

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. 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.

Stabilisasi tanah adalah suatu cara yang digunakan untuk mengubah atau memperbaiki sifat tanah dasar sehingga diharapkan tanah dasar tersebut mutunya dapat lebih baik. Hal tersebut dimaksudkan juga untuk dapat meningkatkan kemampuan daya dukung tanah dasar terhadap konstruksi yang akan dibangun di atasnya.

Ada beberapa metode stabilisasi tanah yang biasanya digunakan dalam upaya untuk memperbaiki mutu tanah dasar yang kurang baik mutunya. Metode tersebut antara lain yaitu stabilisasi mekanik. Stabilisasi mekanik ini dimaksudkan untuk mendapatkan tanah yang bergradasi baik (*well graded*) sehingga tanah dasar tersebut dapat memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Stabilisasi dengan cara mekanik ini biasanya dilakukan dengan cara mencampur berbagai jenis tanah, namun yang perlu diingat adalah tanah yang diambil untuk campuran haruslah yang lokasinya berdekatan sehingga ekonomis. Gradasi dari campuran tanah tersebut harus sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Sedangkan metode stabilisasi tanah yang biasa juga digunakan adalah stabilisasi kimiawi. Stabilisasi kimiawi ini dilakukan dengan cara menambahkan *stabilizing agents* pada tanah dasar yang akan ditingkatkan mutunya. *Stabilizing agents* ini antara lain adalah *portland cement* (PC), *lime*, *bitumen*, *fly ash* dan lain-lain. Stabilisasi tanah dapat juga dilakukan dengan beberapa cara pemadatan atau pemampatan di lapangan, perbaikan dengan cara perkuatan

yaitu dengan pemasangan bahan lain pada lapisan tanah (seperti *geotekstil*), perbaikan permukaan tanah dengan menggunakan drainase, pencampuran lapisan dalam dan dengan cara penurunan air tanah yaitu dilakukan dengan cara menurunkan air tanah dengan pemompaan.

Berdasarkan sistem klasifikasi dapat dibedakan adanya jenis tanah berbutir halus yang disebut lempung. Lempung ini diklasifikasikan dengan tanah yang semua butirannya mempunyai ukuran 2 mikron. Tanah lempung tersebut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis tergantung pada komposisi serta mineral pembentuk butirannya. ditinjau dari mineral pembentuk butirannya lempung dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu lempung non ekspansif dan lempung ekspansif. Lempung non ekspansif yaitu lempung yang butirannya terbentuk dari mineral non ekspansif. Sedangkan lempung ekspansif adalah lempung yang butirannya terbentuk oleh mineral ekspansif.

Untuk tanah yang termasuk ke dalam jenis tanah ekspansif beberapa cara stabilisasi yang dapat dipergunakan antara lain adalah:

1. Removal dan Replacetienf

Metode ini dilakukan dengan cara mencampur tanah ekspansif dengan tanah non ekspansif, diharapkan dengan mencampur kedua jenis tanah ini dapat memperbaiki sifat dari tanah ekspansif. Tinggi dari timbunan tanah non ekspansif harus tepat agar didapat kekuatan yang diinginkan. Tidak ada petunjuk yang tepat berapa tinggi timbunan tanah tersebut tetapi Chen (1988) merekomendasikan antara 1 m sampai dengan 1,3 m.

Keuntungan dari metode ini adalah :

Tanah non ekspansif yang dicampurkan mempunyai sifat *density* yang lebih besar dan daya dukung besar sehingga dapat memperbaiki tanah ekspansif yang mempunyai nilai *density* yang rendah.

Biaya dari metode ini lebih ekonomis dari metode stabilisasi tanah ekspansif lainnya, karena metode ini tidak membutuhkan peralatan konstruksi yang mahal.

Kerugian dari metode ini adalah :

Ketebalan dari tanah ekspansif yang telah dicampur dengan tanah non ekspansif akan menjadi lebih tebal sehingga memungkinkan tidak sesuai dengan ketebalan yang telah ditentukan.

2. Remolding dan Compaction

Swelling potential dari tanah ekspansif dapat diperbaiki dengan cara merubah nilai *density* tanah tersebut (Holtz, 1959). Metode ini menunjukkan bahwa pemadatan pada nilai *density* yang rendah dan pada kadar air dibawah kadar optimum yang terlihat pada test Standart Proctor dapat mengakibatkan lebih sedikit *swelling potential* dari pada pemadatan pada nilai *density*, yang tinggi dan kadar air yang lebih rendah.

3. Chemical Admixtures

a. Stabilisasi tanah dengan kapur

Stabilisasi tanah dengan kapur telah banyak digunakan pada proyek-proyek jalan di banyak negara. Untuk hasil optimum kapur yang digunakan biasanya antara 3% sampai dengan 7%. Thomson (1968) menemukan bahwa dengan kadar kapur antara 5% sampai dengan 7% akan menghasilkan kekuatan yang lebih besar daripada kadar kapur 3%.

b. Stabilisasi tanah dengan semen

Hasil yang didapat dengan stabilisasi tanah dengan semen hampir sama dengan stabilisasi tanah dengan kapur. Menurut Chen (1988) dengan menambahkan semen pada tanah akan dapat meningkatkan shrinkage limit dan shear strength.

c. Stabilisasi tanah dengan *fly ash*

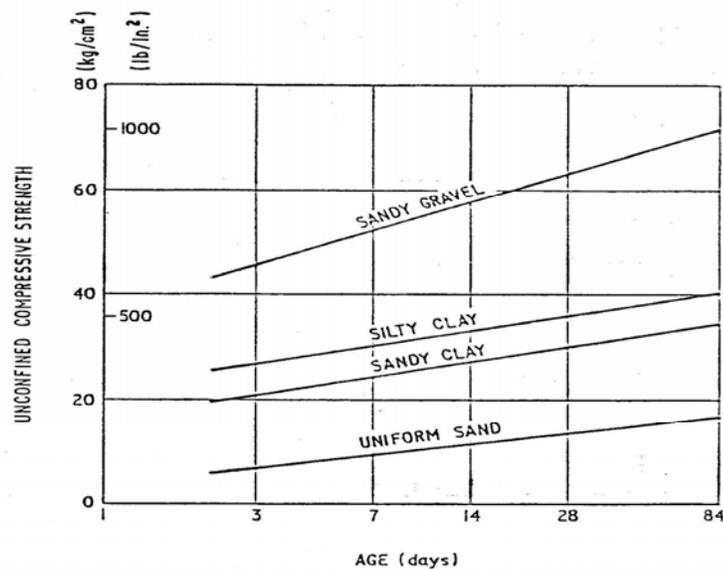
Fly ash dapat juga dipergunakan sebagai *stabilizing agents* karena apabila dicampur dengan tanah akan terjadi reaksi *pozzolonic*, Pada tanah lunak kapur yang akan dicampur *fly ash* dengan perbandingan 1 banding 2. terbukti dapat meningkatkan daya dukung tanah (Woods et.al., 1960).

2.2. Stabilisasi Tanah Dengan Semen Dan Fly Ash

Di dataran Salisbury Inggris tahun 1917, tercatat bahwa campuran tanah-semen telah digunakan untuk jalan berlumpur agar lebih mudah dilewati kendaraan. Penetapan campuran tanah-semen yang digunakan sebagai bahan stabilisasi telah dimulai dibicarakan di awal tahun 1917 di Philadelphia, Amerika Serikat (USA). Setelah tahun 1920-an stabilisasi dengan semen telah berkembang ke beberapa negara bagian di USA dan kemudian juga ke beberapa negara di dunia.

Stabilisasi tanah dengan semen ditentukan oleh beberapa faktor yang terpenting yaitu antara lain kualitas serta persentase dari tanah, semen, dan air per unit volume, keadaan pada waktu hidrasi semen, dan umur pemeraman campuran (Kezdi, 1979).

Waktu pemeraman akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai kuat tekan bebas pada tanah yang dicampur dengan semen. (O.G. Ingles and J. B. Metclaf, 1972). seperti yang digambarkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1. Hubungan Pengaruh waktu pemeraman dengan (UCS) pada tanah yang Dicampur dengan prosentase 5 % semen

Interaksi antara tanah dan semen akan memberi hasil yang baik jika tanah bergradasi baik, mempunyai ruang pori yang kecil dan bidang kontak yang luas (Kezdi, 1979).

Menurut Herzog (1963), partikel semen yang kering tersusun secara heterogen dan berisi kristal-kristal 3CaOSiO_2 , 4CaOSiO_4 , $3\text{CaOA1}_2\text{O}_3$, serta bahan-bahan padat berupa $4\text{CaOA1}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$. Pada waktu hidrasi semen, komponen-komponen tersebut bereaksi dengan air dan membentuk hidrasi silikat, alumuniurn dan kalsium hidroksida.

Ketika semen ditambahkan pada tanah dasar yang akan distabilisasi maka akan terjadi dua proses yaitu yang pertama adalah proses primer terdiri dari hidrolis dan hidrasi semen yang kuat untuk mengikat butiran mineral yang berdekatan dan butiran tanah. Yang kedua adalah proses sekunder yaitu yang terdiri dari reaksi antara butiran tanah dan kalsium hidroksida yang dibebaskan selama hidrasi semen (Krebs & Walker, 1971).

Umumnya ada dua istilah yang muncul dalam stabilisasi tanah yaitu modifikasi dan sementasi. Modifikasi meliputi penambahan sejumlah kecil semen (sekitar 0.5% sampai 3% dari berat tanah) untuk mengurangi plastisitas, mengendalikan pengembangan, memperbaiki sifat kekuatan tanpa banyak mengeras atau peningkatan yang berarti pada nilai kuat tekan atau tarik. Dalam keadaan ini derajat sementasi sangat kecil, sekalipun demikian sifat bahan telah diperbaiki, ini biasa disebut sebagai bahan yang tersementasi dan istilah sementasi digunakan (Sherwood, 1993)

Untuk mengurangi terjadinya *shrinkage* dan *cracking* problem yang biasanya terjadi pada stabilisasi dengan semen maka pada stabilisasi tanah ini juga akan ditambah dengan abu terbang batu bara (*fly ash*). Stabilisasi dengan *fly ash* sudah sejak lama dikenal dan diteliti dengan intensif sejak tahun 1962 oleh Davidson et. Al, *fly ash* digunakan sebagai bahan stabilisasi bersama-sama dengan kapur pada tanah lanau dan lempung.

Efek yang diperoleh dari stabilisasi dengan fly ash pada dasarnya identik dengan reaksi calcium (Kezdi, 1979), Kesulitan yang akan ditemui pada stabilisasi dengan menggunakan *fly ash* adalah tingkat kandungan karbon yang tidak terbakar biasanya cukup tinggi dan hal ini sangat tidak menguntungkan. Pemadatan campuran tanah dengan *fly ash* pada umumnya juga sulit dilaksanakan, hal ini disebabkan banyak fraksi *fly ash* yang mempunyai ukuran lanau.

2.3. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Pemakaian

Menurut Braja M Das (1998) sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur adalah relatif sederhana karena dia hanya didasarkan pada distribusi ukuran butiran tanah saja. Pada saat ini ada dua sistem klasifikasi tanah yang selalu dipakai. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Salah satunya yaitu sistem klasifikasi AASHTO yang dipakai saat ini yang terdapat dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi tanah untuk lapisan tanah dasar jalan raya

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Min 25	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Min 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai tanah dasar	Baik sekali sampai baik						

Klasifikasi umum	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)			
Klasifikasi kelompok	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6"
Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai tanah dasar	Biasa sampai jelek			

* Untuk A-7-5, $PL \leq LL - 30$

" Untuk A-7-6, $PL > LL - 30$

2.4. 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.

2.5. 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:

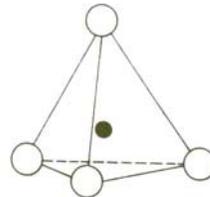
-) Ukuran butir halus, kurang dari $0,002\text{mm}$
-) Permeabilitas rendah
-) Kenaikan air kapiler tinggi
-) Bersifat sangat kohesif
-) Kadar kembang susut yang tinggi
-) Proses konsolidasi lambat

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.

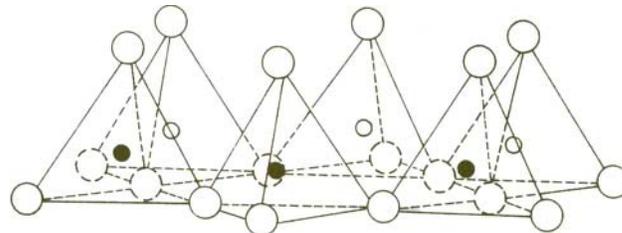
2.5.1. Struktur Mineral Penyusun Lempung

Dalam terminology 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 $2\mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=0,000001\text{m}$), meskipun ada, klasifikasi yang menyatakan batas atas lempung adalah $0,005\text{m}$ (ASTM).

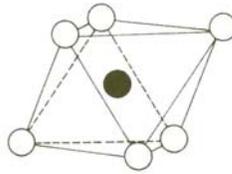
Menurut Holtz and Kovacs (1981) satuan struktur dasar dari mineral lempung terdiri dari *silica tetrahedron* dan *alumina octahedron*. Jenis-jenis mineral lempung tergantung dari kombinasi susunan satuan struktur dasar atau tumpukan lembaran serta macam ikatan antara masing-masing lembaran. Satuan-satuan dasar tersebut bersatu membentuk struktur lembaran seperti yang digambarkan pada Gambar 2.2. sampai dengan Gambar 2.5.



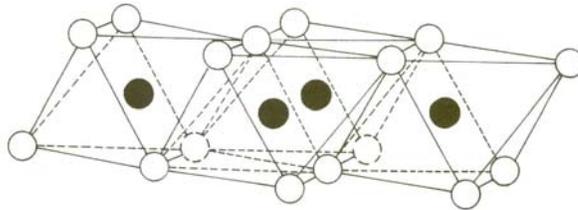
Gambar 2.2. Single silica tetrahedral (Grim, 1959)



Gambar 2.3 Isometric silica sheet (Grim, 1959)



Gambar 2.4. Single aluminium octahedron (Grim, 1959)



Gambar 2.5. Isometric octahedral sheet (Grim, 1959)

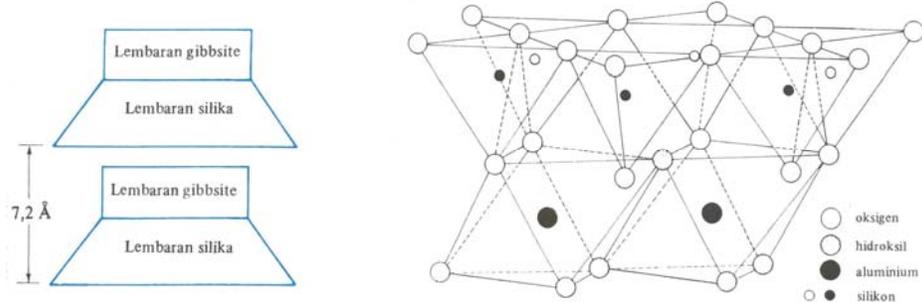
Umumnya partikel-partikel lempung mempunyai muatan negative pada permukaannya. Hal ini disebabkan oleh adanya substitusi isomorf dan oleh karena pecahnya kepingnya partikel pelat tersebut pada tepi-tepinya. Muatan negative yang lebih besar dijumpai pada partikel-partikel yang mempunyai spesifik yang 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*, *serpentinite group*).

Kaolinite

Kaolinite disebut sebagai mineral lempung satu banding satu (1:1). Bagian dasar struktur ini adalah lembaran tunggal silica 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 2.6. 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 $\pm 15\text{m}^2/\text{gram}$.

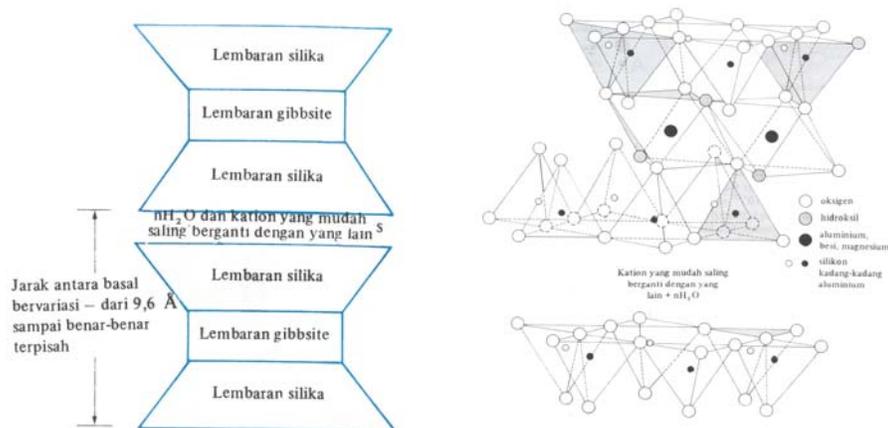


Gambar 2.6. Struktur kaolinite (Grim, 1959)

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 2.7 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.

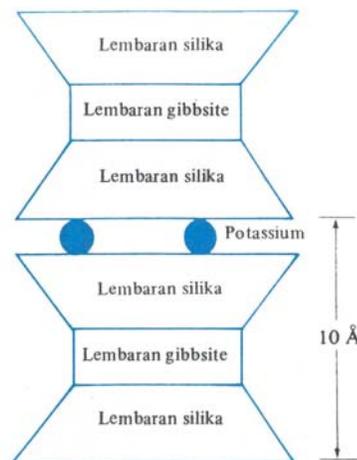


Gambar 2.7. Struktur Montmorillonite (Grim, 1959)

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 2.8.



Gambar 2.8. Struktur illite (Grim, 1959)

Substitusi dari kation-kation yang berbeda pada lemparan octahedral akan mengakibatkan mineral lempung yang berbeda pula. Apabila ion-ion yang disubstitusikan mempunyai ukuran sama disebut *isomorphous*. Bila sebuah anion dari lemparan oktahedral adalah *hydroxyl* dan dua per tiga posisi kation diisi oleh aluminium maka mineral tersebut disebut *gibbsite* dan bila magnesium disubstitusikan ke dalam lemparan 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 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Kisaran kapasitas tukar kation (Chen, 1975)

	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
<i>Particle thickness</i>	(0,5-2) μm	(0,003-0,1) μm	<9,5 \AA
<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: 1 \AA =10⁻¹⁰m=0,1 μm

2.5.2. Sifat Umum Mineral Lempung

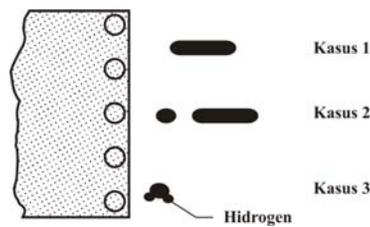
Air sangat mempengaruhi sifat tanah lempung, karena butiran dari tanah lempung sangat halus sehingga luas permukaan spesifikasinya menjadi lebih besar.

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 2.9 Hadiyatmo (1992) menerangkan bahwa molekul air bersifat dipolar, yang berarti memiliki muatan positif dan negative 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 negative 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 2.9. 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 negative) dengan kation-kation yang berada diantaranya, berpengaruh terhadap penyusutan ketebalan lapisan ganda karena jumlah air yang terhidrasi menjadi berkurang.

Hal ini berdasarkan rumusan gaya elektrostatis:

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

Keterangan :

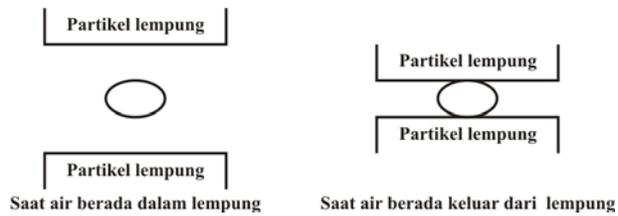
F : Gaya elektrostatis

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 elektrostatis 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 2.10, sedangkan lempung yang bersifat stabil dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.10. Mekanisme kembang susut pada partikle lempung.



Gambar 2.11. Mekanisme kembang susut pada partikel lempung yang stabil

2.6. 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 Diffiracton*).
-) Penyerapan terbilas (*Dye Absorbision*).
-) Penurunan Panas (*Differensial Thermal Analysis*).
-) Analisa Kimia (*Chemical Analysis*).
-) *Electron Microscope Resolution*.

2.6.2. 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.

2.6.2.1. 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 plastis 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 2.3. di bawah ini.

Tabel 2.3. 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 et al (2003) membuat penyederhanaan hubungan antara potensi mengembang dengan indeks plastis sebagai berikut:

$$S = 60k.(PI)^{2.44} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

S: Potensi mengembang

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

PI: Indeks plastisitas

2.6.2.2. 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 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4. 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

2.6.2.3. Free Swell

Uji *Free Swell* diperkenalkan oleh Holtz (1956) sebagaimana dikutip oleh 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.

2.6.2.4. Colloid Content

Colloid Content merupakan salah satu indikator mengembang tanah lempung ekspansif Seed et al (2003) 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 2.12.

Oleh Seed et al (2003) dari grafik hubungan potensial mengembang dan persentase kandungan koloid dibuat hubungan dalam bentuk analisis sebagai berikut:

$$S = k.C^x \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

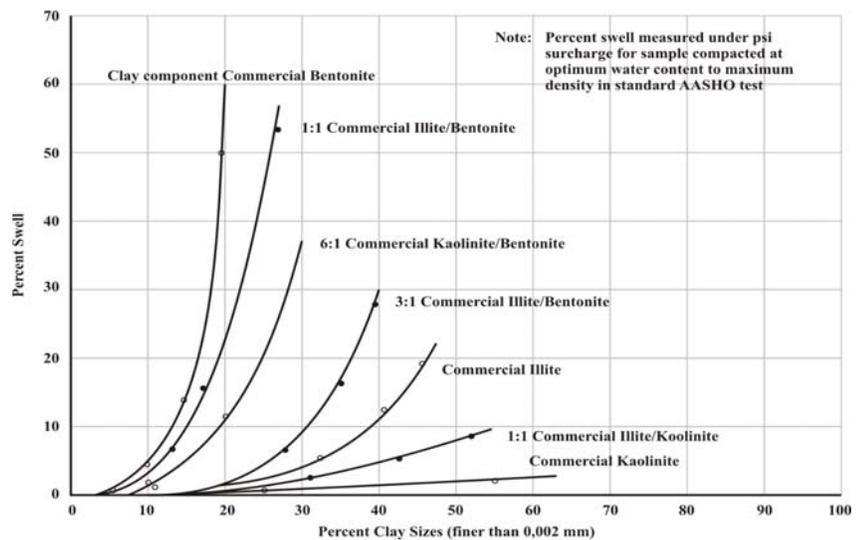
S: Potensi mengembang

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

x: Eksponensial yang tergantung dari jenis lempung

k: Konstanta atau koefisien yang menunjukkan jenis lempung

Gambar 2.12 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.

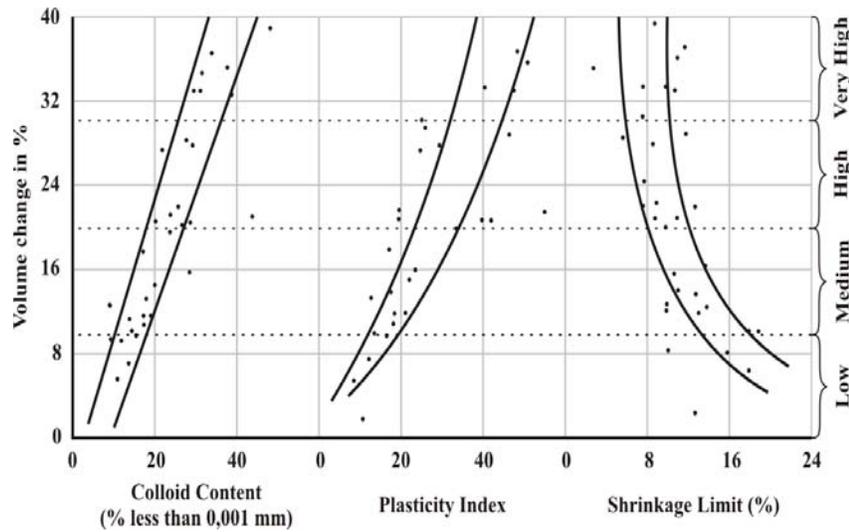


Gambar 2.12. Hubungan potensi mengembang dengan kadar lempung

(Seed, Woodward dan Lundberg, 1962)

2.6.2.5. 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 2.13 di bawah ini menunjukkan hubungan antara sejumlah nilai indeks dimaksud dengan potensi mengembangnya.



Gambar 2.13. Hubungan persentase mengembang dengan kandungan koloid, PI dan batas susut (holtz dan Gibbs, 1959)

Dari kurva diatas Holtz mengajukan kriteria identifikasi sebagaimana dalam Tabel 2.5

Tabel 2.5. 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

2.6.2.6. Activity Method

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

$$Activity(A) = \frac{PI}{C - 10} \dots\dots\dots (2.4)$$

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

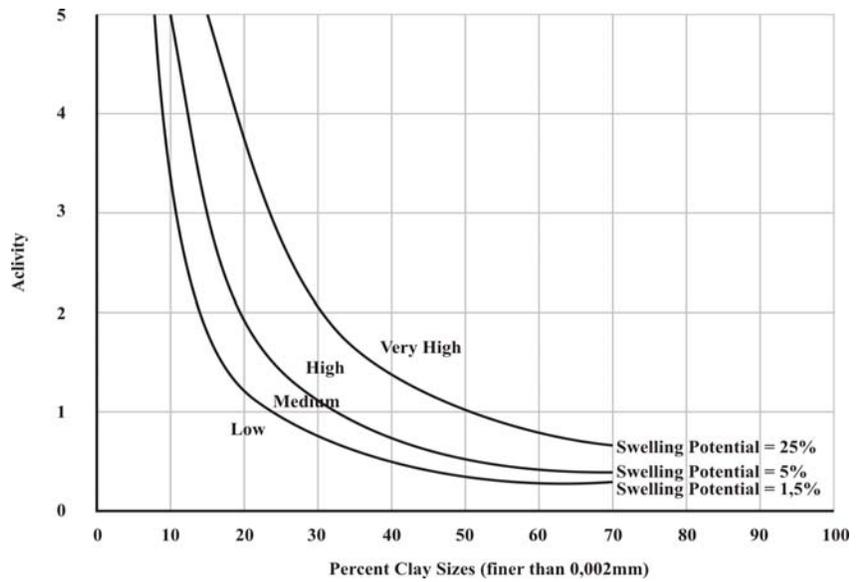
0,75 < A < 1,25 : normal

A > 1,25 : aktif

Seed et al (2003) mengelompokkan besaran aktivitas berdasarkan jenis mineral seperti yang terlihat pada Tabel 2.6 di bawah ini.

Tabel 2.6. Hubungan aktivitas dengan mineral (Seed et al, 2003)

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 2.14. Grafik klasifikasi potensi mengembang (Seed et al, 2003)

Sebagaimana yang terlihat pada Gambar 2.14, Seed et al (2003) 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 lpsi. Rumus Seed et al (2003) dalam bentuk analitis adalah sebagai berikut:

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

Keterangan:

PI: Indeks plastisitas

C: persentase lempung lolos saringan 0,002mm

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

2.6.3. Metode Pengukuran Langsung

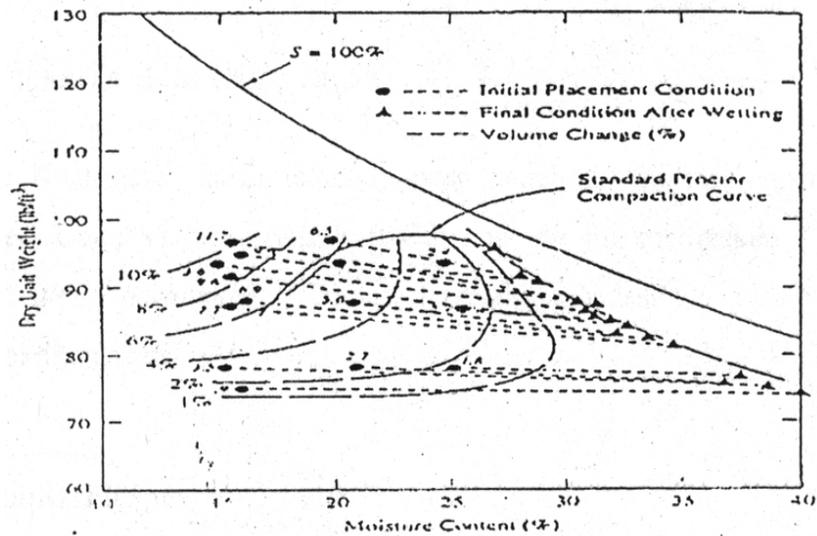
Metode pengukuran terbaik adalah dengan pengukuran langsung yaitu suatu cara untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Contoh tanah yang berbentuk silinder tipis diletakkan dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan 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 di atasnya setiap saat. Metode ini sering juga disebut *constan volume method*.

2.7. Faktor Pengaruh 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 2.15.



Gambar 2.15. Hubungan potensi mengembang dengan kadar air dan kepadatan (Holtz dan Gibbs, 1956)

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 montmorillonite, kepadatan awal, waktu pembasahan, tebal contoh tanah, tingkat ke jenuhan, 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:

- o 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

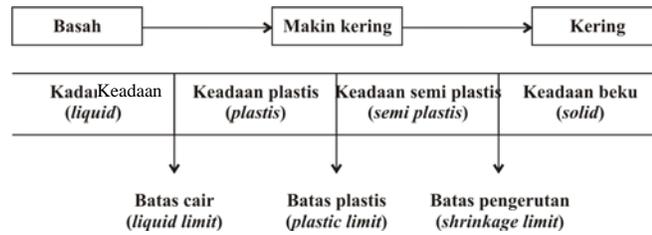
Selain faktor diatas Iyer Balu (1987) secara khusus menyoroti proses pengukuran sebagai salah satu faktor yang sangat berpengaruh dalam pengamatan perilaku mengembang tanah lempung ekspansif. Menurutnya, akibat beragamnya metode pengukuran potensi mengembang yang ada hingga tahun 1985, interpretasi terhadap 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.

2.8. 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 2.16.



Gambar 2.16. Batas-batas Atterberg Limit

2.8.1. 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 pematatannya. Untuk macam-macam tanah tertentu Atterberg limit dapat dihubungkan secara empiris dengan sifat-sifat lainnya, misalnya dengan kekuatan geser atau compression indek dan sebagainya.

2.8.2. 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.

2.8.3. 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.

2.8.4. Batas Susut

Batas susut 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.

$$SL = M - \frac{v - v_o}{w_o} \gamma_w \cdot 100\% \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

SL: Batas menyusut

M: Kadar air (%)

v : Isi tanah basah (cm³)

v_o: Isi tanah kering (cm³)

w_o: Berat tanah kering (gram)

2.8.5. Indeks Plastis

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

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

PI: Indeks plastisitas

LL: Batas cair

PL: Batas plastis

2.9. 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 vertical yang bekerja pada geserannya.
-) Gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan vertical pada bidang gesernya.

Oleh karena itu kekuatan geser tanah dapat diukur dengan rumus:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi \dots\dots\dots (2.8)$$

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:

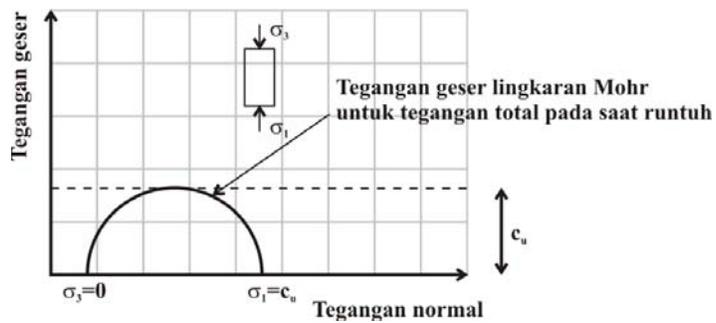
-) Pengujian geser langsung (*direct shear test*)
-) Pengujian triaksial (*triaxial test*)
-) Pengujian tekan bebas (*unconfined compression test*)
-) Pengujian baling-baling (*vane shear test*)

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

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 2.17 di bawah ini. Karena kekuatan geser kondisi air termampatkan dari tanah tidak tergantung pada tegangan penyekap, maka:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \dots\dots\dots (2.9)$$



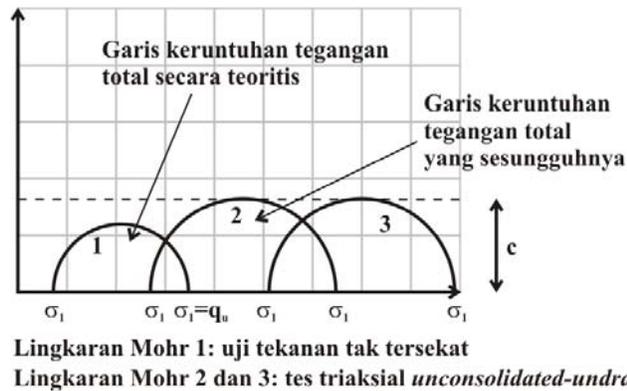
Gambar 2.17. Keruntuhan geser kondisi air termampatkan

c_u di atas sebagai kekuatan tanah kondisi tak tersekap. Pada Tabel 2.7 berikut diberi perkiraan harga-harga konsistensi tanah lempung berdasarkan harga kekuatan tekanan tak tersekap.

Tabel 2.7. 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*. Ini dapat dilihat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Perbandingan uji tekan tak tersekat *unconfined compression* dan *unconsolidated undrained* dari tanah lempung jenuh air

2.10. Kembang Susut Tanah

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.

2.10.1. Pengujian Persentase 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.

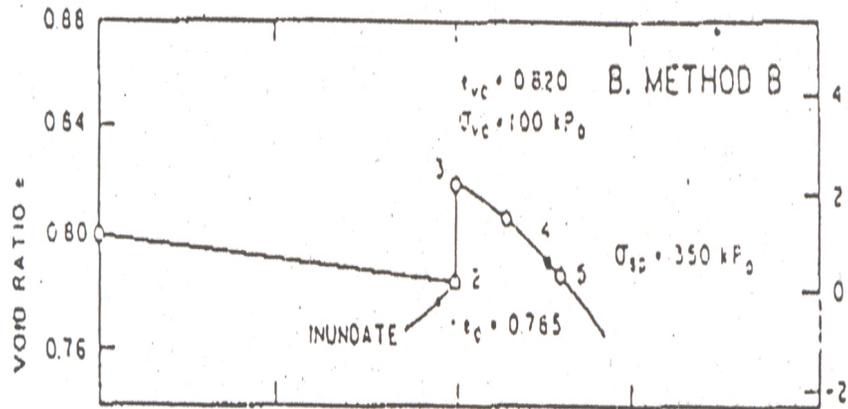
2.10.2. Pengujian Tekanan Mengembang

Pengujian tekanan mengembang merupakan lanjutan dari uji persentase 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*.

Ada beberapa pilihan metode pengamatan menurut ASTM-D-4546-90 berkaitan dengan pengujian tekanan mengembang. Namun yang digunakan dalam penelitian ini adalah ASTM-D-4546-90 metode B. Hal ini karena metode B didesain sedemikian hingga 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 6,20 cm dan tinggi 2,54 mm diberi tekanan sebesar minimal 1 kPa kemudian dilakukan *seating* awal kemudian dikunci dan diberi beban sebesar *overburden* (15,782 kPa) selama 5 menit sebelum dibasahi, dan dilakukan pembacaan dial. Contoh tanah diberi air hingga mengembang dan dilakukan pencatatan dial hingga pengembangan maksimum tercapai. Pada studi ini 72 jam ditetapkan sebagai persentase mengembang maksimum yang terjadi. Langkah selanjutnya adalah contoh tanah diberi beban tambahan berturut-turut sebesar minimal kelipatan *overburden*, dan sampai seterusnya sehingga melewati kondisi air pori awal. Untuk masing-masing kondisi dipakai masa beban 24 jam. Gambar 2.19 contoh grafik penentuan tekanan mengembang metode B.



Gambar 2.19. Penentuan tekanan mengembang metode B (ASTM-D-4546-90)

2.11. Bahan-bahan Yang Digunakan Untuk Campuran Tanah Lempung Ekspansif

2.11.1. Semen

Semen yang digunakan untuk stabilisasi dapat dari berbagai jenis, tetapi yang sering digunakan dalam stabilisasi tanah adalah semen portland (PC). *Portland cement* merupakan campuran bahan-bahan yang sebagian besar berisi kapur (CaO), silikat (SiO₂), alumina (Al₂O₃) dan besi oksida (Fe₂O₃).

Semen adalah bahan yang bila dicampur dengan air akan menjadi ikatan dan pengerasan karena suatu reaksi kimia sehingga membentuk suatu massa yang kuat dan keras yang kemudian sering disebut dengan *hydraulic cement*. Dengan dicampur air maka *Portland cement* dapat dijadikan pengikat hidraulis. Kemudian disusul dengan adanya *hydraulic lime* yang didapat dari pembakaran batu kapur tidak murni yang mengandung oksida-oksida tertentu.

Persyaratan komposisi kimia semen Portland menurut ASTM Designation C 150-92, seperti terlihat pada Tabel. 2.8.

Tabel 2.8. Persyaratan. Standart Komposisi Kimia Portland cement

Kimia Semen	Jenis Portland Cemen				
	I	II	III	IV	V
	dan IA	dan IIA	dan IIIA		
Silicon dioxide (SiO ₂), Min %		20.2			
Aluminium oxide (Fe ₂ O ₃), max %		6.0			
Ferric Oxide (Fe ₂ O ₃), max %		6.0		6.5	
Magnesium Oxide (MgO), max %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Sulfur Trioxide (SO ₃), max %					
When (C ₃ A) is	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
When (C ₃ A) is more than	3.5	NA	4.5	NA	NA
Lose in ignition, max %	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Insoluble residue, max %	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Tricalcium silicate (C ₃ S), max %				35	
Dicalium silicate (C ₂ S)				40	
Tricalcium aluminate (C ₃ S), max %		8	15	7	5
Tetracalcium aluminoferrite tambah dua kali tricalcium aluminate (C ₄ AF+2(C ₃ A)) atau solid solution (C ₃ AF+C ₃ F), as applicable, max %					25

Sumber : ASTM Standart On Soil Stabilization With Admixture 1992

Distribusi ukuran butiran *portland cement* adalah antara 0,0 dan 100 mikron, dengan rata-rata 20 mikron untuk butiran yang lebih besar dari ini tidak pernah berhidrasi lengkap. Butiran semen berukuran 10 mikron mungkin memerlukan tiga bulan untuk selesai berhidrasi dan oleh sebab itu semen halus kelihatannya lebih menguntungkan. Kekuatan lebih tinggi dari stabilisasi tanah dengan *Portland cement* dapat dihasilkan dari semen yang sangat halus.

2.11.2. Fly Ash (abu terbang batubara)

Fly ash merupakan bagian terbesar dari abu batubara yang memiliki ukuran butiran yang halus dan menampakkan warna keabuabuan. Pemanfaatan *fly ash* ini untuk stabilisasi tanah adalah karena fly ash mempunyai sifat *pozzolanik* dan juga dapat mengurangi

shrinkage dan cracking problem yang biasanya timbul pada penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi tanah. Pada intinya fly ash mengandung unsur kimia antara lain adalah silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), feri oksida (Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan karbon.

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari *fly ash* adalah tipe batubara dan kemurnian batubara, tingkat penghancuran, tipe pemanasan (boiler) dan operasi, metode penyimpanan dan penimbunan.

Menurut ASTM 618-78 *fly ash* dibagi menjadi dua kelas, yaitu

a. *Fly ash* kelas C

Merupakan *fly ash* yang diproduksi dari pembakaran *subbituminous coal* atau batubara lignite selain mempunyai sifat *pozzolanic*, *fly ash* ini juga memiliki sifat *cementitious* apabila bereaksi dengan air dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. *Fly ash* kelas C mengandung kalsium dalam kadar yang tinggi.

b. *Fly ash* kelas F

Merupakan *fly ash* yang diproduksi dari *bituminous coal*. Pada *fly ash* kelas F ini untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi penambahan kapur atau semen. *Fly ash* kelas F ini kadar kalsiumnya rendah.