

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Tanah

2.1.1 Umum

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada batas yang telah ditentukan. Kebanyakan jenis tanah terdiri dari banyak campuran lebih dari satu macam ukuran partikelnya. Tanah lempung belum tentu terdiri dari partikel lempung saja. Akan tetapi, dapat bercampur dengan butir-butir ukuran lanau maupun pasir dan mungkin juga terdapat campuran bahan organik

2.1.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi digunakan untuk mengelompokkan tanah-tanah sesuai dengan perilaku umum dari tanah pada kondisi fisis tertentu. Tanah-tanah yang dikelompokkan dalam urutan berdasar satu kondisi- kondisi fisis tertentu bisa saja mempunyai urutan yang tidak sama jika didasarkan kondisi- kondisi fisis tertentu lainnya. Oleh karena itu, sejumlah sistem klasifikasi telah dikembangkan disesuaikan dengan maksud yang diinginkan oleh sistem itu. Ada banyak sekali klasifikasi tanah yang dipergunakan oleh seorang insinyur geoteknik dalam

merencanakan suatu bangunan sesuai dengan fungsi dari bangunan yang akan dibangun.

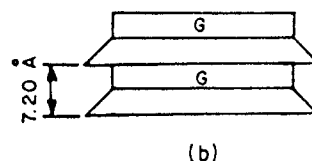
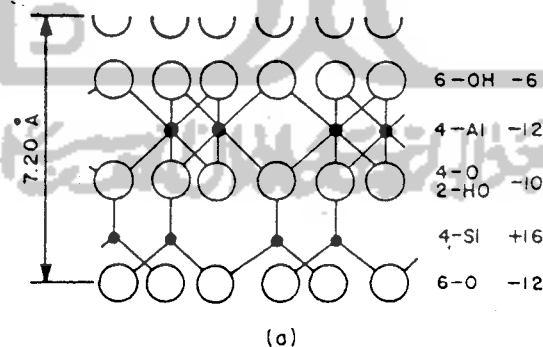
2.2 Tanah Lempung

2.2.1 Karakteristik Tanah Lempung

Tanah lempung atau dapat juga dikatakan sebagai tanah halus mengandung partikel-partikel yang berupa mineral lempung. Mineral lempung terdiri dari aluminium silikat, magnesium dan zat besi. Ada dua unit kristalin dasar yang membentuk mineral lempung yaitu : tetrahedron silikon-oksigen dan oktahedron aluminium. Sifat dari partikel-partikel lempung dapat diilustrasikan dengan menggambarkan tiga subkelompok umum dari mineral lempung yaitu :

a. Kaolinit

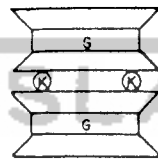
Mineral lempung kaolinit adalah suatu unit dasar dua lapis terbentuk dengan bertumpuknya lempeng gipsit pada lempeng silika seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1a dan secara simbolis terlihat dalam gambar 2.1b.



Gambar 2.1 Struktur dari kaolinit. (a) Struktur atom. (b) Struktur simbolis. (Lambe dan Withman, 1969)

b. Ilit

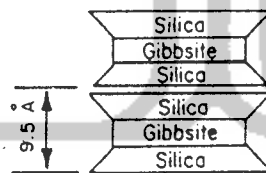
Ilit adalah suatu unit tiga lapis yang sangat stabil yang terdiri dari unit-unit dasar monmorilonit yang terikat oleh gaya bervalensi sekunder dan ion-ion potasium seperti ditunjukkan secara simbolis pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur simbolis dari ilit (I.S. Dunn dkk, 1992)

c. Monmorilonit

Monmorilonit adalah suatu unit dasar tiga lapis terbentuk dengan menempatkan sebuah lempeng silika di atas dan sebuah di bawah dari lempeng gipsit seperti ditunjukkan secara simbolis dalam gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur simbolis dari monmorilonit (I.S. Dunn dkk, 1992)

2.2.2 Jenis Tanah Lempung

Perilaku tanah lempung sangat dipengaruhi oleh sifat partikel-partikel lempung secara individual dan air pori. Tipikal tanah lempung secara alami jika dilihat dari porositas, angka pori dan berat unit dapat dilihat pada gambar 2.4. Porositas (n) adalah perbandingan antara volume pori dan volume total dalam hal ini dapat digunakan dalam bentuk persen maupun desimal. Angka pori (e)

didefinisikan sebagai rasio antara volume pori dengan volume bahan padat yang selalu dinyatakan dalam suatu desimal. Berat unit (berat tiap unit volume) adalah berat tanah dibagi dengan berat volumenya, dimana berat unit dari suatu massa tanah dapat dinyatakan dalam pengertian berat unit total (γ), berat unit kering (γ_d) dan berat unit basah (γ_b).

Deskripsi	Porositas (n)	Angka pori (e)	Kadar air (w) ^a	Berat Unit			
				kN/m ³		lb/cu ft	
				γ_d	γ_{sat}	γ_d	γ_{sat}
1. Pasir uniform, lepas	0,46	0,85	32	14,1	18,5	90	118
2. Pasir uniform, padat	0,34	0,51	19	17,1	20,4	109	130
3. Pasir berbutir campuran, lepas	0,40	0,67	25	15,6	19,5	99	124
4. Pasir berbutir campuran, padat	0,30	0,43	16	18,2	21,2	116	135
5. Lanau bawaan angin (lus)	0,50	0,99	21	13,4	18,2	85	116
6. Tanah glasial, berbutir sangat campuran	0,20	0,25	9	20,7	22,8	132	145
7. Lempung glasial lunak	0,55	1,2	45	11,9	17,3	76	110
8. Lempung glasial kaku	0,37	0,6	22	16,7	20,3	106	129
9. Lempung agak organik lunak	0,66	1,9	70	9,1	15,4	58	98
10. Lempung sangat organik lunak	0,75	3,0	110	6,8	14,0	43	89
11. Lempung monmorilonit lunak (calcium bentonite)	0,84	5,2	194	4,2	12,6	27	80

^aw = kadar air apabila jenuh, dalam persen terhadap berat kering.

Gambar 2.4 Porositas, angka pori dan berat unit air dari tanah-tanah tipikal dalam keadaan alami (Peck dkk, 1974)

2.3 Kompresibilitas, Konsolidasi dan Penurunan

2.3.1 Konsolidasi pada Lempung

1. Umum

Konsolidasi adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan-lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori, proses tersebut berlangsung terus sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total telah benar-benar hilang. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) adalah perpindahan vertikal

permukaan tanah sehubungan dengan perubahan volume pada suatu tingkat dalam proses konsolidasi. Sebagai contoh, penurunan konsolidasi akan terjadi bila suatu struktur dibangun di atas suatu lapisan lempung jenuh atau bila muka air tanah turun secara permanen pada lapisan di atas lapisan lempung tersebut.

Meskipun lapisan lempung mempunyai sedikit sifat kompresi elastis berupa sedikit perubahan volume pada partikel-partikel tanah dan air, secara pasti bagian yang lebih besar dari penurunan harus terjadi karena diperas keluarnya air dari rongga pori. Beban statis menghasilkan suatu gradien tekanan dalam air pori dan menyebabkan aliran menuju permukaan drainasi. Akan tetapi, aliran ini lambat karena rendahnya permeabilitas dari tanah lempung, sehingga laju penurunan merupakan fungsi dari permeabilitas. Kelambatan waktu penurunan disebabkan oleh fenomena ini disebut sebagai kelambatan hidrodinamik. Kelambatan waktu yang berkaitan dengan perlawanan kekentalan disebut kelambatan kekentalan.

Kompresi pada lapisan-lapisan lempung akibat suatu beban statis disebut konsolidasi. Metode mengenai estimasi dari konsolidasi lempung yang biasa digunakan saat ini adalah didasarkan pada teori konsolidasi satu dimensi yang diajukan oleh Terzaghi (1925), yang hanya mengenal kelambatan hidrodinamik yang bertanggung jawab pada kelambatan waktu penurunan.

2. Uji Konsolidasi

Karakteristik suatu tanah selama terjadi konsolidasi satu dimensi atau pemuaian dapat ditentukan dengan menggunakan uji konsolidasi atau uji oedometer. Gambar 2.5 memperlihatkan penampang melintang sebuah oedometer.

Contoh tanah berbentuk suatu piringan ditahan di dalam sebuah cincin logam dan diletakkan diantara dua lapisan batu berpori (*porous stone*). Lapisan batu berpori sebelah atas, yang dapat bergerak di dalam cincin dengan suatu jarak bebas yang kecil, dipasang di bawah tutup pembebanan (*loading cap*) dari logam dimana tekanan bekerja terhadap contoh. Seluruh rakitan tersebut diletakkan di dalam sel terbuka yang berisi air, dimana air pori pada contoh tanah mendapat jalan masuk yang bebas.

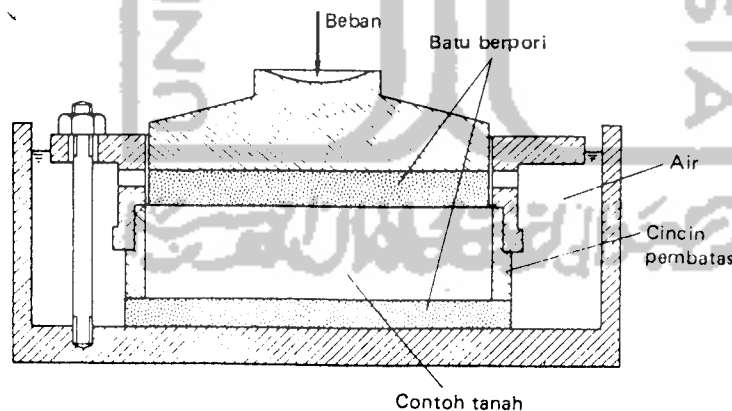
Cincin yang menahan/membatasi contoh tanah dapat terjepit (diklem pada badan sel) atau mengapung (bergerak bebas secara vertikal), cincin bagian dalam harus memiliki permukaan yang halus untuk memperkecil gesekan. Cincin pembatas tersebut menentukan suatu kondisi regangan lateral nol pada contoh tanah, rasio tegangan efektif lateral terhadap tegangan efektif vertikal K_0 , koefisien tekanan tanah pada kondisi diam. Kompresi contoh tanah akibat tekanan diukur dengan menggunakan arloji pengukur (*dial gauge*) pada tutup pembebanan. Prosedur pengujian tersebut telah di standarisasikan dalam BS 1377 [7.4] yang menetapkan bahwa oedometer merupakan tipe cincin yang terjepit (*fixed ring type*).

Tekanan awal tergantung pada jenis tanah, kemudian serangkaian tekanan dikerjakan pada contoh tanah, dimana setiap tekanan besarnya dua kali besar tekanan sebelumnya. Biasanya setiap tekanan dipertahankan selama 24 jam (untuk kasus khusus dibutuhkan waktu 48 jam), pembacaan kompresi dilakukan dalam selang waktu tertentu selama periode ini. Pada akhir periode penambahan ini

dimana tekanan air pori berlebihan telah terdisipasi secara sempurna, besarnya tekanan yang bekerja sama dengan tegangan vertikal efektif pada contoh tanah.

Hasil-hasil tersebut diperlihatkan dengan memplot tebal (presentase perubahan tebal) contoh tanah atau angka pori pada akhir setiap periode penambahan tekanan tersebut terhadap tegangan efektif yang sesuai. Tegangan efektif tersebut dapat diplot dalam skala biasa maupun skala logaritmis. Bila diinginkan, pengembangan contoh tanah dapat diukur berdasarkan penurunan tekanan yang digunakan. Akan tetapi, walaupun karakteristik pemuaian tanah tidak diperlukan pengembangan contoh tanah akibat disipasi tekanan akhir tetap harus diukur.

Angka pori pada akhir setiap periode penambahan tekanan dapat dihitung dari pembacaan arloji pengukur dan begitu pula halnya dengan kadar air (*water content*) atau berat kering (*dry weight*) dari contoh tanah pada akhir pengujian.

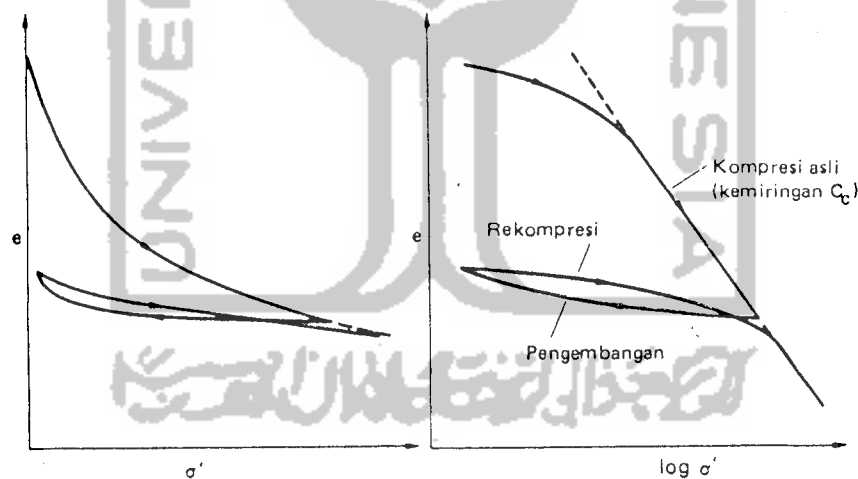


Gambar 2.5 Penampang melintang Oedometer (R.F.Craig, 1989)

2.3.2 Karakteristik Kompresibilitas

Suatu plot tipikal angka pori (e) sesudah konsolidasi terhadap tegangan efektif (σ') untuk lempung jenuh diperlihatkan pada gambar 2.6, plot tersebut

memperlihatkan kompresi awal yang diikuti oleh pemuaian (*expansion*) dan rekompresi. Bentuk kurva tersebut berkaitan dengan sejarah tegangan lempung tersebut. Hubungan e - $\log \sigma'$ untuk tanah lempung terkonsolidasi normal adalah linier (atau hampir linier) dan disebut garis kompresi asli (*virgin compression line*). Bila lempung tersebut terkonsolidasi berlebihan, keadaannya akan diwakili oleh sebuah titik pada bagian pengembangan atau rekompresi pada plot e - $\log \sigma'$. Kurva rekompresi akhirnya bergabung dengan garis kompresi asli, kemudian kompresi selanjutnya terjadi pada garis tersebut. Selama kompresi, terjadi perubahan struktur aslinya selama pengembangan. Plot tersebut memperlihatkan bahwa lempung yang terkonsolidasi berlebihan lebih tidak kompresibel dibandingkan dengan lempung yang sama dalam keadaan terkonsolidasi normal.



Gambar 2.6 Hubungan angka pori-tegangan efektif (R.F.Craig, 1989)

Kompresibilitas lempung dapat diwakili oleh salah satu koefisien yakni Indeks kompresi (C_c). Indeks kompresi (C_c) adalah kemiringan pada bagian linier dari plot e - $\log \sigma'$ dari indeks tersebut tidak berdimensi. Untuk dua buah titik sembarangan pada bagian linier dari plot tersebut :

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}} \quad (2.1)$$

Bagian pengembangan pada plot $e - \log \sigma'$ dapat dianggap sebagai garis lurus, dimana kemiringannya disebut indeks kompresi (C_c).

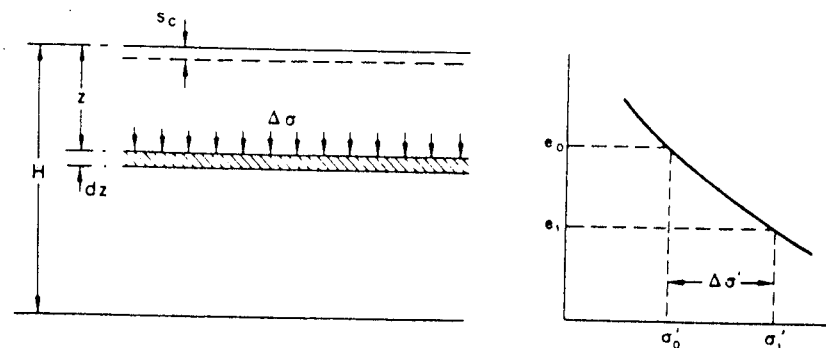
2.3.3 Penurunan Konsolidasi Metode Satu Dimensi

Untuk menghitung penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), diperlukan nilai koefisien kompresibilitas volume dan indeks kompresi (C_c). Diambil suatu lapisan lempung jenuh dengan tebal H . Akibat pembangunan, tegangan vertikal total pada suatu elemen dengan tebal dz pada kedalaman z naik sebesar $\Delta\sigma$ (lihat gambar 2.7). Diasumsikan bahwa konsolidasi rentangan lateral nol digunakan pada lapisan lempung tersebut.

Setelah konsolidasi selesai, akan terjadi kenaikan yang sama sebesar $\Delta\sigma'$ pada tegangan vertikal efektif, sesuai dengan kenaikan tegangan dari σ'_0 ke σ'_1 dan penurunan angka pori dari e_0 ke e_1 pada kurva $e - \sigma'$.

Penurunan volume per satuan volume lempung dapat dinyatakan dalam angka pori sebagai berikut :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$$



Gambar 2.7 Penurunan konsolidasi (R.F.Craig, 1989)

Karena regangan lateral adalah nol, penurunan volume per satuan volume sama dengan kurangnya ketebalan per satuan tebal, yaitu penurunan per satuan kedalaman.

2.4 Kuat Geser Tanah

Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud. Untuk menganalisis masalah stabilitas tanah seperti daya dukung, stabilitas talud dan tekanan tanah kesamping pada turap maupun tembok penahan tanah, mula-mula kita harus mengetahui sifat-sifat ketahanan penggeser tanah tersebut.

2.4.1 Kriteria Keruntuhan Menurut Mohr-Coulomb

Mohr (1980) menyuguhkan sebuah teori tentang keruntuhan pada material yang menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum saja. Jadi, hubungan antara tegangan normal dan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan dalam bentuk berikut (Gambar 2.8a).

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.2)$$

Garis keruntuhan (*failure envelope*) yang dinyatakan oleh persamaan 2.2 di atas sebenarnya berbentuk garis lengkung seperti terlihat pada gambar 2.8b. Untuk sebagian besar masalah-masalah mekanika tanah, garis tersebut cukup didekati dengan sebuah garis lurus yang menunjuk hubungan linier antara

tegangan normal dan geser (Coulomb, 1776). Persamaan itu dapat ditulis sebagai berikut :

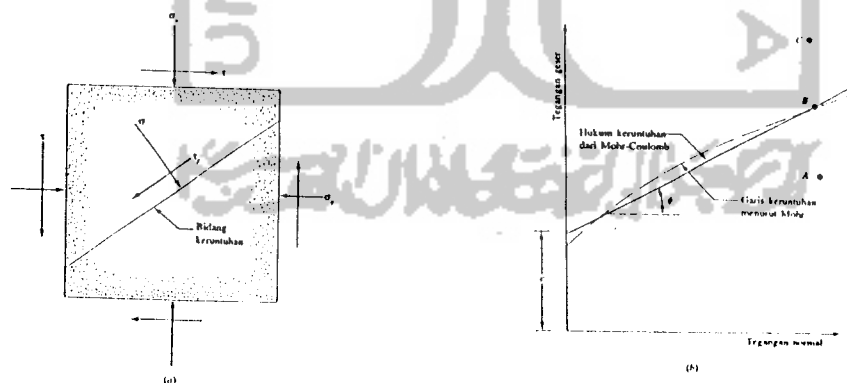
$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

dengan : c = kohesi

ϕ = sudut geser internal

Hubungan di atas disebut sebagai kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.

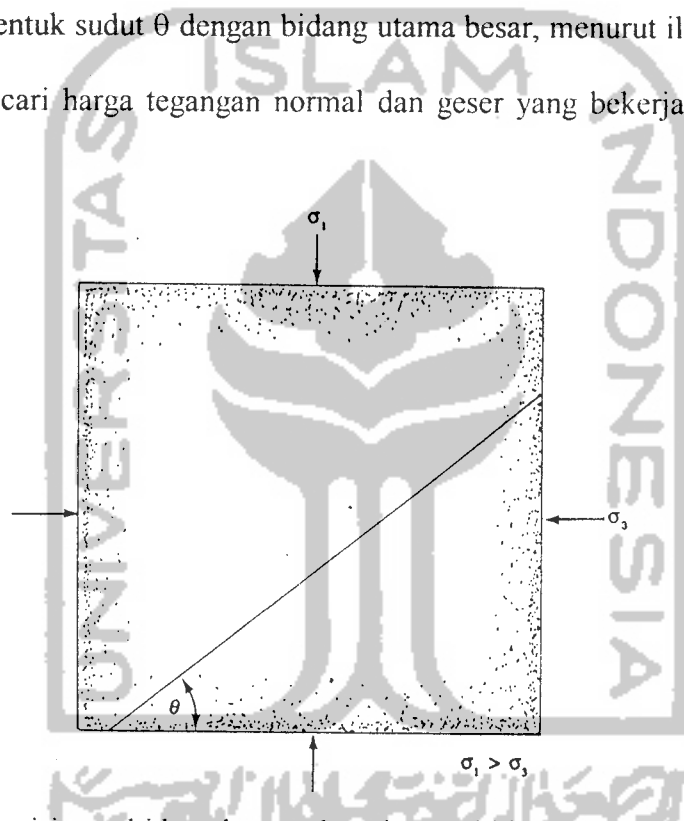
Bila tegangan normal dan tegangan geser pada sebuah bidang dalam suatu massa tanah sedemikian rupa, maka keruntuhan geser tidak akan terjadi pada bidang tersebut. Tetapi bila tegangan normal dan geser yang bekerja pada suatu bidang lain (yang tepat berada pada garis keruntuhan), maka keruntuhan geser akan terjadi pada bidang tersebut. Suatu keadaan kombinasi tegangan tidaklah mungkin terjadi karena bila titik tersebut tergambar di atas garis keruntuhan, keruntuhan geser pasti sudah terjadi sebelumnya.



Gambar 2.8 Garis keruntuhan menurut Mohr dan hukum keruntuhan dari Mohr-Coulomb (Braja M. Das, 1995)

Kemiringan Bidang Keruntuhan Akibat Geser

Keruntuhan geser (keruntuhan akibat geser) akan terjadi bila tegangan geser pada suatu bidang mencapai syarat batas yang dirumuskan oleh persamaan 2.3. Untuk menentukan kemiringan bidang keruntuhan dengan bidang utama besar (*major principal plane*), dijelaskan pada gambar 2.9. Bila bidang keruntuhan tersebut membentuk sudut θ dengan bidang utama besar, menurut ilmu mekanika kita dapat mencari harga tegangan normal dan geser yang bekerja pada bidang tersebut.



Gambar 2.9 Kemiringan bidang keruntuhan dengan bidang utama besar di dalam tanah (Braja M. Das, 1995)

Untuk harga-harga σ_3 dan c tertentu, kondisi runtuh akan ditentukan oleh harga minimum dari tegangan utama besar σ_1 . Bila harga σ_1 adalah minimum, maka harga $(\frac{1}{2} \cdot \sin 2\theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \phi)$ haruslah maksimum. Jadi,

$$\frac{d}{d\theta} (1/2 \cdot \sin 2\theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \phi) = 0 \quad (2.4)$$

atau

$$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + 2 \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi = 0 \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 memberikan hubungan baru :

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2.6)$$

Gambar 2.10 menunjukkan gambaran separuh lingkaran Mohr yang mewakili kondisi tegangan pada saat keruntuhan pada suatu massa tanah. Garis keruntuhan yang dinyatakan oleh persamaan $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ menyinggung lingkaran Mohr pada titik X . Jadi, keruntuhan geser yang terjadi pada bidang tertentu dapat kita nyatakan dengan lingkaran berjari-jari OX , dan bidang tersebut harus membentuk kemiringan sudut $\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ terhadap bidang utama besar.

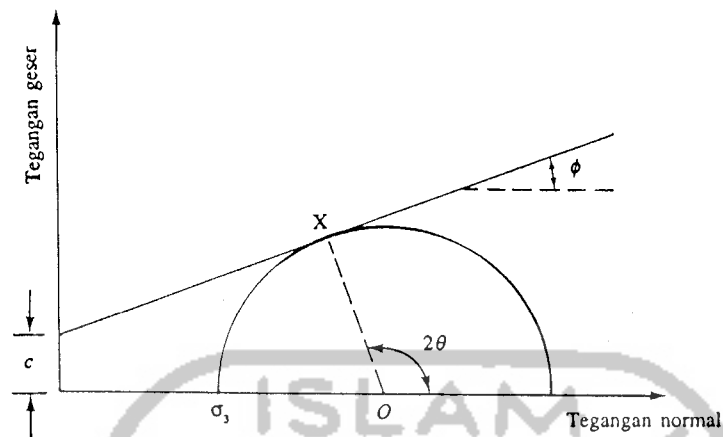
Bila harga $\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ dimasukkan ke dalam persamaan :

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \right) \sin 2\theta = c + \left[\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cos 2\theta \right] \tan \phi$$

dan kemudian disederhanakan, akan menghasilkan

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.7)$$

Akan tetapi, persamaan 2.7 tadi juga dapat dengan mudah diturunkan dengan menggunakan lingkaran Mohr dan ilmu ukur sederhana.



Gambar 2.10 Lingkaran Mohr dan garis keruntuhan (Braja M. Das, 1995)

2.4.2 Uji Triaksial

Dewasa ini, uji geser triaksial adalah uji yang paling dapat diandalkan untuk menentukan parameter tegangan geser. Uji ini telah digunakan secara luas untuk keperluan pengujian biasa ataupun untuk keperluan riset. Gambar skematik dari uji ini dapat dilihat pada gambar 2.11

Pada uji ini umumnya digunakan sebuah sampel tanah kira-kira berdiameter 1,5 inci (38,1 mm) dan panjang 3 inci (76,2 mm). Sampel tanah (=benda uji) tersebut ditutup dengan membran karet yang tipis dan diletakkan di dalam sebuah bejana silinder dari bahan plastik (atau juga gelas) yang kemudian bejana tersebut diisi dengan air atau larutan gliserin. Di dalam bejana, benda uji tersebut akan mendapatkan tekanan hidrostatis. Untuk menyebabkan terjadinya keruntuhan geser pada benda uji, tegangan aksial (vertikal) diberikan melalui suatu piston vertikal (tegangan ini biasa disebut tegangan deviator). Pembebanan arah vertikal dapat dilakukan dengan dua cara :

- a. Dengan memberikan beban mati yang berangsur-angsur ditambah (penambahan setiap saat sama) sampai benda uji runtuh (deformasi arah aksial akibat pembebanan ini diukur dengan sebuah arloji/*dial gauge*)
- b. Dengan memberikan deformasi arah aksial (vertikal) dengan kecepatan deformasi yang tetap dengan bantuan gigi-gigi mesin atau pembebanan hidrolis. Cara ini disebut sebagai benda uji regangan terkendali.

Beban aksial yang diberikan diukur dengan bantuan sebuah proving ring (lingkaran pengukur beban) yang berhubungan dengan piston vertikal.

Alat ini juga dilengkapi dengan pipa-pipa untuk mengalirkan air ke dan dari arah sampel tanah dimana pipa-pipa tersebut juga berguna sebagai sarana pengukur tegangan air pori (pada kondisi uji). Ada tiga tipe standar dari uji triaksial yang biasanya dilakukan :

1. Consolidated-Drained test (CD test)
2. Consolidated-Undrained test (CU test)
3. Unconsolidated-Undrained test (UU test)

Uji air teralirkan-terkonsolidasi (CD test) dilakukan dengan menempatkan sample tanah di dalam ruangan tekanan dan meningkatkan tekanan samping. Sampel tanah kemudian dibiarkan terkonsolidasi terhadap tekanan samping seluruh keliling, σ_3 dengan membiarkan saluran drainase tetap terbuka. Air-teralirkan pada sample tanah selama beban aksial ditambah sehingga tekanan pori eksese yang besar tidak terjadi. Uji air termampatkan-terkonsolidasi (CU test) sama dengan CD test kecuali bahwa pada sample tanah selama beban aksial ditambah besarnya, air-termampatkan. Uji air termampatkan-tak terkonsolidasi dilakukan

dengan menempatkan sample tanah di dalam ruangan tekanan dan dengan penambahan besarnya tekanan samping tanpa membolehkan sample terkonsolidasi dan tidak diijinkan mengalirkan air dari dan ke benda uji selama memberikan tekanan sel σ_3 . Dalam hal ini karena peneliti melakukan uji dengan cara Unconsolidated-Undrained, maka yang akan dijelaskan lebih lanjut hanya tentang UU test saja.

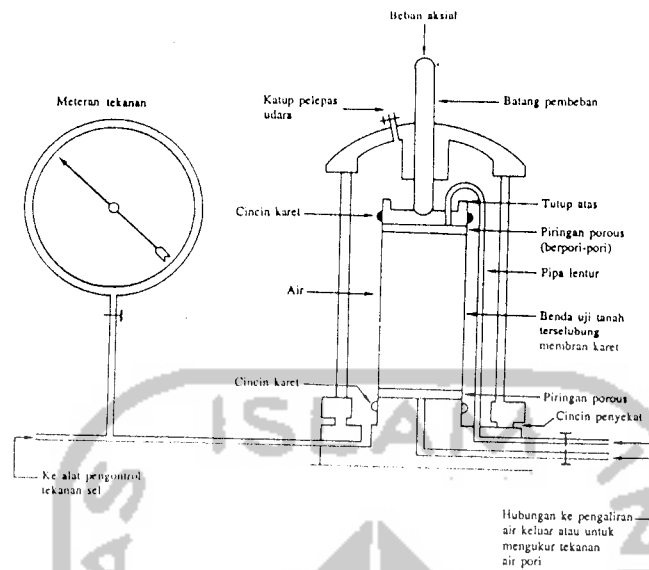
Uji air termampatkan-tak terkonsolidasi (Unconsolidated-Undrained)

Pada uji air termampatkan-tak terkonsolidasi, kita tidak diijinkan mengalirkan air dari dan ke benda uji selama memberikan tekanan sel (σ_3). Benda uji tadi kita uji sampai runtuh dengan memberikan tegangan deviator ($\Delta\sigma_d$), di arah aksial tanpa memperbolehkan pengaliran air (dari dan ke dalam benda uji). Karena pengaliran air tidak dapat terjadi di kedua tahap tersebut, maka uji ini dapat diselesaikan dengan cepat. Karena adanya tegangan sel (= tegangan penyekap = σ_3), tegangan air pori di dalam benda uji tanah tersebut akan naik menjadi u_c (= $u_{at consolidation}$). Kemudian tegangan air pori ini akan naik lagi sebesar Δu_d akibat dari pemberian tegangan deviator. Jadi, tegangan total air pori ini akan naik ke dalam benda uji pada tahap pemberian tegangan deviator adalah

$$u = u_c + \Delta u_d \quad (2.8)$$

Dari persamaan $U_c = B\sigma_3$ dan $\Delta u_d = A\Delta\sigma_d$, jadi

$$u = B\sigma_3 + A\Delta\sigma_d = B\sigma_3 + A(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.9)$$

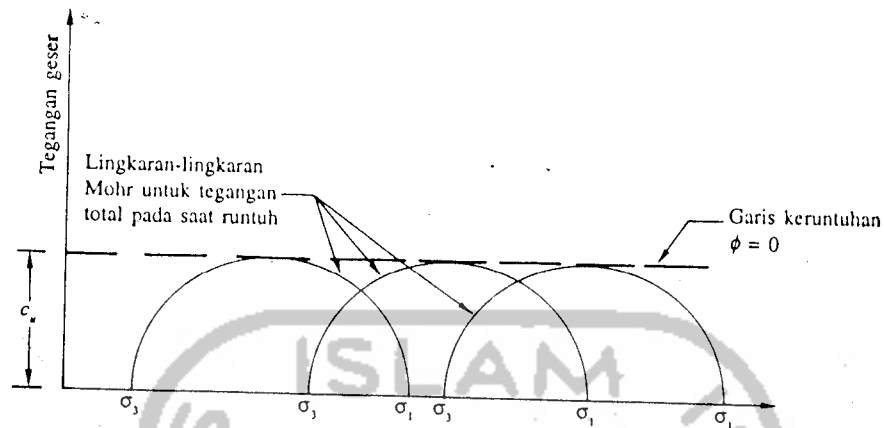


Gambar 2.11 Skema alat Triaksial (Bishop and Bjerrum, 1960)

Pada umumnya, pengujian ini kita lakukan dengan sampel tanah lempung, dan uji ini menyajikan konsep kekuatan geser tanah yang sangat penting untuk tanah berkoheesi yang jenuh air. Tambahan tegangan aksial pada saat tanah mencapai keruntuhan $(\Delta\sigma_{(t)})_f$ akan praktis selalu sama besarnya, berapapun besarnya harga tegangan sel yang ada. Hal ini terlihat pada gambar 2.12. Garis keruntuhan untuk tegangan total dari lingkaran-lingkaran Mohr berbentuk garis horisontal dan disebut sebagai garis $\phi = 0$ dan

$$\tau_f = c_u \quad (2.10)$$

dengan c_u adalah kekuatan geser air termampatkan (*undrain shear strength*) yang besarnya sama dengan jari-jari lingkaran Mohr.



Gambar 2.12 Lingkaran- Lingkaran Mohr untuk tegangan total dan garis keruntuhan ($\phi = 0$) yang didapat dari uji triaksial Uncosolidated-Undrained (Braja M. Das, 1995)

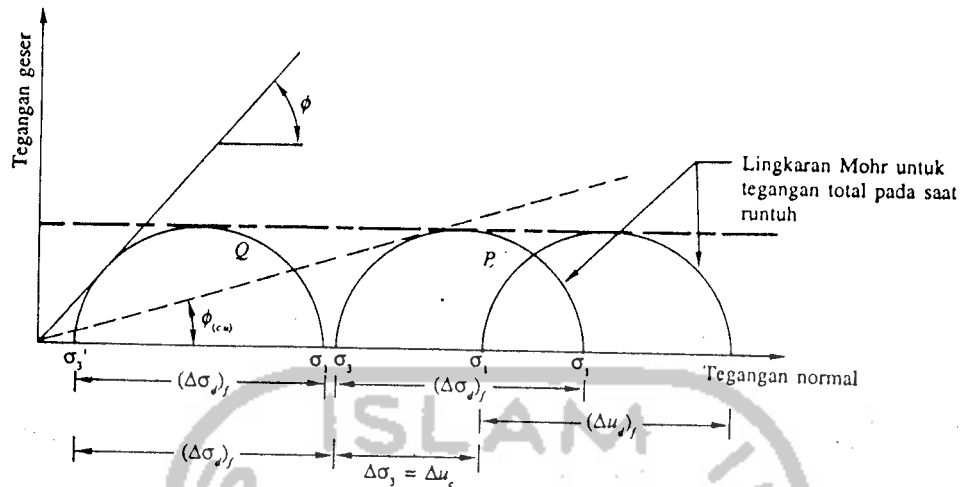
Bila sampel tanah lempung (No.1) dikonsolidasikan pada tegangan sel sebesar σ_3 dan kemudian ditekan (geser) sampai mencapai keruntuhan tanpa mengijinkan adanya pengaliran air dari dan ke dalam benda uji, kondisi tegangan total pada saat runtuh dapat digambarkan dengan lingkaran Mohr P pada gambar 2.13. Tegangan air pori yang terjadi pada saat runtuh adalah $(\Delta u_d)_f$. Jadi tegangan-tegangan efektif utama besar dan kecil pada saat runtuh adalah

$$\sigma_1' = [\sigma_3 + (\Delta \sigma_d)_f] - (\Delta u_d)_f = \sigma_1 - (\Delta u_d)_f$$

dan

$$\sigma_3' = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f$$

Q adalah lingkaran Mohr untuk tegangan efektif utama pada benda uji tersebut, dimana diameter dari lingkaran P dan Q adalah sama.



Gambar 2.13 Lingkaran Mohr (Braja M. Das, 1995)

Sebuah sampel benda uji yang lain (No.2) telah dikonsolidasi dengan tegangan sel lain sebesar σ_2 . Bila tekanan sel dinaikkan sebesar $\Delta\sigma_3$ tanpa membolehkan terjadinya pengaliran air, tegangan air pori akan meningkat pula sebesar Δc_u . Untuk tanah yang jenuh air (*saturated*) dan tersekap tegangan secara isotropis, kenaikan tegangan air pori akan sama dengan kenaikan tegangan total. Jadi, $\Delta c_u = \Delta\sigma_2$. Pada saat ini, tegangan penyekap efektif menjadi $\sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta c_u = \sigma_3 + \Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_3 = \sigma_2$. Ini akan sama dengan tegangan penyekap efektif untuk benda uji No.1 sebelum kita memberikan tegangan deviator. Jadi bila benda uji No.2 ditekan sampai mencapai keruntuhan dengan menaikkan tegangan aksial, maka benda uji tadi akan runtuh pada tegangan deviator yang sama, yaitu $(\Delta\sigma_d)_f$ seperti pada benda uji No.1. Lingkaran Mohr untuk tegangan total pada saat mencapai keruntuhan adalah R (gambar 2.13). Penambahan tegangan pori akibat $(\Delta\sigma_d)_f$ ini adalah $(\Delta u_d)_f$

Pada titik keruntuhan, tegangan efektif utama kecil adalah :

$$[\sigma_3 + \Delta\sigma_3] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] = \sigma_3 - (\Delta u_d)_f = \sigma_3'$$

dan tegangan efektif utama besar ialah :

$$\begin{aligned} [\sigma_3 + \Delta\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f] - [\Delta u_c + (\Delta u_d)_f] &= [\Delta\sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f - (\Delta u_d)_f] \\ &= \sigma_1 - (\Delta u_d)_f = \sigma_1' \end{aligned}$$

Jadi lingkaran Mohr untuk tegangan-tegangan efektif akan tetap sama dengan Q .

Disini diameter lingkaran-lingkaran P, Q dan R adalah sama. Harga $\Delta\sigma_3$ untuk benda uji No.2 dapat dipilih sembarangan. Dalam kondisi apapun, tegangan deviator menyebabkan keruntuhan $(\Delta\sigma_d)_f$ akan praktis sama besarnya.

2.5 Stabilisasi Tanah

Tanah merupakan bahan bangunan pada berbagai pekerjaan teknik sipil, sehingga memerlukan suatu standar persyaratan tertentu. Ada tiga kemungkinan kondisi tanah dijumpai di suatu lokasi, yaitu :

- a. Kondisi tanah di lokasi cukup baik sehingga dapat dipakai langsung,
- b. Kondisi tanah di lokasi bangunan kualitasnya jelek, sehingga perlu diganti dengan tanah dari jenis lain yang lebih baik, dan
- c. Kondisi tanah di lokasi bangunan kualitasnya jelek, namun tidak perlu diganti tetapi tanah tersebut diperbaiki sifat-sifatnya sehingga persyaratannya terpenuhi.

Usaha untuk memperbaiki atau merubah sifat-sifat yang disebut stabilisasi tanah dapat berupa penambahan atau penggantian material baru, pemadatan, penambahan bahan kimia, pemanasan, pendinginan, mengalirkan arus listrik dan lain-lain. Secara garis besar stabilisasi tanah dapat dibagi menjadi tiga bagian

yaitu : stabilisasi mekanik, stabilisasi fisik dan stabilisasi kimia (Ingels dan Metcalf, 1977).

2.5.1 Stabilisasi Mekanik

Stabilisasi mekanik adalah suatu metoda untuk meningkatkan daya dukung tanah dengan merubah struktur atau menambahkan jenis tanah lain yang tidak mempengaruhi sifat-sifat tanah itu sendiri. Cara ini dapat juga berupa pemadatan, penambahan atau penggantian dengan tanah lain, peledakan dengan alat peledak (*explosive*) dan tekanan statis. Alat-alat yang biasa digunakan pada stabilisasi mekanik khususnya untuk pemadatan adalah alat tumbuk, mesin gilas drum halus, pelat getar, mesin gilas ban angin dan mesin kaki domba.

2.5.2 Stabilisasi Fisik

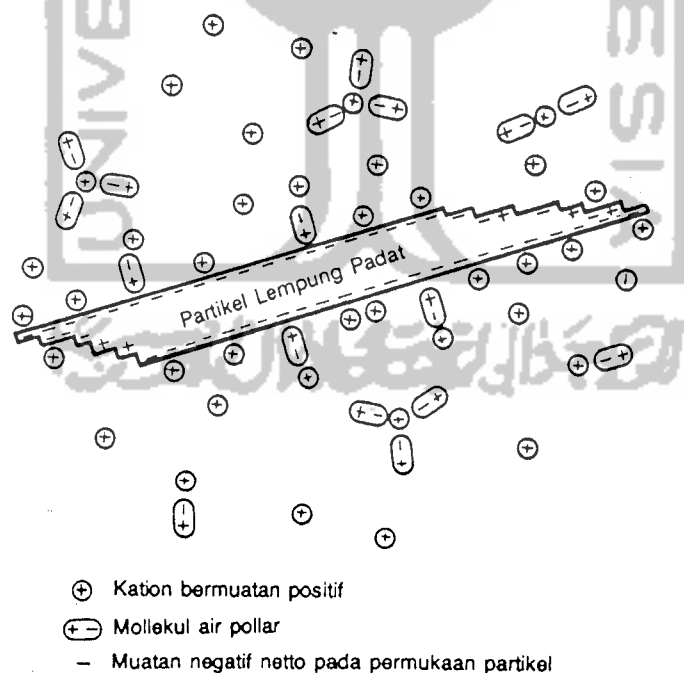
Stabilisasi fisik adalah perubahan sifat-sifat tanah dengan cara pemanasan (*heating*), pendinginan (*cooling*) dan menggunakan arus listrik (*electricity*). Salah satu jenis stabilisasi fisik yang sering dipakai adalah pemanasan.

2.5.3 Stabilisasi Kimia

Stabilisasi kimia adalah stabilisasi dengan cara penambahan bahan kimia padat atau cair pada tanah sehingga mengakibatkan perubahan sifat-sifat dari tanah tersebut, misalnya mencampur tanah lempung dengan kapur, semen dan lain-lain. Hal ini dapat terjadi karena partikel lempung memiliki muatan negatif pada tepi permukaannya dan muatan positif pada ujung-ujungnya yang menyebabkan partikel tanah lempung akan menyebar bila diberi air dan akan menggumpal bila air yang dikandungnya hilang atau berkurang (lihat gambar 2.14). Menurut ahli geoteknik, peristiwa menyebarnya tanah lempung tersebut

dapat diatasi dengan cara menambahkan material yang mengandung unsur Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{++} , Fe^{++} , Na^{++} dan K^{++} yang dapat mengikat partikel-partikel lempung tersebut. Stabilisasi ini memanfaatkan reaksi kimia dengan tanah sehingga tanah menjadi keras, caranya :

- Pertukaran ion, yaitu menukar reaksi ion butiran tanah.
- Pengendapan, yaitu dengan mencampur dua macam campuran (solusi) sehingga terbentuk zat baru yang dapat menimbulkan pemadatan tanah atau stabilisasi tanah
- Polimerisasi, yaitu pada kondisi-kondisi tertentu pencampuran beberapa zat sederhana, sehingga akan membentuk zat baru yang memiliki molekul lebih besar dan menimbulkan pengaruh stabilisasi.



Gambar 2.14 Partikel lempung (I.S. Dunn dkk, 1992)

2.6 Kolom Kapur

Metode kolom kapur telah digunakan di banyak negara, terutama Scandinavia dan Jepang, untuk menambahkan kuat dukung tanah dan mengurangi terjadinya penurunan pada tanah lempung lunak (*soft clay*). Kolom kapur dibangun dengan cara mencampur lempung dengan kapur (*quick lime*) langsung di lapangan (*in situ*). Dimana kolom ini dapat memperkecil plastisitas, meningkatkan permeabilitas dan kekuatan, dan memperkecil kadar air akibat adanya hidrasi dan reaksi pozzolanik.

Kolom kapur dapat digunakan sebagai alternatif yang lebih ekonomis dari segi biaya dan waktu dalam proses stabilisasi tanah pada tanah lempung dibanding dengan stabilisasi kapur dengan cara penghamparan. Kolom kapur juga dapat digunakan sebagai dukungan lateral (*lateral support*) di tempat pelat tiang (*sheet pile*). Di USA, kolom kapur diperkirakan telah menghemat biaya konstruksi sebesar 30 sampai 40 % jika dibandingkan dengan dinding pelat tiang (*sheet pile wall*) konvensional atau fondasi tiang.

2.6.1 Macam-macam Kapur

1. Kapur api (*Quick Lime*)

Kapur api (*quick lime*) yang secara kimia disebut kalsium oksida (CaO) didapat dari pemanasan batu kapur (CaCO_3) untuk mengeluarkan karbon dioksida. Kapur api (*quick lime*) sangat murah jika dibanding dengan hidrat kapur (*hydrated lime*) dan juga paling efektif tetapi kapur jenis ini berbahaya bagi kesehatan seorang peneliti laboratorium.

2. Hidrat Kapur (*Hidrated Lime*)

Hidrat kapur (*hidrated lime*) secara kimia disebut Ca(OH)_2 merupakan hasil reaksi kimia dari kalsium oksida dengan air ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$) yang berupa serbuk yang baik.

2.6.2 Reaksi dari Tanah-Kapur

1. Pertukaran Ion dan Penggumpalan

Kapur + lempung \rightarrow rapuh dan seperti lumpur

a. Bidang dari partikel lempung :

Ion-ion kalsium menempatkan kembali sodum dan ion-ion hidrogen menyusun campuran dari penempatan kembali : $\text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Ca}^{++} < \text{Mg}^{++}$ (nilai tunggal kation-kation ditempatkan kembali dengan kation-kation yang bernilai banyak)

b. Penggumpalan

Kation-kation kalsium berdesak-desak masuk ke bidang dari mineral lempung. Penambahan dari kation-kation yang bernilai dua (Ca^{++}) ke dalam bidang menarik partikel lempung secara bersama-sama.

2. Reaksi Pozzolanic

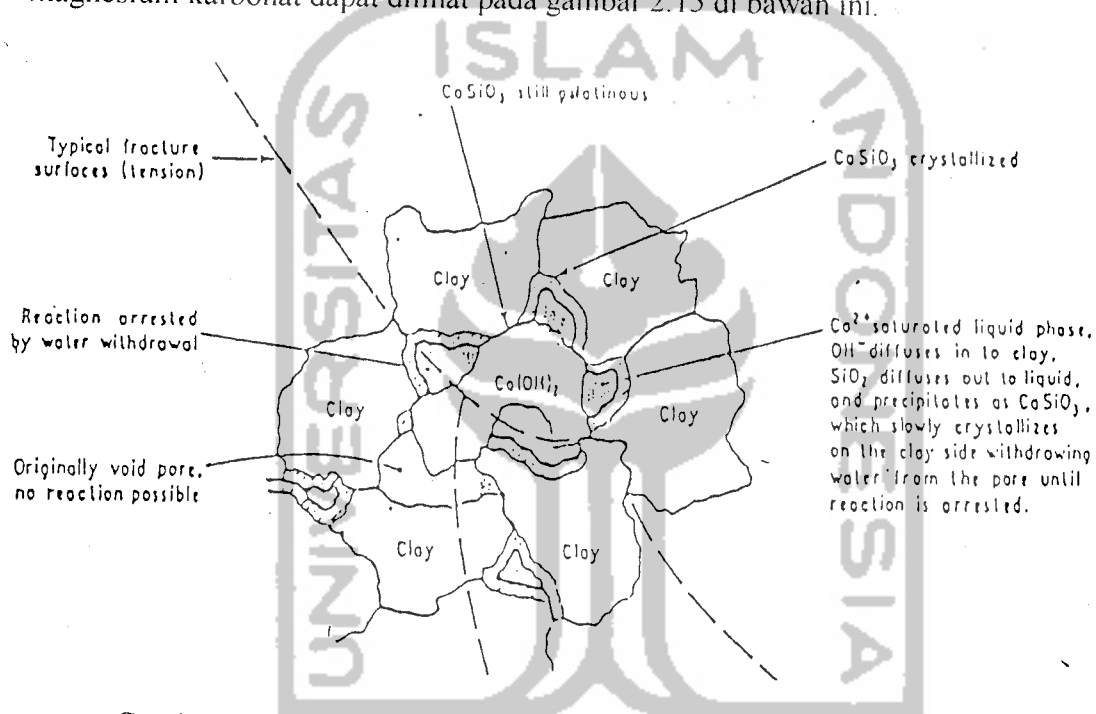
Reaksi antara silika dan alumina di dalam lempung dengan kapur membentuk semen penyebab dari kalsium silikat atau kalsium aluminat hidrat.

a. Silika/alumina dari mineral lempung, kuarsa (kristal silikon dioksida yang berbentuk heksagonal), felspar (pembentuk batuan hablur, mengandung terutama kalium aluminat silikat, natrium aluminat silikat atau kalsium aluminat silikat), mika (mineral silikat)

- b. Kalsium dari kapur
- c. Penambahan dari kapur menaikkan pH menjadi 12,3
- d. pH yang tinggi melarutkan silika dan membebaskan alumina

3. Karbonat Kalsium

Proses penyerapan karbon dioksida dari udara ke bentuk kalsium dan magnesium karbonat dapat dilihat pada gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2.15 Mekanisme dari stabilisasi kapur pada tanah lempung
(After Ingles and Metcalf, 1972)

2.6.3 Karakteristik dari Kapur yang Dikerjakan dengan Tanah

1. Kemampuan mengembang (*Swelling Potential*)

Kemampuan mengembang dan tekanan mengembang menjadi berkurang disebabkan oleh menurunnya afinitas dari air karena penjenuhan kalsium dan juga ketahanan daya hambat terhadap pengembangan volume di matrik tanah yang membentuk semen.

2. Distribusi Ukuran Butir (*Grain Size Distribution*)

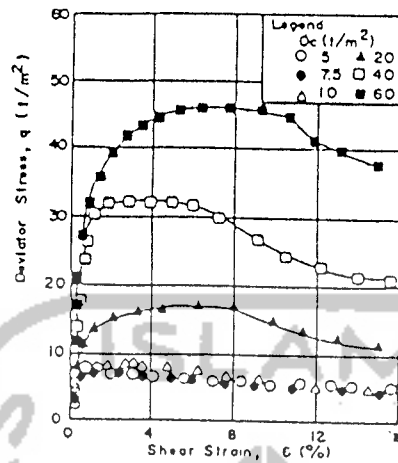
Ada suatu kecenderungan untuk fraksi lempung menjadi menurun dan ditempatkan kembali oleh tanah partikel-partikel berukuran karena efek dari penggumpalan dan tarikan jaringan dari partikel-partikel tanah.

3. Hubungan antara Tegangan Deviator dengan Regangan Geser

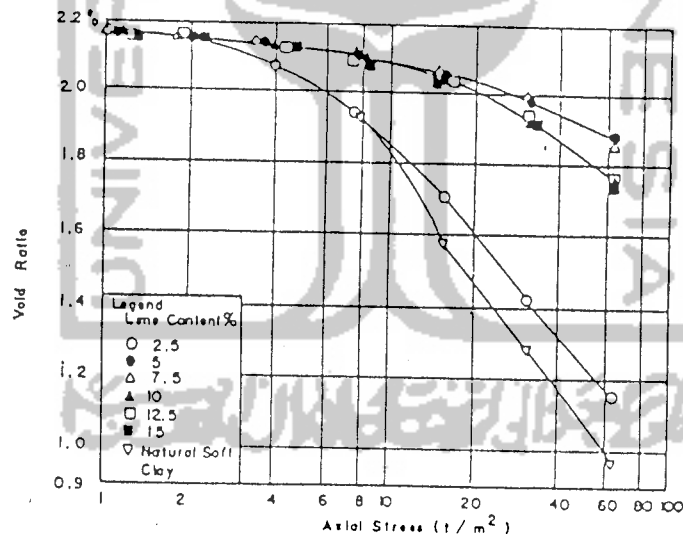
Pada gambar 2.16 memperlihatkan hubungan tegangan deviator dengan regangan geser pada kondisi dibawah tidak dialirkan (*undrained*). Kecenderungan dari sampel tanah yang sudah diolah dengan adanya penambahan kapur adalah mendekati lempung terkonsolidasi berlebihan pada saat sebelum pergeseran tekanan konsolidasi menjadi rendah. Ada perbedaan yang sangat besar antara lempung yang tidak diberi kapur dan lempung yang diberi kapur dengan kandungan kapur 5 %.

4. Karakteristik Kompresibilitas

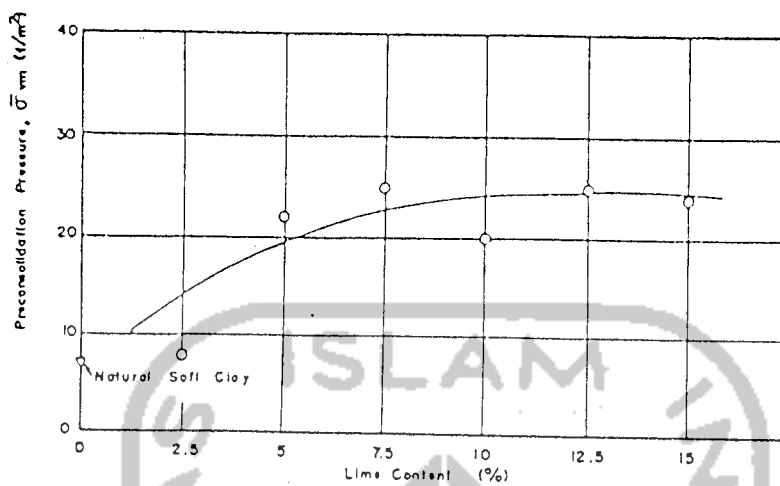
Hubungan antara angka pori dengan tegangan aksial untuk sampel dengan variasi kandungan kapur dapat dilihat pada gambar 2.17. Terlihat bahwa pada kadungan 2,5 % kapur, tidak terlalu banyak diperoleh pengaruh akibat adanya penambahan kapur tersebut. Akan tetapi pada kandungan kapur 5 %, saat sebelum tekanan konsolidasi ternyata angka pori-nya mengalami kenaikan dan lempung lunak menjadi terkonsolidasi lebih (lihat gambar 2.18). Akibat dari penambahan kapur pada indeks kompresi (C_c) dapat dilihat pada gambar 2.19.



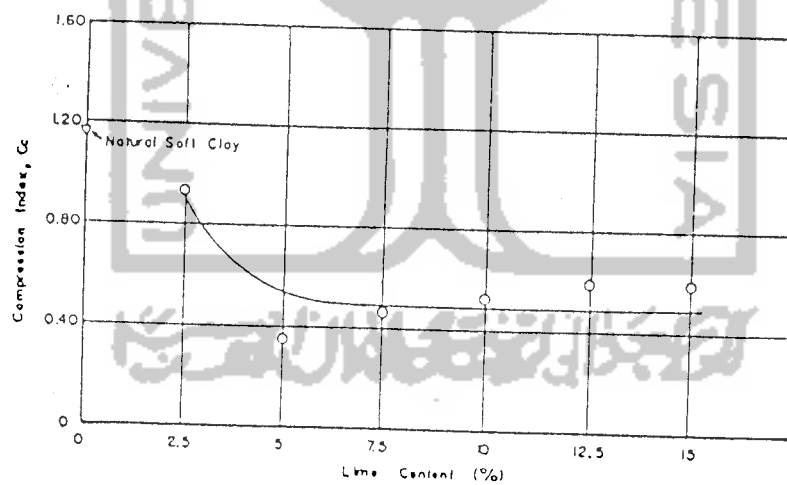
Gambar 2.16 Hubungan tegangan deviator-regangan geser untuk lempung yang sudah diperlakukan dengan kapur (kandungan kapur 2,5%).
(Dennes T Bergado, 1990)



Gambar 2.17 Hubungan angka pori-tegangan aksial (kurva e - $\log \sigma$).
(Dennes T Bergado, 1990)



Gambar 2.18 Efek dari penambahan kapur pada tekanan sebelum konsolidasi (Dennes T Bergado, 1990)



Gambar 2.19 Efek dari penambahan kapur pada indeks kompresi untuk tegangan pada tingkat maksimum (Dennes T Bergado, 1990)