

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

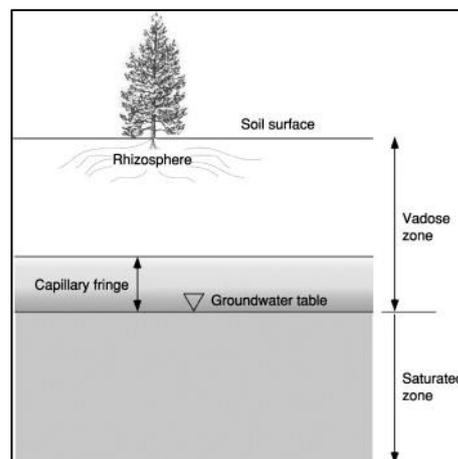
2.1 Mekanika Tanah Jenuh Sebagian

Dalam studi karakteristik tanah di rekayasa sipil, pada umumnya hanya dipelajari dua kasus ekstrim berikut: tanah yang kering sempurna (*dry soils*) dan tanah tersaturasi sempurna (*saturated soils*).

Menggunakan definisi derajat saturasi (S_r) yang merupakan rasio antara volume air (V_w) dan volume void/ V_v (air + udara) pada tanah, kita ketahui bahwa tanah tersaturasi sempurna memiliki nilai $S_r = 1$ dan untuk tanah kering sempurna $S_r = 0$.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

Tanah tersaturasi sempurna (*saturated*) dapat ditemukan pada tanah yang berada di bawah muka air tanah (*ground water*), sedangkan untuk tanah yang berada di atas muka air tanah (*ground water*) adalah tanah dengan kondisi jenuh sebagian (*unsaturated soil*).



Gambar 2.1. Lapisan Tanah

Sumber: Sinarta (2016)

Tanah di atas muka air tanah atau dengan istilah ilmiahnya *vadose zone*, adalah tanah yang tidak tersaturasi, derajat saturasinya berada diantara nol dan satu. Untuk tanah yang berada tepat di atas muka air tanah, meski tidak tersaturasi sempurna, biasanya tingkat saturasinya cukup tinggi. Sedangkan

tanah yang berada di permukaan, tingkat saturasinya tergantung kepada curah hujan atau vegetasi yang ada.

Analisis stabilitas lereng sering melibatkan tanah jenuh sebagian yang memiliki tekanan air pori negatif. Zona tanah jenuh sebagian secara langsung dipengaruhi oleh perubahan iklim mikro atau lokal. Curah hujan dan penguapan menyebabkan perubahan dalam tekanan air pori yang berpengaruh terhadap kekuatan geser tanah. Pada umumnya tanah berada pada kondisi setengah jenuh (*partially saturation*), pada kondisi ini tegangan air pori dapat bernilai negatif yang menimbulkan terjadinya gaya hisap (*soil suction* atau *matric suction*) dan berpengaruh terhadap kuat geser tanah (*shear strength*). Kondisi *partially saturation* terjadi saat ruang pori sebagian terisi air yang merupakan *matric suction* ($u_a - u_w$) dan dapat membentuk maniskus air, yang timbul karena fenomena tegangan permukaan/*surface tension* (H. Rahardjo, 2009).

2.1.1. Kuat Geser Tanah Jenuh Sebagian (*Unsaturated Soil*)

Tanah di alam secara alami dapat dibagi menjadi dua, yaitu tanah kondisi jenuh sempurna (*fully saturated*) dan tanah kondisi jenuh sebagian (*partially saturated*). Perbedaan kondisi kejenuhan tanah ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan fase air yang membentuk suatu massa tanah (Muntaha, 2010). Kondisi pada tanah jenuh sebagian, air hanya mengisi sebagian dari volume pori dan sisanya terisi oleh udara. Pada tanah jenuh sebagian, Teori Terzaghi mengenai tegangan efektif klasik dan koefisien *suction* (χ) telah dimodifikasi menjadi persamaan berikut ini (Bishop, 1959):

$$\sigma' = (\sigma - p_a) + \chi (p_a - p_w) \quad (2.1)$$

Dimana:

σ'	= Tegangan Efektif	(kPa)
σ	= Tegangan Total	(kPa)
p_a	= Tekanan Udara Pori	(kPa)
p_w	= Tekanan <i>Suction</i>	(kPa)

Nilai $(p_a - p_w)$ merupakan nilai tekanan air negatif atau yang biasa disebut *suction* dan χ adalah nilai koefisien *suction*. Nilai koefisien *suction* bervariasi dari nol sampai satu tergantung kondisi tanah, yaitu dalam kondisi kering sampai jenuh. Nilai satu ketika kondisi tanah jenuh, sehingga persamaan menjadi (Hamdhan, 2013):

$$\sigma' = (\sigma - p_w) \quad (2.2)$$

Dan ketika kondisi tanah kering dengan nilai nol, maka persamaan menjadi:

$$\sigma' = (\sigma - p_a) \quad (2.3)$$

Pada saat kondisi tanah kering, tegangan efektif akan sama dengan tegangan total dikarenakan nilai tekanan udara pori dapat diasumsikan sangat kecil bahkan tidak ada ($p_a \approx 0$), sedangkan untuk mendapatkan nilai koefisien *suction* diperlukan pengujian laboratorium. Akan tetapi diperlukan waktu yang cukup lama dan biaya yang tinggi dalam menguji tanah kondisi jenuh sebagian.

Pada kondisi tanah jenuh sebagian, istilah tanah tidak jenuh tidak berarti bahwa tanah tersebut memiliki nilai derajat kejenuhan sebesar nol, tetapi hanya menggambarkan bahwa derajat kejenuhannya tidak mencapai 100% (Muntaha, 2010). Pada saat kondisi ini, istilah tanah tidak jenuh dapat dikenakan pada semua jenis tanah yang memiliki tegangan air negatif (Fredlund et al., 1995). Persamaan yang digunakan dalam menentukan kekuatan geser pada tanah jenuh sebagian, yaitu sebagai berikut (Fredlund et al., 1978) adalah:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan\varphi' + (u_a - u_w) \tan\varphi^b \quad (2.4)$$

Dengan φ^b merupakan sudut yang menunjukkan tingkat kenaikan kekuatan geser relatif terhadap *matric suction*. Sedangkan φ' merupakan sudut yang menunjukkan tingkat kenaikan kekuatan geser berkenaan dengan tegangan normal.

2.1.2. Aliran Air Tanah Jenuh Sebagian

Tiga tipe pergerakan air yang terjadi dalam tanah adalah aliran jenuh (*saturated flow*), aliran tidak jenuh (*unsaturated flow*) dan pergerakan uap (*vapour*). Aliran air tanah merupakan gambaran gradien total potensial air dari satu zona tanah ke zona tanah lainnya.

Aliran air tanah jenuh sebagian (*unsaturated*) adalah kondisi normal yang terjadi pada hampir semua tanah di alam sepanjang waktu. Ciri dari kondisi ini adalah tidak ada gradien hidraulik, tidak ada air dalam pori-pori tanah yang berukuran besar, tetapi air hanya terdapat pada pori-pori tanah yang berukuran kecil. Hal ini terjadi karena adanya gaya adhesi dan kohesi sehingga air yang ada merupakan air serapan dan gaya kapiler. Dalam tanah jenuh sebagian, gradien *matric* potensial dari satu zona ke zona lainnya merupakan pendorong terjadinya pergerakan air. Air mengalir melalui lapisan-lapisan air serapan dan pori-pori kapiler, air cenderung untuk seimbang dan bergerak dari zona dengan potensial tinggi ke zona potensial rendah dan prosesnya sangat lambat. Koefisien permeabilitas pada kondisi tidak jenuh akan berubah-ubah seiring dengan perubahan tingkat kejenuhan yang terjadi.

Perubahan dari kondisi jenuh ke tidak jenuh umumnya memerlukan penurunan koefisien permeabilitas. Pada saat *suction* tinggi atau nilai pembasahan menjadi rendah, permeabilitas mungkin akan menjadi sangat rendah.

2.1.3. Infiltrasi Hujan

Infiltrasi dapat didefinisikan sebagai proses masuknya air ke dalam tanah. Kapasitas infiltrasi (*infiltration capacity*) adalah volume maksimum air yang masuk dari permukaan tanah (dalam satuan kecepatan). Laju infiltrasi (*infiltration rate*) adalah volume dari air yang melewati permukaan tanah dan mengalir dalam profil tanah. Laju infiltrasi ditentukan oleh banyaknya air yang tersedia pada permukaan tanah, sifat dari permukaan tanah, kemampuan tanah untuk mengalirkan infiltrasi air dari permukaan.

Kemampuan tanah untuk melewatkan air tergantung pada ukuran, jumlah dan hubungan antar *void* serta perubahan dalam ukuran akibat sifat kembang susut mineral lempung pada saat pembasahan. Tanah yang mendekati kering mempunyai kapasitas infiltrasi awal yang lebih tinggi dibanding dengan tanah-tanah yang mempunyai kadar air tinggi.

Efek dari laju infiltrasi hujan adalah hilangnya *suction* dalam zona jenuh sebagian, perubahan tekanan air pori serta menurunnya kekuatan geser tanah.

Mengacu kepada BMKG (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika), intensitas curah hujan terbagi atas lima kategori, yaitu:

1. Hujan Ringan : 0,5 – 20 mm/hari
2. Hujan Sedang : 20 – 50 mm/hari
3. Hujan Lebat : 50 – 100 mm/hari
4. Hujan Sangat Lebat : 100 – 150 mm/hari
5. Hujan Ekstrem : >150 mm/hari

2.2. Lereng

Permukaan tanah yang mempunyai sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal sehingga membentuk suatu lereng (*slope*), serta suatu bidang di permukaan tanah yang menghubungkan permukaan tanah yang lebih tinggi dengan permukaan tanah yang lebih rendah. Lereng yang ada secara garis besar dibagi menjadi dua, yaitu lereng alami dan lereng buatan. Lereng alami terbentuk secara alamiah yang biasanya terdapat pada daerah perbukitan. Sedangkan lereng buatan terbentuk oleh manusia yang biasanya untuk keperluan konstruksi, seperti tanggul sungai, bendungan tanah, tanggul untuk badan jalan kereta api dan lain sebagainya.

2.2.1. Faktor Terbentuknya Lereng

Di dalam kehidupan ini, tentu banyak fenomena-fenomena yang terjadi yang tanpa disadari dapat mengubah bentuk alam yang ada dipermukaan bumi ini, termasuk dengan bentuk lereng. Fenomena yang terjadi ini, merupakan

faktor utama dalam terbentuknya suatu lereng. Faktor-faktor yang dapat memengaruhi terbentuknya lereng adalah:

- a. Faktor yang bersifat aktif, antara lain;
 1. Berkurangnya daya tahan suatu tanah terhadap adanya suatu erosi.
 2. Adanya pembebanan, misalnya oleh air hujan, bangunan, sehingga bobot dari massa batuan atau tanah menjadi lebih besar.
- b. Faktor yang bersifat pasif, antara lain;
 1. Pengaruh iklim (tropis atau subtropis).
 2. Keadaan litologi (batuan beku, batuan sedimen, batuan metamorf).
 3. Keadaan stratigrafi (urutan lapisan batuan).
 4. Keadaan struktur geologi (daerah sesar dan lipatan).
 5. Keadaan vegetasi.

2.2.2. Bentuk Lereng

Untuk bentuk lereng, dibagi menjadi dua jenis lereng, yaitu:

1. Lereng Alam (*Natural Slope*)

Lereng alam terbentuk karena proses alam, material yang terbentuk memiliki kecenderungan tergelincir terbawa beratnya lereng itu sendiri dan gaya-gaya luar yang ditahan oleh kuat geser tanah dan material. Gangguan terhadap kestabilan terjadi bilamana tahanan geser tanah tidak dapat mengimbangi gaya-gaya yang menyebabkan gelincir pada bidang longsor.

2. Lereng Buatan (*Man Made Slope*):

a. Lereng Buatan dari Tanah Asli

Lereng dibuat dari tanah asli dengan memotong kemiringan. Kestabilan pemotongan ditentukan oleh kondisi geologi, sifat teknis tanah, tekanan akibat rembesan dan cara pemotongan.

b. Lereng Buatan dari tanah Asli yang Dipadatkan (Lereng Timbunan)

Tanah dipadatkan untuk konstruksi jalan raya atau rel kereta api serta bendungan. Sifat teknis timbunan dipengaruhi oleh cara penimbunan dan derajat kepadatan tanah.

Untuk lereng timbunan dibedakan menjadi beberapa kondisi, yaitu;

1. Timbunan tanah tak berkoheksi di atas lapisan tanah kokoh.
Kestabilan dari lereng ini bergantung pada;
 - a. Sudut geser dalam dari bahan timbunan
 - b. Kemiringan lereng
 - c. Tekanan air pori
2. Timbunan tanah berkoheksi di atas lapisan tanah kokoh.
 - a. Kuat geser tanah timbunan
 - b. Berat isi tanah timbunan
 - c. Tekanan air pori
3. Timbunan dilaksanakan di atas tanah lembek.
 - a. Kuat geser tanah timbunan
 - b. Berat isi tanah timbunan
 - c. Tinggi timbunan kemiringan lereng
 - d. Kuat geser tanah dasar

2.3. Stabilitas Lereng

Dalam beberapa bentuk lereng dan beberapa pola keruntuhan yang ada, maka dianjurkan memeriksa dan mengadakan penilaian terhadap lereng tersebut, dengan demikian stabilitas lereng akan tetap terjaga. Stabilitas lereng dalam arti lainnya adalah kemantapan atau kekokohan sebuah lereng itu berdiri, dengan gaya yang terjadi pada lereng tersebut, baik gaya vertikal maupun horisontal. Sebuah lereng dikatakan stabil apabila terjadi keseimbangan antara gaya yang menyebabkan lereng tersebut bergeser dengan gaya yang akan melawan gaya geser tersebut.

Secara umum faktor keamanan suatu lereng merupakan perbandingan nilai rata-rata kuat geser tanah atau batuan di sepanjang bidang keruntuhan kritisnya terhadap beban yang diterima lereng di sepanjang bidang keruntuhannya. Mengingat lereng terbentuk oleh material yang sangat beragam dan banyak faktor ketidakpastiannya, maka dalam mendesain suatu penanggulangan selalu dilakukan penyederhanaan dengan berbagai asumsi.

Secara teoritis, massa yang bergerak dapat dihentikan dengan menaikkan faktor keamanannya.

2.3.1. Tinjauan Umum

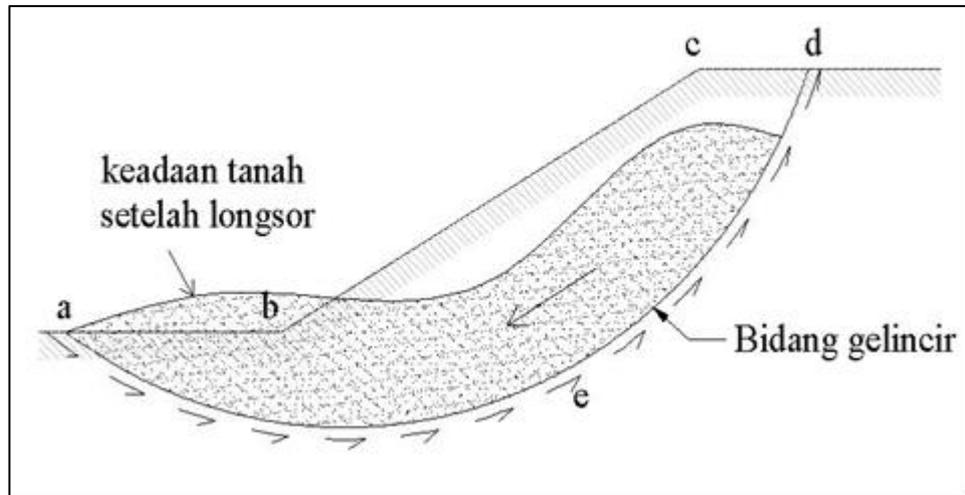
Kondisi permukaan tanah di bumi sebagian besar memiliki ketinggian (*level*) yang tidak sama. Perbedaan ketinggian ini bisa disebabkan oleh mekanisme alam maupun oleh rekayasa manusia. Kondisi yang disebabkan oleh mekanisme alam misalnya gunung, lembah, jurang dan lain-lain. Sedangkan kondisi yang disebabkan oleh rekayasa manusia biasanya berupa hasil penggalian dan hasil penimbunan untuk tujuan yang beraneka ragam, misalnya pembuatan bendungan, irigasi, jalan raya dan lain sebagainya.

Suatu tempat yang terdapat dua permukaan tanah yang memiliki ketinggian yang berbeda dihubungkan oleh suatu permukaan yang disebut sebagai lereng. Suatu lereng yang terjadi secara alamiah maupun hasil rekayasa manusia, akan terdapat di dalamnya gaya-gaya yang bekerja mendorong sehingga tanah yang lebih tinggi akan cenderung bergerak ke arah bawah. Di sisi lain terdapat pula gaya-gaya dalam tanah yang menahan atau melawan dorongan gaya-gaya yang bergerak ke bawah. Kedua gaya ini bila mencapai keseimbangan tertentu maka akan menimbulkan kestabilan pada kedudukan tanah tersebut.

Dalam keadaan tidak seimbang, dimana gaya yang berfungsi menahan/melawan lebih kecil dibandingkan dengan gaya-gaya yang mendorong ke bawah, maka akan terjadi suatu kelongsoran (*slide*). Dalam peristiwa tersebut terjadi pergerakan massa tanah pada arah ke bawah dan pada arah keluar (*outward*). Kelongsoran dapat terjadi dengan berbagai cara, secara perlahan-lahan atau mendadak, dan dengan maupun tanpa dorongan yang terlihat secara nyata.

Penyebab dari suatu kelongsoran bisa beraneka ragam, pada umumnya terjadi karena penggalian terbuka atau penggalian bagian bawah dari suatu lereng. Namun demikian, terdapat beberapa kejadian kelongsoran yang disebabkan oleh bertambahnya tekanan air pori dalam lapisan yang sangat

permeabel dan oleh pengaruh dari guncangan, misalnya gempa yang dapat mengurangi kepadatan tanah di bawah lereng.



Gambar 2.2. Kelongsoran lereng
Sumber: Mandala, A. (2013)

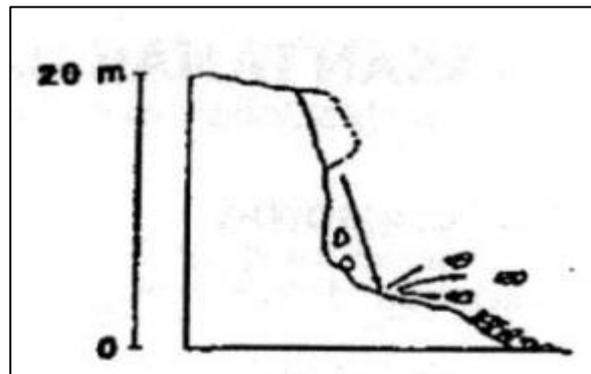
Longsoran pada umumnya terjadi pada sudut lereng 15 – 70 %, karena pada tempat tersebut sering ditempati batuan lempung dan bahan rombakan lain yang mudah longsor. Relief-relief kecil seperti jalan raya, jalan kereta api, tebing penggalian batu, tebing saluran perlu dicatat karena dapat mengundang terjadinya longsoran. Tanah yang longsor dapat merupakan tanah timbunan, tanah yang diendapkan secara alami, atau kombinasi keduanya.

2.3.2. Jenis Keruntuhan Lereng

Gerakan tanah (*mass movement*) adalah gerakan perpindahan lereng dari bagian atas atau perpindahan massa tanah maupun batuan pada arah tegak, mendatar, maupun miring dari kedudukan semula. Gerakan tanah dan longsoran dapat diklasifikasikan dalam banyak cara, dan masing-masing memiliki kegunaannya dalam menekankan pentingnya cara pengenalan, cara penanggulangan, kontrol dan keperluan klasifikasi yang lain. Berdasarkan jenis gerakannya, keruntuhan lereng dapat dibagi sebagai berikut:

1. Runtuhan (*Falls*)

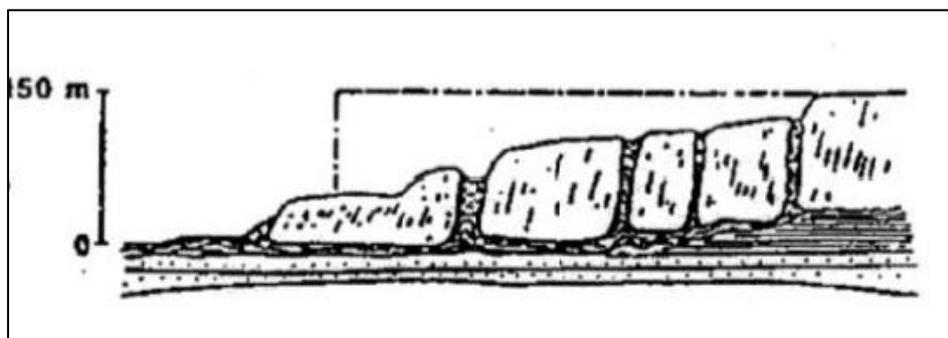
Gerakan massa jatuh melalui udara. Umumnya massa yang jatuh ini terlepas dari lereng yang curam dan tidak ditahan oleh suatu geseran dengan material yang berbatasan. Pada jenis runtuhan batuan umumnya terjadi dengan cepat dan ada kemungkinan tidak didahului dengan gerakan awal. Runtuhan dapat terjadi seketika pada saat gempa.



Gambar 2.3. Jenis Longsoran Runtuhan
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

2. Rayapan (*Creep*)

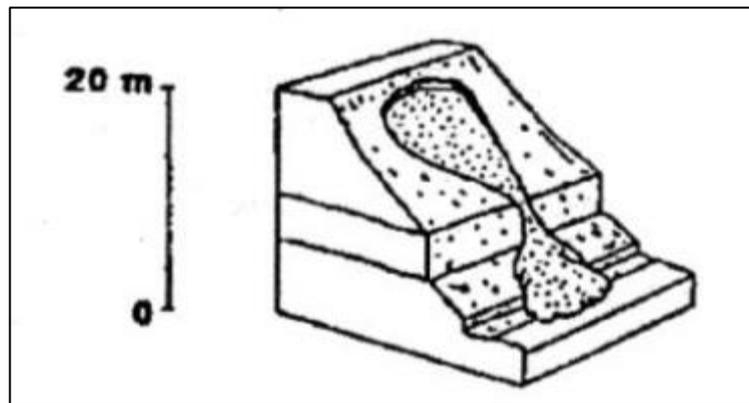
Gerakan yang dapat dibedakan dalam hal kecepatan gerakannya yang secara alami biasanya lambat. Untuk membedakan longsoran dan rayapan, maka kecepatan gerakan tanah perlu diketahui. Rayapan (*creep*) dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu: rayapan musiman yang dipengaruhi iklim, rayapan bersinambungan yang dipengaruhi kuat geser dari material, dan rayapan melaju yang berhubungan dengan keruntuhan lereng atau perpindahan massa lainnya (Hansen, 1984) .



Gambar 2.4. Jenis Longsoran Rayapan
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

3. Aliran (*Flow*)

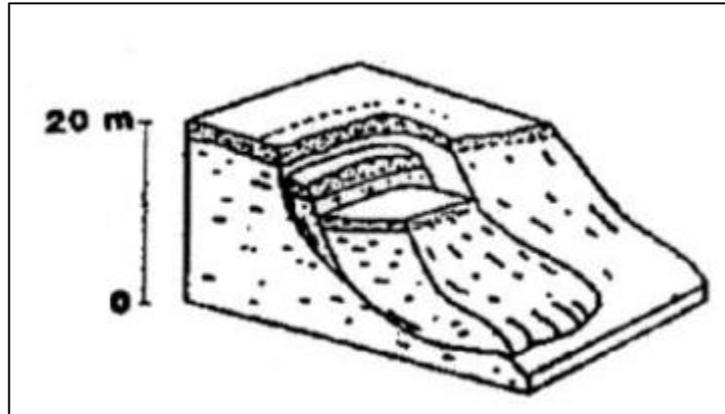
Gerakan yang dipengaruhi oleh jumlah kandungan atau kadar air tanah yang terjadi pada material tak terkonsolidasi. Bidang longsor antara material yang bergerak umumnya tidak dapat dikenali. Pada umumnya gerakan jenis tanah ini terjadi pada kondisi tanah yang amat sensitif atau sebagai akibat dari gaya gempa. Bidang gelincir terjadi karena gangguan mendadak dan gerakan tanah yang terjadi umumnya bersifat cepat tetapi juga dapat lambat misalnya pada rayapan/*creep*.



Gambar 2.5. Jenis Longsoran Aliran
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

4. Longsoran (*slides*)

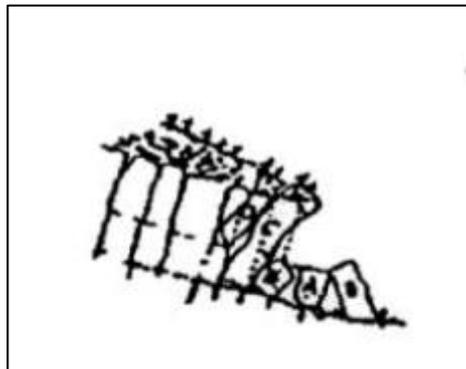
Dalam longsoran sebenarnya gerakan ini terdiri dari peregangan secara geser dan peralihan sepanjang suatu bidang atau beberapa bidang gelincir yang dapat nampak secara visual. Gerakan ini dapat bersifat progresif yang berarti bahwa keruntuhan geser tidak terjadi seketika pada seluruh bidang gelincir melainkan merambat dari suatu titik. Massa yang bergerak menggelincir diatas lapisan batuan/tanah asli dan terjadi pemisahan dari kedudukan semula. Sifat gerakan biasanya lambat hingga amat lambat. Longsoran dapat berupa rotasi atau berupa translasi.



Gambar 2.6. Jenis Longsoran *Slide*
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

5. Pengelupasan (*topples*)

Gerakan ini berupa rotasi keluar dari suatu unit massa yang berputar terhadap suatu titik akibat gaya gravitasi atau gaya-gaya lain seperti adanya air dalam rekahan.

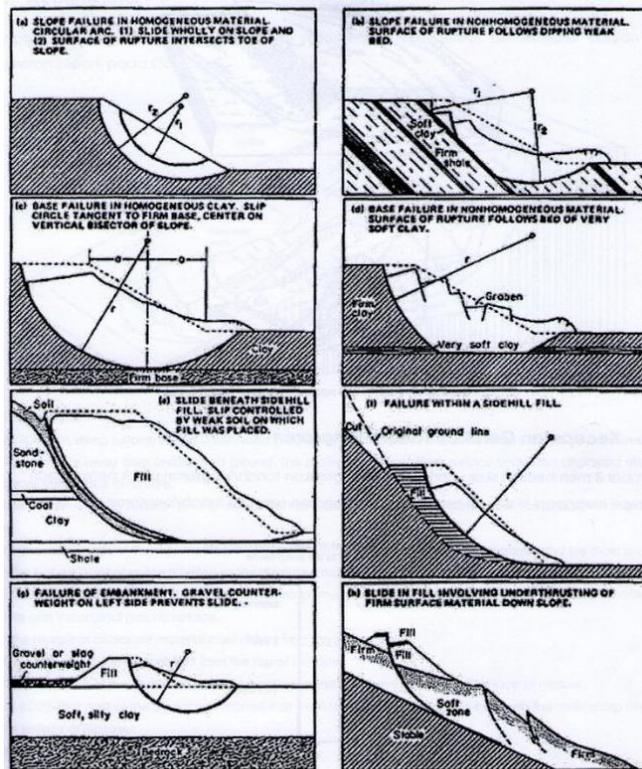


Gambar 2.7. Jenis Longsoran Pengelupasan
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

Longsoran berdasarkan bentuk bidang gelincirnya dapat dibagi menjadi:

1. Longsoran Rotasi

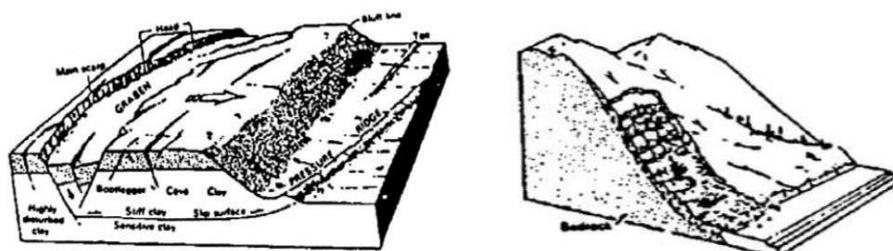
Longsoran rotasi adalah longsoran yang paling sering dijumpai oleh kebanyakan orang. Longsoran rotasi ini dapat terjadi pada batuan maupun tanah. Pada kondisi tanah homogen, longsoran rotasi ini dapat berupa busur lingkaran, tetapi dalam kenyataan sering dipengaruhi oleh adanya diskontinuitas oleh adanya sesar, lapisan lembek, dan lain-lain. Analisis stabilitas lereng yang mengasumsi bidang longsoran berupa busur lingkaran dapat menyimpang bilamana tidak memperhatikan hal ini.



Gambar 2.8. Jenis Longoran Rotasi
Sumber: Cruden dan Varnes (1992)

2. Longoran Translasi

Dalam longoran translasi suatu massa bergerak sepanjang bidang gelincir berbentuk bidang rata. Perbedaan terhadap bidang longoran dan translasi merupakan kunci penting dalam penanggulangannya. Gerakan dari longoran translasi umumnya dikendalikan oleh permukaan yang lembek. Longoran translasi ini dapat bersifat menerus dan luas, serta dapat pula dalam blok.



Gambar 2.9. Jenis Longoran Translasi
Sumber: Transportation Research Board (1978)

2.3.3. Konsep Kestabilan Lereng

Salah satu penerapan pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah/batuan adalah untuk analisa kemantapan lereng. Keruntuhan geser (*shear failure*) pada tanah/batuan terjadi akibat gerak relatif antar butirnya. Oleh sebab itu kekuatannya tergantung pada gaya yang bekerja antar butirnya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kekuatan geser terdiri atas:

1. Bagian yang bersifat kohesi, tergantung pada macam tanah/batuan dan ikatan butirnya.
2. Bagian yang bersifat gesekan, yang sebanding dengan tegangan efektif pada bidang geser.

Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dalam rumus:

$$s = c' + (\tau - \mu) \tan \varphi$$

Dimana :

S = Kekuatan geser

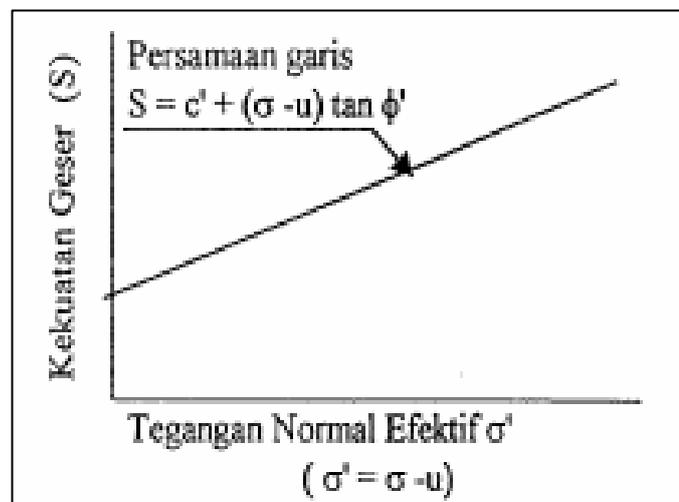
τ = Tegangan total pada bidang geser (kPa)

μ = Tegangan air pori (kPa)

C' = Kohesi efektif

φ = Sudut geser dalam efektif (°)

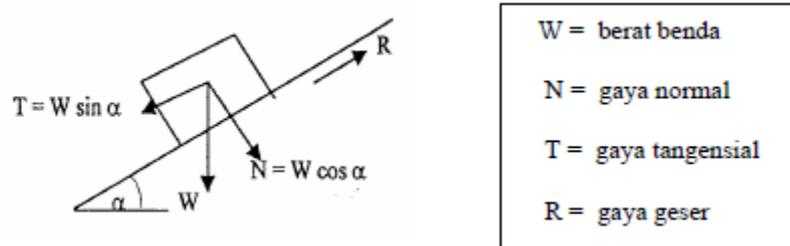
:



Gambar 2.10. Kekuatan Geser Tanah

Sumber: Petunjuk Teknis Perencanaan dan Penanganan Longsor (Bina Marga)

Analisis dasar kemantapan lereng didasarkan pada mekanisme gerak suatu benda yang terletak pada bidang seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.11. Keseimbangan Benda pada Bidang Miring

Sumber: Petunjuk Teknis Perencanaan dan Penanganan Longsoran (Bina Marga)

Pada Gambar 2.11. terlihat bahwa yang mau longsor adalah T , sedangkan gaya yang melawan longsor adalah R yakni gaya geser yang terjadi antara berat benda W dengan bidang miring, sehingga dengan demikian dapat dikatakan :

Bila : $R/T < 1$ Benda akan bergerak

$R/T = 1$ Benda dalam keadaan seimbang

$R/T > 1$ Benda akan diam

2.3.4. Angka Keamanan (*Safety Factor*)

Mengingat lereng terbentuk oleh banyaknya variabel dan banyaknya faktor ketidakpastian antara lain parameter-parameter tanah seperti kuat geser tanah, kondisi tekanan air pori maka dalam menganalisis selalu dilakukan penyederhanaan dengan berbagai asumsi. Secara teoritis massa yang bergerak dapat dihentikan dengan meningkatkan kekuatan gesernya.

Hal yang perlu dipertimbangkan dalam penentuan kriteria faktor keamanan adalah resiko yang dihadapi, kondisi beban dan parameter yang digunakan dalam melakukan analisis stabilitas lereng. Resiko yang dihadapi dibagi menjadi tiga yaitu : tinggi, menengah dan rendah. Tugas seorang *engineer* meneliti stabilitas lereng untuk menentukan faktor keamanannya. Secara umum, faktor keamanan dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$FK = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (2.5)$$

Dimana:

FK = Angka keamanan terhadap kekuatan tanah.

τ_f = Kekuatan geser rata-rata dari tanah.

τ_d = Tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor.

Kekuatan geser suatu lahan terdiri dari dua komponen, friksi dan kohesi, dan dapat ditulis,

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.6)$$

Dimana:

c = Kohesi tanah penahan

φ = Sudut geser penahan ($^{\circ}$)

σ = Tegangan normal rata-rata (kPa)

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

$$\tau_d = c_d + \sigma \tan \varphi_d \quad (2.7)$$

Dimana c_d adalah kohesi dan φ_d sudut geser yang bekerja sepanjang bidang longsor. Dengan mensubstitusi persamaan (2.6) dan persamaan (2.7) ke dalam persamaan (2.5) sehingga didapat persamaan:

$$FK = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{c_d + \sigma \tan \varphi_d} \quad (2.9)$$

Sekarang kita dapat mengetahui beberapa parameter lain yang mempengaruhi angka keamanan tadi, yaitu angka keamanan terhadap kohesi, F_c , dan angka keamanan terhadap sudut geser F_{φ} . Dengan demikian F_c dan F_{φ} dapat kita definisikan sebagai:

$$F_c = \frac{c}{c_d} \quad (2.10)$$

Dan,

$$F_\varphi = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_d} \quad (2.11)$$

Bilamana persamaan (2.9), (2.10), dan (2.11) dibandingkan adalah wajar bila F_c menjadi sama dengan F_φ , harga tersebut memberikan angka keamanan terhadap kekuatan tanah.

$$FK = F_c = F_\varphi \quad (2.12)$$

FK sama dengan 1 maka lereng dalam keadaan akan longsor. Umumnya, faktor aman stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2 – 1,5.

Parameter yang digunakan menyangkut hasil pengujian dengan harga batas atau sisa dengan mempertimbangkan ketelitiannya. Tabel 2.1. memperlihatkan faktor keamanan terendah berdasar hal-hal tersebut di atas.

Tabel 2.1. Faktor Keamanan Minimum Stabilitas Lereng

Risiko	Kondisi Beban	Parameter Kekuatan Geser			
		Maksimum		Sisa	
		Teliti	Kurang Teliti	Teliti	Kurang Teliti
Tinggi	Dengan Gempa	1,50	1,75	1,35	1,50
	Tanpa Gempa	1,80	2,00	1,60	1,80
Menengah	Dengan Gempa	1,30	1,60	1,20	1,40
	Tanpa Gempa	1,50	1,80	1,35	1,50
Rendah	Dengan Gempa	1,10	1,25	1,00	1,10
	Tanpa Gempa	1,25	1,40	1,10	1,20

Sumber: Manual Kestabilan Lereng

Resiko tinggi jika ada konsekuensi terhadap manusia cukup besar (ada pemukiman), bangunan sangat mahal, dan sangat penting. Resiko menengah bila ada konsekuensi terhadap manusia tetapi sedikit (bukan pemukiman), bangunan tidak begitu mahal, dan tidak begitu penting. Resiko rendah bila tidak ada konsekuensi terhadap manusia dan terhadap bangunan (sangat

murah) (SKBI-2.3.06, 1987). Kekuatan geser maksimum adalah harga puncak dan dipakai apabila massa tanah/batuan yang potensial longsor tidak mempunyai bidang diskontinuitas (perlapisan, rekahan, sesar dan sebagainya) dan belum pernah mengalami gerakan. Kekuatan residual dipakai apabila: (i) massa tanah/batuan yang potensial bergerak mempunyai bidang diskontinuitas, dan atau (ii) pernah bergerak (walaupun tidak mempunyai bidang diskontinuitas) (SKBI-2.3.06, 1987).

2.3.5. Analisis Dengan Metode Elemen Hingga (FEM)

Dengan menggunakan metoda keseimbangan batas dimungkinkan untuk melakukan evaluasi lereng dengan cepat. Tetapi, prosedur ini memberlakukan hitungan yang sama antara:

1. Lereng timbunan baru,
2. Lereng yang baru digali atau,
3. Lereng alami.

Menurut Chowdhury (1981), dalam Mandala (2016), tegangan-tegangan di dalam lereng ini sangat dipengaruhi oleh K . Yaitu rasio tegangan lateral terhadap tegangan vertikal efektif. Tetapi perhitungan cara konvensional dengan metoda keseimbangan batas mengabaikan hal ini (Chowdhury, 1981). Dalam kenyataan, distribusi tegangan dalam ke tiga lereng tersebut di atas akan berbeda, dan oleh karena itu akan mempengaruhi stabilitasnya.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) pertama kali dikenalkan oleh Clough dan Woodward pada tahun 1967, tapi penggunaannya terbatas pada struktur dari material tanah yang kompleks. Untuk kasus khusus, metoda elemen hingga dapat mengakomodasi pengaruh penimbunan dan penggalian secara bertahap, sehingga pengaruh sejarah tegangan dalam tanah terhadap deformasinya dapat ditelusuri. Akan tetapi, kualitas metoda elemen hingga secara langsung bergantung pada kemampuan dari model konstitutif yang dipilih untuk secara realitas mensimulasikan kelakuan non linear dari tanah pembentuk lereng. Untuk lereng galian dan lereng alam, model konstitutif hanya dapat benar-benar dikembangkan dengan uji

lapangan kualitas tinggi yang didukung dengan pengamatan di lapangan. Dalam memilih program yang cocok, pengguna harus mempertimbangkan:

1. Model konstitutif, karena hasil dari perhitungan numerik sangat bergantung kepada ketetapan dari modal konstitutif yang akan dipakai.
2. Ketersediaan dari tipe-tipe elemen hingga yang berbeda (segitiga, segiempat, atau isoparametrik)
3. Data laboratorium dan lapangan yang dibutuhkan untuk mendefinisikan sifat-sifat tanah.

Dengan program yang dipilih, dapat ditentukan tegangan-tegangan dan deformasi lereng yang akan digunakan untuk mengevaluasi stabilitas lereng. Walaupun metoda elemen hingga sangat berguna untuk para ahli geoteknik, namun metoda ini tidak selalu dapat digunakan dengan baik dalam analisis stabilitas lereng. Kesulitan terutama dalam hitungan faktor aman saat terjadinya keruntuhan. Pada cara kesimbangan batas, keruntuhan dapat digambarkan dengan kondisi di mana gaya-gaya atau momen yang menggerakkan melampaui gaya-gaya atau momen yang menahan, dan pada kondisi ini biasanya ditunjukkan dengan faktor aman yang kurang dari satu. Dalam metoda elemen hingga, tanah dimodelkan sebagai kumpulan elemen-elemen yang berlainan (*discrete*) dan kondisi keruntuhan merupakan fenomena progresif, di mana tidak setiap elemen runtuh secara simultan. Jadi keruntuhan merupakan kejadian yang bertahap, yaitu keruntuhan dari titik yang mengalami luluh lebih dulu, dan kemudian menunjukkan dari titik yang mengalami luluh lebih dulu, dan kemudian menuju ke kedudukan final di mana seluruh elemen secara efektif telah runtuh. Beberapa kriteria keruntuhan yang telah dipakai pada saat ini adalah menurut Wong (1984), dalam Martini (2009):

1. Cembungan Garis Lereng (*Bulging of Slope Line*) (Snitbhan dan Chen, 1976). Kriteria ini digambarkan dengan perpindahan horizontal dari permukaan lereng, dan ditunjukkan dengan cara menspesifikasikan batas perpindahan horizontal yang masih ditoleransikan.

2. Geser Batas (*Limit Shear*) (Duncan dan Dunlop, 1969). Dalam kasus ini tegangan di sepanjang permukaan bidang longsor yang dihitung dari metoda elemen hingga digunakan secara langsung untuk menghitung faktor aman. Nilai faktor aman akan bergantung pada rasio kuat geser tersedia di sepanjang bidang longsor terhadap tegangan-tegangan yang dihitung dengan metoda elemen hingga.
3. Nonkonvergensi penyelesaian (*nonconvergence of the solution*) (Zienkiewicz, 1971). Keruntuhan diindikasikan dengan runtuhnya elemen-elemen akibat kondisi pembebanan yang diberikan.

Bergantung pada kriteria keruntuhan yang dipilih, perbedaan dalam besarnya beban yang menyebabkan keruntuhan dapat sangat menonjol. Dengan lemahnya kriteria keruntuhan yang jelas, interpretasi dari hasil hitungan elemen hingga masih menjadi masalah, dan pengguna (*user*) sering harus percaya pada pengalaman dan intuisi untuk memahami kemampuan model numerik dalam memprediksi model fisik lereng yang mendekati kenyataan. Dengan mengingat ketidakpastian dan kelemahan metoda elemen hingga tersebut, maka cara pendekatan yang kompleks biasanya tidak digunakan dalam perancangan dan analisis lereng untuk jalan raya dan timbunan (Abramson et al., 1996).

Dalam metoda elemen hingga atau FEM, tidak dilakukan asumsi bidang longsor. Faktor keamanan dicari dengan mencari bidang lemah pada struktur lapisan tanah. Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ), secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan. Nilai faktor keamanan, kemudian dihitung sebagai berikut:

$$\Sigma MSF = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{reduced}} \quad (2.17)$$

Dimana:

- Σ MSSF = Faktor Keaman
- c = Kohesi Tanah (ton/m²)
- ϕ = Sudut geser dalam tanah (°)
- c_{reduced} = Nilai Kohesi Terendah
- ϕ _{reduced} = Nilai Sudut Geser Terendah

2.4. Parameter Tanah

2.4.1. Modulus Young

Dengan menggunakan data sondir, boring dan grafik triaksial dapat digunakan untuk mencari besarnya nilai elastisitas tanah. Nilai yang dibutuhkan adalah nilai qc atau *cone resistance*. Yaitu dengan menggunakan rumus:

$$E = 2 \cdot qc \quad \text{kg/cm}^2$$

$$E = 3 \cdot qc \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{untuk pasir})$$

$$E = (2-8) \cdot qc \quad \text{kg/cm}^2 \quad (\text{untuk lempung})$$

Nilai yang dibutuhkan adalah nilai N. Modulus elastisitas didekati dengan menggunakan rumus:

$$E = 6 (N+5) \quad \text{k/ft}^2 \quad (\text{untuk pasir berlempung})$$

$$E = 10 (N+15) \quad \text{k/ft}^2 \quad (\text{untuk pasir})$$

Dimana:

- σ_1 = Tegangan 1
- σ_2 = Tegangan 2
- erata-rata = Regangan Rata-Rata

Tabel 2.2. Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Macam Tanah	E (Kg/cm ²)
Lempung	
Sangat Lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Berpasir	300 – 425
Pasir	
Berlanau	50 – 200
Tidak Padat	100 – 250

Macam Tanah	E (Kg/cm ²)
Padat	500 – 1000
Pasir dan Kerikil	
Padat	800 – 2000
Tidak Padat	500 – 1400
Lanau	20 – 200
Loess	150 – 600
Cadas	1400 – 14000

Sumber: Bowles (1991)

Tabel 2.3. Hubungan antara Es dengan qc

Jenis Tanah	CPT (kg/cm ²)
Pasir Terkonsolidasi	$Es = (2 - 4) qc$
Pasir <i>Over Consolidation</i>	$Es = (6 - 30) qc$
Pasir Berlempung	$Es = (3 - 6) qc$
Pasir Berlanau	$Es = (1 - 2) qc$
Lempung Lunak	$Es = (3 - 8) qc$

Sumber: Mekanika Tanah 2, Hary Christady Hardiyatmo

2.4.2. Poisson Ratio

Rasio Poisson sering dianggap sebesar 0,2 – 0,4 dalam pekerjaan-pekerjaan mekanika tanah. Nilai sebesar 0,5 biasanya dipakai untuk tanah jenuh dan nilai 0 sering dipakai untuk tanah kering dan tanah lainnya untuk kemudahan dalam perhitungan. Ini disebabkan nilai dari rasio poisson sukar untuk diperoleh untuk tanah.

Tabel 2.4. Nilai Perkiraan Angka Poisson Tanah

Macam Tanah	ν (Angka Poisson Tanah)
Lempung Jenuh	0,4 – 0,5
Lempung Tak Jenuh	0,1 – 0,3
Lempung Berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir Padat	0,2 – 0,4
Pasir Kasar	0,15
Pasir Halus	0,25
Batu	0,1 – 0,4

Sumber: Bowles (1991)

2.4.3. Berat Jenis Tanah Kering

Berat jenis tanah kering adalah perbandingan antara berat tanah kering dengan satuan volume tanah. Berat jenis tanah kering dapat diperoleh dari data laboratorium dengan menggunakan sampel dari uji lapangan.

2.4.4. Berat Isi Tanah Jenuh

Berat isi tanah jenuh adalah perbandingan antara berat tanah jenuh air dengan satuan volume tanah jenuh. Di mana ruang porinya terisi penuh oleh air. Nilai dari berat jenis tanah jenuh didapat dengan menggunakan rumus:

$$\gamma_{sat} = \left(\frac{G_s + e}{1 + e} \right) \gamma_w \quad (2.18)$$

Dimana:

G_s = *Specific Gravity*

e = Angka Pori

γ_w = Berat Isi Air (kPa)

Nilai-nilai dari G_s , e dan γ_w didapat dari hasil pengujian laboratorium dengan menggunakan sumber sampel tanah yang sama.

2.4.5. Sudut Geser Dalam

Sudut geser dalam bersama dengan kohesi merupakan faktor dari kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Nilai dari sudut geser dalam didapat dari engineering properties tanah, yaitu dengan *Triaxial Test* dan *Direct Shear Test* ataupun dengan korelasi yang ditunjukkan pada Tabel 2.10.

Tabel 2.5. Hubungan antara sudut geser dalam dengan jenis tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
Kerikil Kepasiran	35 – 40
Kerikil Kerakal	35 – 40
Pasir Padat	35 – 40

Pasir Lepas	30
Lempung Kelanauan	25 – 30
Lempung Kelanauan	20 – 25

Sumber: Buku Mekanika Tanah, Braja M. Das Jilid 2

2.4.6. Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser tanah, kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Nilai dari kohesi didapat dari engineering properties, yaitu dengan *Triaxial Test* dan *Direct Shear Test*. Nilai kohesi secara empiris dapat ditentukan dari data sondir (q_c) yaitu sebagai berikut: (Sumber : Buku Teknik Sipil, Ir. V. Sunggono kh).

$$\text{Kohesi (c)} = q_c/20 \quad (2.19)$$

Hubungan antara kohesi, N-SPT dan sudut geser dalam ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.6. Hubungan Antara Kohesi, N-SPT dan Sudut Geser Pada Tanah Lempung

Konsistensi	N-SPT	Cu
Sangat Lunak	0 – 2	12,5
Lunak	2 – 4	12,5 – 25
Sedang	4 – 8	25 – 50
Kaku	8 – 15	50 – 100
Sangat Kaku	15 – 30	100 – 200
Keras	> 30	> 200

Sumber: Mandala (2013)

Nilai kohesi efektif, c' untuk tanah lempung *Overconsolidated* menurut Sorensen dan Okkels (2013) bisa didapatkan dari persamaan berikut:

$$c' = 0,1 C_u \quad (2.20)$$

2.4.7. Permeabilitas

Berdasarkan persamaan Kozeny-Carman nilai *permeabilitas* untuk setiap *layer* tanah dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$k = \frac{e^3}{1 + e} \quad (2.21)$$

Di mana:

e = Angka Pori

Untuk tanah yang berlapis-lapis harus dicari nilai permeabilitas untuk arah vertikal dan horisontal dapat dicari dengan rumus:

$$K_h = \frac{1}{H} (kH_1 + kH_2 + \dots + kH_n) \quad (2.22)$$

$$k_v = \frac{H}{\left(\frac{H_1}{k_1}\right) + \left(\frac{H_2}{k_2}\right) + \left(\frac{H_3}{k_3}\right) + \left(\frac{H_4}{k_4}\right) + \dots + \left(\frac{H_n}{k_n}\right)} \quad (2.23)$$

Di mana:

H = Tebal lapisan (m)

K = Koefisien *Permeabilitas*

n = Jumlah Lapisan yang Ditinjau

k_v = Koefisien Permeabilitas Arah Vertikal

k_h = Koefisien *Permeabilitas* Arah Horisontal

Beberapa persamaan empiris telah dikembangkan untuk mendapatkan hubungan antara koefisien permeabilitas dengan volume air atau tingkat kejenuhan dalam tanah khususnya untuk kondisi tanah *unsaturated*. Rumus empiris ini dikembangkan oleh Gardner (1958), Brook dan Corey (1964), dan Van Genuchten (1980).

Genuchten (1980) memberikan persamaan untuk menghitung relatif koefisien permeabilitas:

$$kr(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad (2.24)$$

Di mana:

- kr = Koefisien Relatif Permeabilitas
- h = *Pressure Head* (m)
- α, n, m = Parameter Konstan

2.5. Data Pengujian Lapangan

Dengan menggunakan data profil tanah yang berasal dari Laboratorium Mekanika Tanah diperoleh kesimpulan tentang jenis tanah pada kedalaman-kedalaman tertentu, sehingga dapat dibuat stratifikasi tanah. Untuk pembuatan stratifikasi tanah dapat dibuat dengan menggunakan data dari sondir dan bor log.

2.5.1. Data Sondir

Alat sondir atau *Dutch Cone Penetrometer Test* (CPT) merupakan alat penyelidikan tanah yang paling sederhana, murah, praktis dan sangat populer digunakan di Indonesia. Alat sondir dari Belanda ini memberikan tekanan konus dengan atau tanpa hambatan pelekat (*friction resistance*) yang dapat dikorelasikan pada parameter tanah seperti *undrained shear strength*, kompresibilitas tanah dan dapat memperkirakan jenis lapisan tanah. Uji sondir sendiri ditujukan untuk:

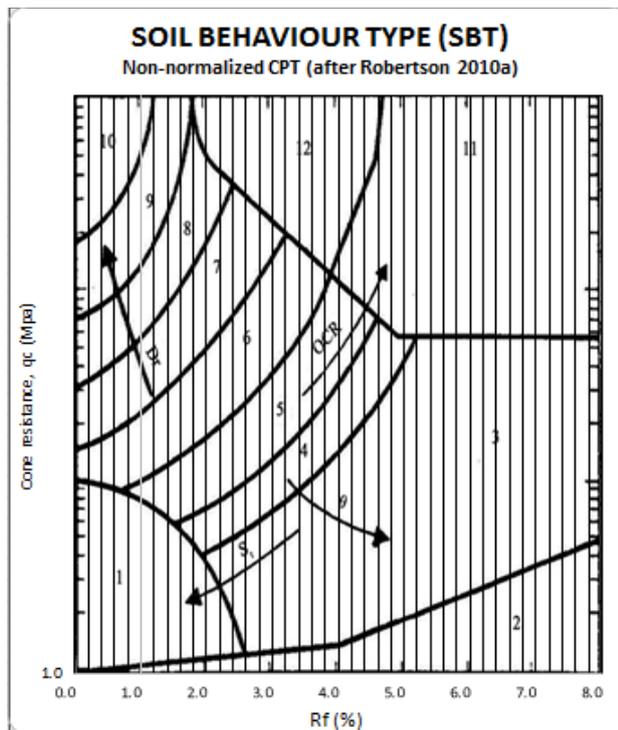
- a. Identifikasi, stratifikasi lapisan tanah, kekuatan lapisan tanah.
- b. Kontrol pemadatan tanah timbunan.
- c. Perencanaan pondasi dan *settlement*.
- d. Perencanaan stabilitas lereng, galian/timbunan.

Hasil sondir (q_c , f_c , JHP, FR) dapat dikorelasikan:

- a. Konsistensinya.
- b. Kuat geser tanah (CU).
- c. Parameter konsolidasi (C_c dan M_v).
- d. Relatif Density (D_r).

- e. Elastisitas tanah.
- f. Daya dukung pondasi.
- g. Penurunan.

Dari nilai-nilai q_c dan FR dapat dikorelasikan terhadap jenis tanah. Hubungan antara Tekanan Konus (q_c), *Friction Ratio* (FR) dan jenis tanah dapat dilihat pada grafik Schmertmann, 1969, dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Grafik Hubungan Antara Tekanan Konus (q_c), *Friction Ratio* (FR) dan Jenis Tanah
 Sumber: Schmertmann, 1969

Dari nilai-nilai q_c dapat dikorelasikan terhadap konsistensi tanah lempung pada suatu lapisan tanah.

Tabel 2.7. Hubungan Antara Konsistensi Sengan Tekanan Konus

Konsistensi	Tekanan Konus Q_c (kg/cm^2)	<i>Undrained Cohesion</i> (T/m^2)
<i>Very soft</i>	< 2,5	< 1,25
<i>Soft</i>	2,5 – 5,0	1,25 – 2,50
<i>Medium stiff</i>	5,0 – 10,0	2,50 – 5,0
<i>Stiff</i>	10,0 – 20,0	5,0 – 10,0
<i>Very stiff</i>	20,0 – 40,0	10,0 – 20,0

Konsistensi	Tekanan Konus Q_c (kg/cm^2)	<i>Undrained Cohesion</i> (T/m^2)
<i>Hard</i>	> 40,0	> 20,0

Sumber: Begemann (1965)

Tabel 2.8. Hubungan Antara Kepadatan, *Relative Density*, Nilai N, q_c dan ϕ

Kepadatan	<i>Relative Density</i> (D_r)	Nilai N	Tegangan Konus q_c (kg/cm^2)	Sudut Geser dalam (ϕ)
<i>Very loose</i>	< 0,2	< 4	< 20	< 30
<i>Loose</i>	0,2 – 0,4	4 – 10	20 – 40	30 - 35
<i>Medium dense</i>	0,4 – 0,6	10 – 30	40 – 120	35 – 40
<i>Dense</i>	0,6 – 0,8	30 – 50	120 – 200	40 – 45
<i>Very dense</i>	0,8 – 1,0	> 50	> 200	> 45

Sumber: Begemann (1965)

Untuk menentukan korelasi empiris antara nilai N-SPT dengan *unconfined compressive strength* dan berat jenis tanah jenuh (γ_{sat}) untuk tanah kohesif. dapat dilihat pada tabel 2.9 di bawah ini.

Tabel 2.9. Korelasi Empiris Antara Nilai N-SPT Dengan *Unconfined Compressive Strength* dan Berat Jenis Tanah Jenuh (γ_{sat}) Untuk Tanah Kohesif

N-SPT (<i>blows/ft</i>)	Konsistensi	q_u (<i>Unconfined Compressive Strength</i>) ton/ft^2	γ_{sat} (kN/m^3)
< 2	<i>Very soft</i>	< 0,25	16 – 19
2 – 4	<i>Soft</i>	0,25 – 0,50	16 – 19
4 – 8	<i>Medium</i>	0,50 – 1,0	17 – 20
8 – 15	<i>Stiff</i>	1,0 – 2,0	19 – 22
15 – 30	<i>Very stiff</i>	2,0 – 4,0	19 – 22
> 30	<i>Hard</i>	> 4,0	19 – 22

Sumber: *Soil Mechanics*, Lambe and Whitman, from Terzaghi and Peck (1948)

Korelasi untuk menentukan berat jenis tanah (γ) dan berat jenis tanah jenuh (γ_{sat}) pada tanah kohesif dan non kohesif dapat dilihat pada tabel 2.10 dan tabel 2.11.

Tabel 2.10. Korelasi Berat Jenis Tanah (γ) Untuk Tanah Non Kohesif dan Kohesif

	<i>Cohesionless Soil</i>			
N	0 – 10	11 – 30	31 – 50	> 50
<i>Unit Weight γ, kN/m³</i>	12 – 16	14 – 18	16 – 20	18 – 23
<i>Angle of Friction ϕ</i>	25 – 32	28 – 36	30 – 40	> 35
<i>State</i>	<i>Loose</i>	<i>Medium</i>	<i>Dense</i>	<i>Very dense</i>
	<i>Cohesive</i>			
N	< 4	4 – 6	16 – 25	> 25
<i>Unit Weight γ, kN/m³</i>	14 – 18	16 – 18	16 – 20	> 20
q_u kPa	< 25	20 – 50	40 – 200	> 100
<i>Consistency</i>	<i>Very soft</i>	<i>Soft</i>	<i>Stiff</i>	<i>Hard</i>

Sumber: *Soil Mechanics*, Whilliam T. Whitman, Robert V (1962)

Tabel 2.11. Korelasi Berat Jenis Tanah Jenuh (γ_{sat}) Untuk Tanah Non Kohesif

Description	<i>Very Loose</i>	<i>Loose</i>	<i>Medium</i>	<i>Dense</i>	<i>Very Dense</i>
N-SPT					
<i>Fine</i>	1 – 2	3 – 6	7 – 15	16 – 30	
<i>Medium</i>	2 – 3	4 – 7	8 – 20	21 – 40	> 40
<i>Coarse</i>	3 – 6	5 – 9	10 – 25	26 – 45	> 45
ϕ					
<i>Fine</i>	26 – 28	28 – 30	30 – 34	33 – 38	
<i>Medium</i>	27 – 28	30 – 32	32 – 36	36 – 42	> 50
<i>Coarse</i>	28 – 30	30 – 34	33 – 34	40 – 50	
γ_{sat} (kN/m ³)	11 – 16	14 – 18	17 – 20	17 – 22	20 – 23

Sumber: *Soil Mechanics*, Whilliam T. Whitman, Robert V (1962)

2.5.2. Data Bor

Pengeboran merupakan cara yang paling awal dan mudah dalam penyelidikan tanah. Maksud dari pekerjaan bor ini adalah untuk mengidentifikasi kondisi tanah, sampai kedalaman yang ditetapkan, sehingga dapat digunakan untuk perencanaan pondasi, timbunan tanah, khususnya penanggulangan longsor. Pekerjaan ini menggunakan mesin bor dan tabung untuk mengambil contoh tanah tak terganggu. Tujuan dilakukan *boring* antara lain:

- a. Identifikasi jenis tanah.
- b. Menggambar contoh tanah asli maupun tidak asli.
- c. Uji Penetrasi Baku/*Standard Penetration Test* (SPT).

d. Uji lain: *Pecker*, *Vane Shear*, *PMT*, *Air Pori*.

Selain melakukan *boring*, juga dilakukan *SPT (Standard Penetration Test)* pada setiap interval tertentu. *SPT* digunakan untuk menentukan konsistensi atau *density* tanah di lapangan. Tes tersebut dilakukan dengan memancang alat *split spoon sampler*, yaitu berupa baja dengan ujung-ujung yang terbuka. *Split spoon* dipancangkan 45 cm ke dalam tanah pada kedalaman tertentu dalam tanah.

Alat untuk memancang berupa palu (*hammer*) dengan berat 63.5 kg dengan tinggi jatuh 75 cm. Jumlah tumbukan untuk penetrasi 15 cm kedua dan 15 cm ketiga disebut *standard penetration resistance N*, yang mana hal ini menggambarkan jumlah tumbukan per 30 cm penetrasi.

SPT dapat dikorelasikan dengan:

- a. Konsistensinya.
- b. Kuat geser tanah.
- c. Parameter konsolidasi.
- d. *Relatif density*.
- e. Daya dukung pondasi.
- f. Penurunan.

Korelasi antara *N-SPT* dengan *relative density* dan sudut geser dalam telah ditampilkan pada tabel 2.6.

Tabel 2.12. Nilai *SPT* dan *Properties Tanah*

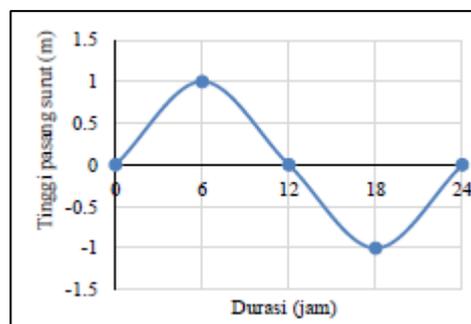
<i>Sand</i>		<i>Clay</i>	
Nilai <i>N-SPT</i>	<i>Relative Density</i>	Nilai <i>N-SPT</i>	<i>Konsistensi</i>
0 – 4	<i>Very Loose</i>	< 2	<i>Very Soft</i>
4 – 10	<i>Loose</i>	2 – 4	<i>Soft</i>
10 – 30	<i>Medium</i>	4 – 8	<i>Medium</i>
30 – 50	<i>Dense</i>	8 – 15	<i>Stiff</i>
> 50	<i>Very Dense</i>	15 – 30	<i>Very Stiff</i>
-	-	> 30	<i>Hard</i>

Sumber: Terzaghi & Peck

2.6. Studi Kasus Lereng Sungai yang Dipengaruhi Pasang Surut (Indra Noer Hamdhan dan Desti Santi Pratiwi)

Pada studi kasus penelitian ini, pemodelan lereng yang digunakan dengan program elemen hingga (Plaxis 2D). Pemodelan lereng dilakukan untuk mengetahui pengaruh pasang surut pada lereng sungai dengan kemiringan lereng yang berbeda. Dalam pemodelan analisis stabilitas lereng dibuat menjadi tiga jenis kemiringan, yaitu 1:1, 1:1,5, dan 1:2 dengan tinggi lereng 5 m. Analisis dilakukan pada satu lapisan tanah yang homogen, yaitu pada tanah dengan permeabilitas tinggi dan rendah. Dengan tinggi muka air (h) yang dimodelkan yaitu 2,5 m dari dasar lereng. Parameter tanah yang digunakan pada pemodelan ini disamakan, yang berbeda hanya parameter hidrauliknya saja, yaitu γ_{unsat} sebesar 16 kN/m^3 ; γ_{sat} sebesar 17 kN/m^3 ; E' sebesar 6.250 kN/m^2 ; ν' sebesar 0,3; c' sebesar 20 kN/m^2 ; ϕ' sebesar 20° ; k sebesar $0,04752 \text{ m/hari}$ (permeabilitas rendah); k sebesar 7.128 m/hari (permeabilitas tinggi).

Pasang surut yang dimodelkan yaitu satu meter dengan jenis pasang surut tunggal (*diurnal*), dimana durasi yang digunakan selama satu hari atau 24 jam. Pemodelan pasang surut pada Program Plaxis 2D menggunakan *flow function*, adapun kondisi pasang surut yang akan digunakan pada pemodelan.



Gambar 2.13. Kondisi Batas Pasang Surut pada Lereng
Sumber: Hamdhan, Pratiwi (2018)

Analisis dalam menentukan nilai faktor keamanan dilakukan pada saat muka air normal/rata-rata (jam ke-0), pasang maksimum (jam ke-6), pertengahan antara pasang surut (jam ke-12), surut minimum (jam ke-18),

dan saat kembali ke muka air normal/rata-rata (jam ke-24). Hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel dan Grafik di bawah ini,

Tabel 2.13. Hasil Analisis Pemodelan Lereng Permeabilitas Rendah

Waktu (jam)	SF dengan Kemiringan Lereng		
	1:1	1:1,5	1:2
0	2,537	2,774	2,958
6	2,999	3,320	3,559
12	2,522	2,774	2,948
18	2,228	2,418	2,563
24	2,552	2,784	2,959

Sumber: Hamdhan, Pratiwi (2018)

Tabel 2.14. Hasil Analisis Pemodelan Lereng Permeabilitas Tinggi

Waktu (jam)	SF dengan Kemiringan Lereng		
	1:1	1:1,5	1:2
0	2,394	2,673	2,872
6	2,830	3,154	3,435
12	2,386	2,665	2,845
18	2,128	2,351	2,509
24	2,416	2,695	2,895

Sumber: Hamdhan, Pratiwi (2018)

Setelah dilakukan analisis stabilitas lereng, yaitu tanah dengan permeabilitas tinggi dan rendah dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin tinggi posisi muka air (pada kondisi pasang), maka nilai faktor keamanan akan semakin besar, hal tersebut diakibatkan karena adanya penambahan tekanan hidrostatis dari air yang menahan gaya yang melongsorkan. Begitu pula sebaliknya, semakin rendah posisi muka air (pada kondisi susut) maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil akibat pengurangan tekanan hidrostatis. Adapun nilai faktor keamanan untuk tanah dengan permeabilitas rendah lebih besar dibandingkan dengan tanah permeabilitas tinggi.
2. Kemiringan lereng pun mempengaruhi besarnya nilai faktor keamanan. Semakin landai kemiringan lereng, maka nilai faktor keamanan akan semakin besar.
3. Dari hasil analisis stabilitas lereng dengan kondisi nilai permeabilitas yang berbeda, pasang surut tidak mempengaruhi nilai faktor keamanan secara signifikan yaitu perbedaannya hanya sebesar 4%.