Timbunan (*Embankment*)

Lereng timbunan umumnya digunakan untuk badan jalan raya, jalan kereta api, dan bendungan tanah. Sifat teknis lereng timbunan dipengaruhi oleh jenis tanah, cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah. Analisis secara terpisah harus dilakukan pada lereng timbunan, yaitu pada kondisi jangka pendek (saat penimbunan selesai), kondisi jangka panjang, kondisi penurunan muka air seketika (*sudden draw-down*), dan gangguan gempa (SNI 8460:2017, 2017).

Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakstabilan lereng timbunan diantaranya:

- (a) Terjadinya *overstressing* pada fondasi timbunan tanah kohesif setelah masa konstruksi. Biasanya pada lereng timbunan, stabilitas jangka pendek pada tanah kohesif lunak lebih penting daripada stabilitas jangka panjang, karena fondasi timbunan mendapatkan kekuatan yang merupakan hasil disipasi air pori. Perlu pemeriksaan stabilitas pada beberapa kondisi tekanan air pori.
- (b) Penurunan muka air cepat dan erosi buluh. Pada timbunan bendungan, penurunan muka air cepat menyebabkan meningkatnya beban efektif timbunan tanah yang dapat menyebabkan ketidakstabilan. Penyebab lain dari ketidakstabilan lereng timbunan adalah erosi bawah permukaan atau erosi buluh.
- (c) Gaya-gaya dinamis. Getaran dapat dipicu oleh gempa bumi, peledakan, pemancangan tiang, dan lainnya.

3. Dinding Penahan Tanah (*Retaining Walls*)

Struktur yang digunakan untuk menahan atau menstabilkan lereng buatan, terutama dalam proyek-proyek yang memerlukan pencegahan longsor atau erosi tanah.

2.4 Kelongsoran pada Tanah

Berdasarkan Buku Petunjuk Teknis Perencanaan dan Penanganan Longsor (Bina Marga, 2006) gerakan tanah/longsoran adalah perpindahan massa tanah/batuhan pada arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula. Dalam definisi ini termasuk juga deformasi lambat atau jangka panjang dari suatu lereng yang biasa disebut rayapan (*creep*). Kelongsoran pada tanah atau lereng dapat diakibatkan oleh beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kondisi dan kekuatan tanah, seperti kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah dan lain-lainnya (Hardiyatmo, 2003).

Menurut (Hardiyatmo, 2003) pada buku Mekanika Tanah II yang mengutip dari Terzaghi (1950) menerangkan bahwasanya penyebab longsoran lereng terdiri dari faktor internal (*internal effect*) dan juga eksternal (*external effect*). Yang termasuk ke dalam faktor internal yaitu longsoran yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar atau gempa bumi, sedangkan faktor eksternal yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya kuat geser tanah.

Hal-hal yang menjadi penyebab kelongsoran lereng alam diantaranya sebagai berikut:

1. Penambahan beban pada lereng. Beban tambahan pada lereng seperti bangunan baru, beban tambahan dari air yang masuk ke dalam pori-pori tanah atau menggenang pada permukaan tanah, dan beban dinamis dari tumbuhan-tumbuhan yang tertiarup angin
2. Penggalian, pemotongan pada kaki lereng, atau penggalian yang mempertajam kemiringan lereng
3. Perubahan posisi muka air secara cepat (*rapid drawdown*) untuk bendungan sungai dan lain-lain.
4. Getaran yang disebabkan oleh gempa bumi, peledakan, atau pemancangan tiang.
5. Penurunan tahanan geser tanah penyusun lereng yang disebabkan beberapa faktor, seperti peningkatan kadar air, kenaikan tekanan air pori, tekanan rembesan akibat genangan air di dalam tanah, serta keberadaan tanah

lempung yang mudah mengalami perubahan volume akibat kembang susut dan faktor lainnya.

2.5 Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng adalah ukuran seberapa kuat lereng, baik yang alami maupun buatan, untuk tetap aman dan tidak runtuh atau tergeser. Menjaga kestabilan lereng sangat penting dalam mengelola operasi tambang atau proyek konstruksi sipil lainnya (Eberhardt, 2003).

Kestabilan lereng adalah kemampuan lereng tanah untuk tetap tegak dan menghindari pergerakan. Stabilitas lereng ditentukan oleh keseimbangan antara tegangan geser dan kekuatan geser. Meskipun lereng sebelumnya stabil, berbagai faktor dapat memengaruhi kemiringannya, sehingga membuat lereng menjadi tidak stabil dalam kondisi tertentu (Kliche, 1999).

Pada dasarnya kestabilan lereng berkaitan dengan tegangan dan kekuatan. Gaya gravitasi dan faktor lainnya bekerja bersama untuk menghasilkan "kekuatan pendorong" yang dapat memicu pergerakan massa tanah hingga menyebabkan keruntuhan. Sementara itu kekuatan geser dalam tanah dan/atau massa batuan memberikan "kekuatan penahan" yang membantu menjaga kestabilannya. Salah satu cara untuk memeriksa kestabilan lereng adalah dengan menghitung faktor keamanan yang merupakan bandingan antara kemampuan tanah menahan gaya penggerak dengan gaya yang mempengaruhi lereng (Darwis, 2018).

2.6 Analisis Stabilitas Lereng *Limit Equilibrium Methode (LEM)*

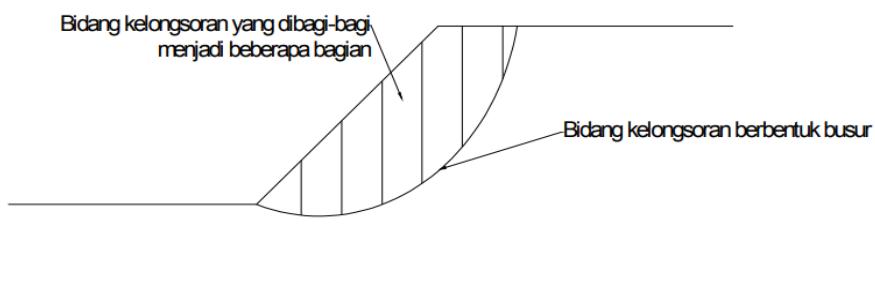
Analisis stabilitas pada suatu permukaan tanah yang miring disebut sebagai analisis stabilitas lereng. Analisis ini pada umumnya dilakukan untuk memeriksa keamanan dari suatu lereng, baik lereng alami, lereng galian, maupun urugan tanah (Sitorus & Wulandari, 2022).

Stabilitas lereng melibatkan permukaan tanah yang tidak datar tetapi memiliki kemiringan relatif terhadap bidang horizontal. Hal ini dapat menyebabkan komponen berat tanah bergerak ke bawah sejajar dengan lereng. Jika berat tanah cukup besar maka dapat terjadi longsor karena gaya gesernya melebihi gaya yang berlawanan dengan kuat geser tanah sepanjang bidang longsor. Pada lahan yang

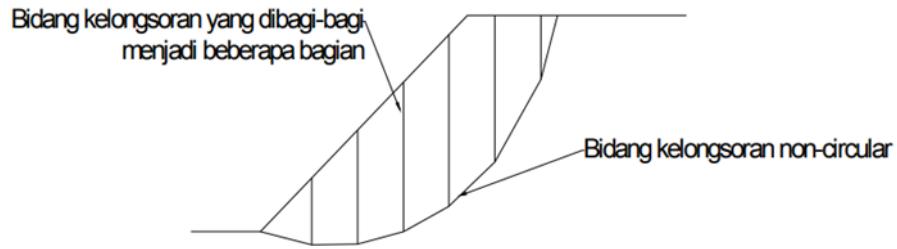
tidak rata, berat tanah menimbulkan gaya gravitasi yang cenderung menggerakkan massa tanah dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah.

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu geometri, karakteristik sifat fisik dan mekanik, hidrologi dan hidrogeologi, bidang lemah yang terbentuk oleh struktur geologi dan getaran. Suatu lereng secara alamiah berada dalam keseimbangan terhadap gaya-gaya yang bekerja, baik dari dalam material maupun dari luar. Lereng akan mencari keseimbangan secara alamiah dengan mengurangi beban apabila terjadi gangguan akibat ketidakseimbangan yang disebabkan adanya aktivitas yang mengganggu dan proses ini disebut longsor atau gerakan tanah (Arif, 2016).

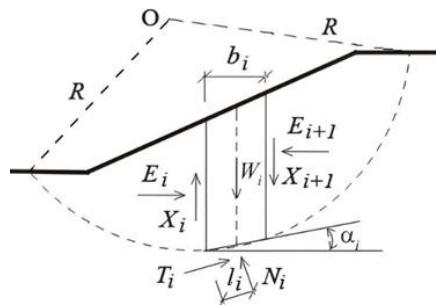
Metode *Limit Equilibrium* adalah pendekatan analisis yang didasarkan pada kondisi kesetimbangan statik yang hubungan tegangan-regangan material diabaikan. Metode ini mengevaluasi kestabilan lereng dengan membandingkan antara gaya pendorong dan gaya penahan yang bekerja pada tanah. Dalam penerapannya, diasumsikan terlebih dahulu bentuk dan geometri bidang runtuh, kemudian dilakukan pembagian lereng menjadi beberapa irisan untuk dianalisis. Setiap irisan dihitung berdasarkan parameter geometrik dan sifat fisik tanah. Prinsip dasar dari metode ini adalah mengurangi kekuatan geser material (*shear strength*) dengan menerapkan faktor keamanan (*factor of safety*) untuk memastikan bahwa kondisi tegangan geser yang bekerja masih berada di bawah ambang batas keruntuhan, sehingga kestabilan lereng dapat dipertahankan.



Gambar 2.6 Bidang Longsor *Circular*



Gambar 2.7 Bidang Longsor *Non-Circular*



Gambar 2.8 Gaya yang Bekerja pada Irisan

Perhitungan dilakukan dengan membagi-bagi tanah yang berada dalam bidang longsor menjadi beberapa irisan sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 2.6 hingga Gambar 2.8 (Liong & Herman, 2012), karena itu metode ini dikenal juga dengan nama metode irisan (*method of slice*). Gambar 2.8 yang menggambarkan massa tanah dan gaya-gaya yang bekerja pada irisan. Perbedaan antara cara yang satu dengan yang lain tergantung pada persamaan kesetimbangan batas dan asumsi gaya kekuatan antar irisan (*interslice force*) yang dihitung. (Liong & Herman, 2012)

Tabel 2.9 dan Tabel 2.10 (Liong & Herman, 2012) menunjukkan perbedaan antar metode yang dikenal dalam *Limit Equilibrium Method* (LEM). Pada cara *Fellenius* mengabaikan semua gaya antar irisan dan hanya memperhitungkan kesetimbangan momen, sedangkan metode *Bishop* dikembangkan lebih kompleks dengan memasukkan gaya yang bekerja di sekitar ruang irisan, namun tetap memperhitungkan kesetimbangan momen. Sementara itu, metode LEM yang lainnya didasarkan pada kesetimbangan gaya horizontal untuk menganalisis kestabilan lereng atau dinding tanah.

Tabel 2.9 Kesetimbangan yang Diperhitungkan pada Masing-masing Cara

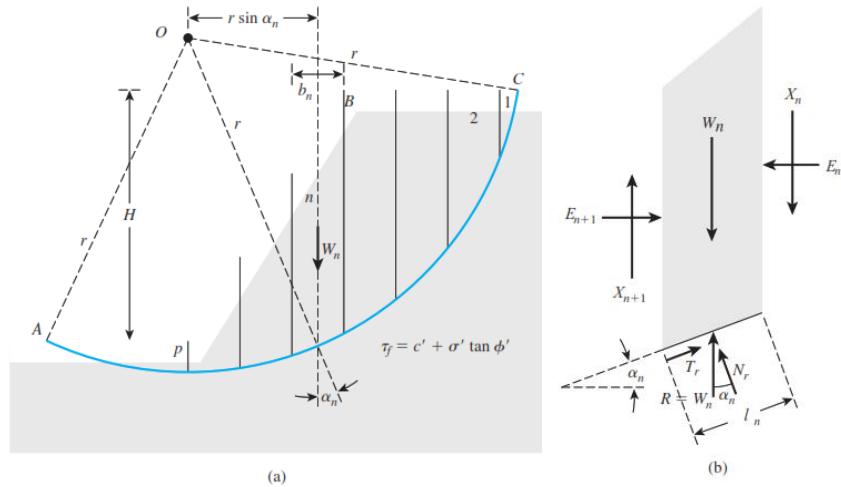
Method	Moment Equilibrium	Force Equilibrium
<i>Ordinary or Fellenius</i>	Yes	No
<i>Bishop Simplified</i>	Yes	No
<i>Janbu Simplified</i>	No	Yes
<i>Morgenstern-Price</i>	Yes	Yes
<i>Spencer</i>	Yes	Yes
<i>Sarma - Vertical Slice</i>	Yes	Yes

Tabel 2.10 Gaya Antar Irisan yang Bekerja Masing-masing Cara

Method	Interslice Normal Force (E)	Interslice Shear Force (X)	Inclination of X/E Resultant, and X-E Relationship
<i>Ordinary or Fellenius</i>	No	No	<i>No Interslice Force</i>
<i>Bishop Simplified</i>	Yes	No	<i>Horizontal</i>
<i>Janbu Simplified</i>	Yes	No	<i>Horizontal</i>
<i>Morgenstern-Price</i>	Yes	Yes	<i>Variable' user Function</i>
<i>Spencer</i>	Yes	Yes	<i>Constant</i>
<i>Sarma - Vertical Slice</i>	Yes	Yes	$X = c + E \tan \varphi$

2.6.1 Metode *Fellenius*

Metode *Fellenius* (*Ordinary Method of Slice*) diperkenalkan pertama kali oleh *Fellenius* (1927,1936) Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa gaya-gaya yang bekerja memiliki arah sejajar (paralel) dengan bidang dasar irisan. Perhitungan faktor keamanan (FK) menurut *Fellenius* dilakukan dengan menggunakan keseimbangan momen terhadap titik tertentu pada bidang runtuh tanpa mempertimbangkan gaya antar irisan.. Pada Gambar 2.9 memperlihatkan konsep analisis stabilitas lereng dengan gaya-gaya yang bekerja pada irisan ke-n dengan metode *Fellenius* (Das, 2013).



Gambar 2.9 Konsep Analisis Stabilitas dengan Metode *Fellenius* : (a) *Trial Failure Surface* (b) Gaya-gaya yang Bekerja Pada Irisan ke-n

Metode ini juga menganggap bahwa gaya normal N bekerja ditengah-tengah *slice*. Diasumsikan juga bahwa resultan gaya-gaya antar irisan pada tiap irisan adalah sama dengan nol, atau dengan kata lain bahwa resultan gaya-gaya antar irisan diabaikan. Jadi total asumsi yang dibuat oleh metode ini adalah:

1. Bidang longsor berbentuk lingkaran
2. Bidang longsor dibagi menjadi beberapa irisan tegak
3. Lebar dari setiap *slice* tidak harus sama

Dengan asumsi yang telah dijelaskan sebelumnya maka faktor keamanan untuk metode *Fellenius* diuraikan seperti pada persamaan (2.3) sampai dengan persamaan (2.9) berikut:

Menentukan berat irisan tanah :

$$W_n = \gamma \times A \quad (2.3)$$

Persamaan gaya normal terhadap bidang gelincir yaitu:

$$N_r = W_n \cos \alpha \quad (2.4)$$

Gaya geser penahan (resisting shear force) didefinisikan :

$$T_r = \tau_d(l_n) = \frac{\tau_f(l_n)}{FK} = \frac{1}{FK} [c' + \sigma' \tan \phi'] (l_n) \quad (2.5)$$

Keterangan :

- τ_f = kuat geser tanah (*Mohr Column*)
 c' = kohesi tanah efektif (kN/m²)
 ϕ' = sudut geser dalam efektif (°)
 σ' = tegangan normal efektif (kN/m²)
 l_n = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-*i* (m)
FK = faktor keamanan

dengan tegangan normal efektif :

$$\sigma' = \frac{N_r}{l_n} = \frac{W \cos \alpha}{l_n} \quad (2.6)$$

Untuk persamaan keseimbangan dari *slice* dinyatakan bahwa total momen penggerak (gaya dari lengan momen terhadap massa tanah setiap *slice*) dengan titik rotasi O harus sama dengan total momen penahan (gaya geser penahan tanah) atau dinyatakan :

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FK} \left(c' + \frac{W \cos \alpha}{l_n} \tan \phi' \right) (l_n) (r) \quad (2.7)$$

Penyederhanaan dari persamaan (2.7) diperoleh persamaan akhir faktor keamanan metode *Fellenius* adalah:

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' l_n + W \cos \alpha \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha} \quad (2.8)$$

Keterangan :

- FK = faktor keamanan
 c' = kohesi tanah efektif (kN/m²)
 ϕ' = sudut geser dalam efektif (°)
 α = sudut irisan (°)
 l_n = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke-*i* (m)
W = berat tanah (kN)

Apabila terdapat air pada lereng, tekanan air pori tidak menambah momen longsor karena resultan gayanya melalui pusat lingkaran. maka didapatkan persamaan metode *Fellenius* yang mempertimbangkan nilai porositas tanah didefinisikan pada persamaan 2.9 berikut :

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' l_n + N_r - u_n l_n) \tan \phi'}{\sum_{n=1}^{n=p} W_i \sin \alpha} \quad (2.9)$$

Keterangan :

- FK = faktor keamanan
- c' = kohesi tanah efektif (kN/m^2)
- ϕ' = sudut geser dalam efektif ($^\circ$)
- α = sudut irisan ($^\circ$)
- u = tekanan air pori pada irisan ke- i (kN/m^2)
- l_n = panjang lengkung lingkaran pada irisan ke- n (m)
- N = gaya normal (kN)
- W = berat tanah (kN)

2.6.2 Metode *Bishop Simplified*

Metode *Bishop Simplified* adalah metode yang diperkenalkan oleh A.W. *Bishop* (1955) dengan pendekatan potongan (*slice method*), di mana gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan lereng diperhitungkan secara lebih rinci. Metode ini digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan asumsi permukaan gelincir berbentuk lingkaran, serta dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode *Fellenius*, terutama dalam memperhitungkan pengaruh gaya normal antar irisan yang berkontribusi terhadap kestabilan lereng.

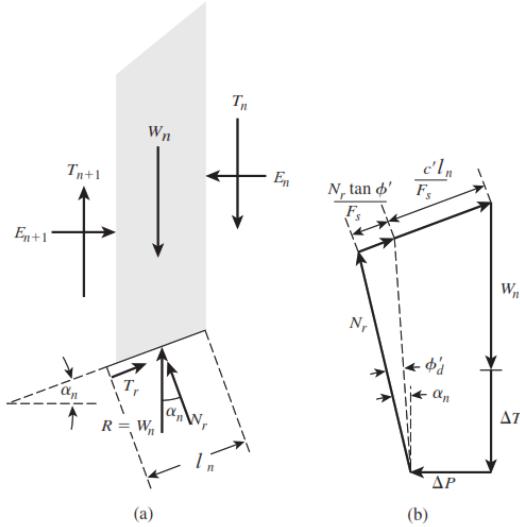
Berbeda dengan metode *Fellenius* yang mengabaikan gaya antar irisan dan menyelesaikan perhitungan secara langsung, metode *Bishop* mempertimbangkan keseimbangan gaya vertikal dan gaya geser pada alas setiap irisan. Dalam metode ini diasumsikan bahwa gaya-gaya normal total berada atau bekerja di pusat alas potongan dan bisa ditentukan dengan menguraikan gaya-gaya pada potongan secara

vertikal atau normal. Metode *Bishop Simplified* ini menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal (*Bishop*, 1955)

Pada penggunaannya terdapat beberapa asumsi yang menjadi acuan yaitu :

1. Pada metode ini keruntuhan diasumsikan akibat gerakan rotasi dari tanah tersebut yang memiliki bidang runtuhan berbentuk lingkaran sama seperti pada metode *Fellenius* yang ditunjukkan Gambar 2.9 (a).
2. Nilai dari gaya horizontal pada kedua sisi dapat diabaikan karena tidak diketahui nilainya dan sulit untuk dihitung.
3. Gaya normal yang bekerja diasumsikan bekerja di tengah bidang irisan dan diperoleh dengan menjumlahkan gaya-gaya dalam arah vertikal (Amri dkk., 2021).

Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut maka dapat digambarkan gaya-gaya yang bekerja untuk setiap potongan pada metode *Bishop Simplified* seperti pada Gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10 Gaya-gaya yang Bekerja pada Suatu Potongan Metode *Bishop* (a) Gaya yang Bekerja pada Irisan ke-n; (b) Gaya Poligon untuk Kesetimbangan

Keterangan :

W_n = berat total pada irisan (kN)

T_n dan T_{n+1}	= gaya antar irisan yang bekerja secara vertikal pada penampang kiri dan kanan (kN)
E_n dan E_{n+1}	= gaya antar irisan yang bekerja secara horizontal pada penampang kiri dan kanan (kN)
T_r	= gaya geser penahan sepanjang bidang gelincir (kN)
N_r	= gaya normal terhadap bidang gelincir (kN)
ΔT	= koreksi kecil vertikal akibat gaya geser (kN)
l_n	= panjang lengkung lingkaran pada irisan ke- n (m)
α	= sudut kemiringan lereng ($^{\circ}$)
R	= jari-jari slip surface (m)

Dengan memperhitungkan seluruh komponen keseimbangan gaya yang bekerja pada masing-masing irisan tanah, maka rumus untuk faktor keamanan (FK) metode *Bishop* secara bertahap diperoleh berdasarkan keseimbangan statis. Proses perhitungan didasarkan pada pendekatan analitis yang dijelaskan oleh (Das, 2013) adalah sebagai berikut :

Gaya geser penahan pada *slice* (modifikasi) :

$$T_r = N_r (\tan \phi'_d) + c_d l_n = N_r \left(\frac{\tan \phi'}{FK} \right) + \frac{c' l_n}{FK}$$

$$T_r = \frac{1}{FK} (N_r \tan \phi' + c' \cdot l_n) \quad (2.10)$$

Keterangan :

T_r	=	gaya geser penahan (kN)
FK	=	faktor keamanan
c'	=	kohesi tanah efektif (kN/m^2)
ϕ'	=	sudut geser dalam efektif ($^{\circ}$)
l_n	=	panjang lengkung lingkaran pada irisan ke- n (m)
N	=	gaya normal terhadap bidang gelincir (kN)

Keseimbangan gaya vertikal yang diambil dari gambar (b) jika dilakukan penjumlahan gaya dalam arah vertikal, didapatkan:

$$W_n + \Delta T = N_r \cos \alpha + \left(\frac{N_r \tan \phi'}{FK} + \frac{c' \cdot l_n}{FK} \right) \sin \alpha \quad (2.11)$$

Disusun ulang untuk mencari N_r yang digunakan untuk menghitung gaya normal pada bidang gelincir yang bergantung pada berat *slice*, kohesi, dan sudut bidang gelincir.

$$N_r = \frac{W_n + \Delta T - \frac{c' \cdot l_n}{FK} \sin \alpha}{\cos \alpha + \left(\frac{\tan \phi' \sin \alpha}{FK} \right)} \quad (2.12)$$

Selanjutnya berdasarkan keseimbangan momen terhadap titik pusat rotasi O momen penggerak dan penahan dihitung dengan mengalikan gaya dengan jarak terhadap titik pusat rotasi.

$$\sum_{n=1}^p W_n \cdot r_n \sin \alpha = \sum_{n=1}^p T_r \cdot r_n \quad (2.13)$$

Substitusi persamaan T_r dan N_r ke dalam formulasi di atas, diperoleh bentuk iteratif dari faktor keamanan maka diperoleh persamaan (2.14) sebagai berikut.

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^p (c' \cdot l_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi') \times \frac{1}{m_a}}{\sum_{n=1}^p W_n \sin \alpha} \quad (2.14)$$

dengan koreksi geometri :

$$m_a = \cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{FK} \quad (2.15)$$

Apabila komponen vertikal koreksi gaya geser antar *slice* dianggap kecil ($\Delta T=0$), maka persamaan faktor keamanan disederhanakan menjadi:

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^p (c' \cdot l_n + W_n \tan \phi') \times \frac{1}{m_a}}{\sum_{n=1}^p W_n \sin \alpha} \quad (2.16)$$

Dalam implementasinya persamaan faktor keamanan *Bishop* lebih rumit dibandingkan dengan metode *Fellenius*, karena nilai faktor keamanan FK diperoleh melalui iterasi, mengingat FK terletak di kedua sisi persamaan (dalam m_a). Nilai awal FK ditebak (misalnya 1.0 atau 1.5), kemudian dilakukan iterasi hingga konvergen. Metode *Bishop* yang disederhanakan ini menghasilkan nilai yang lebih mendekati hasil perhitungan dengan metode yang lebih teliti (Hardiyatmo, 2003).

Dalam kondisi jenuh, tekanan air pori (dilambangkan dengan u) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tegangan efektif tanah, sehingga perlu diperhitungkan dalam analisis stabilitas lereng. Pada metode *Bishop Simplified* pengaruh tekanan air pori diperhitungkan secara eksplisit dalam formulasi perhitungannya, yang ditunjukkan pada persamaan (2.17) berikut.

$$FK = \frac{\sum_{n=1}^p [c' \cdot l_n + (W_n - u_n l_n) \tan \phi'] \times \frac{1}{m_a}}{\sum_{n=1}^p W_n \sin \alpha} \quad (2.17)$$

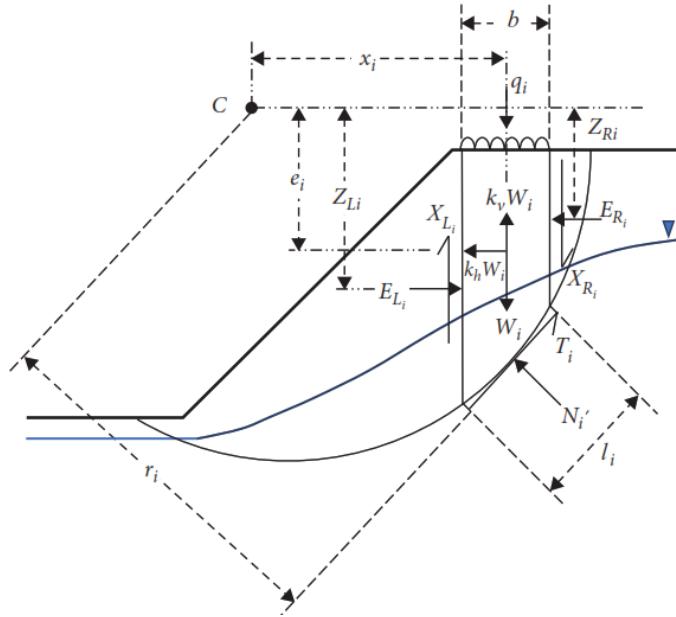
Keterangan :

W = berat tanah (kN)

u = tekanan air pori (kN/m²)

2.6.3 Metode *Morgenstern-Price*

Metode ini adalah salah satu metode yang didasarkan pada prinsip kesetimbangan batas, yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price pada tahun 1965. Proses analisisnya melibatkan keseimbangan setiap gaya normal dan momen yang bekerja pada setiap irisan bidang kelongsoran lereng tersebut. Dalam metode ini, diasumsikan penyederhanaan untuk menunjukkan hubungan antara gaya geser di sekitar irisan (X) dengan gaya normal di sekitar irisan (E) (Allan Takwin dkk., 2017). Pada metode ini juga menghindari sistem persamaan tak tentu dengan mengasumsikan hubungan tertentu antar gaya-gaya tersebut. Untuk gaya-gaya yang bekerja pada setiap irisan dengan metode Morgenstern-Price seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 (Alok dkk., 2024) berikut.



Gambar 2.11 Gaya-gaya yang Bekerja pada Setiap Irisan Metode *Morgenstern-Price*

Berdasarkan Gambar 2.11 lereng yang dibagi menjadi n irisan vertikal dengan setiap irisannya bekerja gaya-gaya seperti gaya berat (W_i), gaya normal (N_i), gaya geser mobilisasi (E_{mi}), tekanan air pori (μ_i), gaya normal antar irisan kiri dan kanan (E_{Li} dan E_{Ri}), gaya geser antar irisan kiri dan kanan (X_{Li} dan X_{Ri}), beban luar atau timbunan diatas irisan (q_i), serta panjang dasar bidang gelincir (l_i) dan sudut kemiringan dasar irisan terhadap horizontal (α). (Alok dkk., 2024)

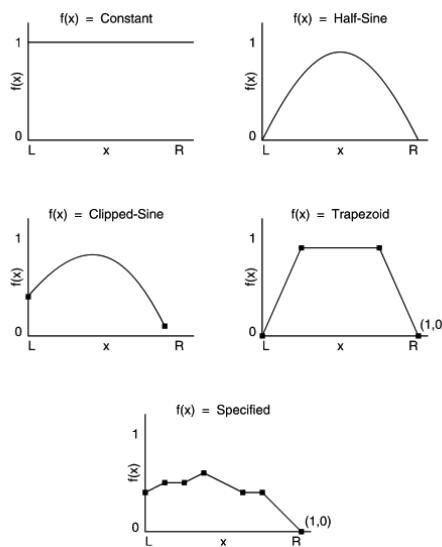
Karena gaya-gaya antar irisan (E_{Li}, E_{Ri}, X_{Li} dan X_{Ri}) jumlahnya lebih banyak dibanding persamaan keseimbangan, maka sistem menjadi tak tentu. Untuk itu Morgenstern dan Price menyederhanakan sistem dengan asumsi bahwa gaya geser antar irisan sebanding terhadap gaya normal antar irisan yang diasumsikan dengan:

$$X_i = \lambda \cdot f(x_i) \cdot E_i \quad (2.18)$$

Keterangan :

- X_i = gaya geser antar irisan (kN)
- E_i = gaya normal antar irisan (kN)
- λ = lambda (*scaling multiplier*), yaitu nilai skala yang ditentukan iteratif
- $f(x_i)$ = fungsi distribusi bisa berupa fungsi linear, konstan atau bentuk lain

Dalam praktik metode Morgenstern-Price, fungsi distribusi gaya antar irisan $f(x)$ dapat dibentuk dalam beberapa variasi sesuai dengan karakteristik lereng. Beberapa bentuk umum dari fungsi $f(x)$, diantaranya adalah fungsi konstan, setengah-sinus (*half-sine*), sinus terpotong (*clipped-sine*), trapesium (*trapezoidal*) serta bentuk yang ditentukan secara penuh berdasarkan titik data tertentu (*data point fully specified*) ditunjukkan pada Gambar 2.12 (GEO-SLOPE International, 2010) yang memiliki karakteristik distribusi berbeda terhadap gaya antar irisan, dan dapat memengaruhi hasil akhir perhitungan faktor keamanan secara signifikan, tergantung pada kondisi geometri lereng dan sifat material tanah atau batuan.



Gambar 2.12 Bentuk-bentuk Fungsi $f(x)$

Setelah menentukan nilai $f(x)$ selanjutnya menghitung gaya normal efektif (N'_i) yaitu gaya normal yang benar-benar menahan geser, setelah dikurangi pengaruh tekanan air pori :

$$N'_i = N_i - \mu_i \cdot l_i \quad (2.19)$$

Keterangan :

- N_i = gaya normal total di bidang gelincir (kN)
- μ_i = tekanan air pori per satuan panjang (kN/m^2)
- l_i = panjang bidang gelincir irisan ke- i (m)

Berikutnya dihitung gaya geser mobilisasi (S_{mi}) yaitu gaya yang melawan gaya dorong atau gerakan tanah. Nilainya mengikuti kriteria *Mohr-Coulomb*:

$$S_{mi} = \frac{c' \cdot l_i + N_i' - \tan \phi_i'}{FK} \quad (2.20)$$

Keterangan :

c' = kohesi efektif tanah (kN/m^2)

ϕ_i = sudut geser dalam ($^\circ$)

FK = faktor keamanan

Setelah menghitung nilai S_{mi} kemudian tinjau persamaan keseimbangan gaya vertikal ($\Sigma F_y = 0$) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.21) yang menyusun keseimbangan vertikal pada irisan ke-i :

$$X_{Li} - X_{Ri} + S_{mi} \sin \alpha + N_i \cos \alpha - W_i + k_v \cdot W_i + q_i \cdot dx = 0 \quad (2.21)$$

Kemudian disubstitusi dengan persamaan (2.20) dan persamaan (2.21) sehingga diperoleh persamaan (2.22) sebagai berikut.

$$N_i' = \frac{X_{Li} - X_{Ri} - k_v W_i + q_i \cdot dx - \frac{(c' - \mu_i \tan \phi') l_i \sin \alpha}{FK}}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{FK}} \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) digunakan untuk menghitung gaya normal total N_i dari gaya-gaya vertikal yang diketahui termasuk pengaruh gaya gempa vertikal (k_v) dan gaya beban luar (q_i). Apabila rasio tekanan air pori diperhitungkan maka diperoleh persamaan (2.23) berikut.

$$N_i' = \frac{X_{Li} - X_{Ri} - k_v W_i + q_i \cdot dx - \frac{(c' - ru \cdot W \tan \phi') l_i \sin \alpha}{FK}}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{FK}} \quad (2.23)$$

Keterangan :

k_v = koefisien gempa vertikal

$$q_i \cdot dx = \text{gaya akibat beban luar (kN)}$$

Selain memperhitungkan gaya-gaya berdasarkan keseimbangan secara vertikal, kemudian dilanjutkan memperhitungkan gaya-gaya yang bekerja secara horizontal ($\sum F_x = 0$) dengan seluruh irisan berlaku pada persamaan (2.24) berikut.

$$\sum (E_{Li} - E_{Ri}) + \sum S_{mi} \cos \alpha - \sum N_i \sin \alpha - \sum k_v W_i = 0 \quad (2.24)$$

Karena jumlah gaya antar irisan saling meniadakan ($E_L - E_R = 0$) maka disederhanakan dalam bentuk persamaan (2.25) untuk menentukan nilai faktor keamanan dari keseimbangan gaya (*force*) sebagai berikut :

$$FK_f = \frac{\sum [(c' l_i + (N_i - \mu_i l_i) \tan \phi') \cos \alpha]}{\sum [k_h W_i + N_i \sin \alpha]} \quad (2.25)$$

Keterangan :

FK_f = faktor keamanan dari keseimbangan gaya

k_h = koefisien gempa horizontal

Apabila perhitungan keseimbangan terhadap gaya telah diperhitungkan, selanjutnya memperhitungkan keseimbangan momen gaya ($\sum M = 0$) terhadap titik rotasi sehingga menghasilkan persamaan untuk menghitung faktor keamanan berdasarkan keseimbangan momen seperti ditunjukkan pada persamaan (2.26) berikut:

$$FK_m = \frac{\sum [(c' l_i + (N_i - \mu_i l_i) \tan \phi') \cdot r_i]}{\sum [W_i x_i - k_v W_i x_i + k_h W_i e_i + q_i \cdot dx - N_i f_i]} \quad (2.26)$$

Keterangan :

FK_m = faktor keamanan dari keseimbangan momen

x_i/e_i = koordinat pusat gravitasi irisan terhadap pusat rotasi

f_i = jarak antara titik kerja gaya normal dan pusat rotasi

Karena metode *Morgenstern-Price* memenuhi dua syarat (gaya dan momen) maka nilai FK yang benar harus memenuhi persamaan (2.27) untuk mencari nilai λ sehingga nilai $FK_m \approx FK_f$

$$f_{NR}(\lambda) = FK_m(\lambda) - FK_f(\lambda) = 0 \quad (2.27)$$

Dan diselesaikan dengan menggunakan metode iteratif *Newton-Raphson* :

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k - \frac{f_{NR}(\lambda_k)}{f'_{NR}(\lambda_k)} \quad (2.28)$$

Dengan turunan:

$$f'_{NR}(\lambda_k) = FK'_m(\lambda) - FK'_f(\lambda) \quad (2.29)$$

Keterangan :

f_{NR} = fungsi residual (selisih FK)

f'_{NR} = turunan terhadap λ

Berdasarkan penjelasan rumus *Morgenstern Price* tersebut menunjukkan bahwa setiap komponen saling bergantung, untuk menghitung N_i memerlukan nilai X_{Ri} dan X_{Li} . Nilai X_{Ri} dan X_{Li} berasal dari nilai E_{Ri} dan E_{Li} bergantung pada nilai λ dan $f(x)$. Nilai FK baru diperoleh setelah semua gaya ini dihitung dan disubstitusi kembali. Maka untuk melakukan iterasi pada metode ini harus memenuhi prosedur sebagai berikut :

1. Membagi lereng menjadi beberapa irisan vertikal
2. Asumsikan FK dan λ awal.
3. Menghitung gaya antar irisan
4. Menghitung N_i dari keseimbangan vertikal seperti pada persamaan (2.22)
5. Menghitung nilai FK_m dan FK_f
6. Evaluasi selisih dengan memperbarui nilai λ (*Newton Raphson*)
7. Ulangi hingga nilai konvergen $|FK_m - FS_f| <$ toleransi (0,0001). Ini merupakan hasil atau solusi akhir dari metode *Morgenstern-Price*.

Proses ini bersifat interloop atau iteratif yang pada perhitungannya dilakukan secara berulang hingga diperoleh nilai faktor keamanan yang stabil dan memenuhi kriteria konvergensi. Pendekatan ini memastikan bahwa interaksi gaya antar irisan dan kestabilan keseluruhan lereng dihitung secara konsisten dan akurat.

2.7 Faktor Keamanan (FK)

Faktor keamanan digunakan untuk mengidentifikasi stabilitas lereng yang umumnya didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat geser tanah dan tegangan geser tanah yang bekerja pada massa tanah (Ramadhan dkk., 2019). Nilai ini menunjukkan seberapa aman lereng dari potensi kegagalan atau kelongsoran.

Dalam Anderson dan Richards 1987, umumnya faktor keamanan (FK) berupa perbandingan antara gaya penahan longsor terhadap gaya penyebab longsor.

$$FK = \frac{\text{Gaya penahan longsor}}{\text{Gaya penyebab longsor}}$$

Besar nilai faktor kemanan dalam (Looke, 2007) dipengaruhi oleh kekuatan tanah, geometri, kondisi air, dan metode analisis yang digunakan. Air memiliki pengaruh paling besar terhadap stabilitas, sedangkan hasil analisis tiga dimensi umumnya menunjukkan nilai faktor keamanan lebih tinggi dibanding analisis dua dimensi. Nilai faktor keamanan juga perlu disesuaikan dengan kualitas data geoteknik serta tingkat risiko proyek, di mana pekerjaan sementara dapat menggunakan nilai lebih rendah dan proyek kritis memerlukan nilai yang lebih tinggi untuk menjamin keamanan

Adaptasi dari GEO dalam buku (Looke, 2007) memberikan nilai faktor keamanan yang lebih tinggi untuk jenis lereng baru dibandingkan dengan lereng yang sudah ada, hal ini dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan perubahan dimasa yang akan datang baik dari penambahan beban atau penurunan kekuatan akibat proses pelapukan.

Nilai-nilai kestabilan suatu lereng dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$F > 1,5$: Massa tanah pada lereng stabil

$F < 1,5$: Massa tanah pada lereng tidak stabil

$F = 1,5$: Massa tanah pada lereng diambil kelongsoran

Adapun nilai faktor keamanan untuk lereng baru dan lereng eksisting disajikan dalam Tabel 2.11 dan Tabel 2.12 berikut:

Tabel 2.11 Faktor Keamanan untuk Lereng Baru

Risiko Ekonomi	Faktor keamanan dengan periode ulang hujan 10 tahun		
	Tidak Signifikan	Rendah	Tinggi
Tidak Signifikan	> 1,1	1,2	1,4
Rendah	1,2	1,3	1,5
Tinggi	1,4	1,5	1,6

Tabel 2.12 Faktor Keamanan untuk Lereng Eksisting

Risiko	Faktor keamanan dengan periode ulang hujan 10 tahun
Tidak Signifikan	> 1,1
Rendah	1,2
Tinggi	1,4

Namun menurut Bowles (1993) pada umumnya nilai faktor keamanan FK $> 1,25$ merupakan desain normal untuk memberikan perkiraan faktor keamanan dalam analisis stabilitas lereng (Ramadhan dkk., 2019). Penetapan nilai ini penting untuk memastikan bahwa desain lereng aman serta dapat mengantisipasi berbagai faktor tak terduga selama proses analisis dan konstruksi seperti kesalahan data, kekeliruan perhitungan, maupun kurangnya pengawasan di lapangan.

Faktor keamanan tidak hanya berfungsi sebagai indikator kondisi stabilitas lereng tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan dalam desain geoteknik yang aman. Nilai FK yang terlalu rendah menunjukkan perlunya perbaikan desain stabilisasi pada lereng. Sebaliknya, nilai FK yang terlalu tinggi dapat menyebabkan desain menjadi tidak ekonomis. Maka penentuan nilai FK yang tepat menjadi kunci untuk menyeimbangkan aspek keamanan dan efisiensi teknis perencanaan lereng.

2.8 Software Geostudio

GeoStudio merupakan sebuah *software* yang dikembangkan oleh GEOSLOPE International yang dapat digunakan untuk menganalisis suatu perilaku tanah menggunakan konsep analisis numerik. Terdapat beberapa produk yang digunakan dalam perhitungan pada bidang geoteknik dalam *software* ini, seperti SLOPE/W, SIGMA/W, TEMP/W, AIR/W, CTRAN/W, dan QUAKE/W.

Analisis stabilitas pada suatu lereng dapat dilakukan menggunakan bantuan program SLOPE/W. SLOPE/W merupakan suatu program yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng baik tanah ataupun batuan termasuk galian dan juga timbunan. Analisis tersebut menganalisis serta memperhitungkan faktor keamanan pada suatu lereng.

Perumusan SLOPE/W yang komprehensif memungkinkan untuk menganalisis dengan mudah masalah stabilitas lereng yang sederhana maupun yang rumit dengan menggunakan berbagai metode untuk menghitung faktor keamanan minimum dan permukaan gelincir yang kritis. Beberapa metode perhitungan stabilitas lereng yang disediakan disajikan dalam Tabel 2.13 (Hiben, 2021).

Tabel 2.13 Metode-metode yang Tersedia di Program SLOPE/W

<i>Method</i>	<i>Moment Equilibrium</i>	<i>Force Equilibrium</i>
<i>Ordinary or Fellenius</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Bishop Simplified</i>	<i>Yes</i>	<i>No</i>
<i>Janbu Simplified</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Spencer</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Morgenstern-Price</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>
<i>Corps of Engineers-1</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Corps of Engineers-2</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Lowe-Karafiath</i>	<i>No</i>	<i>Yes</i>
<i>Janbu Generalized</i>	<i>Yes (by slice)</i>	<i>Yes</i>
<i>Sarma - Vertical Slice</i>	<i>Yes</i>	<i>Yes</i>

SLOPE/W dapat digunakan untuk memodelkan berbagai kondisi geoteknik, diantaranya sebagai berikut:

1. Lapisan tanah dengan karakteristik beragam, termasuk variasi material dan perubahan sifat mekanis di setiap lapisan.
2. Distribusi tekanan air pori yang tidak seragam, baik pada kondisi jenuh maupun tidak jenuh.
3. Berbagai model kekuatan geser tanah seperti *Mohr-Coloumb*, Anisotropic, dan lainnya.
4. Parameter kekuatan geser tanah dalam kondisi tidak jenuh yang berpengaruh terhadap stabilitas lereng.
5. Bentuk bidang longsor yang fleksibel dengan atau tanpa adanya *tension crack* (retakan tegangan).
6. Beban tambahan eksternal, seperti beban merata akibat bangunan diatas lereng dan gaya akibat gempa bumi.
7. Struktur perkuatan lereng termasuk dinding penahan tanah, paku tanah (*soil nail*), dan geotekstil.