

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Geoteknik

Geoteknik merupakan bagian dari rekayasa sipil dan pertambangan yang didasarkan pada pengetahuan yang terkumpul beberapa tahun terakhir ini. Seorang ahli geoteknik yang merancang terowongan, jalan raya, bendungan atau yang lainnya memerlukan suatu estimasi bagaimana tanah dan batuan akan merespon tegangan. Sehingga dalam hal ini penyelidikan geoteknik merupakan bagian dari uji lokasi dan merupakan dasar untuk pemilihan lokasi. Bagian dari ilmu geoteknik yang berhubungan dengan respon material alami terhadap gejala deformasi, tegangan dan regangan disebut dengan geomekanika, yang pada dasarnya dibagi menjadi dua yaitu mekanika tanah dan mekanika batuan.

3.2 Lereng

3.2.1 Lereng Alami

Secara umum lereng dapat diartikan sebagai “bentang alam yang bentuknya miring terhadap bidang horizontal”. Lereng dapat dibedakan menjadi lereng alam dan lereng buatan. Lereng Alam merupakan lereng yang terbentuk karena proses-proses alam dalam hal ini misalkan lereng suatu bukit atau gunung.

3.2.2 Lereng Buatan

Lereng buatan adalah lereng yang terbentuknya akibat aktifitas manusia misalnya pada penggalian suatu tambang atau konstruksi galian pada pekerjaan sipil. Pada pembahasan ini dibatasi pada pengertian lereng untuk suatu galian tambang.

Adapun beberapa jenis lereng bukaan tambang terdiri sebagai berikut :

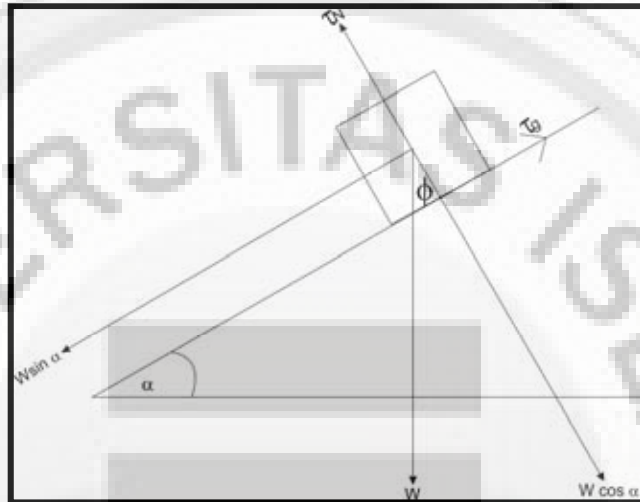
- *Single slope*, lereng tunggal yang terbentuk dari satu jenjang *bench* yang terdiri dari tinggi lereng (sama dengan tinggi *bench*), sudut lereng, kaki lereng *Toe*, dan siku lereng *Crest*.
- *Inter-ramp slope*, lereng yang terbentuk antar jalan tambang, dapat terbentuk dari beberapa jenjang *benches*.
- Lereng keseluruhan *Overall Pit Slope*, lereng yang terbentuk dari *Crest* teratas dan *Toe* terbawah, dengan tinggi total lereng sama dengan kedalaman bukaan tambang.

3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Secara umum, ada beberapa faktor yang harus diperhatikan dalam menganalisa suatu stabilitas lereng antara lain :

- Geometri Lereng
- Kekuatan Masa Batuan lereng
- Orientasi bidang lemah *discontinuitas* terhadap orientasi lereng.
- Air Tanah
- Faktor Luar

Dalam menentukan kestabilan atau kemantapan lereng dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*) yang merupakan perbandingan antara gaya-gaya yang menahan terhadap gaya-gaya yang menggerakkan tanah tersebut. Bila faktor keamanan lebih tinggi dari satu umumnya lereng tersebut dianggap stabil.



Sumber : *Bahan Kuliah Geoteknik Tambang, Maryanto Ssi.MT*

Gambar 3.1

Ilustrasi Kelongsoran Dengan Gaya Mekanika

$$FK = \frac{\text{Kekuatan (strength)}}{\text{Gaya yang Bekerja (Stress)}} = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{c + \tau_n \cdot \tan \phi}{w \cdot \sin \alpha}$$

Dimana :

FK = Faktor Keamanan (*safety factor*)

C = kohesi (Kn/m^2)

τ_n = Tegangan Normal

τ_g = Tegangan Gesek ($\tau_n \cdot \tan \phi$)

ϕ = Sudut geser dalam bidang (sudut geser tanah)

Kemudian hubungan antara faktor keamanan dan kemungkinan longsoran lereng adalah :

- FK > 1 lereng dianggap aman
- FK = 1 lereng dianggap dalam kondisi kritis
- FK < 1 lereng dalam keadaan tidak mantap

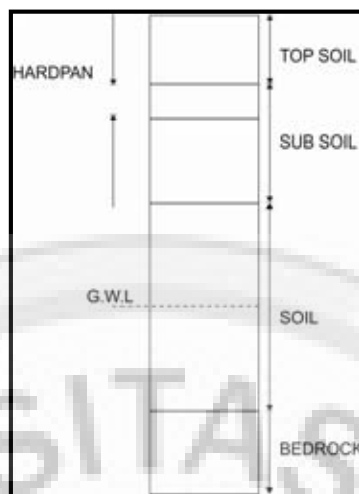
Penentuan nilai FK bergantung pada perencanaan pembuatan lereng dan kemungkinan keruntuhan yang terjadi. Metode analisis kemantapan lereng yang dapat digunakan diantaranya adalah, Metode Keseimbangan Batas.

3.4 Pengujian Geomekanika

Geomekanika terbagi menjadi dua yaitu mekanika batuan dan mekanika tanah yang kedua bidang ini menunjang dalam pelaksanaan pemodelan geoteknik dan Rekayasa Pertambangan. Geomekanika merupakan gabungan dari mekanika batuan dan mekanika tanah yang membahas tentang respon mekanik dan semua material geologi seperti batuan dan tanah.

3.4.1 Mekanika Tanah

Bila kita membuat suatu galian secara hati-hati agar permukaannya baik, maka akan nampak penampang galian seperti gambar 3.2 di bawah ini.



Sumber : Buku Ajar Geoteknik Tambang, Yuliadi ST.MT 2006

Gambar 3.2

Penampang Galian pada Tambang

- Top soil : Merupakan lapisan “organic soil”, biasanya tebalnya tidak lebih dari 500 mm dan mengandung humus.
- Sub soil : Merupakan bagian kulit yang telah lapuk, terletak antara *Top soil* dan bagian yang tidak lapuk dibawahnya.
- Soil : Merupakan endapan-endapan geologi yang lemah merupakan kelanjutan dari sub soil sampai bedrock.
- Bedrock : Merupakan lapisan batuan induk yang sifatnya dan belum mengalami proses pelapukan atau pemecahan dan terletak pada lapisan paling bawah.
- Hardpan : Merupakan lapisan yang tipis agak keras dibawah top soil. Akibat dari air hujan yang menyebabkan humus membusuk Air hujan yang sedikit asam dapat melarutkan zat besi dan alumina yang meresap ke bawah dan merupakan bahan penyemen, sehingga membentuk lapisan agak keras tersebut.

Sifat fisik tanah meliputi :

- Massa jenis (ρ) : Massa tanah per satuan volume.
- Kadar air (w) : Perbandingan antara massa air dengan massa butir tanah, dinyatakan dalam persen.
- Derajat kejenuhan (S_r) : Perbandingan volume air dan volume pori total, dinyatakan dalam persen.
- Angka pori (e) : Perbandingan antara volume pori dan volume butir.
- Porositas (n) : Perbandingan antara volume pori dan volume total.

Sifat Mekanika Tanah :

- Kuat Tekan bebas (*unconfined compression test*)
- Kuat Geser langsung UU (*Unconsolidate Undrained Direct Shear Test*)
- Konsolidasi (uji kemampuan tanah)
- Triaxial UU (*Unconsolidate Undrained Triaxial*)

3.4.1.1 Pengujian Sifat Fisik Tanah

- a. Massa jenis (*density*)

$$\rho = M / V$$

Dimana :

ρ = massa jenis tanah (gr/cm^3)

M = massa tanah alami (gr)

V = volume tanah alami (cm^3)

b. Kadar air (*Water Content*)

$$w = (M_w/M_d) \times 100\%$$

Dimana :

w = kadar air (%)

M_w = massa air (gr)

M_d = massa tanah kering (gr)

c. Derajat Kejenuhan (*Degree Of Saturation*)

$$S_r = \frac{M_w \times \rho_d}{\rho_w [(\rho_d \times V) - M_d]} \times 100\%$$

Dimana :

S_r = derajat kejenuhan (%)

V = volume total (cm³)

M_w = massa air (gr)

M_d = massa tanah kering (gr)

ρ_w = massa jenis air (1 gr/cm³)

ρ_d = massa jenis tanah kering (gr/cm³)

Tabel 3.1
Kondisi Tanah Berdasarkan Angka Derajat Kejenuhan

Kondisi Tanah	Derajat Kejenuhan Degree of Saturation (%)
Dry (Kering)	0
Humid (Agak Lembab)	1-25
Damp (Lembab)	25-50
Moist (Agak Basah)	50-75
Wet (Basah)	75-99
Saturated (Jenuh)	100

Sumber : *Diktat Penuntun Praktikum Mekanika Tanah*, 2008

3.4.1.2 Uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compressive Test*)

Percobaan ini banyak dipakai untuk mengukur (*Unconfined Compressive Strength*) dari tanah, lempung /lanau, dari kuat tekan bebas tersebut dapat diketahui Beberapa definisi yang berkaitan dengan percobaan ini antara lain :

Perhitungan yang digunakan dalam percobaan ini :

Apabila $q_u = \text{Unconfined Compressive Strength}$

Maka $S_u = \frac{q_u}{2}$

S_u = kekuatan geser undrained

Sumber : ASTM (American Society For Testing And Materials) D2166/D2166M – 13

- Kuat tekan bebas : didapat dari pembacaan proving ring dial yang maksimal.

$$q_u = \frac{K \times R}{A}$$

Dimana :

q_u = kuat tekan bebas (kg/cm²)

K = kalibrasi proving ring

R = pembacaan maksimum-pembacaan awal

A = luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan R (yang dikoreksi)

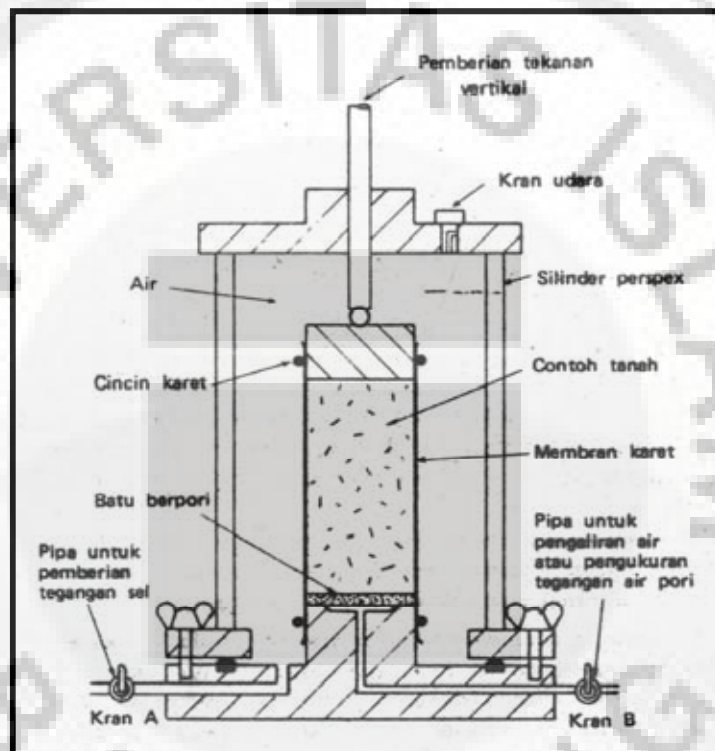
- Derajat Kepekaan : perbandingan antara q_u undisturbed dan q_u Remolded.

$$S_t = \frac{q_u \text{ undisturbed}}{q_u \text{ Remolded}} \text{ atau } S_t = \frac{q_u \text{ Intact Specimen}}{q_u \text{ Remolded Specimen}}$$

Sumber : ASTM (American Society For Testing And Materials) D2166/D2166M – 13

3.4.1.3 Uji Triaxial UU (*Unconsolidated Undrained Triaxial*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan geser tanah yaitu c (kohesi) dan ϕ (sudut geser dalam), dalam tegangan total ataupun efektif yang mendekati keadaan aslinya di lapangan yang digunakan dalam analisa kesetabilan jangka pendek (*short term stability analysis*).



Sumber : *Mekanika Tanah*, Dr.Ir. Wesley, Tahun 1977

Gambar 3.3
Sel Triaxial

Percobaan ini mencakup uji kuat geser untuk tanah berbentuk silinder dengan diameter maksimum 75 mm. Pengujian dilakukan dengan alat konvensional dalam kondisi contoh tanah tidak terkonsolidasi dan air pori tidak teralir (*unconsolidated undrained*). Beberapa definisi dan cara pengujian yang berkaitan dengan percobaan ini antara lain :

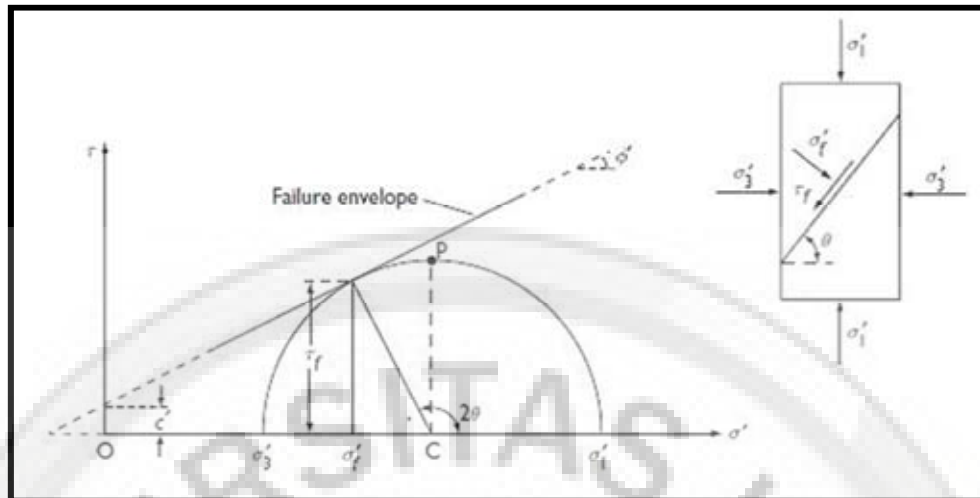
Cara Pengujian :

- Conto tanah diambil dengan tabung bor ukuran tinggi 76 mm dan diameter 38 mm, kedua permukaannya diratakan
- Keluarkan conto tanah dari silinder dengan menggunakan piston plunger
- Ukur diameter dan tinggi conto dengan teliti
- Timbang conto
- Dengan bantuan strecher, contoh tanah diselubungi membran karet
- Pasang batu pori dibagian bawah
- Membran bagian bawah dan atas diikat dengan karet membran
- Letakan conto tanah tersebut pada alat triaxial
- Sel triaxial diisi dengan air destilasi hingga penuh dan meluap, tegangan air pori dinaikan hingga sesuai tegangan keliling yang diinginkan
- Tekanan vertikal diberikan dengan cara menekan tangkai beban di bagian atas conto tanah yang dijalankan oleh mesin dengan kecepatan tertentu
- Pembacaan diteruskan sampai pembacaan proving ring dial memperlihatkan penurunan sebanyak 3 kali. Percobaan dilakukan lagi dengan tegangan sel yang lebih besar dengan prosedur seperti di atas.

Definisi dalam pengujian triaxial :

- Uji Triaxial UU adalah uji kompresi triaxial dimana tidak diperkenankan perubahan kadar air dalam conto tanah. Sampel tidak dikonsolidasikan dan air pori tidak teralir saat pemberian tegangan geser.
- Bidang-bidang tegangan utama adalah 3 bidang yang saling tegak lurus dimana bekerja tegangan-tegangan normal dan tanpa tegangan geser.

- Tegangan-tegangan utama σ_1 , σ_3 adalah tegangan normal yang bekerja pada bidang-bidang tegangan utama.
- Tegangan deviator adalah selisih antara tegangan utama terbesar (σ_1) dan tegangan utama terkecil (σ_3).
- Lingkaran Mohr adalah representasi secara grafis kondisi tegangan-tegangan pada suatu bidang dinyatakan dalam tegangan normal dan tegangan geser.
- Garis keruntuhan adalah garis atau kurva yang menyinggung lingkaran-lingkaran Mohr pada kondisi keruntuhan pada sampel yang memiliki tegangan-tegangan keliling yang berbeda. Mempunyai persamaan $T_f = c + \sigma \tan \phi$.
- Bidang keruntuhan adalah bidang dimana kuat geser maksimum dari tanah telah termobilisasi saat keruntuhan. Secara teoritis pada uji triaxial, bidang tersebut menyudut $(45^\circ + \phi/2)$ terhadap bidang horisontal.
- Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulumb adalah kuat geser tanah yang diperoleh dari uji triaxial, dinyatakan dalam persamaan $T_f = c + \sigma \tan \phi$.
- Kohesi, c adalah kuat geser tanah bila tidak diberikan tegangan keliling.
- Sudut geser dalam, ϕ adalah komponen kuat geser tanah yang berasal dari gesekan antara butir tanah.



Sumber : *Mekanika Tanah*, Dr.Ir. Wesley, Tahun 1977

Gambar 3.4
Lingkaran Mohr

3.4.2 Mekanika Batuan

Mekanika batuan merupakan ilmu teoritis dan terapan tentang perilaku mekanik batuan, berkaitan dengan respons batuan atas medan gaya dari lingkungan sekitarnya. *Deere, D.V., dalam Stagg & Zienkiewicz, 1968.*

Sifat Fisik Batuan Meliputi :

- Bobot Isi
- Berat Jenis
- Porositas
- Absorpsi
- Void Ratio

Sifat Mekanik Batuan Meliputi :

- Kuat Tekan
- Kuat Tarik
- Kuat Geser Langsung
- Triaxial

- Modulus Elastisitas
- Nisbah Poisson *Poition Ratio*

3.4.2.1 Pengujian Sifat Fisik Batuan

Batuan yang diambil dari lapangan biasanya disiapkan di laboratorium dengan urutan-urutan pertimbangan sebagai berikut :

- Massa sampel asli (natural) di timbang = M_n .
- Massa sampel jenuh (Sesudah dijenuhkan \pm selama 24 jam) : M_s .
- Massa sampel jenuh tergantung di dalam air : M_{sm} .
- Massa sampel kering (sesudah dikeringkan dalam oven \pm selama 24 jam dengan temperatur $\pm 90^0C$) : M_d .
- Volume Sampel Solid (V_s) :
$$= \frac{M_d - M_{sm}}{\rho_w}$$
- Volume Sampel Total (V_t) :
$$= \frac{M_s - M_{sm}}{\rho_w}$$
- Volume air dalam pori (V_w) :
$$= \frac{M_s - M_d}{\rho_w}$$

Maka beberapa rumus umum yang digunakan untuk menentukan sifat fisik batuan adalah sebagai berikut :

- Densitas Asli (*natural density*) : $\frac{M_n}{V_t}$
- Densitas Jenuh (*saturated density*) : $\frac{M_s}{V_t}$
- Densitas Kering (*dry density*) : $\frac{M_d}{V_t}$
- *Apparent specific gravity* : $\frac{M_d/V_t}{\rho_w}$
- *True specific gravity*: $\frac{M_d/V_s}{\rho_w}$

- Kadar Air Asli (*natural water content*) : $\frac{M_n - M_d}{M_d} \times 100 \%$
- Kadar Air Jenuh (*absorption*) : $\frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \%$
- Derajat Kejenuhan (*degree of saturation*) : $\frac{M_n - M_d}{M_s - M_d} \times 100 \%$
- Porositas : $n = \frac{V_w}{V_t} \times 100\%$
- Void ratio : $e = \frac{n}{1-n}$

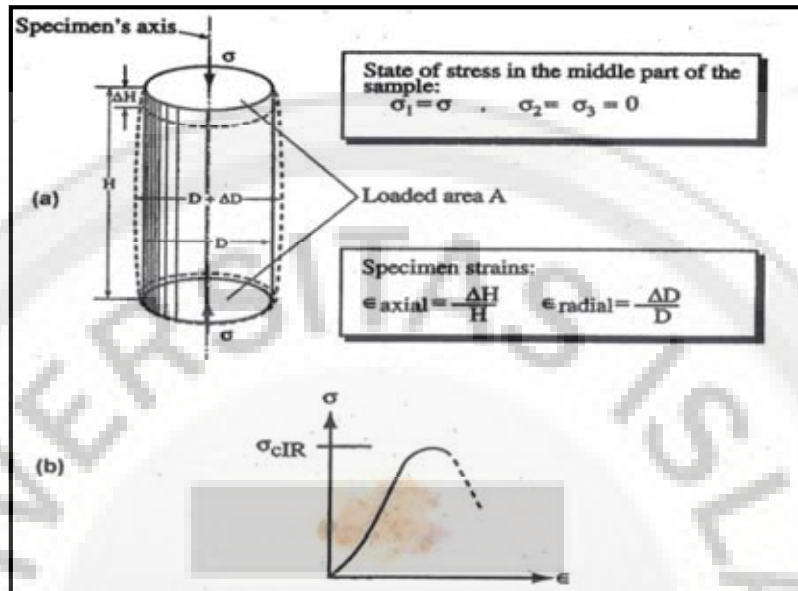
3.4.2.2 Uji Kuat Tekan Uniaxial (*Uniaxial Compression Strength Test*)

Pengujian ini menggunakan mesin tekan *compression machine* untuk menekan sampel batu yang berbentuk silinder, balok atau prisma dari satu arah *uniaxial*. Penyebaran tegangan di dalam sampel batu secara teoritis adalah searah dengan gaya yang dikenakan pada sampel tersebut. Tetapi dalam kenyataan arah tegangan tidak searah dengan gaya yang dikenakan pada sampel tersebut karena ada pengaruh dari plat penekan mesin tekan yang menghimpit sampel sehingga bentuk pecahan tidak berbentuk bidang pecah yang searah dengan gaya melainkan berbentuk “*cone*”.

Perbandingan antar tinggi dan diameter sampel (ι/D) mempengaruhi nilai kuat tekan batuan. Untuk perbandingan $\iota/D = 1$ kondisi tegangan triaxial saling bertemu sehingga akan memperbesar nilai kuat tekan batuan. Untuk pengujian kuat tekan digunakan $2 < \iota/D < 2,5$. Makin besar ι/D maka kuat tekannya akan bertambah kecil seperti ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini :

➤ Menurut ASTM
$$: \sigma_{\frac{\iota}{D}=1} = \frac{\sigma}{0,778 + \frac{0,222}{\frac{\iota}{D}}}$$

- Menurut PROTODIAKONOV : $\sigma_c \left(\frac{l}{D}\right)=2 = \frac{8\sigma}{7 + \frac{2}{l/D}}$



Sumber : Diktat Penuntun Praktikum Mekanika Tanah , 2008

Gambar 3.5

Uji Kuat Tekan Uniaxial pada Batuan Dengan (a) Ketentuan Kondisi Tegangan dan Regangan (b) Diperoleh Kurva Tegangan-Regangan dengan Tegangan Puncak pada Kuat Tekan Uniaxial

Dari hasil pengujian kuat tekan, dapat digambarkan kurva antara tegangan dengan regangan (stress berbanding strain) untuk tiap sampel batuan. Kemudian dari kurva ini dapat ditentukan beberapa sifat mekanik batuan berhubungan dengan kuat tekan yaitu :

1. Kuat Tekan = σ_c

Yaitu tegangan puncak saat batuan pecah.

2. Batas elastik = σ_E

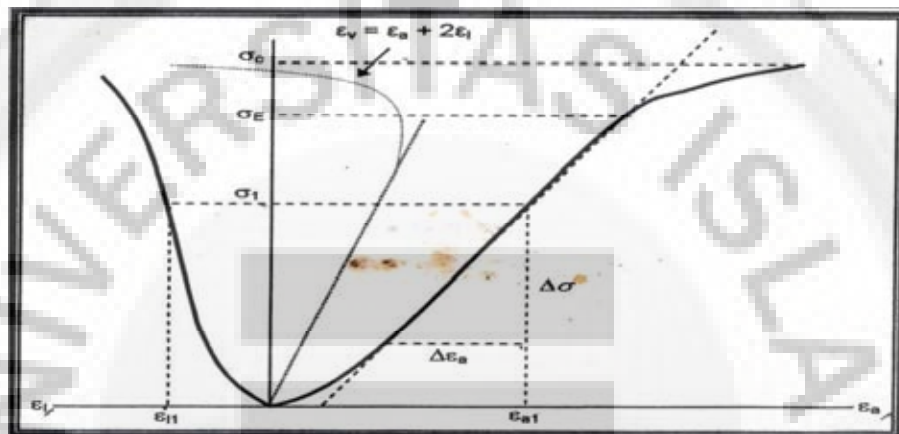
Yaitu batas batuan mencapai elastisitas tertinggi sebelum batuan tersebut pecah dengan pembebanan tertentu.

3. Modulus Young : $E = \Delta\sigma / \sigma \square_a$

Didapatkan dari perbandingan antara perbedaan tegangan aksial dengan perbedaan regangan aksial yang didapatkan dari kurva tegangan – regangan.

4. Poisson's ratio : $\nu = \epsilon_{l1} / \epsilon_{a1}$

Yaitu Perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksial yang dihitung pada 50% tegangan maksimum (σ_c).



Sumber : Diktat Penuntun Praktikum Mekanika Tanah , 2008

Gambar 3.6

Kurva Tegangan-Regangan Hasil Uji Kuat Tekan

Keterangan Gambar : σ_c = Tegangan puncak

ϵ_a = Regangan aksial

ϵ_l = Regangan diametral

σ_1 = $\frac{1}{2}$ Tegangan puncak ($\frac{1}{2} \sigma_c$)

σ_E = Batas elastisitas

ϵ_v = Regangan volumik

Regangan dari sampel batuan baik aksial (ϵ_a) maupun lateral (ϵ_l) selama pengujian berlangsung dapat diukur dengan menggunakan *dial gauge* atau *electric strain gauge*.

Dalam menentukan modulus young, dapat ditentukan dari kurva tegangan-regangan dengan beberapa cara yaitu :

- “Tangent Young’s modulus”, E_t .

Tangent young modulus ini diukur dari tingkat tegangan = $0,5\sigma_c$ kemudian ditentukan dengan cara tangen.

$$E_t = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_a$$

- “Average Young’s modulus”, E_{av} .

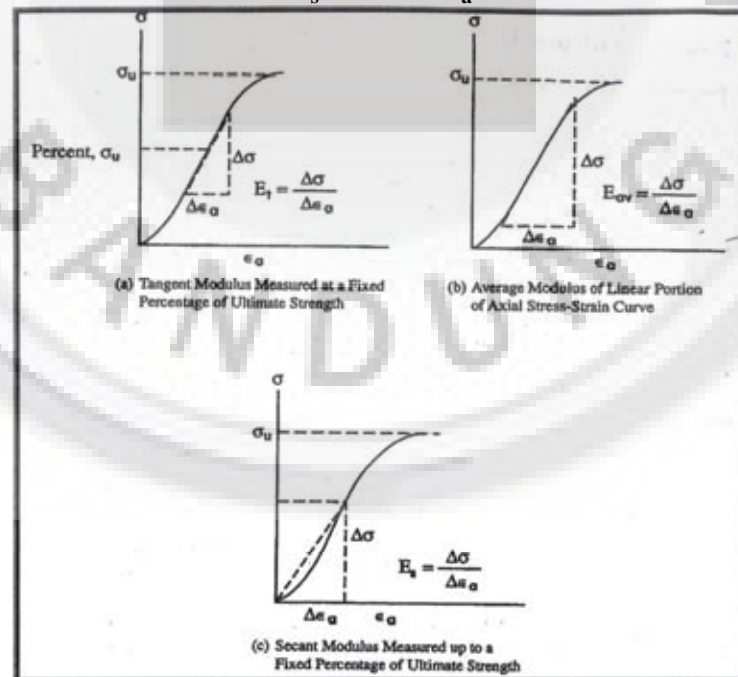
Nilai modulus ini didapatkan dari perbandingan nilai tegangan dan regangan yang berpedoman kepada titik potong garis lurus yang ditarik berimpit dengan kurva (garis rata-rata kemiringan atau bagian linear yang terbesar dari kurva).

$$E_{av} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_a$$

- “Secant Young’s modulus”, E_s .

Diukur dari tegangan = 0 sampai nilai tegangan tertentu, yang biasanya adalah 50% σ_c .

$$E_s = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_a$$



Sumber : Diktat Penuntun Praktikum Mekanika Tanah , 2008

Gambar 3.7

Penentuan Modulus Elastisitas Young dari Pengukuran Tegangan-Regangan Aksial Selama Proses Penekanan

- Rumus –rumus yang Digunakan

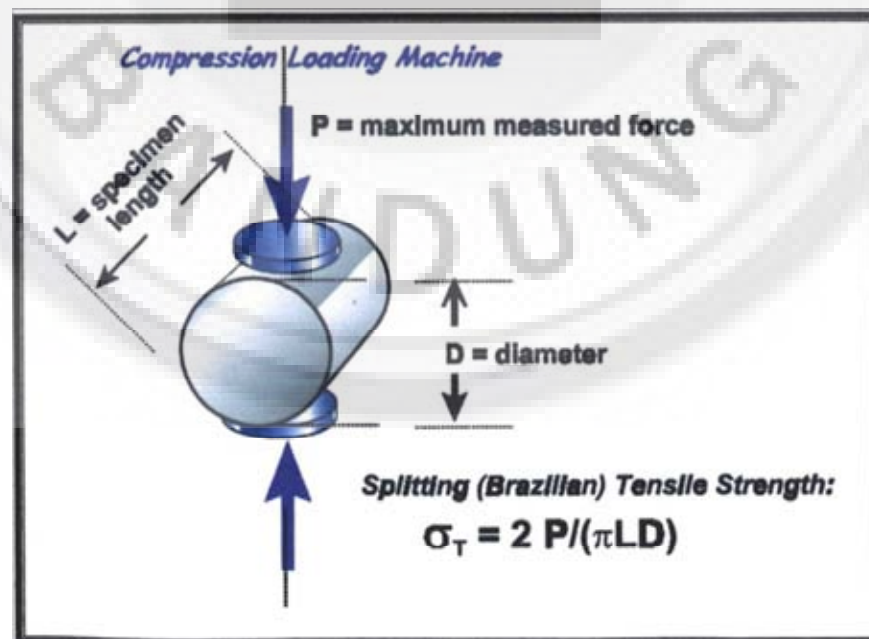
1. Menghitung tegangan : $\sigma_c = \text{beban} / \text{luas}$
2. Menghitung regangan aksial : $\epsilon_a = \Delta L / L_0$
3. Menghitung regangan lateral : $\epsilon_l = \Delta D / D_0$

3.4.2.3 Uji Kuat Tarik Tidak Langsung

Untuk mengetahui kuat tarik batuan secara tidak langsung. Pengertian secara tidak langsung ini, dikarenakan sampel diberikan pembebanan terhadap arah diametral sehingga gaya yang diberikan akan didistribusikan secara diametral (ditarik).

- Teori Dasar

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik (tensile strength) dari sampel batuan berbentuk silinder secara tidak langsung. Alat yang digunakan adalah mesin tekan seperti pada pengujian kuat tekan.



Gambar 3.7
Pengaturan Uji Kuat Tarik Brazilian dalam Mesin Pembebanan Standar

- Rumus yang Digunakan :

$$\sigma_t = 2P / \pi DL$$

Dimana :

σ_t = Kuat tarik (kg/cm^2)

P = Beban maksimum saat spesimen pecah (kg)

L = Tebal spesimen (cm)

D = Diameter spesimen (cm)

3.5 *Finite Element Methode*

Pemodelan dengan FEM adalah pemodelan lereng dengan cara membagi blok lereng ke dalam elemen-elemen mesh, di mana setiap elemen mesh dibatasi oleh node-node yang akan dihitung data output perubahannya akibat perubahan yang terjadi pada blok lereng.

Pemodelan dan analisis stabilitas lereng dengan FEM, menggunakan software Phase² versi 6.0. Tahapan proses dalam pemodelan numerik dengan FEM ini, adalah meliputi :

- pemodelan sistem statika,
- pemodelan batuan dan parameter geoteknik,
- pemodelan pembebanan dan tegangan insitu,
- penentuan kondisi batas, dan
- validasi model.