

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lempung Ekspansif

2.1.1 Pengertian Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif memiliki sifat yang khas yaitu kandungan mineralnya memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air. Pada peningkatan kadar air, tanah ekspansif akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan kembang. Bila kadar airnya berkurang sampai batas susutnya, akan terjadi penyusutan. Sifat kembang susut yang demikian dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan di atasnya. (Hardiyatmo, 2006)

Lempung (*clays*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskop biasa yang memiliki ukuran partikel kurang dari 0,002 mm (2 mikron). Dari segi mineral, tanah lempung mempunyai peratikel-partikel mineral tertentu yang “menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air” (Grim, 1953). Namun, terdapat juga tanah yang dapat disebut sebagai tanah bukan lempung (*non-clay soil*) meskipun terdiri dari partikel-partikel yang sangat kecil seperti partikel-partikel quartz, feldspar, dan mika yang berukuran submikroskopis, tetapi umumnya mereka tidak dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis pada tanah. (Das, 1995:9)

2.1.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS)

Klasifikasi sistem ini diperkenalkan oleh oleh Casagrande tahun 1942 dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation* (USBR) dan *United State Army Corps of Engineer* (USACE). Kemudian *American Society for Testing and Materials* (ASTM) telah memakai USCS sebagai metode standar guna mengklasifikasikan tanah.

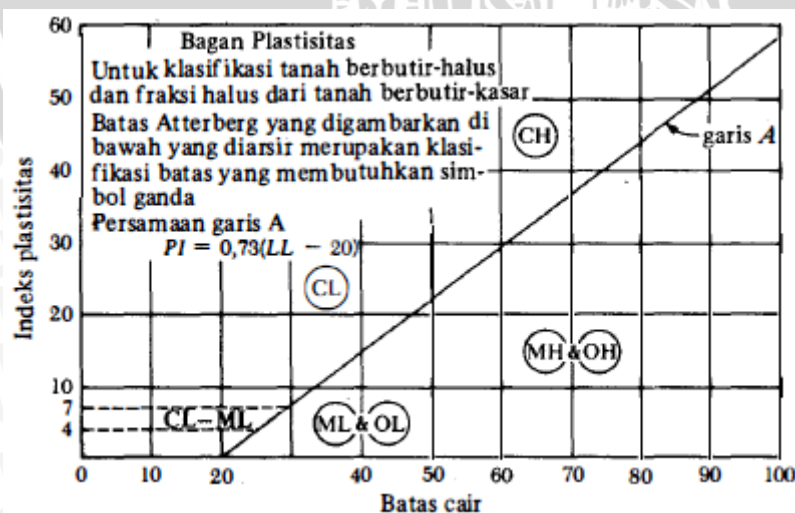
Hingga saat ini, sistem ini banyak digunakan dalam berbagai pekerjaan geoteknik.

Dalam sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*coarse – grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$).
2. Tanah berbutir halus (*fine – grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$).

Tabel 2.1 Simbol untuk Klasifikasi USCS

Simbol	Keterangan
G	Kerikil (<i>gravel</i>)
S	Pasir (<i>sand</i>)
M	Lanau Inorganik (<i>inorganic silt</i>)
C	Lempung Inorganik (<i>inorganic clay</i>)
O	Lanau dan Lempung Organik
Pt	Gambut (<i>peat</i>)
W	Gradasi Baik (<i>well graded</i>)
P	Gradasi Buruk (<i>poorly graded</i>)
L	Plastisitas Rendah (<i>low plasticity</i>)
H	Plastisitas Tinggi (<i>high plasticity</i>)



Gambar 2.1 Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah USCS
Sumber: Das (1995:72)

2.1.3 Mineral Tanah Lempung Ekspansif

Menurut Chen (1975), mineral lempung terdiri dari tiga komponen penting yaitu *montmorillonite*, *illite*, dan *kaolinite*. Mineral *montmorillonite* mempunyai luas permukaan lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah banyak bila dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga tanah yang mempunyai kepekaan terhadap pengaruh air ini sangat mudah mengembang.

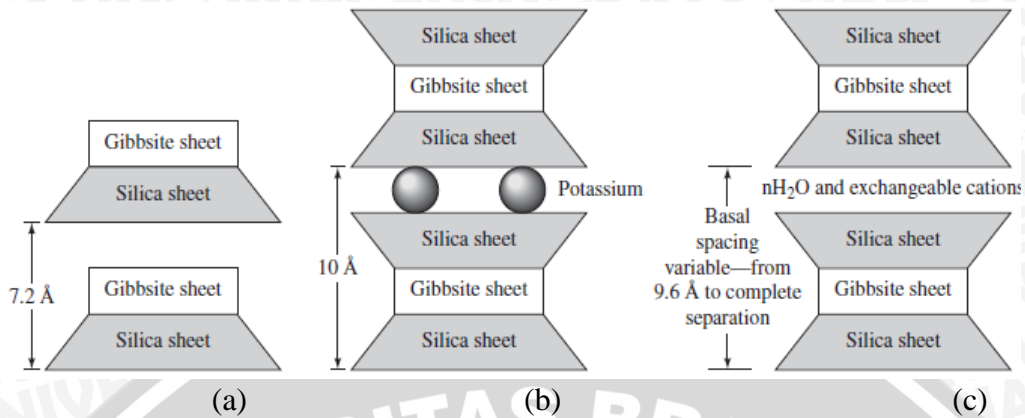
Struktur *kaolinite* terdiri dari unit lapisan *silica* dan *aluminium* yang diikat oleh ion hidrogen. *Kaolinite* membentuk tanah yang stabil karena strukturnya yang terikat kuat mampu menahan molekul-molekul air sehingga tidak masuk ke dalamnya. Struktur *illite* terdiri dari lapisan-lapisan unit *silica-aluminium-silica* yang dipisahkan oleh ion K^+ yang mempunyai sifat mengembang. Struktur *montmorillonite* mirip dengan dengan struktur *illite*, tetapi ion pemisahannya berupa H_2O yang sangat mudah lepas. Mineral ini dapat dikatakan sangat tidak stabil pada kondisi tergenang air, karena air dapat dengan mudah masuk ke dalam sela antar lapisan ini sehingga mineral mengembang. Pada waktu mengering, air di antara lapisan juga mengering sehingga mineral menyusut. Karena sifat-sifat tersebut, *montmorillonite* sering menimbulkan masalah kerusakan pada bangunan. (Hardiyatmo, 1992:16-17).

Kandungan mineral dalam tanah lempung ditampilkan pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.2 Hubungan Mineral Tanah Dengan Aktifitas

Mineral	Aktifitas
<i>Kaolinite</i>	0,33 – 0,46
<i>Illite</i>	0,9
<i>Montmorillonite</i> (Ca)	1,5
<i>Montmorillonite</i> (Na)	7,2

Sumber: Chen (1975)



Gambar 2.2 Diagram Struktur dari (a) *Kaolinite*; (b) *Illite*; (c) *Montmorillonite* Sumber: Das (1995:13)

2.1.4 Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif memiliki karakteristik yang berbeda dari jenis tanah pada umumnya, yaitu sebagai berikut:

1. Mineral lempung

Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume umumnya mengandung *montmorillonite* atau *vermiculite*, sedangkan *illite* dan *kaolinite* dapat bersifat ekspansif bila ukuran partikelnya sangat halus.

2. Kimia tanah

Peningkatan konsentrasi kation dan bertambahnya tinggi valensi kation dapat menghambat pengembangan tanah. Sebagai contoh kation Mg^{++} akan memberikan pengembangan yang lebih kecil dibandingkan dengan Na^{+} .

3. Plastisitas

Tanah dengan indeks plastisitas dan batas cair yang tinggi mempunyai potensi untuk mengembang yang lebih besar.

4. Struktur tanah

Tanah lempung yang berflokulasi cenderung bersifat lebih ekspansif dibandingkan dengan terdispersi.

5. Berat isi kering

Tanah yang mempunyai berat isi kering yang tinggi menunjukkan jarak antar partikel yang kecil, hal ini berarti gaya tolak yang besar dan potensi pengembangan yang tinggi.

(Pd T-10-2005-B, 2005:3)

2.1.5 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Menurut Chen (1975), terdapat tiga cara yang dapat dilakukan untuk mengidentifikasi potensi tanah lempung ekspansif, yaitu identifikasi mineralogi, cara tidak langsung (*single index method*), dan cara langsung.

1. Identifikasi Mineralogi

Identifikasi mineralogi dilakukan untuk mengidentifikasi potensi kembang-susut yang terjadi pada tanah lempung. Identifikasi dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Difraksi Sinar-X (*X-Ray Diffraction*),
- b. Penurunan Panas (*Differential Thermal Analysis*),
- c. Penyerapan Terbilas (*Dye Absorption*),
- d. Analisa Kimia (*Chemical Analysis*), dan
- e. *Electron Microscope Resolution*.

2. Cara Pengukuran Tidak Langsung

Hasil uji sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi berpotensi ekspansif atau tidaknya pada suatu contoh tanah. Uji indeks dasar tanah meliputi uji batas-batas *Atterberg*, *linier shrinkage test* (uji susut linier), *free swell test* (uji mengembang bebas), dan *colloid content test* (uji kandungan koloid).

Menurut Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji *Atterberg*. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitasnya, seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.3 Hubungan Potensial Mengembang Dengan Indeks Plastisitas

Potensi Mengembang	Indeks Plastisitas (IP)
Rendah	0 - 15
Sedang	10 - 35
Tinggi	20 - 55
Sangat Tinggi	35 <

Sumber: Chen (1975:18)

Altmeyer (1955) dalam Chen (1975), membuat acuan mengenai derajat mengembang tanah lempung dengan nilai persentase susut linier dan persentase batas susut *Atterberg*, seperti yang ditunjukkan tabel berikut:

Tabel 2.4 Klasifikasi Potensi Mengembang Didasarkan pada *Atterberg Limit*

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

Sumber: Altmeyer (1955)

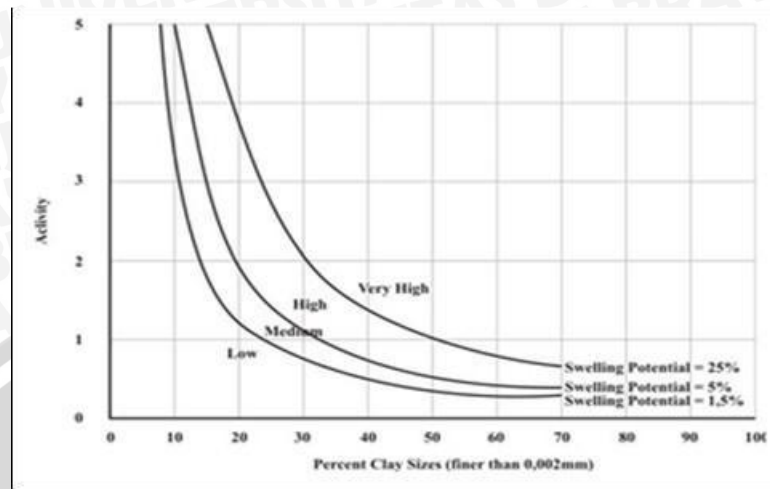
Skrepton (1953) mendefinisikan suatu besaran yang dinamakan aktivitas (*activity*) yang merupakan hubungan antara PI dan persen butiran lolos ayakan 2 ϕ , atau dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = \frac{PI}{c} \tag{2-1}$$

dengan, A = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

C = prosentase lempung < 0,002 mm



Gambar 2.3 Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

Sumber: Seed at al. (1962)

Coloid Content merupakan salah satu indikator mengembang tanah lempung ekspansif. Berikut ini adalah klasifikasi tanah ekspansif berdasarkan kadar koloid:

Tabel 2.5 Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Kadar Coloid

Data Indeks Properties			% Total Volume Change	Degree of Expansion
Colloid (<0,00 mm)	Liquid Limit (%)	Standart Penetration		
>28	>35	< 11	>30	Very High
20 – 13	25 – 41	7 – 12	20 – 30	High
13 – 23	15 – 28	10 – 16	10 – 20	Medium
< 15	< 28	>15	< 10	Low

Sumber: Holtz dan Gibbs (1956)

3. Cara Pengukuran Langsung

Metode terbaik untuk menentukan potensial mengembang dan tekanan mengembang pada lempung ekspansif adalah dengan metode pengukuran langsung. Pengukuran langsung langsung dapat dilakukan dengan menggunakan alat konsolidometer satu dimensi. Sampel tanah yang berbentuk silinder tipis diletakkan ke dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan pori pada

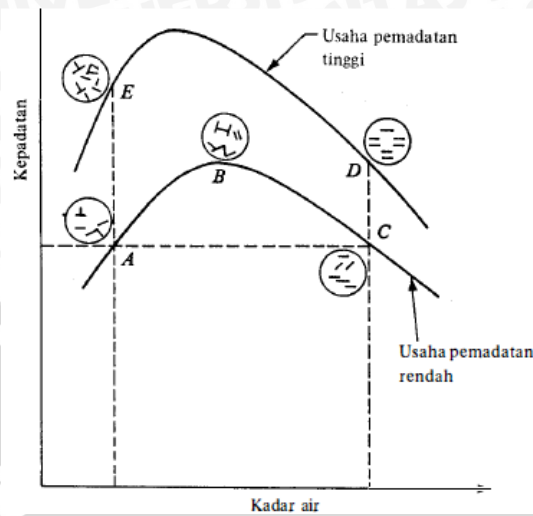
sisi atas dan sisi bawah yang kemudian diberi beban sesuai yang diinginkan. Besarnya pengembangan contoh tanah dibaca beberapa saat setelah dibasahi dengan air. Besarnya pengembangan yang terjadi adalah pengembangan tanah dibagi dengan tebal awal contoh tanah. Adapun cara pengukuran tekanan mengembang ada dua cara, yaitu:

- a. Pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi, kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ke tebal semula.
- b. 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*.

2.2 Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan

Lambe (1958) mengutip dari Das (1995) mengatakan bahwa sifat-sifat tanah lempung setelah dipadatkan akan bergantung pada cara atau usaha pemadatan, macam tanah, kadar air pada saat dipadatkan. Lambe (1958) telah menyelidiki pengaruh pemadatan terhadap struktur tanah lempung dan hasil penyelidikan seperti terlihat pada Gambar 2.4.

Hasil penyelidikan pada tanah lempung yang dipadatkan memperlihatkan bahwa jika lempung dipadatkan pada keadaan kering optimum, susunan tanahnya tidak bergantung pada macam pemadatan (Seed dan Chan dalam Das, 1995). Pemadatan tanah dengan kadar air pada basah optimum akan mempengaruhi, susunan, kuat geser, serta sifat kemampatan tanahnya. Pada usaha pemadatan yang sama, dengan penambahan kadar air, penyesuaian susunan butiran menjadi bertambah. Pada kering optimum, tanah selalu terflokulasi. Sebaliknya pada basah optimum susunan tanah menjadi tersdispersi beraturan.



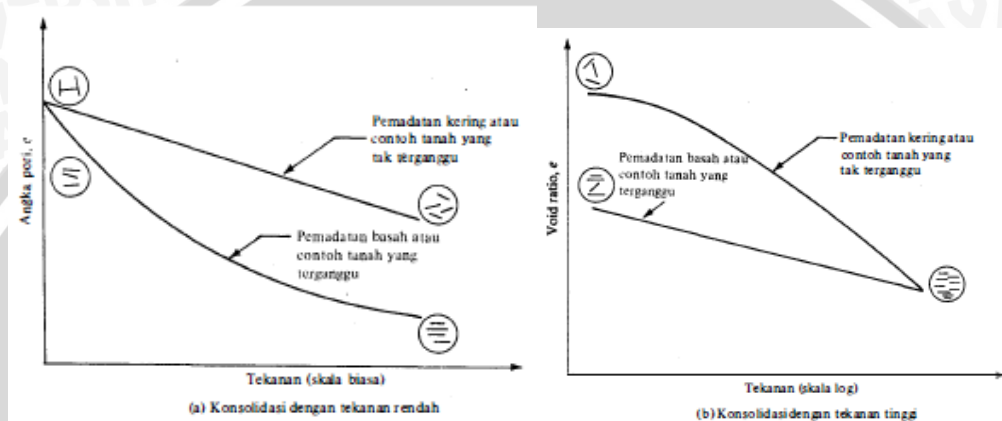
Gambar 2.4 Pengaruh Pemadatan pada Struktur Tanah Lempung
Sumber: Lambe dalam Das (1995:244)

Pada suatu kadar air tertentu, usaha pemadatan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak partikel-partikel lempung dengan orientasi yang sejajar, sehingga lebih banyak struktur tanah yang terdispersi. Partikel-partikel tanah lebih dekat satu sama lain dan dipadatkan berat volume yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat dengan membandingkan antara titik A dan E pada gambar. Susunan tanah pada titik C lebih teratur dari pada titik A. Jika usaha pemadatan ditambah, susunan tanah cenderung untuk lebih beraturan penyesuaiannya, bahkan berlaku juga pada kondisi kering optimum. Susunan tanah pada titik E lebih teratur dari pada titik A, sedang pada kondisi basah optimum, susunan pada titik D akan lebih teratur dari pada titik C.

Pemadatan menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkohesi. Perubahan-perubahan tersebut meliputi perubahan pada daya rembes (*permeability*), kemampuanampatan (*compressibility*), dan kekuatan dari tanah. Contoh tanah dalam pemadatan dipadatkan pada berbagai kadar air dengan usaha pemadatan yang sama. Harga koefisien rembesan yang menunjukkan ukuran mudah-sukarnya air merembes melewati suatu tanah, akan berkurang dengan bertambahnya kadar air. Harga koefisien rembesan tersebut mencapai minimum pada kadar air optimum. Sesudah kadar air optimum,

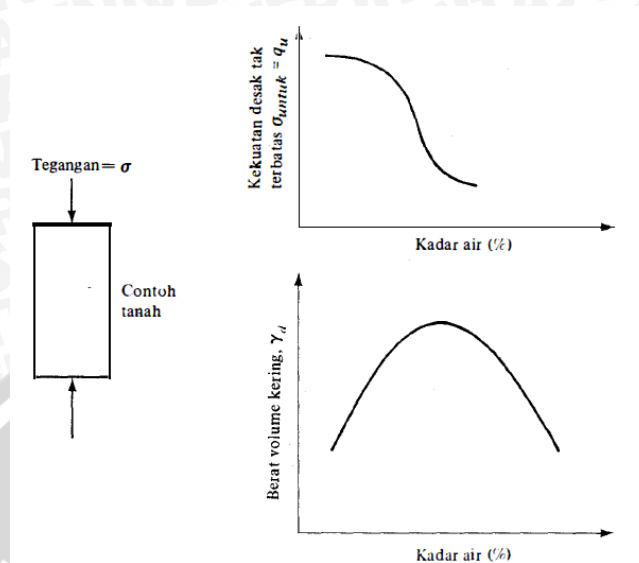
koefisien rembesan akan sedikit bertambah. Jika usaha pemadatan ditambah, koefisien permeabilitas akan berkurang, sebab angka pori berkurang.

Pada tekanan yang rendah, suatu tanah yang dipadatkan pada sisi basah dari kadar air optimum akan lebih mudah memampat dibandingkan pada tanah yang dipadatkan pada kondisi kadar air minimum. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2.5 Pengaruh Pemadatan pada Daya Rembes Tanah Lempung
Sumber: Lambe dalam Das (1995:248)

Kekuatan tanah lempung yang dipadatkan umumnya berkurang dengan bertambahnya kadar air. Hal ini dapat diperhatikan bahwa pada kadar air optimum, terjadi penurunan kekuatan tanah yang besar. Ini berarti bahwa pada dua contoh tanah yang dipadatkan pada berat volume kering yang sama, yang satu dipadatkan pada sisi kering dan yang lainnya pada sisi basah dari kadar air optimum (yang memiliki struktur terfokulasi) akan mempunyai kekuatan yang lebih besar seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6 berikut ini:



Gambar 2.6 Pengaruh Pemadatan pada Kekuatan Tanah Lempung
Sumber: Das (1995:249)

2.3 Daya Dukung Tanah

Menurut Hardiyatmo (2011), daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban pondasi dari struktur yang terletak di atasnya. Selain itu juga, kapasitas dukung menyatakan tahanan geser tanah untuk melawan penurunan akibat beban yang bekerja, yaitu tahanan geser yang dapat dikerahkan oleh tanah sepanjang bidang-bidang gesernya.

Konsep daya dukung batas suatu tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilakukan dengan suatu pemodelan pondasi bentuk persegi yang memanjang dengan lebar B yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat atau tanah yang kaku seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7a. Apabila beban terbagi rata q per satuan luas bekerja di atas model pondasi, maka pondasi akan mengalami penurunan. Apabila beban tersebut ditambah, penurunan pondasi yang terjadi pun akan semakin besar. Bila besar $q = q_u$ tercapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi dimana pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q . Dalam keadaan ini, q_u didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah. Sehingga dari keadaan tersebut akan diperoleh grafik hubungan antara beban dan

penurunan seperti pada Gambar 2.7b (Das, 1993:117). Sedangkan Hardiyatmo (2011) menyatakan bahwa kapasitas dukung ultimit (*ultimit bearing capacity*) (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka:

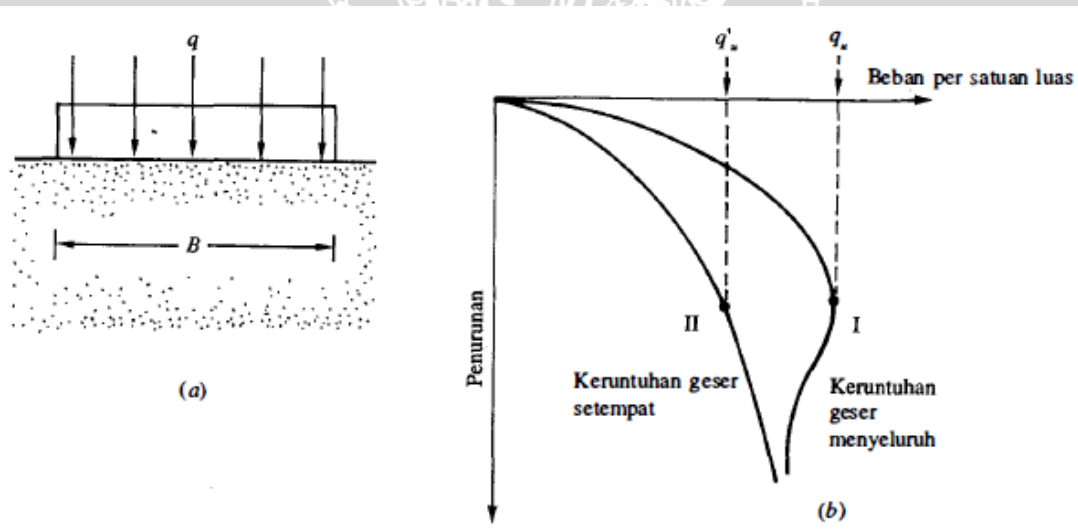
$$q_u = \frac{P_u}{A}$$

(2-2)

Dengan, q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m²)

P_u = beban ultimit (kN)

A = luas pondasi (m²)



Gambar 2.7 Daya Dukung Batas Tanah; (a) Model Pondasi; (b) Grafik Hubungan Beban dan Penurunan

Sumber: Das (1993:117)

Berdasarkan hasil uji model, menurut Vesic (1963) sebagaimana yang dikutip Hardiyatmo (2011), membagi mekanisme keruntuhan pondasi menjadi 3

macam:

1. Keruntuhan geser umum (*general shear failure*),
2. Keruntuhan geser lokal (*local shear failure*), dan
3. Keruntuhan penetrasi (*penetration failure atau punching shear failure*).

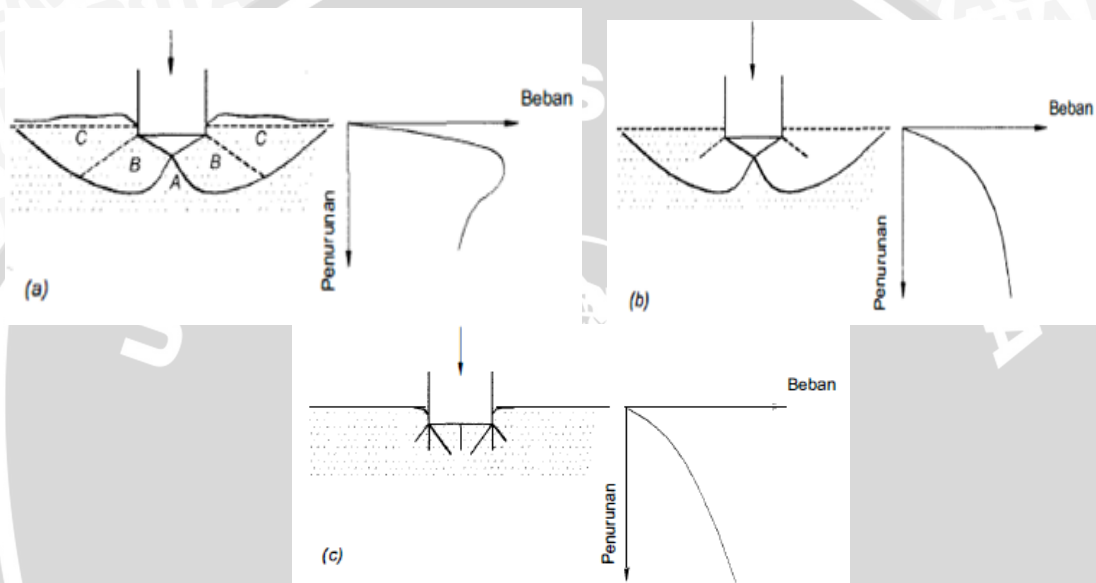
Keruntuhan geser umum terjadi menurut bidang runtuh yang dapat diidentifikasi dengan jelas yaitu terjadi pengembangan tanah di sekitar pondasi. Bidang runtuh yang terbentuk berupa lengkung dan garis lurus yang berkembang hingga permukaan tanah. Saat keruntuhan, terjadi gerakan massa tanah ke arah luar dan ke atas. Keruntuhan ini terjadi dalam waktu relatif mendadak yang diikuti dengan penggulingan pondasi (Gambar 2.8a).

Keruntuhan geser lokal hampir sama dengan keruntuhan geser umum, namun bidang runtuh yang terbentuk tidak mencapai permukaan tanah. Seiring dengan penambahan beban, pondasi akan tenggelam pada kedalaman yang relatif dalam, yang menyebabkan tanah di dekatnya mampat. Tetapi, mampatnya tanah tidak sampai mengakibatkan kedudukan kritis keruntuhan tanah, sehingga zona plastis tidak berkembang seperti pada keruntuhan geser umum. Pada keruntuhan ini terjadi sedikit pengembangan tanah di sekitar pondasi, namun tidak terjadi penggulingan pondasi (Gambar 2.8b).

Keruntuhan penetrasi dapat dikatakan keruntuhan geser tanah tidak terjadi. Akibat beban yang bekerja pada tanah lunak, pondasi hanya menembus dan menekan tanah ke samping yang menyebabkan pemampatan tanah di dekat pondasi. Penurunan pondasi bertambah hampir secara linier dengan penambahan beban. Penurunan yang terjadi tidak mengakibatkan gerakan arah lateral yang menuju kedudukan kritis keruntuhan tanah, sehingga kuat geser ultimit tanah tidak dapat berkembang. Saat keruntuhan, bidang runtuh tidak terlihat sama sekali (Gambar 2.8c).

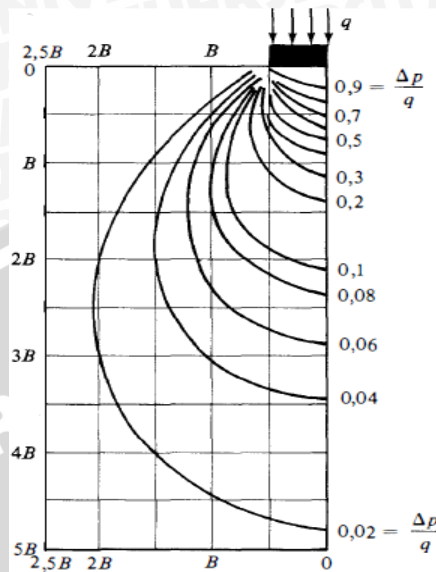
Jika tanah tidak mudah mampat dan kuat gesernya tinggi, maka keruntuhan geser umum akan terjadi. Tipe keruntuhan penetrasi biasanya terjadi terutama pada tanah-tanah yang mudah mampat, seperti pasir tidak

padat dan lempung lunak, dan banyak terjadi pula jika kedalaman pondasi (D_f) sangat besar bila dibandingkan dengan lebarnya (B). Akan tetapi, model keruntuhan pondasi hanya akan terjadi pada tipe pondasi tertentu tergantung dari banyak faktor, seperti pada tipe tanah tertentu tidak dapat menunjukkan tipe model keruntuhan pondasi.



Gambar 2.8 Macam Keruntuhan Pondasi; (a) Keruntuhan geser umum; (b) Keruntuhan geser lokal; (c) Keruntuhan penetrasi
Sumber: Vesic (1963)

Pada tanah yang mendukung pondasi dengan berbagai bentuk umumnya terjadi kenaikan tegangan. Kenaikan tegangan pada tanah tersebut tergantung pada beban per satuan luas dimana pondasi berada, kedalaman tanah di bawah pondasi dimana tegangan tersebut ditinjau, dan faktor-faktor lainnya. Boussinesq (1883) telah memecahkan masalah untuk menghitung penambahan tegangan vertikal tanah di bawah beban lentur berbentuk bujur sangkar seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Isobar Tegangan Vertikal di Bawah Luasan Berbentuk Bujur Sangkar yang Menerima Beban Merata
Sumber: Das (1995:165)

Isobar tegangan vertikal di bawah luasan berbentuk bujur sangkar pada Gambar 4.9 akan digunakan sebagai acuan untuk area tanah yang akan distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mix* (DSM), dimana kolom DSM akan diinstalasi atau diletakkan pada area yang terpengaruh tegangan vertikal, yaitu pada jarak hingga $2B$ arah horizontal dengan panjang kolom hingga $3B$ arah vertikal dari titik pusat beban bekerja. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengurangi pengaruh besarnya tegangan vertikal yang terjadi sehingga daya dukung tanah menjadi meningkat.

2.4 Stabilisasi Tanah

Sifat-sifat tanah di lapangan tidak selalu memenuhi harapan dalam merencanakan suatu konstruksi. Maka apabila dijumpai tanah yang sifat-sifatnya sangat jelek, tanah tersebut harus distabilisasi sehingga dapat memenuhi syarat-syarat teknis yang diperlukan. Tujuan stabilisasi tanah adalah untuk memperbaiki kondisi tanah kemudian mengambil tindakan yang tepat terhadap masalah-masalah yang dihadapi. Stabilisasi tanah dapat berupa

menambah kepadatan tanah, menambah material yang tidak aktif sehingga mempertinggi kohesi dan/atau tahanan geser yang timbul, menambah material agar dapat terjadi perubahan-perubahan alami dan kimiawi material tanah, merendahkan permukaan air tanah (*drainase*), dan mengganti tanah-tanah yang buruk (Soedarmono & Purnomo, 1993:101).

Stabilisasi tanah dapat terdiri dari salah satu atau gabungan pekerjaan-pekerjaan sebagai berikut:

1. Mekanis

Merupakan stabilisasi dengan menggunakan berbagai macam peralatan alat mekanis, seperti:

- a. Mesin gilas (*roller*)
- b. Benda-benda berat yang dijatuhkan (*pounder*)
- c. Peledakan dengan alat peledak (*eksplosif*)
- d. Tekanan statis

2. Bahan pencampur/tambahan (*additive*)

Merupakan stabilisasi dengan mencampur atau menambahkan bahan-bahan tertentu tergantung dari jenis tanah tersebut. Stabilisasi jenis ini dapat mengurangi sifat plastis tanah. Stabilisasi dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

- a. Kerikil untuk kohesif (lempung)
- b. Lempung untuk tanah berbutir kasar
- c. Pencampur kimiawi seperti:
 - Semen Portland (PC)
 - Gamping/kapur
 - Abu batu bara
 - Semen aspal dll.

Pada penelitian ini, stabilisasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan zat aditif. Zat aditif yang digunakan yaitu *fly ash*. Zat aditif tersebut diharapkan akan mampu meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif di daerah Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

2.4.1 Stabilisasi Tanah Lempung Dengan *Fly Ash*

Fly ash merupakan material yang memiliki butiran yang halus, berwarna keabu-abuan, dan diperoleh dari hasil pembakaran batu bara pada pembangkit tenaga listrik. *Fly ash* mengandung unsur-unsur kimia seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero 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 carbon.

Menurut ASTM C618, *fly ash* dibagi menjadi 2 kelas yaitu *fly ash* kelas F dan *fly ash* kelas C. Perbedaan utama dari kedua *fly ash* tersebut adalah banyaknya unsur kalsium, silika, aluminium, dan kadar besi dalam *ash*.

1. *Fly ash* kelas F merupakan *fly ash* yang diproduksi dari pembakaran batu bara *antrachite* atau *bituminous*, mempunyai sifat *pozzolanic* dan untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen. *Fly ash* kelas F memiliki kadar kapur yang rendah ($\text{CaO} < 10\%$).
2. *Fly ash* kelas C merupakan *fly ash* yang diproduksi dari pembakaran batu bara *lignite* atau *subbtuminous* yang mempunyai sifat *pozzolanic* serta *self cementing* (kemampuan untuk mengeras dan menambah kekuatan apabila bereaksi dengan air tanpa adanya penambahan kapur). *Fly ash* kelas C memiliki kadar kapur tinggi ($\text{CaO} > 10\%$).

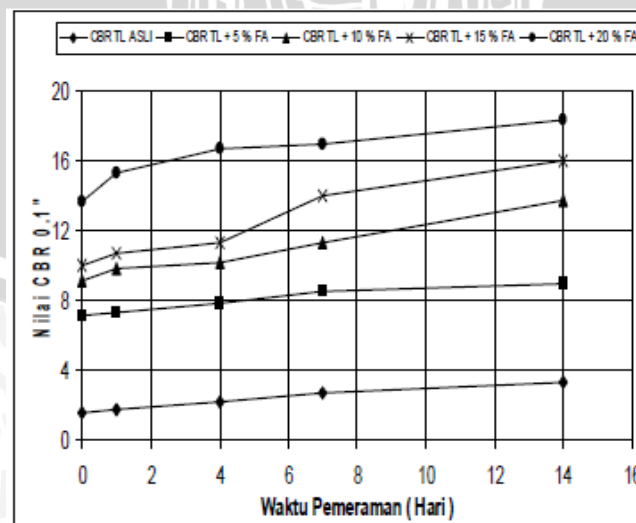
Penambahan *fly ash* pada tanah ekspansif dimaksudkan agar terjadi reaksi *pozzolanic*, yaitu reaksi antara kalsium yang terdapat dalam *fly ash* dengan alumina dan silikat yang terdapat dalam tanah, sehingga menghasilkan masa yang keras dan kaku. Penambahan *fly ash* selain memperkaya kandungan alumina dan silika tanah, juga memperbaiki gradasi tanah. (Budi et al., 2005:21) Berikut ini adalah komposisi *fly ash* batu bara yang diambil dari PLTU Paiton:

Tabel 2.6 Komposisi *Fly Ash* Batu Bara PLTU Paiton

Komponen penyusun	Kandungan (% berat)
SiO ₂	30,25 – 36,83
Al ₂ O ₃	14,52 – 23,78
Fe ₂ O ₃	13,46 – 19,94
CaO	11,40 – 16,57
MgO	5,360 – 8,110
Mn ₃ O ₄	0,140 – 0,480
Na ₂ O	0,250 – 0,740
K ₂ O	0,630 – 1,320
TiO ₂	0,830 – 1,050
P ₂ O ₅	0,630 – 3,750
SO ₃	3,010 – 7,280

Sumber: PJB Paiton (2002)

Surta Ria N.P. (2010) melakukan penelitian dengan melakukan variasi penambahan *fly ash* dengan kadar 5%, 10%, 15%, dan 20% pada tanah ekspansif di Lubuk Pakam, Sumatra Utara. Dengan adanya penambahan kadar *fly ash* serta variasi waktu perawatan (*curing*) dapat meningkatkan nilai CBR. Peningkatan terjadi secara signifikan pada penambahan kadar *fly ash* 15% dengan waktu perawatan 4 -7 hari. Grafik hubungan antara nilai CBR dengan waktu perawatan dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Grafik Hubungan Antara Nilai CBR dan Waktu Perawatan

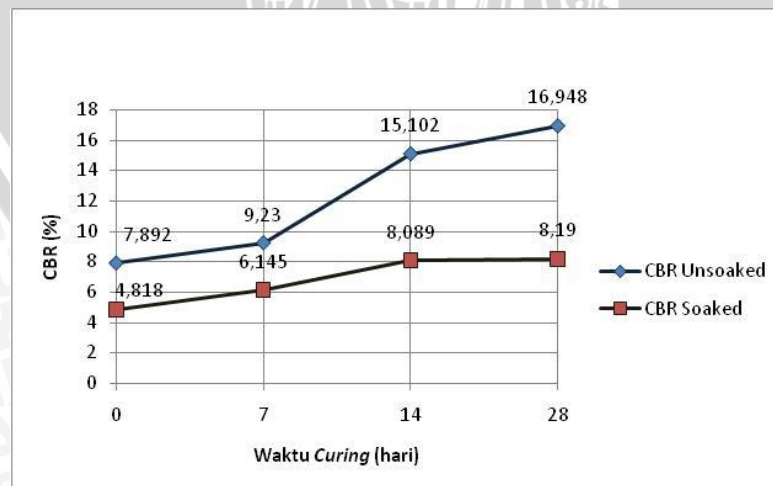
(Curing) Sumber: Ria (2010:282)

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Benny C.L.T. (2014), dengan menambahkan campuran 15% *fly ash* sebagai kadar optimum pada tanah ekspansif di Bojonegoro, Jawa Timur dengan variasi perawatan 0, 7, 14, dan 28 hari. Dengan penambahan 15% *fly ash* serta semakin lamanya waktu perawatan, nilai CBR terus mengalami peningkatan. Dengan waktu perawatan selama 28 hari, diperoleh nilai CBR terbesar yaitu 16,948% (meningkat sebesar 433,6%) dan nilai *swelling* terkecil yaitu 0,381% (menurun hingga 1045,1%). Namun, waktu efektif yang dibutuhkan untuk perawatan adalah 14 hari dimana nilai CBR mengalami peningkatan yang signifikan.

Tabel 2.7 Hasil Uji Pemadatan Standar

KOMPOSISI TANAH	KADAR AIR OPTIMUM (%)	BERAT ISI KERING MAKSIMUM (□d) (gr/cm ³)
Tanah asli	26,891	1,479
Tanah asli + 5% <i>fly ash</i>	26,523	1,434
Tanah asli + 10% <i>fly ash</i>	26,446	1,473
Tanah asli + 15% <i>fly ash</i>	25,842	1,488
Tanah asli + 20% <i>fly ash</i>	25,636	1,476

Sumber: Benny (2014:35)



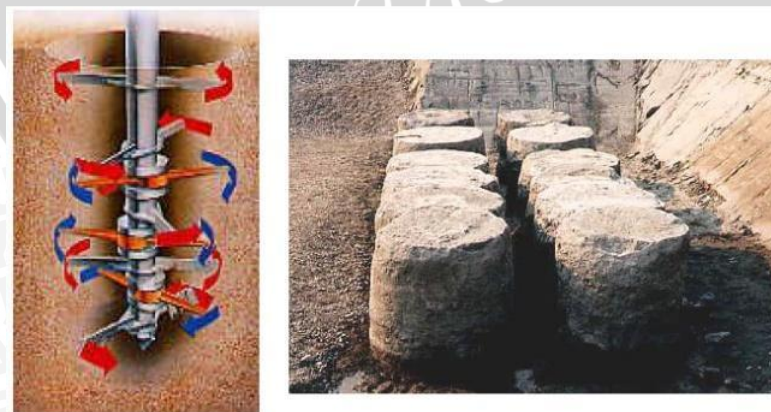
Gambar 2.11 Grafik Hubungan Nilai CBR dengan Waktu Curing

Sumber: Benny (2014:42)

Berdasarkan dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Surta (2010) dan Benny (2014), maka dalam penelitian ini akan dilakukan dengan stabilisasi penambahan 15% *fly ash* pada tanah lempung ekspansif di Bojonegoro dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan waktu perawatan (*curing*) 4 hari.

2.4.2 Metode *Deep Soil Mixing* (DSM)

Menurut Gregory (2012) yang dikutip dari Porbaha et al. (2005) dan EuroSoilStab (2002), *Deep Soil Mixing* (DSM) berguna untuk stabilisasi tanah pada lapisan dalam dan merupakan stabilisasi *in-situ* dimana pengikat basah atau kering dimasukkan ke dalam tanah dan dicampur dengan tanah lunak (lempung, gambut atau tanah organik) dengan cara mekanik atau dengan alat pencampur berupa bor atau *auger*. Pengikat tersebut bisa berupa bahan aditif seperti semen, kapur, campuran semen-kapur dan/atau bahan aditif lainnya. Limbah industri termasuk *slag* dan *ash* juga dapat digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan sifat-sifat tanah. Mirja Kosche (2004) mengatakan bahwa metode ini berguna untuk mengurangi penurunan dan/atau meningkatkan stabilitas tanah. Selain itu juga, DSM dapat berperan seperti *vertical drain* dan dapat mempercepat proses penurunan (*settlement*). Gambar 2.12. menunjukkan proses DSM dan kolom hasilnya di lapangan.

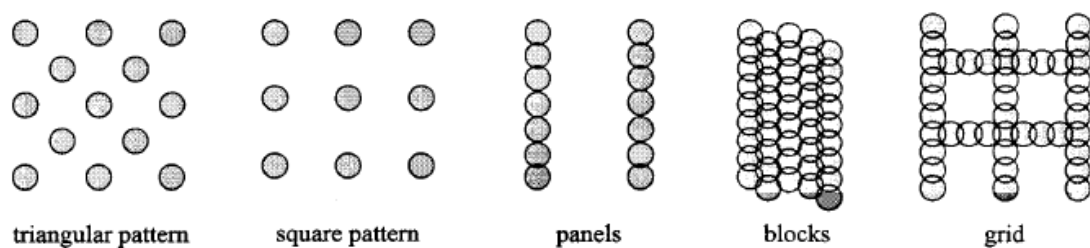


Gambar 2.12 Proses *Deep Soil Mixing* (DSM) dan Hasil Kolom DSM

Sumber: Annad et al. (2008:26)

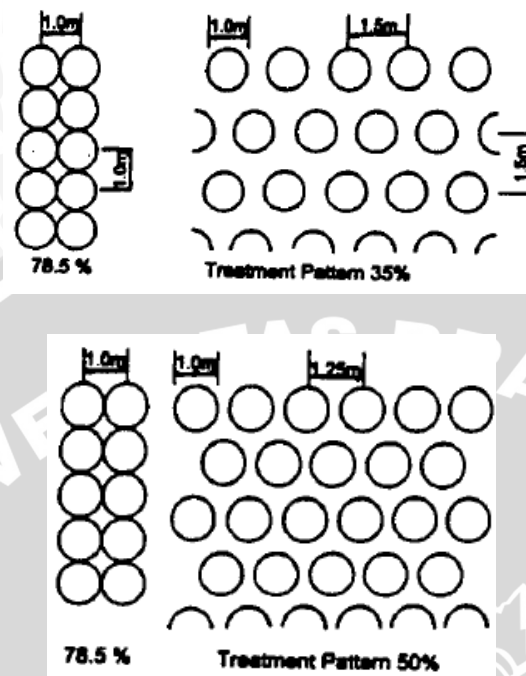
Proses stabilisasi dapat dilakukan dengan cara mekanis *dry mixing*, *wet mixing*, atau *grouting*. *Dry mixing* digunakan untuk lokasi proyek dimana muka air tanah tinggi dan dekat dengan permukaan tanah. Bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dalam bentuk kering. *Wet mixing* digunakan untuk lingkungan yang kering dan gersang atau lokasi dengan muka air tanah yang dalam. Bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dalam bentuk cair (*slurry*) dimana sebelumnya bahan aditif dicampur terlebih dahulu dengan air. *Grouting* dengan atau tanpa jet hidrolik tekanan tinggi telah digunakan untuk memperkuat tanah, membantu proses penggalian, dan mengontrol muka air tanah dalam kegiatan konstruksi (Annad et al, 2008:27).

Kolom *deep soil mixing* (DSM) dapat diletakkan atau diterapkan dengan konfigurasi yang berbeda-beda, seperti seperti *single column*, *blocks column*, *panels*, dan *grids types* yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Untuk mengurangi penurunan dibawah timbunan digunakan konfigurasi *single column* dengan pola persegi. Sedangkan konfigurasi *panels*, *grids*, atau *blocks* biasanya digunakan untuk bangunan atas dengan dimensi yang besar seperti lereng, galian, dam, dinding penahan tanah, dan di bawah timbunan.

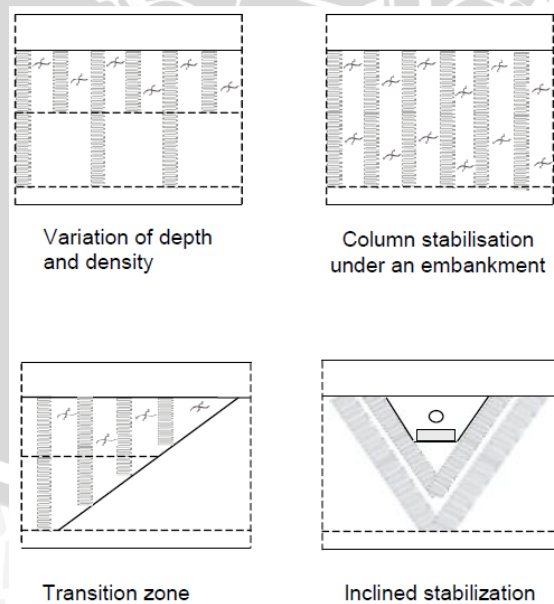


Gambar 2.13 Konfigurasi Kolom DSM Sumber: Mirja (2004:12)

Dalam beberapa kasus di lapangan, variasi konfigurasi dan jarak antar kolom dilakukan guna mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas tanah. Variasi ini pernah dilakukan pada proyek *Tomei Freeway* di Jepang, seperti yang terlihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM Sumber: Yang et al. (1998)



Gambar 2.15 Contoh Penempatan Kolom Sumber: EuroSoilStab (2002:10)

Pada pelaksanaannya, metode DSM dilakukan sebagai alternatif

stabilisasi dengan tujuan sebagai berikut:

- Meningkatkan daya dukung tanah lunak
- Mengurangi penurunan tanah
- Mencegah kegagalan geser pada lereng dan timbunan
- Melindungi struktur di sekitar lokasi penggalian
- Mencegah deformasi geser
- Memperbaiki tanah yang tercemar

Adapun keuntungan metode DSM dari pada metode stabilisasi tanah lainnya yaitu (EuroSoilStab, 2002:11):

- Ekonomis
- Fleksibilitas
- Menghemat bahan dan energi
- Cepat dalam pelaksanaan
- Dapat dengan mudah terhubung dengan struktur lainnya dan di sekitarnya (tidak ada perbedaan penurunan yang merugikan)
- Meningkatkan sifat mekanis tanah.

2.4.3 Uji Laboratorium Metode *Deep Soil Mixing* (DSM)

Dalam penerapan metode DSM ini, ada beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari kolom DSM itu sendiri. Annad et al. (2008) yang dikutip dari Babasaki et al. (1996) mengatakan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi tersebut, antara lain: karakteristik dan kondisi tanah, karakteristik zat aditif, cara pencampuran, dan waktu *curing*. Pada penelitian akhir-akhir ini, pengaruh dari beberapa faktor, termasuk tipe dan kadar zat aditif yang digunakan, rasio campuran air serta lamanya *curing* dalam stabilisasi tanah lempung ekspansif dilakukan di dalam laboratorium dan disimulasikan seperti di lapangan.

Ada beberapa metode untuk menyiapkan benda uji pada metode DSM. Tidak ada prosedur standar yang harus dilakukan pada pengujian laboratorium. Namun, beberapa penelitian yang pernah dilakukan dapat menjadi

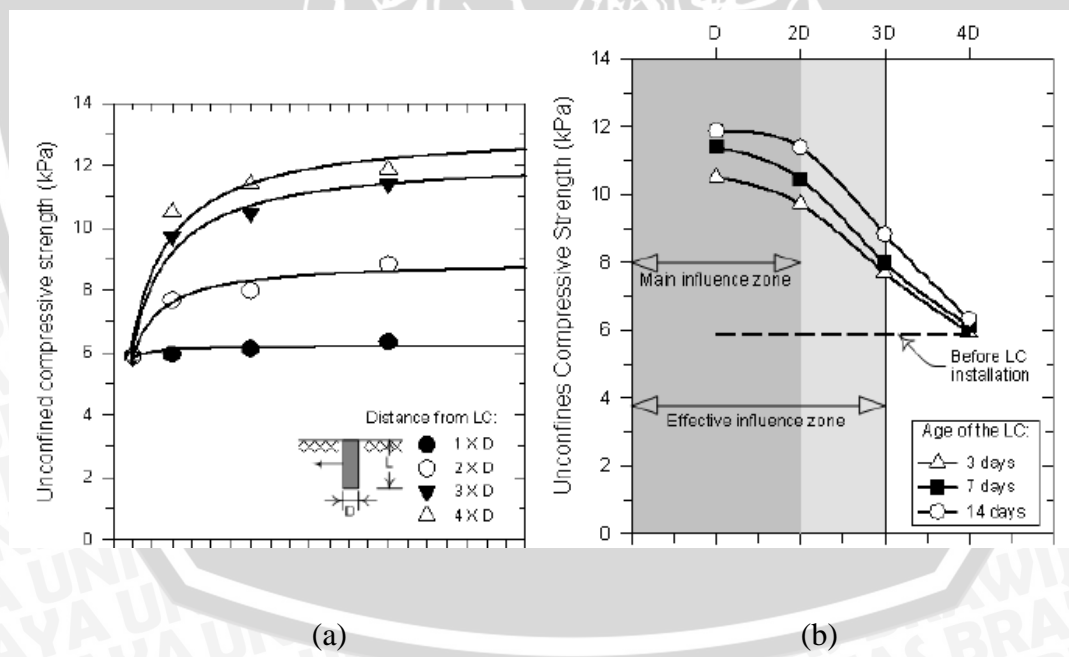
referensi dalam menyiapkan benda uji DSM (lihat Tabel 2.8).

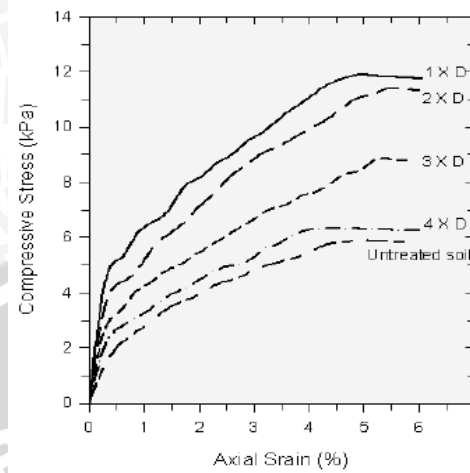
Tabel 2.8 Beberapa Standar Persiapan Benda Uji Metode DSM pada Uji Laboratorium

Preparation standards	Field sampling and storage	Sample preparation molds	Type of soil mixer	Sample preparation procedure	Curing conditions
Japanese Geotechnical Society, JGS 0821-2000, Section 7.2	Thin walled sampling, store the specimens at original water content	The standard size of the mold is defined to create a specimen with a 5 cm diameter and 10 cm height.	Domestic dough mixer with 5,000 to 30,000 cm ³ mixing bowl and hook type paddle, capable of 120 to 300 rpm planetary motion (Fig. 2.11)	Mixing duration: 10 minutes with occasional hand mixing, compacted in 3 lifts with poking using a 5 mm metal rod and light tamping to exclude air voids	The sample ends are properly sealed with specified sealants and stored at 20±3°C for the specified time at 95% relative humidity
EuroSoilStab, CT97-0351. (Project No. BE 96-3177)	Tube, piston or Delft samplers, stored at in situ conditions	Plastic tubes or plastic coated cardboard, 5 cm diameter and 10 cm height coated with oil or wax on the inner side	Dough mixer or kitchen mixer with sufficient capacity and rpm for all soil types	Mixing duration: 5 minutes and is a variable depending on the soil type. Circular steel stamp 10 mm thick and 45 mm diameter, attached to a 50 mm long rod. Static load of 100 kPa may be used for 2 seconds on each layer	No mention of humidity, store samples at a constant temperature of 18-22 °C in properly sealed conditions
Al-Tabba et al. (1999) and Shen et al. (2003)	N/A	50, 100 and 150 mm diameter soil mixed columns are prepared in test pits with same principle as the DSM column installing machine in field	Sensor controlled speed and rpm of the augers. The equipment mainly consists of slurry injection part, a mixing device and a controlling panel pressure control (Fig. 2.12)	Control panel operated and is dependant on soil type. Injection pressure can be adjusted from several kPa to several hundred kPa. Consolidation pressure can be simulated through air pressure	Cured at room temperature for a specific curing period
Jacobson et al (2002), Virginia Tech and VDOT, United States	Bulk samples with minimized exposure to air and stored at 100% Relative humidity at 20°C	50 mm diameter and 100 mm tall one time use plastic molds which can be easily tearable during sample extraction	Kitchen Aid dough mixer with dough hook. Outer spindle rotating at 155 rpm and inner spindle at 68 rpm to mix sufficient sample to form a batch of eight samples	Mixing duration of 5 minutes with intermittent hand mixing. 25 mm (1 inch) thick lifts in molds, poking with 5 mm brass rods evenly 25 times. 100 kPa pressure for 5-10 seconds using a 48 mm aluminum piston.	Cured at 100% relative humidity and 20±3 °C for 7, 14, 28 and 56 days

Sumber: Annad et al. (2008:32-33)

Agus Setyo M. (2009) telah melakukan penelitian mengenai perkuatan kolom-kapur pada tanah lunak di daerah Bantul-Yogyakarta skala laboratorium dengan tujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom-kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Kolom kapur dirancang sebagai kolom tunggal dengan diameter (D) 50 mm dengan panjang 200 mm dan diletakkan di dalam kotak baja berukuran 1,2 m × 1,2 m dan tinggi 1 m. Hasil pengujian menyatakan bahwa seiring dengan penambahan kadar kapur, kuat dukung tanah meningkat dari 0,23 kN menjadi 5,2 kN setelah diperkuat dengan kolom-kapur. Pemasangan kolom-kapur meningkatkan kekuatan tanah disekitarnya baik pada arah radial maupun vertikal hingga mencapai 3×D dari pusat kolom-kapur. Grafik hasil uji pembebanan pada sampel kolom-kapur dan kurva tegangan-regangan tanah dapat dilihat pada Gambar 2.16



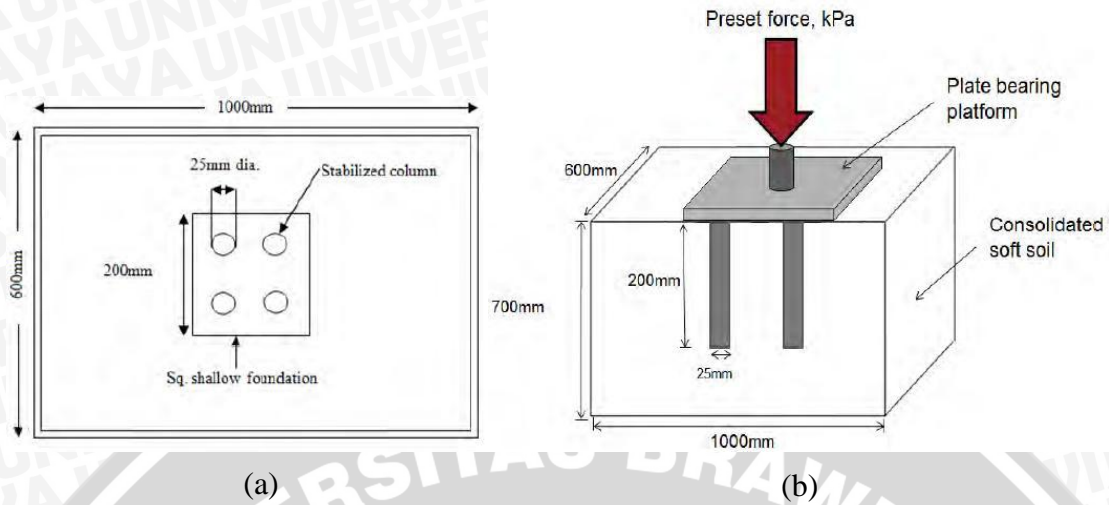


(c)

Gambar 2.16 (a) Grafik Hubungan Waktu *Curing* Terhadap Daya Dukung, (b) Grafik Hubungan Prosentase Penurunan Daya Dukung pada Beberapa Titik di Sekitar Kolom Kapur, dan (c) Grafik Tegangan-Regangan Tanah dari Hasil Uji UCS

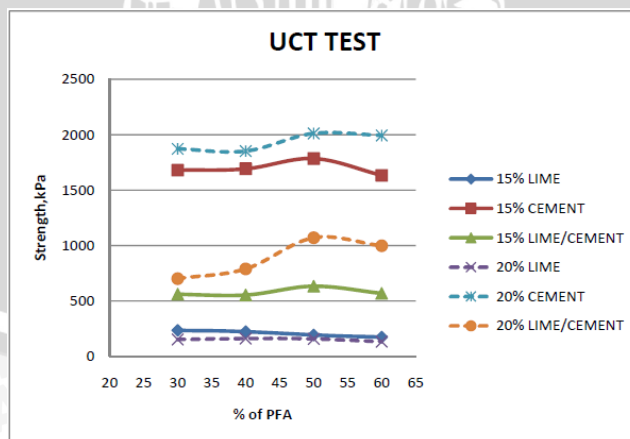
Sumber: Agus (2009:204-205)

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Ailin Nur et al. (2011) yang meneliti tentang daya dukung tanah yang distabilisasi dengan kolom kapur-semen yang ditambahkan *Pulverized Fuel Ash* (PFA) di Malaysia dengan model laboratorium. Sampel yang terdiri dari kapur, semen, dan PFA disiapkan dalam bentuk kolom dengan diameter 25 mm dan tinggi 200 mm. Pencampuran sampel dengan tanah dilakukan hingga semuanya homogen dan dicampur selama 2 sampai 5 menit. Kemudian, sampel dimasukkan ke dalam dengan menggunakan pipa PVC ke dalam kotak dengan ukuran 100×60×70 cm yang telah diisi dengan tanah lempung jenuh (lihat Gambar 2.16).



Gambar 2.17 (a) Rencana Penempatan Kolom PFA; (b) Pemodelan Laboratorium
 Sumber: Ailin et al. (2011)

Dari uji *Unconfined Compressive Strength* diperoleh hasil bahwa setelah *curing* 28 hari dengan menambahkan 40% PFA dan 15% kapur dapat meningkatkan kekuatannya 2 sampai 3 kali dari tanah asli. Namun, ketika kapur diganti dengan semen, peningkatan kekuatan tanah terjadi secara signifikan yaitu hingga 5 kali dari tanah asli. Penggunaan PFA dengan kadar lebih dari 50% dan menurunkan kekuatan tanah (lihat Gambar 2.17).

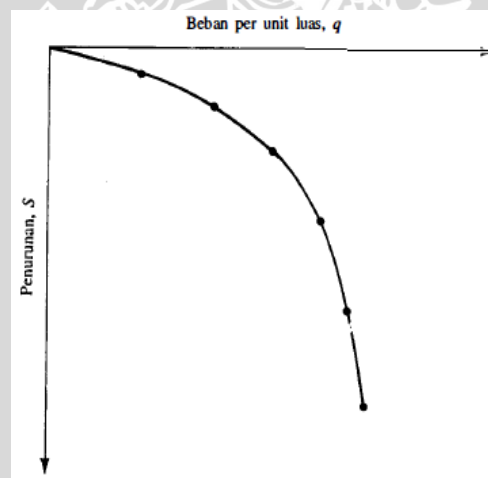


Gambar 2.18 Grafik Hubungan Kadar PFA Terhadap Nilai Tegangan
 Sumber: Ailin et al. (2011)

2.5 Uji Beban (*Load Test*)

Das (1995) menyatakan bahwa dalam beberapa keadaan, uji beban (*load test*) dilakukan untuk menentukan daya dukung batas pondasi yang bersangkutan. Metode yang baku mengenai uji beban di lapangan diatur oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*) nomor D-1194. Diperlukan adanya pelat dukung (*bearing plate*) untuk mendukung pelaksanaan uji beban pada pondasi. *Bearing plate* diletakkan pada tanah dasar yang kemudian dilakukan uji beban dengan memberikan beban di atas *bearing plate* secara bertahap.

Selanjutnya, beban yang bekerja didiadakan sedemikian rupa sehingga dianggap cukup untuk menyebabkan penurunan. Apabila penurunan *bearing plate* sudah kecil sekali (dapat diabaikan), maka penambahan beban dilakukan lagi secara bertahap. Dari hasil pengujian, akan diperoleh grafik hubungan antara beban dan penurunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.19 Bentuk Umum Grafik Hubungan Antara Beban dan Penurunan yang didapat dari Uji Beban (*Load Test*)

Apabila digunakan hasil uji beban (*load test*), maka daya dukung batas tanah (q_u) yang bersangkutan untuk pondasi dangkal dapat dihitung dengan metode pendekatan berikut:

Untuk tanah lempung:

$$q_u(\text{pondasi}) = q_u(\text{pelat}) \quad (2-3)$$

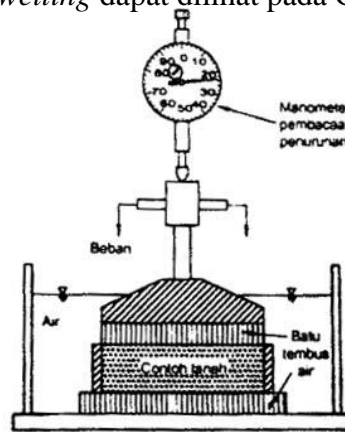
$\frac{B(\text{pondasi})}{B(\text{pelat})}$ Untuk tanah pasir:

$$q_u(\text{pondasi}) = q_u(\text{pelat}) \quad (2-4)$$

2.6 Uji Kembang Susut (Swelling)

Swelling adalah bertambahnya volume tanah secara perlahan-lahan akibat tekanan air pori berlebih negatif. Tanah yang banyak mengandung lempung khususnya tanah lempung ekspansif mengalami perubahan volume yang ekstrim ketika kadar air berubah. Perubahan itulah yang dapat membahayakan konstruksi di atasnya. Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor, yaitu tipe dan jumlah mineral di dalam tanah, kadar air, susunan tanah konsentrasi garam dalam air pori, sementasi, adanya bahan organik, dll.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai *swell* akibat adanya beban vertikal. Hal ini terjadi akibat air yang masuk ke pori-pori tanah dan menyebabkan perubahan isi pori tanah sehingga tekanan vertikal bekerja pada tanah tersebut. Skema uji *swelling* dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Pengujian *Swelling*

Tekanan ke tanah sangat mempengaruhi proses terjadinya pengembangan pada tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah

mengembang disebut tekanan pengembangan (*swelling pressure*). Pada tanah asli (*undisturbed*) Chen (1988) mendefinisikan tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah untuk mengembang pada berat volume kering di tempat. Sedangkan untuk tanah yang dibentuk kembali (*remolded*) pada tanah 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga berat volume kering tersebut (Hardiyatmo, 2010:134).

Secara umum sifat kembang susut tanah lempung tergantung pada sifat plastisitasnya, semakin plastis mineral lempung semakin potensial untuk menyusut dan mengembang.

