

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

Dalam suatu pekerjaan konstruksi tanah mendapat posisi yang sangat penting. Kebanyakan problem tanah dalam bidang keteknikan adalah tanah lempung yang merupakan tanah kohesif. Tanah kohesif ini didefinisikan sebagai kumpulan dari partikel mineral yang mempunyai tingkat sensitifitas tinggi terhadap perubahan kadar air sehingga perilaku tanah sangat tergantung pada komposisi mineral, unsur kimia, teksture dan partikel serta pengaruh lingkungan sekitarnya.

2.2. Tanah Lempung Berpotensi Ekspansif

Pengetahuan mengenai mineral tanah sangat diperlukan untuk memahami perilaku tanah tersebut. Menurut Mitchell (1976), mineralogi merupakan faktor utama untuk mengontrol, ukuran, bentuk, sifat-sifat fisik dan kimia dari partikel tanah. Dalam klasifikasi tanah secara umum partikel tanah lempung mempunyai diameter $2\mu\text{m}$ atau sekitar $0,002\text{mm}$. Lempung didefinisikan sebagai golongan partikel yang berukuran kurang dari $0,002\text{mm}$ (MIT, U.S.D.A, AASTHO, UCS). Namun demikian, di beberapa kasus, partikel berukuran antara $0,002\text{ mm}$ sampai $0,005\text{ mm}$ juga masih digolongkan sebagai partikel lempung (ASTM-D-653). Disini tanah diklasifikasikan sebagai lempung (hanya berdasarkan pada ukurannya saja).

Belum tentu tanah dengan ukuran partikel lempung tersebut juga mengandung mineral-mineral lempung. Dari segi mineral (bukan dari ukuran) yang disebut tanah lempung dan mineral lempung adalah yang mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang "menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampurkan dengan air" (Grim, 1953) sebagai dikutip Das. Braja M (1985). Jadi dari segi mineral tanah dapat juga disebut tanah bukan lempung (*non clay soil*) meskipun terdiri dari partikel-partikel yang sangat kecil (partikel-partikel quartz, feldspar, mika dapat berukuran sub mikroskopis, tetapi umumnya tidak bersifat plastis). Partikel-partikel dari mineral lempung umumnya berukuran koloid; merupakan gugusan kristal berukuran mikro yaitu $<1\mu\text{m}$ merupakan hasil proses pelapukan mineral batuan induknya, sedangkan ukuran $2\mu\text{m}$ merupakan batas atasnya.

Mineral lempung merupakan senyawa aluminium silikat yang kompleks. Mineral ini terdiri dari dua lempung kristal pembentuk kristal dasar yaitu silikat tetrahedral dan aluminium octahedral. Setiap unit tetrahedral (berisi empat) terdiri dari empat atom oksigen mengelilingi atom silikon sebagaimana dikutip Das, Braja M., 1985. Terdapat ratusan mineral lempung yang telah teridentifikasi namun yang sering dibahas dalam persoalan geoteknik hanya sebagian kecil (Lambe dan Whitman, 1969). Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki tingkat sensitifitas yang tinggi terhadap perubahan kadar air.

2.3. Lempung dan Mineral Penyusunnya

Das (1994), menerangkan bahwa tanah lempung merupakan tanah dengan ukuran mikronis sampai dengan sub-mikronis yang dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan. Tanah lempung sangat keras dalam keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi lempung bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung menurut Hardiyatmo (1992) adalah sebagai berikut:

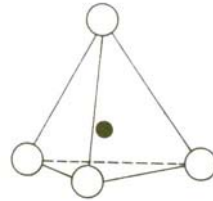
- Ukuran butir halus, kurang dari 0,002mm
- Permeabilitas rendah
- Kenaikan air kapiler tinggi
- Bersifat sangat kohesif
- Kadar kembang susut yang tinggi
- Proses konsolidasi lambat

Susunan kebanyakan tanah lempung terdiri dari silikat tetrahedral dan aluminium octahedral. Silica dan aluminium secara parsial dapat digantikan dengan elemen lain dalam kesatuannya, hal ini dikenal dengan substitusi isomorf.

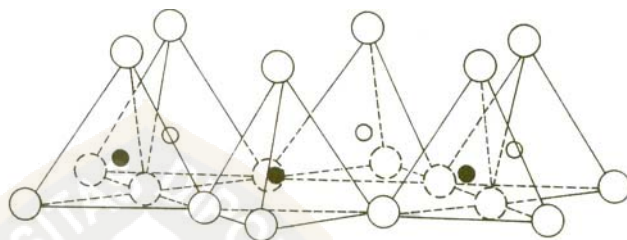
2.3.1. Struktur Mineral Penyusun Lempung

Dalam terminologi ilmiah, lempung adalah mineral asli yang mempunyai sifat plastis saat basah, dengan ukuran butir yang sangat halus dan mempunyai komposisi dalam jumlah besar berupa *hydrous aluminium* dan *magnesium silicate*. Batas atas ukuran butir untuk lempung umumnya adalah kurang dari 2 μ m (1 μ m=0,000001m), meskipun ada, klasifikasi yang menyatakan batas atas lempung adalah 0,005m (ASTM).

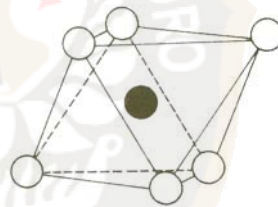
Menurut Holtz and Kovacs (1981) satuan struktur dasar dari mineral lempung terdiri dari silica tetrahedron dan alumina octahedron. Jenis-jenis mineral lempung tergantung dari kombinasi susunan satuan struktur dasar atau tumpukan lembaran serta macam ikatan antara masing-masing lembaran. Satuan-satuan dasar tersebut bersatu membentuk struktur lembaran seperti yang digambarkan pada Gambar 2.1 sampai dengan Gambar 2.4.



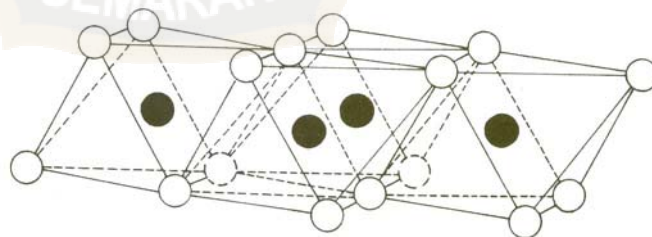
Gambar 2.1. Single silica tetrahedral (Grim, 1959)



Gambar 2.2 Isometric silica sheet (Grim, 1959)



Gambar 2.3. Single aluminium octahedron (Grim, 1959)



Gambar 2.4. Isometric octahedral sheet (Grim, 1959)

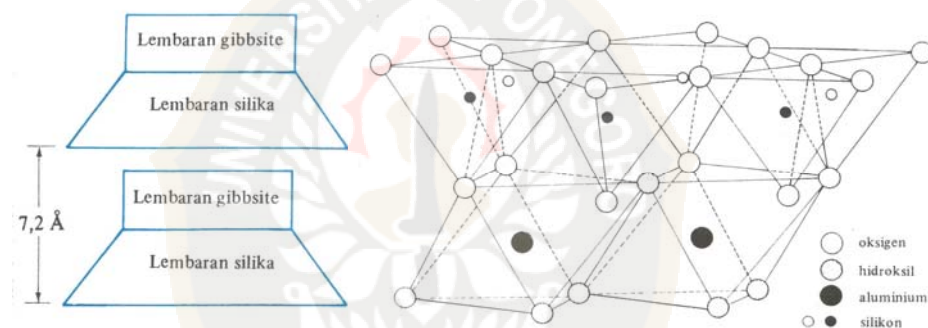
Umumnya partikel-partikel lempung mempunyai muatan negatif pada permukaannya. Hal ini disebabkan oleh adanya substitusi isomorf dan oleh karena pecahnya kepingnya partikel pelat tersebut pada tepi-tepinya. Muatan negatif yang

lebih besar dijumpai pada partikel-partikel yang mempunyai spesifik yang lebih besar.

Jika ditinjau dari mineraloginya, lempung terdiri dari berbagai mineral penyusun, antara lain mineral lempung (*kaolinite*, *montmorillonite* dan *illite group*) dan mineral-mineral lain yang mempunyai ukuran sesuai dengan batasan yang ada (*mika group*, *serpentine group*).

Kaolinite

Kaolinite disebut sebagai mineral lempung satu banding satu (1:1). Bagian dasar struktur ini adalah lembaran tunggal silika tetrahedral yang digabung dengan satu lembaran tunggal alumina oktahedran (*gibbsite*) membentuk satu unit dasar dengan tebal kira-kira $7,2\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$) seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Hubungan antar unit dasar ditentukan oleh ikatan hidrogen dan gaya bervalensi sekunder. Mineral kaolinite berwujud seperti lempengan-lempengan tipis masing-masing dengan diameter 1000\AA sampai 20000\AA dan ketebalan dari 100\AA sampai 1000\AA dengan luasan spesifik per unit massa $\pm 15\text{m}^2/\text{gram}$.

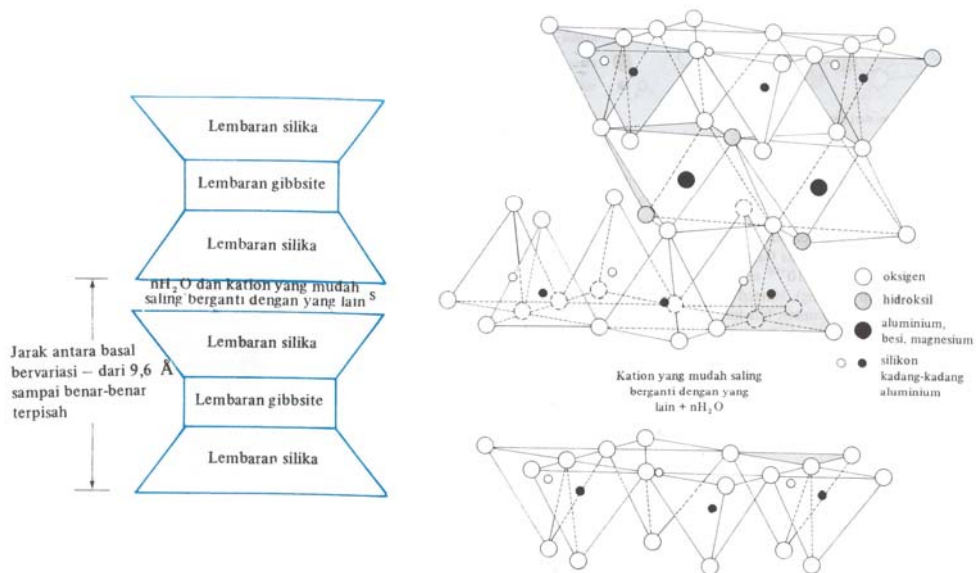


Gambar 2.5. Struktur kaolinite (Grim, 1959)

Montmorillonite

Disebut juga mineral dua banding satu (2:1) karena satuan susunan kristalnya terbentuk dari susunan dua lempeng silika tetrahedral mengapit satu lempeng alumina oktahedral ditengahnya. Tebal satu satuan. unit adalah $9,6\text{\AA}$ ($0,96\mu\text{m}$), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 sebagaimana dikutip Das, Braja M. (1985). Hubungan antara satuan. unit diikat oleh ikatan gaya Van der Waals diantara ujung-ujung atas dari lembaran silika itu sangat lemah, maka lapisan air ($n\text{H}_2\text{O}$) dengan kation yang dapat bertukar dengan mudah menyusup dan memperlemah ikatan antar satuan susunan kristal mengakibatkan antar lapisan

terpisah. Ukuran unit massa sangat besar, dapat menyerap air dengan sangat kuat, mudah mengalami proses pengembangan.



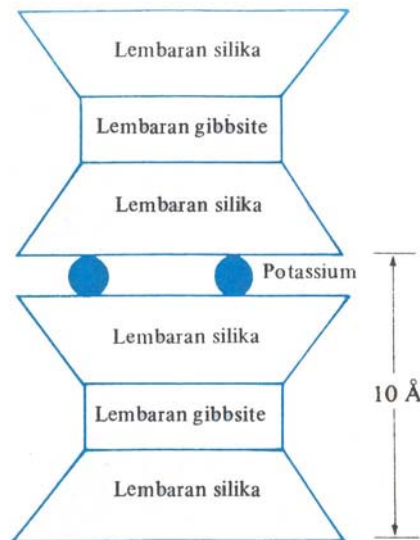
Gambar 2.6. Struktur Montmorillonite (Grim, 1959)

Illite

Memiliki formasi struktur satuan kristal yang hampir sama dengan montmorillonite. Satu unit kristal illite memiliki tebal dan komposisi yang hampir sama dengan montmorillonite. Perbedaannya ada pada:

- Pengikatan antar unit kristal terdapat pada kalium (K) yang berfungsi sebagai penyeimbang muatan sekaligus pengikat.
- Terdapat $\pm 20\%$ pergantian silikon (Si) oleh aluminium (Al) pada lempeng tetrahedral.
- Struktur mineralnya tidak mengembang sebagaimana montmorillonite.

Gambar satuan unit illite seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Struktur illite (Grim, 1959)

Substitusi dari kation-kation yang berbeda pada lembaran octahedral akan mengakibatkan mineral lempung yang berbeda pula. Apabila ion-ion yang disubstitusikan mempunyai ukuran sama disebut *isomorphous*. Bila sebuah anion dari lembaran oktahedral adalah *hydroxyl* dan dua per tiga posisi kation diisi oleh aluminium maka mineral tersebut disebut *gibbsite* dan bila magnesium disubstitusikan ke dalam lembaran aluminium dan mengisi seluruh posisi kation, maka mineral tersebut disebut *brucite*.

Chen (1975) membedakan jenis mineral lempung berdasarkan pada tebal dan diameter partikel, luas permukaan spesifik butiran dan kapasitas pertukaran kation seperti yang terlihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Kisaran kapasitas tukar kation (Chen, 1975)

	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
<i>Particle thickness</i>	(0,5-2) μm	(0,003-0,1) μm	<9,5Å
<i>Particle diameter</i>	(0,5-4) μm	(0,5-10) μm	(0,05-10) μm
<i>Specific surface (sq. m/gram)</i>	10 - 20	65 - 180	50 - 480
<i>cation exchange capacity (millequivalents per 100 gram)</i>	3 - 15	10 - 40	70 - 80

Keterangan: 1Å=10⁻¹⁰m=0,1 μm

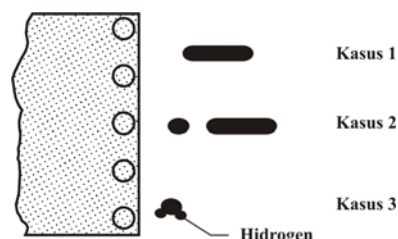
2.3.2. Sifat Umum Mineral Lempung

Air sangat mempengaruhi sifat tanah lempung, karena butiran dari tanah lempung sangat halus, sehingga luas permukaan spesifikasinya menjadi lebih besar. Dalam suatu partikel lempung yang ideal, muatan negatif dalam keadaan seimbang, selanjutnya terjadi substitusi isomorf dan kontinuitas perpecahan susunannya, sehingga terjadi muatan negatif pada permukaan partikel kristal lempung. Salah satu untuk mengimbangi muatan negatif, partikel tanah lempung menarik muatan positif (kation) dari garam yang ada dalam air porinya. Hal ini disebut pertukaran ion-ion.

Pertemuan antara molekul air dan partikel lempung akan menimbulkan lekatan yang sangat kuat, sebab air akan tertarik secara elektrik dan air akan berada disekitar partikel lempung yang disebut air lapisan ganda, sedangkan air yang berada pada lapisan dalam disebut air resapan. Lapisan air inilah yang menimbulkan gaya tarik menarik antar partikel lempung yang disebut *unhindered moisture film*.

Pada Gambar 2.8 Hadiyatmo (1992) menerangkan bahwa molekul air bersifat dipolar, yang berarti memiliki muatan positif dan negatif pada ujung yang berlawanan, sehingga dapat tertarik oleh permukaan lempung secara elektrik dalam 3 kasus, yaitu:

1. Tarikan antar permukaan negatif dan partikel lempung dengan ujung positif dipolar.
2. Tarikan antar kation-kation dalam lapisan ganda dengan muatan negatif dari ujung dipolar. Kation-kation ini tertarik oleh permukaan partikel lempung yang bermuatan negative.
3. Andil atom-atom hidrogen dalam molekul air, yaitu ikatan hidrogen antara atom oksigen dalam molekul-molekul air.



Gambar 2.8. Molekul air dipolar dalam lapisan ganda (Hardiyatmo, 1992)

Jadi jelaslah bahwa semakin luas permukaan spesifik tanah lempung, air yang tertarik secara elektrik disekitar partikel lempung yang disebut air lapisan ganda jumlahnya akan semakin besar. Air lapisan ganda inilah yang mengakibatkan sifat plastis tanah lempung.

Konsentrasi air resapan dalam mineral lempung memberi bentuk dasar dari susunan tanahnya, tiap partikelnya terikat satu sama lain lewat lapisan air serapannya. Selain itu, jarak antar partikel juga akan mempengaruhi hubungan tarik menarik atau tolak menolak antar partikel tanah lempung yang diakibatkan oleh pengaruh ikatan hidrogen, gaya Van Der Waals serta semacam ikatan kimia organiknya. Bertambahnya jarak akan mengurangi gaya antar partikel.

Jadi jelaslah bahwa ikatan antara partikel tanah yang disusun oleh mineral lempung akan sangat besar dipengaruhi oleh besarnya jaringan muatan negatif pada mineral, tipe, konsentrasi dan distribusi kation-kation yang berfungsi untuk mengimbangi muatannya.

Gaya elektrostatik (gaya tarik menarik antara partikel bermuatan) yang terjadi pada permukaan lempung (bermuatan negatif) dengan kation-kation yang berada diantaranya, berpengaruh terhadap penyusutan ketebalan lapisan ganda karena jumlah air yang terhidrasi menjadi berkurang.

Hal ini berdasarkan rumusan gaya elektrostatik:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

F : Gaya elektrostatik

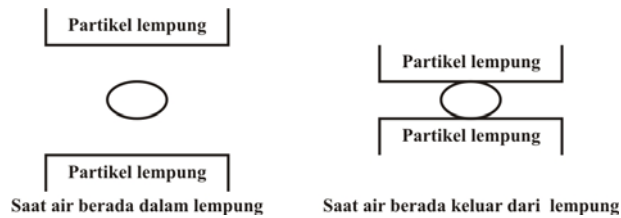
q₁: Muatan partikel 1

q₂: Muatan partikel 2

r : jari-jari antar partikel bermuatan

Lempung akan bersifat labil (kembang susutnya besar) bila kation-kation yang berada diantara partikel lempung adalah kation-kation yang lemah, atau dapat dengan mudah digantikan oleh kation-kation yang lain atau tergeser oleh molekul-molekul air yang konsentrasinya tinggi. Kation yang lemah adalah kation-kation yang berasal dari garam-garam mineral yang terdapat di alam misalnya Na⁺. Sehingga akan dihasilkan gaya elektrostatik yang lemah serta jari-jari antar partikel besar, sehingga akan didapatkan lempung yang mengembang disaat banyak air dan menyusut pada saat air keluar dari lempung, dengan perbedaan kembang susut

yang besar dapat dilihat pada Gambar 2.9, sedangkan lempung yang bersifat stabil dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.9. Mekanisme kembang susut pada partikle lempung.



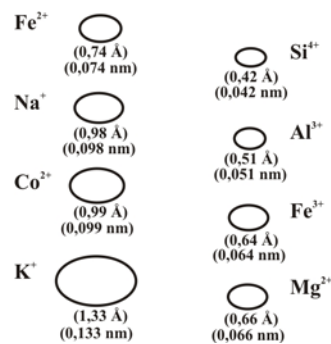
Gambar 2.10. Mekanisme kembang susut pada partikel lempung yang stabil

2.4. Interaksi Air dan Mineral dalam Fenomena Tanah Lempung Ekspansif

Permukaan mineral lempung tanah biasanya mengandung muatan elektronegatif yang memungkinkan terjadinya reaksi pertukaran kation, muatan ini merupakan hasil dari satu atau beberapa lebih dari reaksi yang berbeda. Dua sumber utama bagi asal usul muatan negatif menurut Kim. H. Tan (1991) yaitu:

- Adanya substitusi Isomorfik. Proses ini merupakan sumber utama muatan negative dalam lempung lapis 2:1. Sebagian dari silicon dalam lapisan tetrahedral dapat diganti oleh ion yang berukuran sama, yang biasanya Al^{3+} demikian pula sebagian dari aluminium dalam lembar octahedral dapat digantikan oleh Mg^{2+} tanpa mengganggu struktur kristal. Muatan negative yang dihasilkan dari proses substitusi isomorfik tersebut dianggap sebagai muatan permanen karena tidak berubah dengan berubahnya PH. Kemudahan terjadinya substitusi isomorfik tergantung dari ukuran dan valensi ion-ion yang terlibat. Proses hanya terjadi antara ion-ion berukuran sebanding. Perbedaan dalam ion tidak lebih dari 15% dan valensi ion-ion yang saling berganti tidak berbeda lebih dari satu satuan (Paton, 1978) sebagaimana dikutip Kim. H. Tan (1991). Sebagai contoh seperti yang terlihat dalam Gambar 2.11. Dimensi Nisbi dari beberapa ion yang umum dijumpai dalam tanah (Kim. H. Tan, 1991) bahwa dimensi Na^{2+} dan Ca^{2+} hampir sama ukurannya sehingga dapat menggantikan satu sama lain dengan nisbi mudah, walaupun valensi Ca^{2+} lebih tinggi. Kalium

diharapkan tidak dapat menggantikan N^{2+} atau Ca^{2+} karena ukuran K^+ 1,4 kali lebih besar daripada ion Na^{2+} dan Ca^{2+} .



Gambar 2.11. Dimensi nisbi dari beberapa ion yang umum dijumpai dalam tanah (Kim H. Tan, 1991)

- Disosiasi gugus hidrosil yang terbuka. Keberadaan gugus -OH pada tepi kristal dapat juga mengakibatkan muatan negatif khususnya pada pH tinggi. Hidrogen dari hidroksil (OH) terurai sedikit dari permukaan lempung menjadi bermuatan negatif dari ion oksigen. Muatan negatif tipe ini disebut muatan berubah-ubah atau muatan tergantung pH. Sebaliknya proton (H^+) tidak hanya dapat terdisosiasi dari gugus -OH (hidroksil) yang terbuka tetapi dapat juga menyerap atau memperoleh proton, proses ini akan terjadi pada media yang sangat asam (pH rendah) sehingga dapat menghasilkan muatan positif pada permukaan lempung.

Reaksi untuk disosiasi proton:



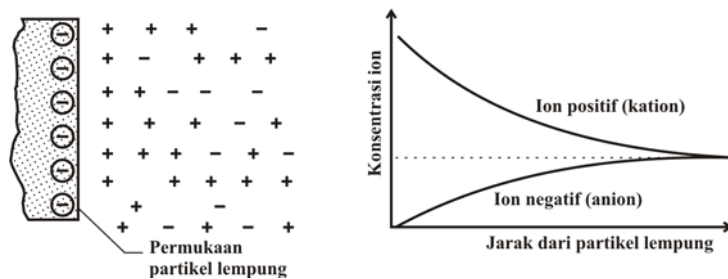
Pada mineral lempung kering, muatan negatif pada permukaan akan dinetralkan oleh kation-kation lain yang mengelilingi partikel tersebut secara *exchangeable cation* akibat adanya perbedaan kekuatan muatan dimungkinkan antar kation yang ada disekeliling partikel lempung bisa saling mendesak posisi atau bertukar. Kemampuan mendesak dari kation-kation dapat dilihat dari besarnya potensi mendesak sesuai urutan berikut:



Kation Li^+ tidak dapat mendesak kation lain yang berada dikirinya (Kim. H. Tan, 1982)

Lempung dalam suspensi dapat menarik kation-kation, ion-ion positif tersebut tidak teragih secara seragam dalam seluruh media dispersi, mereka ditahan pada atau

dekat permukaan lempung sebagian kation tersebut bebas untuk dipertukarkan dengan kation lain. Dengan demikian muatan negatif pada permukaan lempung ditutupi oleh sekumpulan ekuivalen dari ion lawan bermuatan positif dengan kerapatan terbesar dekat permukaan dan semakin berkurang kerapatannya bertambah jarak dari permukaan partikel. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.12. Menurut Yong dan Warkentin (1966) sebagaimana dikutip Das. Braja M. (1985) berpendapat bahwa tingkat kerapatan ion lawan dilapisan kedua merupakan fungsi jarak, semakin jauh jaraknya dari tepi permukaan partikel lempung semakin kecil tingkat kerapatan ion.



Gambar 2.12. Kation dan ion pada lapisan rangkap listrik di permukaan partikel lempung (Yong dan Warkentin, 1966)

Muatan negatif yang lebih besar dijumpai pada partikel-partikel yang mempunyai luasan spesifik yang lebih besar. Pada Tabel 2.2, rata-rata kerapatan muatan di kedua sisi permukaan partikel diberikan daftar rata-rata kerapatan muatan negatif pada kedua permukaan pada mineral-mineral lempung (Yong dan Warkentin, 1966 sebagaimana dikutip Das. Braja M, 1991).

Tabel 2.2. Rata-rata kerapatan muatan di kedua sisi permukaan partikel (Yong dan Warkentin, 1966)

Mineral lempung	Kerapatan muatan di kedua sisi permukaan partikel	
	(A ⁰² /muatan elektron)	
<i>Kaolinite</i>	25	
<i>Mika lempung dan Chlorite</i>	50	
<i>Montmorillonite</i>	100	
<i>Vermiculite</i>	75	

Muatan negatif pada permukaan partikel lempung beserta kumpulan ion-ion lawan yang bermuatan positif disebut lapisan rangkap listrik atau *diffuse double layer*. Lapisan pertama dari lapisan rangkap tersebut terbentuk dari muatan dari permukaan lempung (berupa muatan titik yang terlokasi) tetapi dianggap terbagi secara merata pada

permukaan lempung. Lapisan kedua berada dalam lapisan cairan yang berdekatan dengan permukaan lempung.

Teori lapisan rangkap Helm Holtz seperti yang dikutip Kim. H. Tan (1991), merupakan salah satu teori paling tua. Muatan negatif pada koloid dianggap terbagi merata pada permukaannya sedang muatan lawan total dalam lapisan kedua terkonsentrasi pada bidang sejajar dalam permukaan koloid pada jarak x .

Jika medium mempunyai tetapan dielektrik (D), maka potensial elektrokinetik adalah sama, dengan potensial total (T) yang dirumuskan sebagai berikut:

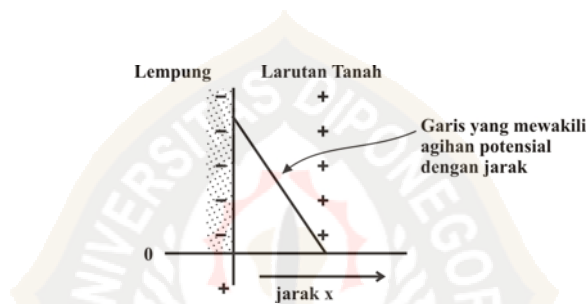
$$\psi = \frac{4\pi x}{d} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

ψ :Potensial elektromagnetik

D :Tetapan dielektrik

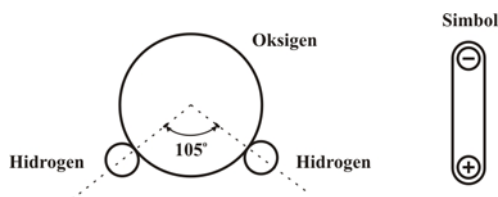
Teori lapisan rangkap Helm Holtz digambarkan sebagaimana pada Gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13. Lapisan rangkap Helm Holtz

Potensial elektrokimia adalah maksimum pada permukaan koloid dan menurun secara linier pada lokasi-lokasi dengan jarak x yang meningkat dari permukaan koloid didalam lapisan rangkap.

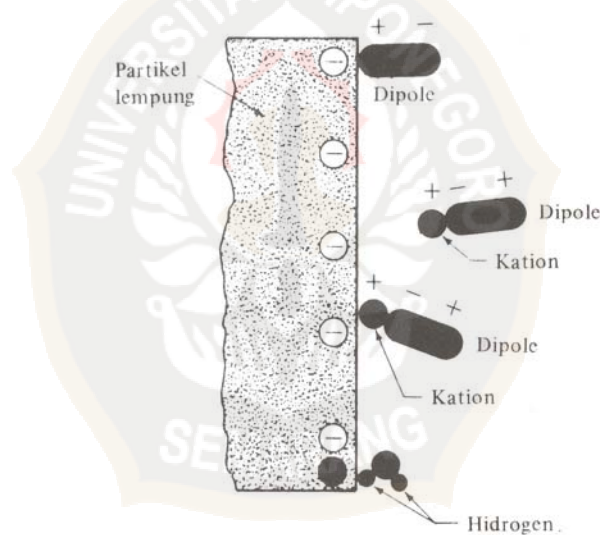
Molekul air merupakan molekul dipolar karena atom hydrogen tidak tersusun simetris disekitar atom oksigen, melainkan membentuk sudut ikatan 105° akibatnya molekul-molekul air berperilaku seperti batang-batang kecil yang mempunyai muatan positif di satu sisi dan muatan negative di sisi lain. Sudut dipolar air terlihat pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14. Sifat dipolar molekul air (Das Braja. M, 1985)

Interaksi antara molekul-molekul air dengan partikel lempung dapat melalui tiga proses. Pertama, kutub positif dipolar air akan saling tarik menarik dengan muatan negatif permukaan partikel lempung. Kedua, molekul air diikat oleh partikel lempung melalui ikatan hydrogen (hydrogen air ditarik oksigen atau hidroksil lain yang ada pada permukaan partikel lempung). Proses ketiga, penarikan molekul air oleh muatan negatif permukaan lempung secara berantai melalui kation yang menampung dalam larutan air. Faktor paling dominan adalah proses ikatan hydrogen.

Menurut Mitchell (1976) molekul air dekat permukaan akan memiliki sifat kelistrikan dan termodinamika yang berbeda dengan molekul air bebas yang sangat jauh dari daerah ikatan. Jumlah molekul air yang berinteraksi dengan permukaan lempung akan sangat dipengaruhi oleh jenis mineral yang ada yaitu pada nilai luasan permukaan spesifiknya (*specific surface*), seperti yang terlihat pada Gambar 2.15. Luas permukaan lempung merupakan faktor utama yang mempengaruhi besarnya molekul air yang ditarik untuk membentuk lapisan listrik rangkap (*Diffuse Double Layer*). Fenomena ini mengidentifikasi kemampuan mineral lempung menarik molekul air atau menunjukkan kapasitas perilaku plastis tanah lempung.



Gambar 2.15. Interaksi molekul dan air dengan partikel lempung (Das Braja. M, 1985)

Untuk faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan lapisan rangkap baur, menurut Verweg dan Overbeck (1946) seperti yang dikutip Kim. H. Tan (1991):

- Pengaruh dari konsentrasi elektrolit yang tinggi memberi penekanan atas lapisan rangkap. Jumlah kation meningkat berakibat turunya gradien konsentrasi dalam antar muka cairan antara permukaan partikel lempung dari fase cairan sekelilingnya.

Oleh karena itu kecenderungan kation untuk berbau menjauhi permukaan koloid menurun yang berakibat penurunan ketebalan lapisan rangkap.

- Faktor lain adalah valensi kation yang dapat dipertukarkan. Diperoleh bahwa kation-kation *monovalen* dalam posisi petukaran menghasilkan lapisan rangkap baur yang lebih tebal dibandingkan dengan kation *bivalen*. Gejala ini disebabkan oleh kecenderungan ion-ion untuk berbau menjauhi permukaan koloid dengan urutan: ion *monovalen* > ion *bivalen* > ion *trivalen*.

Kim. H. Tan (1991) membuat pengelompokan ketebalan lapisan rangkap baur berdasarkan konsentrasi dan valensi ion seperti dalam Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3. Pengaruh konsentrasi dan valensi terhadap ketebalan lapisan rangkap baur (Kim H. Tan,1991)

Konsentrasi elektrolit (mol/l)	Ketebalan lapisan rangkap baur (1/kcm)	
	Ion monovalen	ion divalen
1×10^{-5}	1×10^{-5}	$0,5 \times 10^{-5}$
1×10^{-3}	1×10^{-6}	$0,5 \times 10^{-6}$
1×10^{-1}	1×10^{-7}	$0,5 \times 10^{-7}$

2.5. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Menurut Chen (1975), cara-cara yang biasa digunakan untuk mengidentifikasi tanah ekspansif dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu:

- Identifikasi Mineralogi.
- Cara tidak langsung (*single index method*).
- Cara langsung.

2.5.1. Identifikasi Mineralogi

Analisa mineralogy sangat berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang susut tanah lempung. Identifikasi dilakukan dengan cara:

- Difraksi Sinar X (*X-Ray Diffraction*).
- Penyerapan terbilas (*Dye Absorption*).
- Penurunan Panas (*Differential Thermal Analysis*).
- Analisa Kimia (*Chemical Analysis*).
- *Electron Microscope Resolution*.

2.5.2. Cara Tidak Langsung

Hasil uji sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi berpotensi ekspansif atau tidak pada suatu contoh tanah. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas Atterberg, *linear shrinkage test* (uji susut linier), uji mengembang bebas dan uji kandungan koloid.

2.5.2.1. Atterberg Limit

Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji Atterberg. Besaran indeks plastisitas dapat digunakan sebagai indikasi awal bahwa *swelling* pada tanah lempung yang telah dipadatkan pada kadar air optimum metode AASTHO, setelah contoh direndam dengan 1 psi.

Chen (1975) berpendapat bahwa potensi mengembang tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga Chen membuat klasifikasi potensi pengembangan pada tanah lempung berdasarkan indeks plastisitas, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4. Hubungan potensial mengembang dengan indeks plastis (Chen, 1975)

Potensi mengembang	Indeks Plastis
Rendah	0 - 15
Sedang	10 - 35
Tinggi	20 - 55
Sangat tinggi	35 <

Seed at. Al (1962) membuat penyederhanaan hubungan antara potensi mengembang dengan indeks plastis sebagai berikut:

$$S = 60k.(PI)^{2,44} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

S: Potensi mengembang

K: Konstanta ($3,66 \times 10^{-5}$)

PI: Indeks plastisitas

2.5.2.2. Linear Shrinkage

Altmeyer (1955) sebagaimana dikutip Chen (1975), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai persentase susut linear dan persentase batas susut Atterberg, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.5. Klasifikasi potensi mengembang didasarkan pada Atteberg Limit

Batas susut Atterberg (%)	Susut linear (%)	Derajat mengembang
< 10	> 8	Kritis
10 - 12	5 - 8	Sedang
> 12	0 - 8	Tidak kritis

2.5.2.3. Free Swell

Uji *Free Swell* diperkenalkan oleh Holtz (1956) sebagaimana oleh dikutip Chen (1975), yaitu dengan cara memasukkan tanah lempung kering yang telah diketahui volumenya kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur yang diisi air tanpa pembebanan. Pengamatan dilakukan setelah lempung mengendap.

Perbedaan tinggi air atau volume awal pengamatan dengan akhir pengamatan menunjukkan perubahan volume material tanah. Persentase *free swell* adalah perbandingan perubahan volume tanah dengan volume tanah awal pengamatan.

2.5.2.4. Coloid Content

Coloid Content merupakan salah satu indikator mengembang tanah lempung ekspansif Seed et. al (1962) melakukan serangkaian eksperimen dari sejumlah jenis tanah lempung, diperoleh hubungan potensial mengembang dengan kandungan koloid yang ada, pada mineral lempung seperti yang terlihat pada Gambar 2.16.

Oleh Seed et. al (1962) dari grafik hubungan potensial mengembang dan persentase kandungan koloid dibuat hubungan dalam bentuk analisis sebagai berikut:

$$S = k.C^x \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

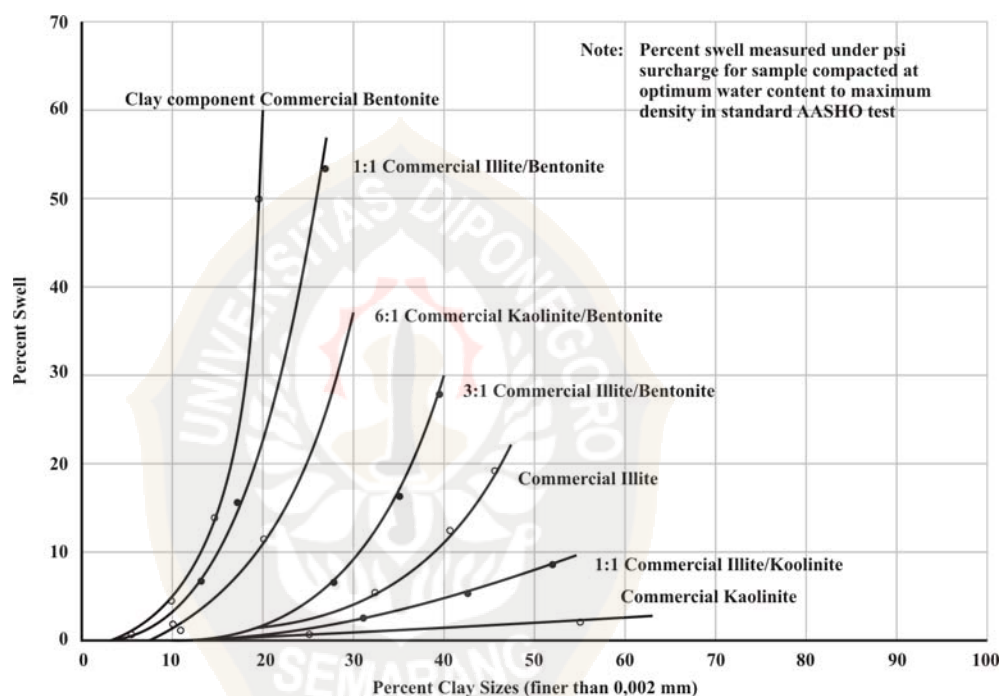
S: Potensi mengembang

C: Persentase butiran lempung (<0,002mm)

x: Eksponensial yang tergantung dari jenis lempung

k: Konstanta atau koefisien yang menunjukkan jenis lempung

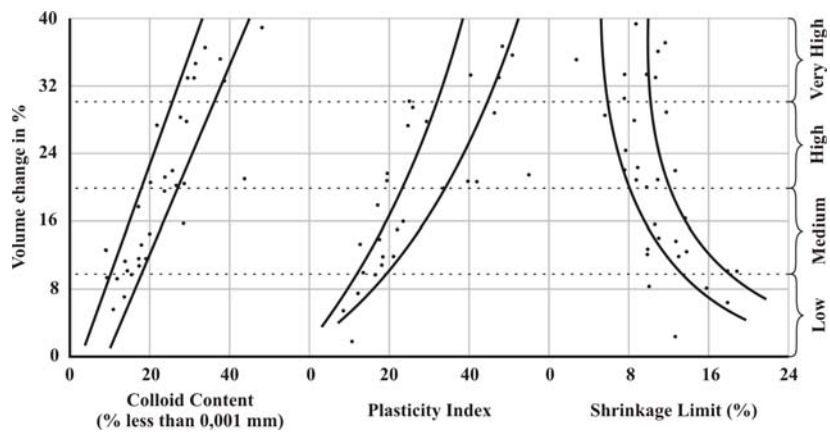
Gambar 2.16 hubungan antara persentase mengembang dengan persentase butiran lempung pada sejumlah tanah lempung yang diambil pada kondisi kepadatan kering maksimum standar AASTHO dan dibawah tekanan 1 psi.



Gambar 2.16. Hubungan potensi mengembang dengan kadar lempung (Seed, Woodward dan Lundberg, 1962)

2.5.2.5. Metode Klasifikasi (Metode USBR)

Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana dikutip oleh Chen (1975), mengembangkan metode USBR berdasarkan penelitian terhadap sejumlah nilai indeks tanah secara simultan. Gambar 2.17 di bawah ini menunjukkan hubungan antara sejumlah nilai indeks dimaksud dengan potensi mengembangnya.



Gambar 2.17. Hubungan persentase mengembang dengan kandungan koloid, PI dan batas susut (holtz dan Gibbs, 1959)

Dari kurva diatas Holtz mengajukan kriteria identifikasi sebagaimana dalam Tabel (2.6).

Tabel 2.6. Kriteria identifikasi tanah lempung ekspansif USBR (holtz dan Gibbs, 1959)

Colloid Content (<0,001mm) (%)	Indeks plastisitas (%)	Batas susut (%)	Persentase pengembangan (%)	Derajat pengembangan
> 28	> 35	< 11	> 30	Sangat tinggi
20 - 13	25 - 41	7 - 11	20 - 30	Tinggi
13 - 23	15 - 28	10 - 16	10 - 30	Sedang
< 15	<18	>15	< 10	Rendah

2.5.2.6. Activity Method

Skemion (1953), mendefinisikan sebuah parameter yang disebut aktivitas dalam rumus sebagai berikut:

$$Activity(A) = \frac{PI}{C - 10} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

PI: Indeks plastisitas

C: Persentase lempung lolos saringan 0,002mm

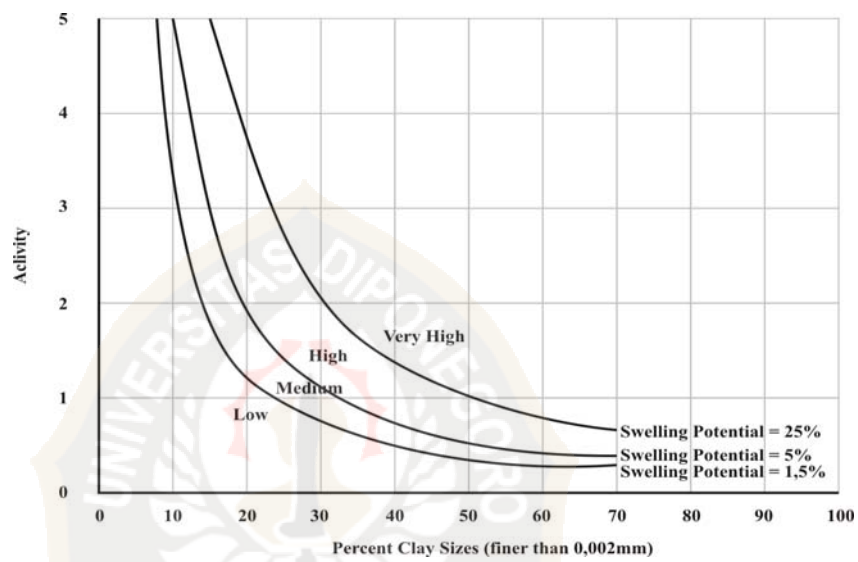
Dari rumus tersebut Skemton membuat kategori tanah dalam tiga golongan, yaitu:

- A<0,75 tidak aktif
- 0,75<A<1,25 normal
- A>1,25 aktif

Steed et. Al (1962) mengelompokkan besaran aktivitas berdasarkan jenis mineral seperti yang terlihat pada Tabel 2.7 di bawah ini.

Tabel 2.7. Hubungan aktivitas dengan mineral (Seed et. Al, 1962)

Mineral	Aktivitas
<i>Kaolinite</i>	0,33 - 0,46
<i>Illite</i>	0,99
<i>Montmorillonite (Ca)</i>	1,5
<i>Montmorillonite (Na)</i>	7,2



Gambar 2.18. Grafik klasifikasi potensi mengembang (Seed et. Al, 1962)

Sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.18, Seed et. al (1962) mengembangkan grafik hubungan nilai aktifitas dan persentase butir tanah lempung yang lolos saringan 0,002mm yang diperoleh dari hasil pengamatan sejumlah tanah lempung *remolded* yang berbeda-beda, yaitu: *Bentonite*, *Illite*, *Kaolinit* dan pasir halus dimana contoh tanah-tanah tersebut dipadatkan 100% pada kadar air optimumnya dan menerima beban Ipsi. Rumus Seed et. al (1962) dalam bentuk analitis adalah sebagai berikut:

$$Activity(A) = \frac{PI}{C - n} \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

PI: Indeks plastisitas

C: persentase lempung lolos saringan 0,002mm

N: berharga 5 atau 10 (n tanah asli=5, sedangkan n remolded =10)

2.5.3. Metode Pengukuran Langsung

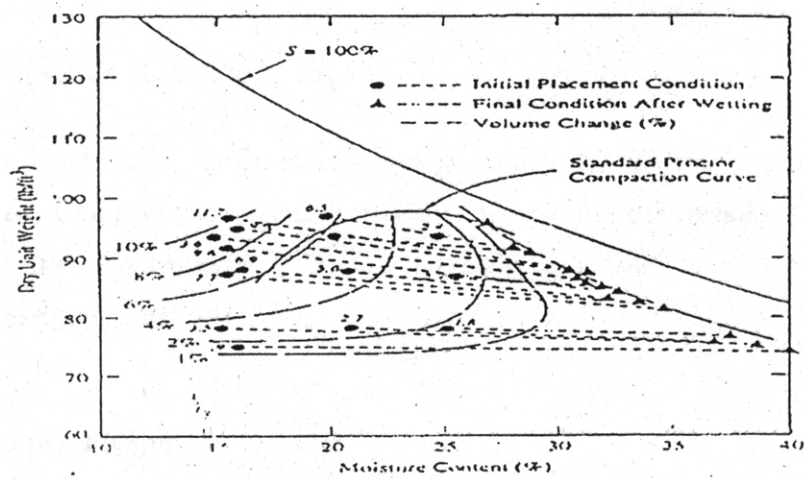
Metode pengukuran terbaik adalah dengan pengukuran langsung yaitu suatu cara untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Contoh tanah yang berbentuk silinder tipis diletakkan dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan pori pada sisi atas dan bawahnya yang selanjutnya diberi beban sesuai dengan beban yang diinginkan. Besarnya pengembangan contoh tanah dibaca beberapa saat setelah tanah dibasahi dengan air. Besarnya pengembangan adalah pengembangan tanah dibagi dengan tebal awal contoh tanah. Adapun cara pengukuran tekanan pengembangan ada dua cara yang umum digunakan.

Cara pertama, pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ketebal semula.

Cara kedua, contoh tanah direndam dalam air dengan mempertahankan volume atau mencegah terjadinya pengembangan dengan cara menambah beban diatasnya setiap saat. Metode ini sering juga disebut *constan volume method*.

2.6. Faktor Berpengaruh dalam Proses Mengembang

Hubungan yang terlebih dulu disampaikan oleh Holtz-Gibbs (1968) sebagaimana, dikutip oleh Chen (1975), yaitu dalam bentuk grafik hubungan potensi mengembang dengan kepadatan dan kadar air, seperti terlihat dalam Gambar 2.19 di bawah ini.



Gambar 2.19. Hubungan potensi mengembang dengan kadar air dan kepadatan (Holtz dan Gibbs, 1959)

Menurut Chen (1975) faktor yang berpengaruh dalam proses mengembang tanah lempung ekspansif dapat dilihat dari dua kondisi proses, yaitu kondisi di laboratorium dan kondisi di lapangan (*in situ*). Proses mengembang di laboratorium merupakan penyederhanaan pengamatan terhadap faktor berpengaruh dalam proses mengembang di lapangan. Faktor-faktor tersebut adalah kadar mineral lempung, montmorillinite, kepadatan awal, waktu pembasahan, tebal contoh tanah, tingkat kejenuhan, kadar air awal dan tekanan akibat beban luar. Empat faktor pertama memiliki kecenderungan potensi mengembang bertambah dengan meningkatnya nilai faktor tersebut. Sedangkan tiga faktor terakhir memiliki kecenderungan yang sebaliknya. Selanjutnya oleh Chen (1975) dijelaskan bahwa proses mengembang yang terjadi di lapangan (*in situ*) jauh lebih rumit prosesnya daripada yang diamati di laboratorium. Sejumlah faktor tambahan lain yang sangat berpengaruh terhadap proses mengembang adalah:

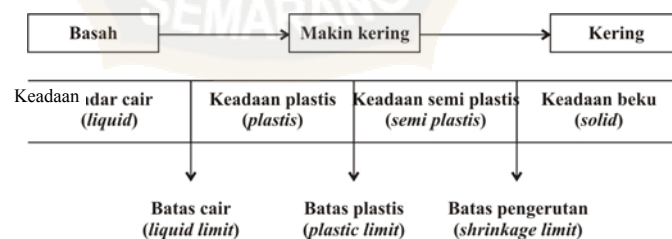
- Iklim (*climate*) meliputi efek presipitasi, evaporasi dan transpirasi serta kelembaban pada tanah.
- Profil tanah (*soil profile*), ketebalan tanah ekspansif dan posisinya pada profil tanah akan sangat mempengaruhi proses mengembang tanah setempat.
- Air tanah (*ground water*), lapisan tanah ekspansif yang berada di daerah fluktuasi pergerakan air tanah akan sangat mempengaruhi proses mengembang di lokasi tanah setempat. Tetapi untuk lapisan tanah ekspansif yang berada dibawah daerah fluktuasi air tanah tersebut tidak akan mempengaruhi proses mengembang tanah ekspansif tersebut.
- Drainase

Selain faktor diatas Iyer Balu (1987) secara khusus menyoroti proses pengukuran sebagai salah satu faktor yang sangat berpengaruh dalam pengamatan perilaku mengembang tanah lempung ekspansif. Menurutnya, akibat beragamnya metode pengukuran potensi mengembang yang ada hingga tahun 1985, interpretasi terhadap proses mengembang akan berbeda baik untuk perubahan volume maupun untuk tekanan mengembang. Untuk lebih rinci Iyer Balu (1987) mengelompokkan faktor-faktor yang berpengaruh pada proses mengembang dalam tiga kategori:

- Faktor komposisi (*compositional factors*) meliputi: jenis lempung, kadar lempung dan komposisi air pori awal.
- Faktor lingkungan (*environmental factors*) meliputi: kadar air awal, kepadatan awal, tingkat kejenuhan awal, struktur tanah awal, ketersediaan dan komposisi air pengembang serta temperatur.
- Faktor prosedur (*procedural factors*) meliputi: ukuran dan bentuk contoh tanah, kadar gangguan terhadap contoh tanah, metode pengukuran tekanan mengembang dan metode pengukuran persentase mengembang.

2.7. Batas-Batas Konsistensi Tanah

Dalam masalah tanah, penting bagi kita untuk mengetahui pengaruh kadar air terhadap sifat-sifat mekanis tanah, misalnya kita campurkan air terhadap suatu sampel tanah berbutir halus (lanau, lempung atau lempung berlumpur) sehingga mencapai keadaan cair. Bila campuran itu dikeringkan sedikit demi sedikit maka sampel tanah itu akan melalui beberapa keadaan tertentu dari cair sampai keadaan beku (padat). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21. Batas-batas Atterberg Limit

2.7.1. Kegunaan Batas-Batas Konsistensi Tanah

Batas cair dan batas plastis tidak secara langsung memberi angka-angka yang dapat dipakai dalam perhitungan desain. Yang kita peroleh dari percobaan Atterberg limit ini adalah gambaran secara garis besar akan sifat-sifat tanah yang bersangkutan. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat-sifat teknis yang buruk yaitu kekuatannya rendah, kompresibilitasnya tinggi dan sulit dalam pemadatannya. Untuk macam-macam tanah tertentu Atterberg limit dapat dihubungkan secara empiris dengan sifat-sifat lainnya, misalnya dengan kekuatan geser atau compression index dan sebagainya.

2.7.2. Batas Cair

Batas cair (*liquid limit*) adalah kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis (yaitu batas atas dan daerah plastis). Cara menentukannya adalah dengan menggunakan alat Cassagrande. Tanah yang telah dicampur dengan air ditaruh di dalam mangkuk Cassagrande dan di dalamnya dibuat alur dengan menggunakan alat spatel (*grooving tool*). Bentuk alur sebelum dan sesudah percobaan tampak berbeda. Engkol dibuka sehingga mangkuk dinaikan dan dijatuhkan pada dasar dan banyaknya pukulan dihitung sampai kedua tepi alur tersebut berhimpit. Biasanya percobaan ini dilakukan terhadap beberapa contoh tanah dengan kadar air berbeda dan banyaknya pukulan dihitung untuk masing-masing kadar air. Dengan demikian dapat dibuat grafik kadar air terhadap banyaknya pukulan. Dari grafik ini dapat dibaca kadar air pada pukulan tertentu.

Persamaan empiris untuk menentukan batas cair yaitu :

$$LL = \omega N (N/25) \tan \beta$$

Dimana :

N : Jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk menutup goresan selebar 0,5" pada dasar contoh tanah yang diletakkan dalam mangkok kuningan dari alat uji batas cair

Ω : Kadar air dimana untuk menutup dasar goresan dari contoh tanah dibutuhkan pukulan sebanyak N

Tan β : 0,121

2.7.3. Batas Plastis

Batas plastis (*plastic limit*) adalah kadar air pada batas bawah daerah plastis, kadar air ini ditentukan dengan menggiling tanah pada plat kaca hingga diameter dari batang yang dibentuk mencapai 1/8 inci. Bilamana tanah mulai pecah pada saat diameternya 1/8 inci maka kadar air tanah itu adalah batas plastis.

2.7.4. Batas Susut

Batas menyusut menunjukkan kadar air atau batas di mana tanah dalam keadaan jenuh yang sudah kering tidak akan menyusut lagi, meskipun dikeringkan terus. Percobaan batas susut (*shrinkage limit*) ini bertujuan untuk mengetahui batas menyusut tanah.

$$SL = M - \left(\frac{(v - v_o) \gamma_w}{w_o} \cdot 100\% \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

- SL: Batas menyusut
- M: Kadar air (%)
- v : Isi tanah basah (cm³)
- v_o: Isi tanah kering (cm³)
- w_o: Berat tanah kering (gram)

2.7.5. Indeks Plastis

Selisih antara batas cair dan batas plastis ialah daerah dimana tanah tersebut adalah dalam keadaan plastis disebut (*plasticity index*).

$$PI = LL - PL \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan:

- PI: Indeks plastisitas
- LL: Batas cair
- PL: Batas plastis

2.8. Parameter Kuat Geser Tanah C dan ϕ

Seperti material teknik lainnya tanah mengalami penyusutan volume jika menderita tekanan merata di sekelilingnya. Apabila menerima tegangan geser, tanah akan mengalami distorsi dan apabila distorsi yang terjadi cukup besar maka partikel-

partikelnya akan terpeleset satu sama lain dan tanah akan dikatakan gagal dalam geser. Dalam arah vertikal semua jenis tanah daya dukung terhadap tegangan tarik sangat kecil atau bahkan tidak mampu sama sekali, unsur-unsur tarikan jarang sekali terjadi dalam geser.

Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisa-analisa daya dukung tanah (*bearing capacity*), tegangan tanah terhadap dinding penahan (*earth pressure*) dan kestabilan lereng (*slope stability*).

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar seperti ini, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh:

- Kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan pematatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada geserannya.
- Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan vertikal pada bidang gesernya.

Oleh karena itu kekuatan geser tanah dapat diukur dengan rumus:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan:

τ : Kekuatan geser tanah

σ : Tegangan normal efektif

u : Tegangan air pori

c' : Kohesi tanah efektif

ϕ : Sudut perlawanan geser efektif

Ada beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, antara lain:

- Pengujian geser langsung (*direct shear test*)
- Pengujian triaksial (*triaxial test*)
- Pengujian tekan bebas (*unconfined compression test*)
- Pengujian baling-baling (*vane shear test*)

Namun dalam penelitian ini yang digunakan untuk menentukan kuat geser tanah adalah pengujian geser langsung (*direct shear test*) dan pengujian tekan bebas (*unconfined compression test*). Pengujian kuat geser ini dilakukan untuk mendapatkan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ).

2.8.1. Teori Pengujian Geser Langsung

Pengujian ini adalah pengujian tertua dalam bentuk yang paling sederhana, untuk suatu susunan alat uji geser. Alat uji geser tersebut terdiri dari sebuah kotak logam berisi sampel tanah yang akan diuji. Sampel tanah tersebut berbentuk penampang bujur sangkar atau lingkaran. Ukuran sampel tanah yang biasa digunakan adalah sekitar 3inci² - 4inci² (1935mm² - 2580,64mm²) untuk luas penampangnya dan 1 inci (25,4mm) untuk tingginya. Kotak tersebut terbagi dua sama sisi dalam arah horisontal. Gaya normal dari sampel tanah didapat dengan menaruh suatu beban mati di atas sampel tanah tersebut. Beban mati tadi dapat menyebabkan tekanan pada sampel tanah sampai 150psi (1034,2kN/m²). Gaya geser diberikan dengan mendorong sisi kotak sebelah atas sampai terjadi keruntuhan geser pada tanah. Pada pengujian tertentu, tegangan normal dapat dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_N = \frac{N}{A} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

- σ_N : Tegangan normal
- N : Gaya normal
- A : Luas penampang lintang sampel

Tegangan geser yang melawan pergerakan geser dapat dihitung sebagai berikut:

$$\sigma_D = \frac{D}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan:

- σ_D : Tegangan geser
- N : Gaya geser yang melawan gerakan
- A : Luas penampang lintang sampel

Dua macam jenis tegangan geser:

- Tegangan geser terkendali, dimana penambahan gaya geser dibuat konstan dan diatur.
- Tegangan terkendali, dimana kecepatan gesernya yang diatur.

Uji geser drained pada pasir dan tanah lempung:

- Pasir, harga sudut geser (ϕ) yang diperoleh dari uji geser langsung pada pasir jenuh air sama dengan sudut geser tanah pasir dalam keadaan kering.
- Lempung, harga koefisien rembesan tanah lempung sangat kecil bila dibandingkan dengan koefisien rembesan tanah pasir.

Bila suatu beban diberikan pada sampel tanah lempung, diperlukan waktu yang cukup lama agar tanah tersebut terkonsolidasi sepenuhnya. Pada Gambar 2.22 berikut ini diperlihatkan gambar lingkaran Mohr pada tanah lempung terkonsolidasi normal. Persamaan untuk harga rata-rata garis yang menghubungkan titik-titik dalam eksperimen adalah:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \dots\dots\dots (2.12)$$

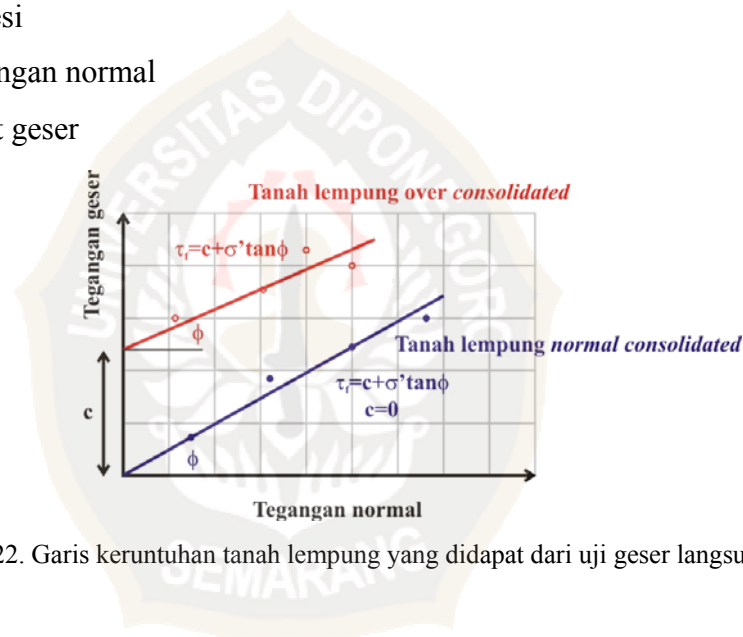
Keterangan:

τ_f : Tegangan geser

c : Kohesi

σ' : Tegangan normal

ϕ : Sudut geser



Gambar 2.22. Garis keruntuhan tanah lempung yang didapat dari uji geser langsung kondisi drained

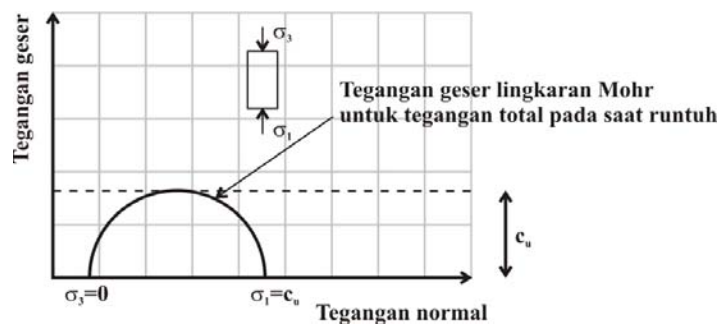
2.8.2. Uji Tekan Bebas

Pengujian uji tekan bebas (*unconfined compression test*) ini adalah bentuk khusus dari uji UU yang umum dilakukan terhadap sampel tanah lempung. Pada uji ini, tegangan penyekap σ_3 adalah nol. Tegangan aksial dilakukan terhadap benda uji secara relatif cepat sampai mencapai keruntuhan. Pada titik keruntuhan, harga tegangan total utama kecil (*Total minor principal stress*) adalah nol dan tegangan utama besar adalah σ_1 seperti terlihat pada Gambar 2.23 di bawah ini.

Karena kekuatan geser kondisi air termampatkan dari tanah tidak tergantung pada tegangan penyekap, maka:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \dots \dots \dots (2.13)$$

Sensitivity : c_u / nilai tegangan max



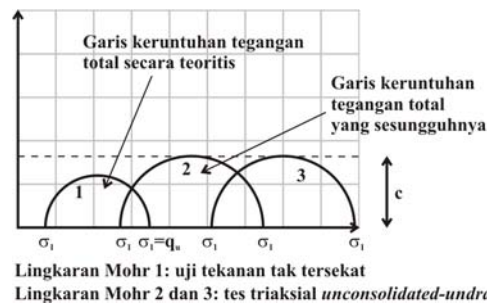
Gambar 2.23. Keruntuhan geser kondisi air termampatkan

q_u di atas sebagai kekuatan tanah kondisi tak tersekap. Pada Tabel 2.8 berikut diberi perkiraan harga-harga konsistensi tanah lempung berdasarkan harga kekuatan tekanan tak tersekap.

Tabel 2.8. Harga konsistensi tanah berdasarkan harga kekuatan tanah

Konsistensi	q_u	
	(ton/ft ²)	(kN/m ²)
Sangat lunak	0 - 0,25	0 - 23,94
Lunak	0,25 - 0,50	24 - 48
Menengah	0,50 - 1,48	48,1 - 96
Kaku	1,00 - 2,96	96,1 - 192
Sangat Kaku	2,00 - 4,192	192,1 - 383
Keras	> 4	>383

Secara teoritis, untuk tanah lempung jenuh air dan tanah lempung termampatkan tak terkendali (*unconsolidated-undrained*) akan menghasilkan harga c_u yang sama. Tetapi pada kenyataannya pengujian *unconfined compression* pada tanah lempung jenuh air biasanya menghasilkan harga c_u yang lebih kecil dari harga yang didapat pengujian *unconsolidated-undrained*. Dapat dilihat pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24. Perbandingan uji tekan tak tersekat *unconfined compression* dan *unconsolidated undrained* dari tanah lempung jenuh air

2.9. Pemadatan Tanah

Pemadatan adalah suatu proses berkurangnya volume tanah akibat adanya energi mekanis, pengaruh kadar air dan gradasi butiran. Tingkat pemadatan diukur dari berat volume kering tanah yang dipadatkan, air dalam pori tanah berfungsi sebagai unsur pembasah (pelumas) tanah, sehingga butiran tanah tersebut lebih mudah bergerak atau bergeser satu sama lain dan kedudukan yang lebih padat atau rapat. Dalam suatu usaha pemadatan, berat volume kering tanah akan meningkat seiring dengan kenaikan kadar air tanah tetapi pada kadar air tanah tertentu, penambahan air justru cenderung menurunkan berat volume kering tanah. Hal ini disebabkan karena air tersebut kemudian akan menempati ruang-ruang pori dalam tanah sebetulnya dapat ditempati oleh partikel-partikel tanah. Kadar air yang memberikan nilai berat volume kering maksimal (MDD) disebut kadar air optimal (OMC).

Pemadatan juga dapat mengurangi besarnya penurunan tanah yang tidak diinginkan dan meningkatkan kemantapan tanah di atasnya atau dengan kata lain maksud dari pemadatan adalah :

- Mempertinggi kuat geser tanah
- Mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas)
- Mengurangi permeabilitas
- Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air

Cara mekanis yang dipakai untuk memadatkan tanah boleh bermacam-macam. Di lapangan biasanya dipakai cara menggilas, sedangkan di laboratorium dipakai cara memukul. Untuk setiap daya pemadatan tertentu, kepadatan yang tercapai tergantung kepada banyaknya air di dalam tanah tersebut. Tujuan pemadatan

adalah untuk memperbaiki sifat-sifat teknis massa tanah. Beberapa keuntungan yang didapatkan dengan adanya pemadatan ini adalah :

- Berkurangnya penurunan permukaan tanah yaitu gerakan vertikal di dalam massa tanah itu sendiri akibat berkurangnya angka pori.
- Bertambahnya penyusutan, berkurangnya volume akibat berkurangnya kadar air dan nilai patokan pada saat pengeringan.
- Bertambahnya kekuatan tanah.

Usaha pemadatan dan energi pemadatan (*compaction effort and energy*) adalah tolok ukur energi mekanis yang dikerjakan terhadap suatu massa tanah. Di lapangan, usaha pemadatan ini dihubungkan dengan jumlah gilasan dari mesin gilas, jumlah jatuhan dari benda-benda yang dijatuhkan dan hal-hal yang serupa untuk suatu volume tanah tertentu. Energi pemadatan merupakan bagian dari spesifikasi untuk pekerjaan tanah karena sangat sukar untuk diukur. Biasanya yang sering diisyaratkan adalah jenis peralatan yang digunakan, jumlah gilasan, atau yang paling sering adalah hasil akhir berupa berat isi kering dll.

Pada pembuatan timbunan tanah untuk jalan raya, dam tanah dan banyak struktur teknik lainnya, tanah yang lepas (renggang) haruslah dipadatkan untuk meningkatkan berat volumenya. Pemadatan tersebut berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanah, sehingga dengan demikian meningkatkan daya dukung pondasi di atasnya.

2.9.1. Uji Standar Proctor

Pada uji Proctor, tanah dipadatkan dalam sebuah cetakan silinder bervolume $1/30 \text{ ft}^3$ ($=943,3 \text{ cm}^3$). Diameter cetakan tersebut adalah 4 in. ($=101,6 \text{ mm}$). Selama percobaan di laboratorium, cetakan itu diklem pada sebuah pelat dasar dan di atasnya diberi perpanjangan (juga berbentuk silinder). Tanah dicampur air dengan kadar yang berbeda-beda dan kemudian dipadatkan dengan menggunakan penumbuk khusus. Pemadatan tanah tersebut dilakukan dalam 3 (tiga) lapisan (dengan tebal lapisan kira-kira 1,0 in.) dan jumlah tumbukan adalah 25 x setiap lapisan. Berat penumbuk adalah 5,5 lb (massa = 2,5 kg) dan tinggi jatuh sebesar 12 in. ($=304,8 \text{ mm}$), Untuk setiap percobaan, berat volume basah γ dari tanah yang dipadatkan tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\gamma = W / V_{(m)} \dots \dots \dots (2.14)$$

di mana:

W = berat tanah yang dipadatkan di dalam cetakan

V_(m) = volume γ cetakan (= 1/30 ft³ = 943, 3 cm³).

Juga pada setiap percobaan besarnya kadar air dalam tanah yang dipadatkan tersebut dapat ditentukan di laboratorium. Bila kadar air tersebut diketahui, berat volume kering γ_d dari tanah tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{\frac{1 + w \%}{100}} \dots \dots \dots (2.15)$$

di mana w(%) = persentase kadar air.

Harga berat volume kering dari Persamaan tersebut dapat digambarkan terhadap kadar air untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum. Untuk pengujian pemadatan tanah di laboratorium dilakukan dengan test Proctor. Dalam hal ini Proctor mendefinisikan empat variabel pemadatan tanah yaitu :

- Usaha pemadatan atau energi pemadatan
- Jenis tanah
- Kadar air
- Berat isi kering (γ_d)

Untuk suatu kadar air tertentu berat volume kering maksimum secara teoritis didapat bila pada pori-pori tanah sudah tidak ada udaranya lagi, yaitu pada saat di mana derajat kejenuhan tanah sama dengan 100%. Jadi, berat volume kering maksimum (teoritis) pada suatu kadar air tertentu dengan kondisi "zero air voids" (pori-pori tanah tidak mengandung udara sama sekali) dapat ditulis sebagai:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \dots \dots \dots (2.16)$$

di mana:

γ_{zav} = berat volume pada kondisi zero air voids

γ_w = berat volume air

e = angka pori

G_s = berat spesifik butiran padat tanah

2.9.2. Uji Modified Proctor

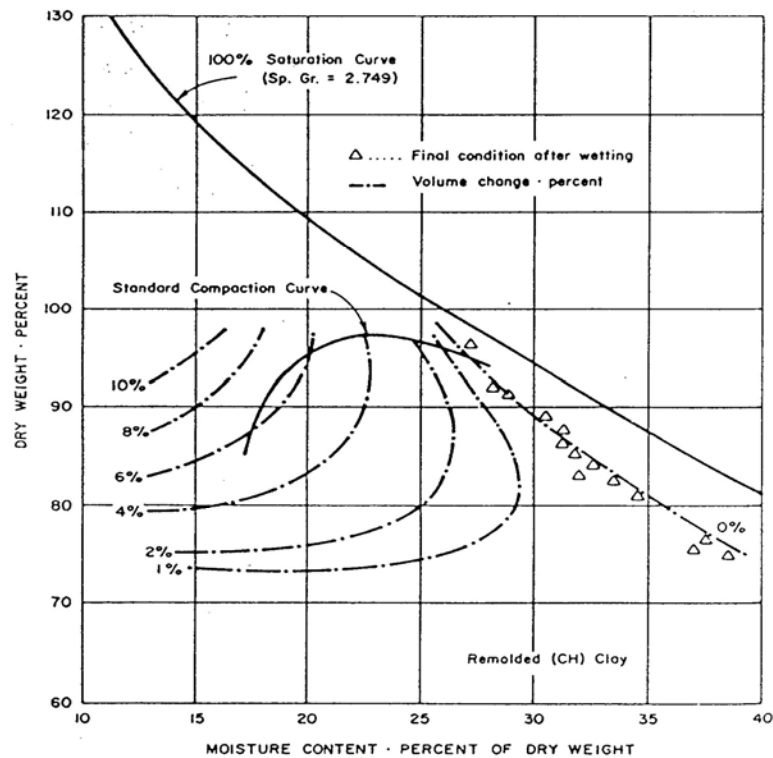
Dengan berkembangnya alat-alat penggilas berat yang digunakan pada pemadatan dilapangan uji Proctor standar harus dimodifikasi untuk dapat lebih mewakili kondisi lapangan. Uji *Proctor Dimodifikasi* (ASTM Test Designation a1S57 dan AASHTO Test Designation T-180). Untuk pelaksanaan uji Proctor dimodifikasi ini, dipakai cetakan yang sama dengan volume $1/30 \text{ ft}^3$ (944 cm^3) sebagaimana pada uji Proctor standar. Tetapi tanah dipadatkan dalam lima lapisan dengan menggunakan penumbuk seberat 10 lb (massa = 4,54 kg). Tinggi jatuh penumbuk adalah 18 in. (457,2 mm). Jumlah tumbukan per lapisan adalah tetap yaitu 25 kali sebagaimana pada Proctor standar. Energi pemadatan yang dilakukan dalam uji dimodifikasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$E = \frac{(5 \text{ lapisan})(25 \text{ tumbukan/lapisan}) (10\text{lb})(1,5 \text{ ft/jatuhan})}{(1/30 \text{ ft}^3)}$$
$$= 56.250 \text{ ft} - \text{lb/ ft}^3 \approx 2693,3 \text{ kJ/ m}^3 \dots\dots\dots (2.17)$$

Karena energi pemadatannya lebih besar, uji Proctor dimodifikasi juga menghasilkan suatu harga berat volume kering maksimum yang lebih besar. Peningkatan berat volume kering maksimum ini disertai dengan penurunan kadar air optimum

2.10. Kembang Susut Tanah

Menurut Chen (1975) kembang susut tanah didefinisikan sebagai peristiwa pengembangan (*swell*) karena meresapnya air ke pori-pori tanah menggantikan udara akibat penambahan beban. Rangkaian pengujian kembang susut tanah ini menggunakan satu set alat *consolidometer*. Pengujian ini mempunyai tujuan untuk mengetahui seberapa besar potensial mengembang dan tekanan (*pressure*) apabila tanah dibebani.



PROSENTASE KONDISI VARIASI PEMBEBANAN

Menurut Chen (1975) faktor yang mempengaruhi hasil dalam pengujian kembang susut pada tanah yaitu:

1. Berat isi udara. Dalam pengujian tanah tidak terganggu sebaiknya dipilih sampel dengan berat isi udara besar, biasanya pengujian menggunakan sampel tanah yang kering. Banyaknya pengujian sangat mempengaruhi untuk mengetahui keadaan pada sampel yang akan diuji. Berat isi kering udara harus dikontrol untuk mendapatkan besarnya volume pada kondisi tanah, semakin banyak berat isi udara maka serapan airnya juga semakin banyak.
2. Berat kepadatan kering. Faktor pertama yang mempengaruhi karakteristik kembang susut adalah berat kepadatan kering. Pada pengujian kembang susut dapat mengambil tingkat kepadatan tanah yang dapat diambil dari kandungan udara dan kepadatan tanah yang kering. Pada kembang susut dengan kepadatan yang kering maka akan menghasilkan hasil void yang rendah.
3. Penambahan tekanan udara. Beban tambahan yang pada tekanan antara 0,35 – 1 psf dapat digunakan untuk pengujian kembang susut. Pada beban dengan nilai tambahan yang besar maka akan menghasilkan nilai kembang susut kecil. Pengujian kembang

susut dapat berpengaruh untuk perubahan tekanan sehingga tekanan dapat berubah, misalkan untuk pondasi menggunakan tekanan kira-kira 1 psf.

4. Waktu kembang susut. Waktu yang dibutuhkan tanah untuk mencapai kembang susut dengan mengubah bentuk dasar dari kepadatan awal dan tebal dari contoh untuk memperoleh hasil tersebut biasanya dibutuhkan waktu 24 jam, untuk memperoleh 95% dari total kembang susut yang ada, pada waktu yang sama untuk tanah yang tidak terganggu dengan kepadatan tinggi pada tanah lempung bisa beberapa hari dalam 1 minggu sebelum penjenahan total dapat tercapai. Untuk perubahan kadar air awal harus sama, kebutuhan minimum waktu kembang susut adalah 6 jam untuk memperoleh hasil.
5. Ukuran dan ketebalan. Ketebalan sampel mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kejenuhan total, untuk mempecepat waktu pengetesan ketebalan sampel dikurangi 1 inch dari tebal contoh aslinya. Pada waktu yang sama diambil potongan dari sampel tanah yang tidak terganggu dengan tebal yang tipis bisa menunjukkan gangguan permukaan yang mempunyai pengaruh pada partikel butiran dan lapisan tanah. Pada percobaan tebal contoh tanah sangat mempengaruhi untuk mengetahui lamanya waktu yang dibutuhkan.

2.10.1. Pengujian Potensi Mengembang

Pemeriksaan ini digunakan untuk menentukan nilai swell atau kembang susut akibat beban vertikal. Hal ini terjadi akibat air yang meresap ke pori-pori mengisi rongga-rongga udara sehingga terjadi perubahan isi dari dalam pori tanah yang diakibatkan adanya perubahan tekanan vertikal yang bekerja pada tanah tersebut.

Tanah lempung yang banyak mengandung mineral *montmorillonite* berpotensi untuk mengembang dan umumnya di uji dengan metode ini. Besarnya prosentase mengembang dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Persen swell} = \left[\frac{((0,25 * 10) - X)}{174} \right] * 100 \dots\dots\dots(2.18.)$$

dimana :

x = besarnya nilai pembacaan dial

2.10.2. Pengujian Tekanan Mengembang

Pengujian tekanan mengembang merupakan lanjutan dari uji prosentase mengembang setelah pengembangan maksimum. Selanjutnya diberi tekanan bertahap hingga kembali keangka pori awal (e_0). Pembacaan dial dilakukan pada setiap masing-masing beban setelah pembebanan berlangsung selama 24 jam. Besar beban-beban tersebut adalah minimal kelipatan dari beban *overburden*.

$$e = \left(\frac{V_v}{V_s} \right) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$V_s = \left(\frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w} \right)$$

$$V_v = V - V_s$$

Keterangan :

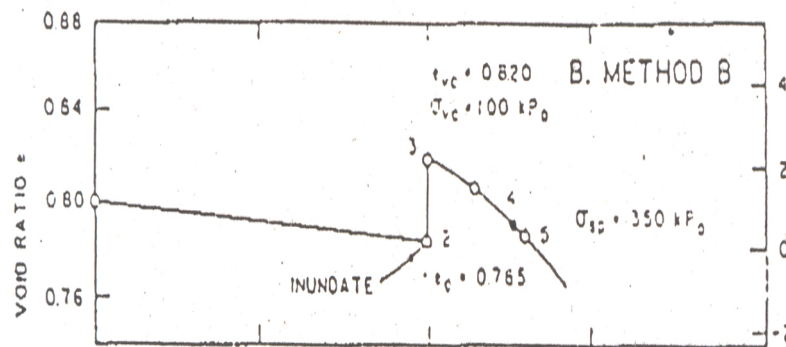
- e : angka pori
- V_v : volume pori
- V_s : volume butiran tanah
- W_s : berat butiran tanah
- G_s : berat jenis dari butiran padat
- γ_w : berat volume air

Ada 3 pilihan metode pengamatan menurut ASTM-D-4546-90 berkaitan dengan pengujian tekanan mengembang yaitu ASTM-D-4546-90 metode A, ASTM-D-4546-90 metode B dan ASTM-D-4546-90 metode C. Dalam penelitian ini menggunakan ASTM-D-4546-90 metode B karena metode B didesain untuk menghindari perubahan volume dan tekanan yang terjadi di lapangan.

Metode B (ASTM-D-4546-90)

Metode ini sering disebut *loaded swell test*. Contoh tanah yang sudah siap dicetak dalam *consolidometer ring* diameter 6,20cm dan tinggi 2,54mm diberi tekanan sebesar minimal 1 kPa kemudian dilakukan *seating* awal selama 5 menit sebelum dibasahi, dan dilakukan pembacaan dial. Kemudian di kunci dan diberi beban sebesar *overburden*. Langkah selanjutnya adalah contoh tanah diberi beban tambahan berturut-turut sebesar minimal kelipatan *overburden*, dan sampai seterusnya sehingga terlewati kondisi air pori awal. Untuk masing-masing kondisi dipakai masa beban 24 jam.

Dibawah ini akan digambarkan contoh grafik penentuan tekanan mengembang metode B.



Gambar 2.25. Penentuan tekanan mengembang metode B(ASTM-D-4546-90)

