

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah Lempung Ekspansif

Lempung merupakan tanah berbutir halus koloidal yang tersusun dari mineral-mineral yang dapat mengembang. Lempung ekspansif memiliki sifat khusus yaitu kapasitas pertukaran ion yang tinggi yang akan mengakibatkan lempung jenis ini memiliki potensi pengembangan yang cukup tinggi apabila terjadi perubahan kadar air. Tanah ekspansif yang mengandung mineral *montmorillonite* mampu menyerap air. Ketika mineral tersebut menyerap air, tanah lempung ekspansif akan mengembang yang disertai dengan kenaikan tekanan air pori dan tekanan pengembangannya. Sebaliknya, jika kadar air turun sampai dengan batas susutnya, lempung ekspansif akan mengalami penyusutan yang cukup tinggi (Chen, 1975).

Terdapat banyak mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung, namun mineral utama lempung ada tiga, yaitu *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite*. Muntohar (2009) menjelaskan bahwa tanah yang mengandung mineral *montmorillonite* akan sangat mudah mengembang karena tambahan air. *Montmorillonite* merupakan mineral lempung yang mempunyai struktur serupa dengan *illite* yaitu terdiri atas satu lembaran *gibbsite* yang diikat dengan dua lembaran *silica*. Dalam *montmorillonite* terjadi penggantian isomorf aluminium dengan magnesium dan besi pada lembaran *octahedral*. Lapisan-lapisan antara *octahedral* diikat dengan ikatan yang relatif lemah, yaitu ikatan *Van der Waals*, yang menyebabkan bermuatan negatif dan air atau ion-ion yang dapat berpindah lainnya dapat ditarik sehingga dapat memisahkan tiap lapisan tersebut. Kristal *montmorillonite* berukuran sangat kecil, tetapi mempunyai gaya tarik yang kuat terhadap air. Akibat perubahan volume, struktur ringan seperti jalan raya dapat menjadi rusak.

Muntohar (2014) memaparkan secara umum kerugian yang diakibatkan oleh tanah mengembang diantaranya adalah:

1. Pengembangan vertikal (*heave*) dan retak (*cracking*) pada permukaan jalan raya,
2. Kelebihan tegangan lateral pada dinding penahan tanah,
3. Pengembangan vertikal dan lenturan (*buckling*) pada pelat lantai (*slab*) atau perkerasan kaku, dan dinding penahan tanah,
4. Berkurangnya daya dukung dan kuat geser tanah.

Berdasarkan tingkat ekspansif tanah, Chen (1975) mengklasifikasikan derajat pengembangan tanah menurut hasil indeks plastisitas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Klasifikasi tanah berdasarkan potensi pengembangan

Derajat Pengembangan	Indeks Plastisitas (%)
Sangat tinggi (<i>Very high</i>)	> 55
Tinggi (<i>High</i>)	20 - 55
Sedang (<i>Medium</i>)	10 - 35
Rendah (<i>Low</i>)	0 - 15

Menurut Bowles (1984) mineral-mineral pada tanah lempung umumnya memiliki sifat keaktivitasan. Aktivitas tanah lempung adalah perbandingan antara Indeks Plastisitas (IP) dengan persentase butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm yang dinotasikan dengan huruf C, disederhanakan dalam persamaan :

$$A = IP/C$$

Dengan, A = aktivitas

IP = indeks plastisitas (%)

C = persentase butiran < 0,002mm (%)

Untuk nilai $A > 1,25$ digolongkan aktif dan sifatnya ekspansif. Nilai $1,25 < A < 0,75$ digolongkan normal sedangkan nilai $A < 0,75$ digolongkan tidak aktif.

B. Stabilisasi Tanah dengan Teknik Kolom

Stabilisasi tanah merupakan salah satu metode yang lazim digunakan untuk perbaikan tanah. Stabilisasi tanah dapat diartikan sebagai perbaikan dari stabilitas

atau daya dukung tanah dengan berbagai metode fisik, kimia, atau biologi agar memenuhi persyaratan teknis sebagai bahan konstruksi (Muntohar, 2014). Stabilisasi tanah terhadap geser maupun tekan adalah suatu usaha yang selalu dilakukan untuk meningkatkan ketahanan tanah terhadap tegangan tekan maupun tegangan geser. Sehingga, sampai saat ini stabilisasi tanah merupakan kajian yang menarik untuk diteliti baik metodenya maupun bahan-bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah tersebut. Muntohar et al. (2007) menjelaskan bahwa secara umum teknik perbaikan tanah dapat dilakukan dengan dua metode utama, yaitu secara mekanis dan kimia. Perbaikan secara kimia biasanya menggunakan bahan tambah seperti kapur, semen, atau bahan kimia lainnya. Bila bahan tersebut dicampur dengan tanah akan merubah sifat tanah akibat adanya reaksi kimia antara bahan tambah dengan tanah. Perbaikan tanah secara mekanis biasanya dilakukan dengan cara penggantian tanah, pemadatan tanah, atau memberikan perkuatan pada tanah. Beberapa penelitian tentang stabilisasi tanah dengan teknik kolom kapur sudah banyak dilakukan oleh para peneliti (Muntohar, 2010; Muntohar & Liao, 2006; Budi, 2003) melakukan uji laboratorium untuk mengkaji kapur kolom sebagai kolom tunggal yang berdiameter 5 cm dan panjang 20 cm dengan hasil kapur kolom dalam tanah dapat meningkatkan kekuatan tanah disekitarnya, di kedua arah yaitu arah radial sebesar 3D dan pada arah vertikal sebesar 8D.

Budi (2003) juga melakukan pengujian laboratorium tentang pengaruh kolom tunggal yang berisi masing-masing kapur aktif dan limbah karbit terhadap peningkatan kekuatan tanah liat ekspansif di sekitarnya. Kolom kapur yang dipakai mempunyai diameter masing-masing sebesar 2,5 cm, 5,0 cm, dan 7,5 cm dengan kedalaman sekitar 10 cm (setebal lapisan tanah), sedangkan kolom limbah karbit memiliki diameter masing-masing sebesar 3,75 cm, 5,0 cm, dan 7,5 cm dengan kedalaman sekitar 30 cm. Hasil penelitian menyebutkan bahwa kolom limbah karbit dan kolom kapur dapat meningkatkan kekuatan tanah ekspansif di sekitarnya. Peningkatan kekuatan bervariasi dengan jarak dari kolom, tertinggi terjadi di dekat kolom. Peningkatan kekuatan tanah di dekat kolom yang berisi limbah karbit dan kolom yang berisi kapur aktif relatif sama, yaitu sekitar 450%, dari 0,013 kg/cm² pada tanah asli meningkat 0,055 kg/cm² setelah ditambah kolom.

Muntohar (2010) mengkaji distribusi kekuatan tanah disekitar kolom kapur dan karakteristik pembebanannya yang dilakukan di laboratorium. Kolom kapur dirancang sebagai kolom tunggal dengan diameter (D) 5 cm, dan panjang 20 cm. Hasil penelitian tersebut menjelaskan jika penambahan kolom kapur dalam tanah dapat meningkatkan kekuatan tanah sekitarnya kolom di kedua arah vertikal dan radial. Kekuatan yang lebih tinggi terdapat disekitar kolom dan menurun secara bertahap dengan jarak dari kolom. Kekuatan tanah yang meningkat adalah hasil dari migrasi kapur dan reaksi dengan tanah. Kapur dapat menembus ke dalam tanah hingga 3D arah radial dan 8D dalam arah vertikal. Tetapi, zona utama yang dipengaruhi adalah 2D dalam arah radial dan 4D arah vertikal. Kadar air disekitar kolom menurun setelah pemasangan kolom kapur karena penghisapan air untuk reaksi kimia antara kapur dan tanah. Jumlah penurunan kadar air mengurang dengan jarak dari tepi kolom.

Penelitian tentang distribusi kekuatan disekitar kolom kapur di arah radial dan arah vertikal dari pusat kolom juga telah dilakukan oleh Muntohar dan Liao (2006). Tujuan dari penelitian tersebut untuk mempelajari penyebaran kuat geser tanah di sekitar kolom kapur yang diukur dengan kuat tekan bebas (q_u) dan perlawanan ujung konis (q_c). Kolom dirancang sebagai kolom tunggal dengan diameter (D) 5 cm, dan panjang 20 cm. Kekuatan tanah sekitar kolom kapur ditentukan dengan (UCS) uji kekuatan tekan bebas dan uji penetrasi kerucut (CPT). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kolom kapur memberikan kontribusi untuk meningkatkan kekuatan tanah dalam arah radial hingga 4D dari pusat kolom kapur. Kekuatan yang lebih tinggi terjadi di dekat kolom kapur dan berkurang dengan jarak dari pusat kolom kapur.

Muntohar et al. (2014) menggunakan bahan SiCC sebagai pengisi kolom untuk mendukung sistem perkerasan jalan. Kolom SiCC merupakan campuran mikrosilika dan mikrokalsium dari abu sekam padi dan kapur dari limbah karbit yang telah didaftarkan sebagai paten No. P00201304681. Agrina (2016) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh kadar air dan umur pada perilaku tanah lempung yang diperkuat dengan kolom SiCC menggunakan pengujian tekan bebas. Pada penelitiannya digunakan 3 jenis benda uji, yaitu tanah, tanah yang diperkuat

kolom SiCC, dan kolom SiCC. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kuat tekan bebas menurun dengan meningkatnya kadar air tanah untuk benda uji tanah yang diperkuat dengan kolom SiCC. Kekakuan tanah meningkat seiring dengan bertambahnya umur karena dibuktikan dari nilai E_{50} yang semakin tinggi.

Penelitian kuat dukung tanah dengan perkuatan kolom SiCC sudah dilakukan oleh Bimantara (2016) dan Tafalas (2016) dengan bermacam bentuk dan panjang kolom. Penelitian tersebut mengkaji deformasi dan pembebanan pada tanah lempung ekspansif yang diberi kolom *T-Shape* dengan panjang 70 cm dan 50 cm yang diameter 5,08 cm dan 15,24 cm. Penelitian kuat dukung tanah dengan perkuatan kolom SiCC dilakukan oleh Bimantara (2016) dan Tafalas (2016) dengan bermacam bentuk dan panjang kolom. Penelitian tersebut mengkaji pengaruh panjang mini kolom dalam membantu daya dukung tanah terhadap deformasi pelat dan beban di atas tanah ekspansif yang diberi kolom *T-shape* dengan panjang 70 cm dan 50 cm yang memiliki diameter atas 15,24 cm dan diameter bawah 5,08 cm. Untuk pengujian pengembangan dilakukan selama 4 hari ketika kolom telah berumur 14 hari. Hasil dari penelitian tersebut menjelaskan bahwa semakin panjang kolom *T-shape*, maka daya dukung tanah lempung ekspansif semakin meningkat. Deformasi pengembangan pelat fleksi-glass dengan perkuatan kolom *T-shape* mengalami deformasi pengembangan yang lebih kecil daripada deformasi pengembangan tanpa diperkuat oleh kolom *T-shape*.

C. Sifat – Sifat Indeks Tanah

Pengujian dasar yang dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat geoteknik dari tanah tersebut adalah dengan pengujian-pengujian sebagai berikut:

1. Kadar air

Kadar air adalah perbandingan antara berat air dengan berat butiran padat yang dinyatakan dalam persen (Hardiyatmo, 2012).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Dengan, w = kadar air (%),

W_w = berat air (g),

W_s = berat butiran padat (g).

2. Berat jenis

Berat spesifik atau berat jenis adalah perbandingan antara volume butiran padat dengan berat volume air pada temperatur 4°C (Hardiyatmo, 2012).

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.2)$$

Dengan, G_s = berat jenis,

γ_s = berat volume butiran padat (g/cm^3),

γ_w = berat volume air (g/cm^3).

Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah diberikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Berat jenis tanah (Hardiyatmo, 2002)

Jenis Tanah	Berat Jenis, G_s
Kerikil	2,65 - 2,68
Pasir	2,65 - 2,68
Lanau organik	2,62 - 2,68
Lempung organik	2,58 - 2,65
Humus	1,37
Gambut	1,25 - 1,80

3. Batas-batas *Atterberg*

Hardiyatmo (2012) memaparkan bahwa suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel mineral lempung dalam tanah. Istilah plastisitas menggambarkan kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak. Bergantung pada kadar air, tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Konsistensi bergantung pada gaya tarik antara partikel mineral lempung.

Terdapat 3 macam batas-batas *atterberg*, yaitu:

a. Batas cair (*Liquid Limit*)

Batas cair didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair biasanya ditentukan dari uji casagrande (Hardiyatmo, 2012). Muntohar (2009) menjelaskan jika pada kondisi cair, tanah memiliki kekuatan yang sangat rendah dan terjadi deformasi yang sangat besar. Namun sebaliknya, kekuatan tanah menjadi sangat besar dan mengalami deformasi yang sangat kecil dalam kondisi padat.

Tabel 2. 3 Karakteristik kekakuan tanah pada beberapa nilai indek cair
(Muntohar, 2009)

Indek Cair	Karakteristik Kekuatan Tanah
LI < 0	Kondisi tanah agak padat, memiliki kekuatan tinggi dan bersifat getas (<i>brittle</i>)
0 < LI < 1	Tanah berada pada kondisi plastis, memiliki kekuatan yang sedang dan mengalami deformasi seperti bahan plastis
LI > 1	Tanah berada pada kondisi cair, memiliki kekuatan yang sangat rendah dan mengalami deformasi seperti halnya bahan cair yang kental (<i>viscous fluid</i>)

Untuk mengukur kekuatan tanah berdasarkan batas-batas *atterberg*, dikenal suatu parameter yaitu indeks cair (*Liquid Index*), *LI*, dimana:

$$LI = \frac{wN - PL}{PI} \quad (2.3)$$

Dengan, wN = kadar air tanah asli di lapangan (%),

PL = batas plastisitas tanah,

PI = indeks plastisitas tanah.

b. Batas plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung (Hardiyatmo, 2012).

c. Batas susut (*Shrinkage Limit*)

Batas susut didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah (Hardiyatmo, 2012).

4. Distribusi ukuran butir tanah

Sifat-sifat tanah bergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh karena itu, analisis ukuran butir tanah merupakan pengujian yang sangat sering dilakukan (Hardiyatmo, 2012). Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan. Terdapat dua metode untuk mengetahui distribusi ukuran partikel, yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer.

a. Analisis saringan

Penyaringan merupakan metode yang biasanya secara langsung untuk menentukan ukuran partikel dengan didasarkan pada batas-batas bawah ukuran lubang saringan yang digunakan. Batas terbawah saringan adalah ukuran terkecil untuk partikel pasir (Muntohar, 2009).

Tabel 2. 4 Susunan dan ukuran saringan (Hardiyatmo, 2002)

No. Saringan (ASTM)	Ukuran (mm)
No. 10	2,000
No. 20	0,850
No. 40	0,425
No. 60	0,250
No. 140	0,105
No. 200	0,075

b. Analisis hidrometer

Muntohar (2009) menjelaskan proses penyaringan tidak dapat digunakan untuk tanah berbutir halus, seperti lanau dan lempung karena ukuran

partikelnya sangat kecil berupa koloid (*colloid*). Sehingga untuk tanah berbutir halus, digunakan metode analisis hidrometer. Bila contoh tanah terdipersi di dalam air, partikel-partikel mengendap dengan kecepatan yang berbeda-beda bergantung pada ukuran, berat, dan bentuk serta kekentalan (*viscosity*) air. Partikel yang lebih besar akan mengendap lebih cepat diikuti dengan partikel-partikel yang lebih kecil.

Sifat-sifat mekanis penting tanah, seperti kekuatan dan pemampatan, secara langsung dipengaruhi oleh faktor-faktor dasar seperti rapat massa, berat volume, angka pori, dan derajat kejenuhan (Muntohar, 2009).

Volume total tanah dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (2.4)$$

Dengan, V_s = volume tanah padat,

V_v = volume pori,

V_w = volume air yang mengisi pori,

V_a = volume udara pada pori.

Dengan mengabaikan berat udara, maka berat total tanah adalah:

$$W = W_s + W_w \quad (2.5)$$

Dengan, W_s = berat butiran tanah,

W_w = berat air.

Pada umumnya, yang menunjukkan hubungan berat yaitu kadar air dan berat volume tanah. Kadar air (w) atau jumlah kandungan air dalam tanah didefinisikan sebagai perbandingan berat air dengan berat butiran tanah untuk suatu volume tanah, sedangkan berat volume tanah (γ) adalah berat total tanah per satuan volume total.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.6)$$

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

Berat per satuan volume yang tidak termasuk air yang dikandung dalam tanah disebut berat volume kering (*dry unit weight, γ_d*).

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan definisi berat volume dan berat volume kering (persamaan 2.7 dan 2.8), dapat dituliskan:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{G_s \cdot \gamma_w + w \cdot G_s \cdot \gamma_w}{1+e} = \frac{(1+w)G_s \cdot \gamma_w}{1+e} \quad (2.9)$$

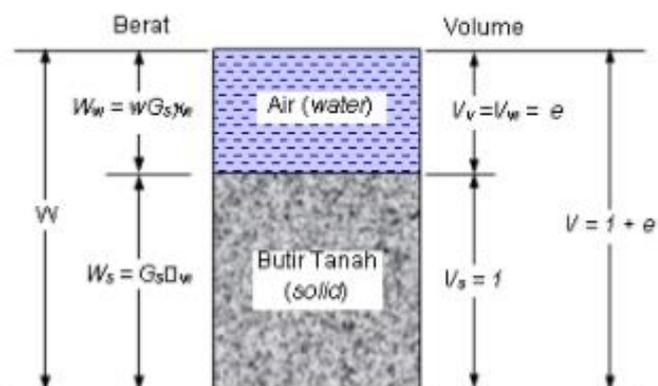
$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} \quad (2.10)$$

Angka pori (e) didefinisikan sebagai perbandingan volume pori dengan volume butiran tanah. Sedangkan Derajat kejenuhan (S) didefinisikan sebagai perbandingan volume air dan volume pori yang umumnya dinyatakan dalam persentase.

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (2.11)$$

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w \cdot G_s}{e} \quad (2.12)$$

Persamaan-persamaan tersebut digunakan untuk memberikan hubungan antara ketiga fase elemen tanah.



Gambar 2. 1 Elemen tanah pada kondisi jenuh air dengan volume bagian padat $V_s=1$ (Muntohar, 2009)

Tabel 2. 5 Tipikal nilai angka pori, kadar air, berat volume kering untuk beberapa jenis tanah (Muntohar, 2009)

Jenis Tanah	Angka pori, e	Kadar air pada kondisi jenuh (%)	Berat volume kering	
			lb/ft	kN/m ³
Pasir lepas seragam	0,8	30,0	92	14,5
Pasir padat seragam	0,45	16	115	18
Pasir berlanau lepas	0,65	25	102	16
Pasir berlanau padat	0,4	15	121	12
Lempung keras	0,6	21	108	17
Lempung lunak	0,9-1,4	30-50	73-93	11,5-14,5
Tanah <i>loess</i>	0,2	25	86	13,5
Lempung lunak organik	2,5-3,2	90-170	38-51	6-8
Tanah glasial	0,3	10	134	21

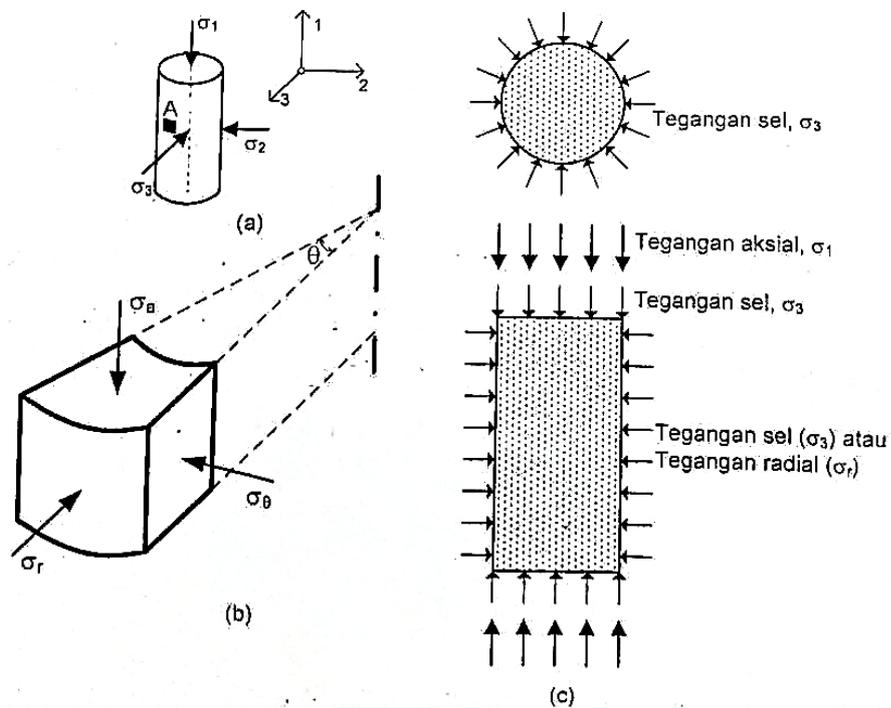
D. Uji Triaksial

Keamanan suatu struktur yang berdiri di atas tanah tergantung pada kekuatan tanah dibawahnya. Jika tanah tidak mampu mendukung beban dari struktur, maka struktur tersebut akan runtuh. Kekuatan tanah yang dimaksud adalah kekuatan geser tanah (*shear strength*). Muntohar (2009) menyebutkan kuat geser merupakan gaya atau tegangan dalam tanah yang diperlukan untuk menahan atau memberikan perlawanan geser akibat beban atau tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Ada beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, antara lain:

1. Uji geser langsung
2. Uji triaksial
3. Uji tekan bebas

Pada prinsipnya, Muntohar (2009) menentukan parameter kekuatan geser tanah yaitu dengan kohesi dan sudut gesek tanah.

Uji triaksial merupakan jenis pengujian kuat geser tanah yang banyak digunakan dan sesuai untuk tanah kohesif dan tanah granuler serta batuan (Muntohar, 2009). Pada uji triaksial, tegangan-tegangan yang bekerja pada benda uji berada pada kondisi *axial-symmetry* seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Sistem tegangan-tegangan pada uji traksial (a) tegangan pada sistem tiga dimensi (b) tegangan-tegangan pada elemen A (c) idealisasi tegangan pada dua dimensi (Muntohar, 2009)

Terdapat 3 metode yang dapat dilakukan dalam pengujian triaksial, yaitu:

- a. Tak terkonsolidasi-tak terdrainase atau *Unconsolidated-Undrained* (UU)
- Muntohar (2009) menjelaskan bahwa pada uji triaksial UU, benda uji tidak perlu dikonsolidasikan dan selama penerapan tegangan sel σ_3 tidak diperbolehkan terjadinya drainase air pori. Pada uji triaksial UU, tegangan deviator sama dengan beban aksial yang diberikan kepada benda uji yang dibagi dengan luas penampang yang sudah dikoreksi. Akibat pemberian tekanan sel, tekanan air pori dalam benda uji akan meningkat sebesar u_c . Tegangan deviator $\Delta\sigma_d$ diberikan pada benda uji hingga mencapai keruntuhan geser tanpa diperbolehkan terjadinya drainase. Tekanan air pori menjadi meningkat lagi yaitu Δu_d akibat penerapan tegangan deviator, sehingga tekanan air pori total adalah :

$$u = u_c + \Delta u_d \quad (2.13)$$

Atau

$$\begin{aligned} u &= B\sigma_3 + \bar{A}\Delta u_d \\ &= B\sigma_3 + \bar{A}(\sigma_1 - \sigma_3) = [\sigma_3 + A(\sigma_1 - \sigma_3)] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dimana $A = \frac{\bar{A}}{B}$

Dengan, u = tekanan air pori total

u_c = tekanan air pori dalam benda uji

Δu_d = tekanan air pori saat penerapan tegangan deviator

\bar{A} = parameter tekan air pori

Uji triaksial UU dilakukan pada tanah lempung kondisi jenuh air, maka koefisien tekanan air pori $B = 1$ dan $A = \bar{A}$. Uji triaksial UU dilakukan untuk mengevaluasi parameter total kekuatan tegangan geser dan kegagalan perilaku di bawah tekanan keliling yang berbeda (Diana et al. 2013).

b. Terkonsolidasi-tak terdrainase atau *Consolidated-Undrained* (CU)

Muntohar (2009) menjelaskan bahwa pada uji triaksial CU, tahap awal konsolidasi pada benda uji dilakukan dengan memberikan tekanan sel σ_3 dan drainase dibiarkan terjadi selama pemberian tekanan sel. Dengan demikian tekanan air pori, $u_c = 0$ pada saat proses konsolidasi selesai, kemudian benda uji diterapkan tegangan deviator $\Delta\sigma_d$ hingga terjadi keruntuhan. Selama pembebanan ini tidak diperbolehkan terjadi drainase sehingga menyebabkan tekanan air pori dalam benda uji bertambah. Bersamaan dengan pemberian tegangan deviator, tekanan air pori u_d juga dikukur. Tekanan air pori pada pengujian CU dapat dinyatakan dengan parameter tekan air pori \bar{A} , yaitu:

$$\bar{A} = \frac{u_d}{\Delta\sigma_d} \quad (2.15)$$

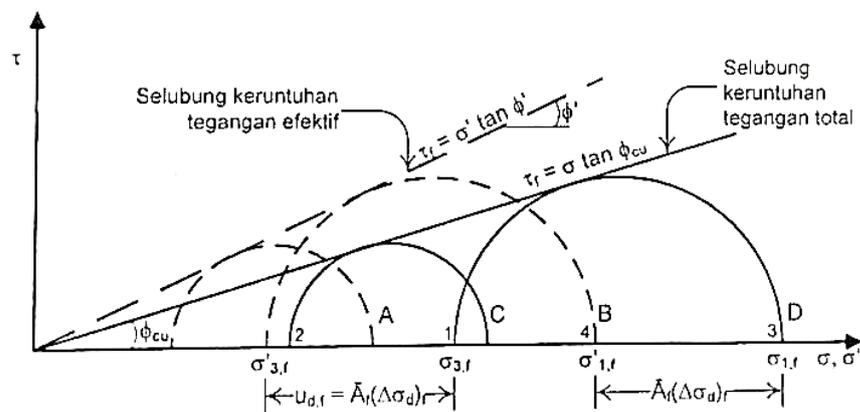
Dengan, u_d = tekanan air pori (dalam butiran tanah) saat runtuh,

$\Delta\sigma_d$ = tegangan deviator saat runtuh.

Tegangan utama total dan tegangan utama efektif pada uji triaksial CU tidak memiliki nilai yang sama. Tegangan-tegangan utama pada saat keruntuhan diberikan sebagai berikut:

- 1) Tegangan utama mayor total, $\sigma_{1,f} = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f$
- 2) Tegangan utama mayor efektif, $\sigma'_{1,f} = \sigma_{1,f} - (u_d)_f = \sigma_{1,f} - \bar{A}_f (\Delta\sigma_d)_f$
- 3) Tegangan utama minor total, $\sigma_{3,f}$
- 4) Tegangan utama minor efektif, $\sigma'_{3,f} = \sigma_{3,f} - (u_d)_f = \sigma_{3,f} - \bar{A}_f (\Delta\sigma_d)_f$

Pengujian triaksial dilakukan untuk paling tidak 3 benda uji dari contoh tanah yang sama yang diberikan tegangan sel berbeda, dengan demikian dapat digambarkan lingkaran Mohr seperti pada Gambar 2.3. Lingkaran Mohr tegangan efektif bergeser ke kiri dari tegangan totalnya sebesar $u_{d,f}$ dengan diameter yang sama.



Gambar 2. 3 Selubung keruntuhan tegangan total dan tegangan efektif pada uji triaksial CU (Muntohar, 2009)

Kondisi benda uji yang digunakan untuk ketiga cara pengujian tersebut diasumsikan oleh Muntohar (2009) bahwa tanah berada dalam keadaan yang jenuh air, karena pengaruh keterusikan (*disturbance effect*) pada saat pengambilan contoh

tanah atau pembuatan benda uji dengan cara dipadatkan (*remolded*), benda uji tidak berada dalam kondisi jenuh 100%. Benda uji dapat dikatakan dalam kondisi jenuh air bila koefisien tekanan air pori (*b-value*) mencapai setidaknya 0,95.

E. Tegangan Efektif

Jika tanah berada dalam air, tanah dipengaruhi oleh gaya angkat ke atas sebagai akibat tekanan air hidrostatis. Hardiyatmo (2012) menjelaskan bahwa berat tanah yang terendam tersebut berat tanah efektif, sedangkan tegangan yang terjadi akibat berat tanah efektif di dalam tanah, disebut tegangan efektif. Tegangan efektif ini merupakan tegangan yang mempengaruhi kuat geser dan perubahan volume atau penurunan tanah.

Tanah terdiri dari butiran-butiran padat dan ruang pori. Ruang pori yang dapat berisi udara dan air ini terjadi karena bentuk partikel tanah yang merupakan butiran-butiran. Bila tanah tersebut jenuh, ruang pori akan terisi penuh dengan air. Tegangan yang terjadi pada bidang kontak antar butiran akan dipengaruhi oleh tekanan air pori. Tekanan air pori bekerja ke segala arah sama besar dan akan bekerja pada seluruh bidang permukaan butiran, tapi dianggap tidak mengubah volume butiran (Hardiyatmo, 2012).

Hardiyatmo (2012) juga menjelaskan pada butiran mineral lempung, mungkin tidak terjadi kontak langsung, akibat partikel lempung yang terselubung oleh lapisan air serapan (*adsorbed water*), jadi dianggap bahwa gaya antar partikel dapat diteruskan lewat kekentalan yang tinggi dari air serapan yang mengelilingi butiran.

Tegangan yang terjadi pada tanah dapat dibagi menjadi tegangan total (σ) dan tegangan efektif (σ'), hubungan dari keduanya adalah:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.16)$$

$$\sigma = \gamma \cdot h \quad (2.17)$$

$$u = \gamma_w \cdot h \quad (2.18)$$

Dengan σ = tegangan total (kN/m²)

γ = berat jenis tanah (kN/m³)

γ_w = berat jenis air (kN/m³)

h = tebal lapisan (m)

u = tekanan air (kN/m²)

Sehingga $\sigma' = \sigma - u$ (2.19)

$$\sigma' = (\gamma \cdot h) - (\gamma_w \cdot h) \quad (2.20)$$

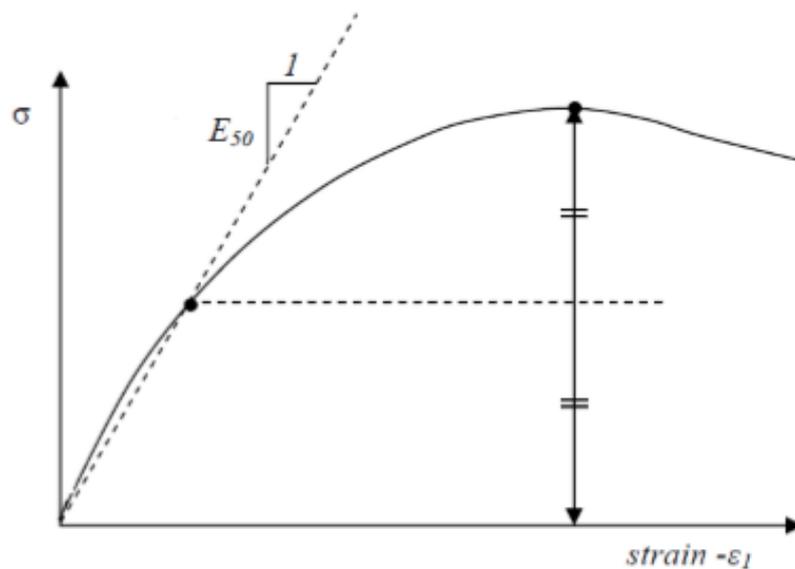
$$\sigma' = (\gamma_r - \gamma_w) \cdot h \quad (2.21)$$

Dengan σ' = tegangan efektif (kN/m²)

γ_r = berat jenis tanah jenuh (kN/m³)

F. Modulus Elastisitas Tanah

Diana et al. (2013) menjelaskan modulus elastisitas adalah salah satu parameter yang digunakan untuk karakteristik kekakuan atau elastisitas tanah. Nilai umumnya dinyatakan dalam modulus sekan, E₅₀. Modulus sekan adalah kemiringan garis lurus yang ditarik dari titik asal ke tegangan tertentu pada kurva tegangan-regangan. Nilai dari E₅₀ dinyatakan sebagai $E_{50} = q_{50}/\epsilon_{50}$, di mana q₅₀ adalah setengah dari kekuatan tekan puncak, dan ϵ_{50} adalah regangan yang sesuai dengan q₅₀.



Gambar 2. 4 E₅₀ (Brinkgrave dan Vermeer, 1998)

Gangguan benda uji (*sample disturbance*) mempunyai pengaruh yang besar pada nilai modulus elastisitas yang diperoleh. Menurut Hardiyatmo (2010) semakin besar gangguan benda uji, nilai elastisitas tanah akan semakin kecil, sehingga semakin jauh dari nilai aslinya ketika benda uji masih didalam tanah. Modulus elastisitas untuk tanah lempung dapat diperoleh dari uji triaksial *undrained* di laboratorium. Beberapa faktor mempengaruhi hasil yang diperoleh, salah satunya adalah semakin kecil kecepatan pembebanan (regangan), semakin kecil nilai modulus elastisitas *undrained*.