

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

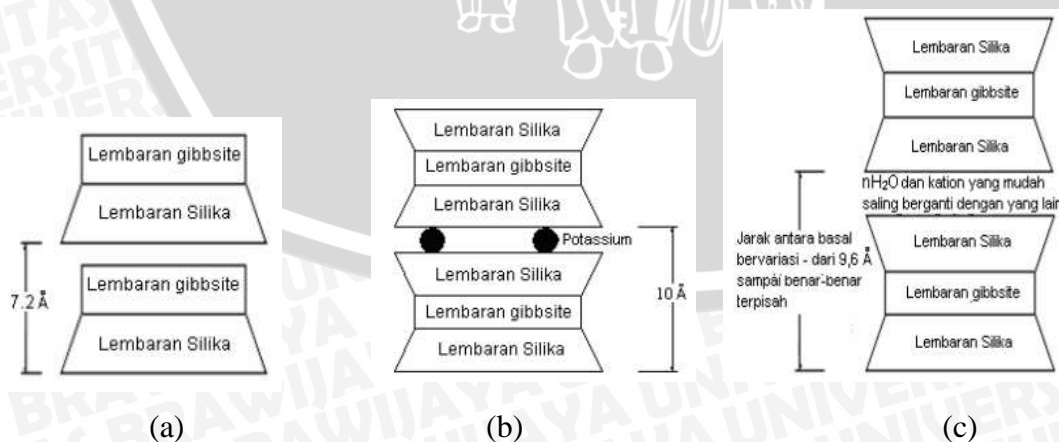
2.1 Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan tanah yang berukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis yang berasal 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 (Das, 1995).

Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung (Hardiyatmo, 1999) adalah sebagai berikut:

1. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm
2. Permeabilitas rendah
3. Kenaikan air kapiler tinggi
4. Bersifat sangat kohesif
5. Kadar kembang susut yang tinggi
6. Proses konsolidasi lambat.

Tanah lempung terdiri dari butir-butir yang sangat kecil (< 0.002 mm) dan menunjukkan sifat plastisitas dan kohesi. Kohesi menunjukkan kenyataan bahwa bagian-bagian itu melekat satu sama lainnya, sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuk bahan itu dirubah-rubah tanpa perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk aslinya, dan tanpa terjadi retakan-retakan atau terpecah-pecah (L.D Wesley, 1977). Menurut Das (1995) terdapat tiga jenis kelompok mineral penyusun lempung, diantaranya *kaolonite*, *illite* dan *montmorillite*.



Gambar 2.1. Struktur Penyusun Lempung (a) *Kaolite*, (b) *Illite*, dan (c) *Montmorillite*

Sumber: Braja M. Das (1995)

2.1.1 Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang mempunyai potensi kembang susut yang besar. Apabila terjadi peningkatan kadar air tanah akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan pengembangan dan sebaliknya apabila kadar air berkurang akan terjadi penyusutan.

Tanah lempung ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai karakter kembang susut yang besar seperti pada mineral *montmorillonite*. Mineral *montmorillonite* mempunyai luas permukaan yang lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah yang banyak bila dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga komponen ini menjadikan tanah lempung tidak stabil jika berhubungan dengan air.

Untuk tanah ekspansif, ada beberapa pendekatan spesifik untuk mengatasi sifat kembang susut yang besar, yaitu :

- a. Mencegah terjadinya perubahan kadar air pada tanah.
- b. Memberikan beban yang cukup besar diatas permukaan tanah untuk melawan tekanan pengembangan dari tanah.
- c. Memperbaiki sifat yang merusak dari tanah dasar dengan cara stabilisasi.

2.2 Sistem Klasifikasi Tanah

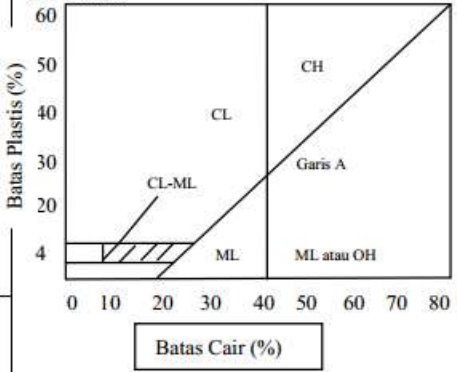
Untuk menentukan jenis-jenis tanah pada suatu daerah dapat digunakan sitem klasifikasi tanah. Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem penggolongan yang sistematis dari jenis-jenis tanah yang mempunyai sifat-sifat yang sama ke dalam kelompok-kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya (Das, 1995). Umumnya dipakai dua sistem klasifikasi tanah yaitu sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) dan sistem klasifikasi *American Association Of State Highway and Transportation Official* (AASHTO).

2.2.1 Sistem Klasifikasi USCS

Dalam sistem ini, *Cassagrande* membagi tanah atas 3 (tiga) kelompok yaitu :

1. Tanah berbutir kasar, < 50% lolos saringan No. 200.
2. Tanah berbutir halus, > 50% lolos saringan No. 200.
3. Tanah organik yang dapat dikenal dari warna, bau dan sisa-sisa tumbuh-tumbuhan yang terkandung di dalamnya.

Tabel 2.1. Unified Soil Classification System (USCS)

| Divisi Utama | | Simbol | Nama Umum | Kriteria Klasifikasi | |
|--|---|--|---|--|---|
| Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200 | Kerikil $50\% \geq$ fraksi kasar tertahan saringan No. 4 | Kerikil bersih (hanya kerikil) | GW | Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW |
| | | Kerikil dengan Butiran halus | GP | Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus | |
| | | Kerikil dengan Butiran halus | GM | Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau | |
| | | | GC | Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung | |
| | Pasir $\geq 50\%$ fraksi kasar lolos saringan No. 4 | Pasir bersih (hanya pasir) | SW | Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW |
| | | | SP | Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus | |
| | | Pasir dengan butiran halus | SM | Pasir berlanau, campuran pasir-lanau | Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol |
| | | | SC | Pasir berlempung, campuran pasir-lempung | |
| | Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200 | Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$ | ML | Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung | Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  |
| | | | CL | Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>) | |
| | | | OL | Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah | |
| | | Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$ | MH | Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis | |
| CH | | | Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>) | | |
| OH | | | Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi | | |
| Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi | | | PT | <i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi | |

2.2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Hoentogler dan Terzaghi, yang akhirnya diambil oleh *Bureau Of Public Roads*. Sistem ini membedakan tanah dalam 8 kelompok yang diberi nama dari A-1 sampai A-8. A-8 adalah kelompok tanah organik yang bersifat tidak stabil sebagai bahan lapisan struktur jalan raya, maka pada revisi terakhir oleh AASHTO diabaikan.

Pada sistem klasifikasi AASHTO tanah bebutir lolos saringan no. 200 kurang dari 35% maka tanah diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A3. Tanah dengan persentase lolos saringan no. 200 lebih dari 35% diklasifikasikan ke dalam kelompok A4, A-5, A-6 dan A-7.

Sistem klasifikasi didasarkan pada kriteria di bawah ini (Das, 1995):

a. Ukuran butir:

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm)

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No.10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm)

Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No.200

b. Plastisitas:

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas [*plasticity index* (PI)] sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih

c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

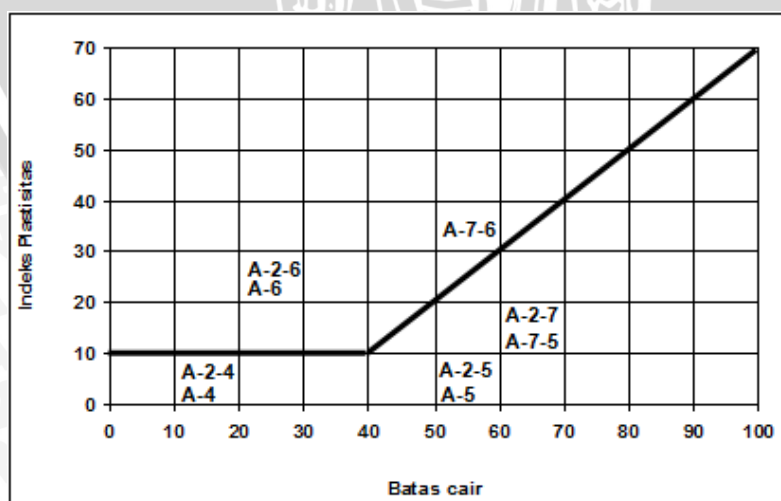
Tabel 2.2. American Association Of State Highway and Transportation Official (AASHTO)

| 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) | | | |
|--|---|--------------------|-------------------|-------------------------|
| | 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, $PL > LL - 30$



Gambar 2.2. Rentang dari Batas Cair dan Indeks Plastisitas Sistem AASHTO

Sumber: Das (1995)

2.3 Identifikasi Lempung Berpotensi Ekspansif

Identifikasi tanah ekspansif dapat dilakukan dengan 3 cara (Chen, 1975), yaitu:

1. Identifikasi Mineralogi
2. Cara Tidak Langsung (*single index method*)
3. Cara Langsung

2.3.1 Identifikasi Mineralogi

Analisa mineralogi sangat berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang susut lempung. Identifikasi mineralogi dapat dilakukan dengan cara:

1. Difraksi Sinar X (*X-Ray Diffraction*).
2. Penurunan Panas (*Differensial Thermal Analysis*).
3. Analisa Kimia (*Chemical Analysis*).
4. *Electron Microscope Resolution*.

2.3.2 Cara Tidak langsung

Hasil sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi tanah yang berpotensi ekspansif. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas *Atteberg*, *Linier shrinkage test* (uji susut linier), uji pengembangan (*swelling test*).

2.3.2.1 *Atteberg Limit*

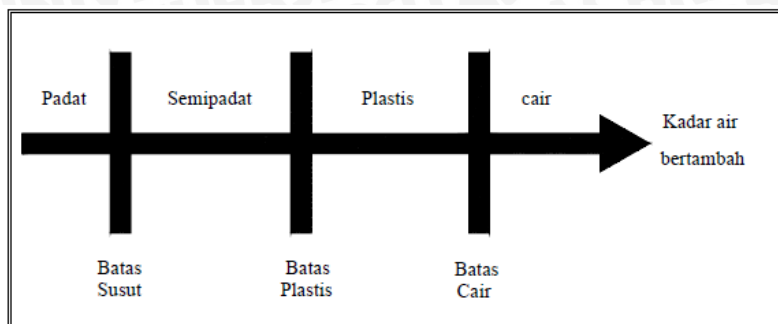
Menurut Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji *Atteberg*. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitas (Chen, 1975), seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas

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

Sumber:Chen (1975)

Menurut *Atteberg* tanah dapat dipisahkan dalam empat keadaan dasar yaitu padat, semi padat, plastis dan cair seperti yang ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 2.3. Batas-batas Atterberg

1. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (*Liquid Limit*) didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair ditentukan dari pengujian Casagrande (1948).

2. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas Plastis (*Plastic Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan silinder sekitar 3 mm mulai retak-retak ketika dipilin-pilin.

Tabel 2.4 Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP

| Plasticity Index (%) | Swelling Potensial |
|----------------------|--------------------|
| 0 - 15 | Low |
| 10 - 35 | Medium |
| 35 - 55 | High |
| > 55 | Very High |

Sumber: Chen (1975)

3. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Suatu tanah akan mengalami penyusutan bila kadar air secara perlahan-lahan hilang dari dalam tanah. Dengan kehilangan air terus menerus akan mencapai suatu tingkat keseimbangan atau telah mencapai batas susutnya. Batas susut (*Shrinkage Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu

persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah.

Tabel 2.5. Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI

| Plasticity Index (%) | Shrinkage Index (%) | Degree of Expansion |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| <12 | <15 | Low |
| 12 - 30 | 15 - 30 | Medium |
| 23 - 30 | 30 - 40 | High |
| >30 | > 40 | Very High |

Sumber: Raman (1967)

2.3.2.2 Linier Shrinkage

Altmeyer (1955) dalam Chen (1975), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai presentasi susut linier dan persentase batas susut Atteberg, seperti yang ditunjukkan Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Klasifikasi Potensi Mengembang Didasarkan pada *Atteberg Limit*

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

Sumber: Altmeyer (1955)

Susut linier (*linier shrinkage*) didefinisikan sebagai pengurangan massa tanah pada satu ukuran yang dinyatakan dalam persentase terhadap keadaan sebelum terjadi pengurangan.

2.3.2.3 Uji 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:

1. Tipe dan jumlah mineral di dalam tanah
2. Kadar air
3. Susunan tanah
4. Konsentrasi garam dalam air pori
5. Sementasi
6. Adanya bahan organik, dll.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai *swelling* 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.

Tekanan ke tanah sangat mempengaruhi persentase terjadinya pengembangan pada tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah mengembang disebut tekanan pengembangan (*swelling pressure*). Chen (1988), menyatakan bahwa tekanan pengembangan tidak tergantung pada kadar air awal, derajat kejenuhan awal, tingkat ketebalan tanah, dan variasi berat volume kering, dan oleh karena ini merupakan fundamental sifat-sifat tanah ekspansif.

Tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah untuk mengembang pada berat volume kering di tempat, hal ini berlaku untuk tanah asli (*undisturbed*). Sedangkan untuk tanah yang dibentuk kembali (*remolded*) pada tanah 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga berat volume kering tersebut.

Tabel 2.7. Hubungan Potensi Mengembang dengan Tekanan Mengembang

| Swelling potential | Swelling pressure |
|--------------------|-------------------|
| Low | <2 |
| Medium | 2-4 |
| High | 4-7 |
| Very high | >7 |

Dari Tabel 2.7 dapat dilihat bahwa potensi pengembangan suatu sampel tanah berdasarkan tekanan mengembang. Untuk nilai *swelling pressure* kurang dari 2 memiliki *swelling potential* yang rendah sedangkan untuk *swelling pressure* yang memiliki nilai lebih dari 7 memiliki *swelling potential* yang sangat tinggi.

2.3.2.4 Activity Method

Menurut Skempton (1953) yang disebut aktivitas dapat diketahui berdasarkan rumus berikut:

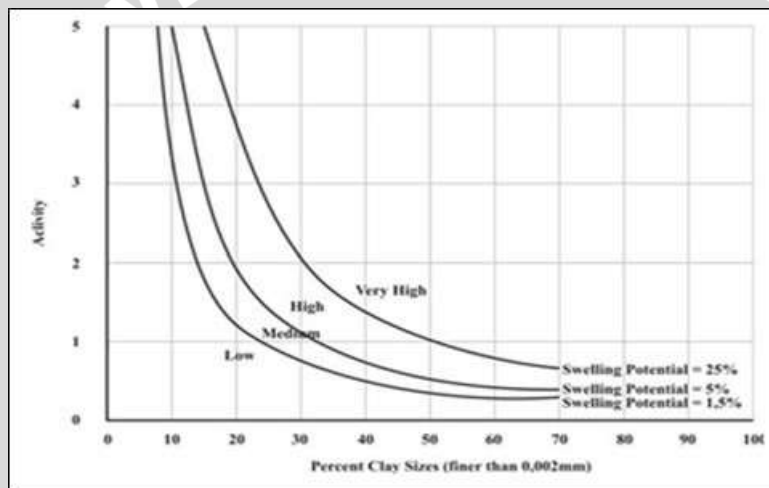
$$\text{Activity (A)} = \frac{PI}{C-10} \dots\dots\dots(2-1)$$

Keterangan: PI = Indeks Plastisitas

C = Presentase lempung lolos saringan 0,002 mm

Dari rumus tersebut kategori tanah terbagi dalam tiga golongan yaitu:

- $A < 0,75$ (Tidak Aktif)
- $0,75 < A < 1,25$ (Normal)
- $A > 1,25$ (Aktif)



Gambar 2.4. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

Sumber: Seed dkk. (1962)

2.3.3 Cara Langsung

Metode pengukuran langsung merupakan suatu cara yang digunakan untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Terdapat dua cara dalam pengukuran tekanan pengembangan secara langsung yaitu pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi, kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ke tanah semula. Cara yang kedua yaitu dengan merendam tanah dalam air dengan mempertahankan volume atau mencegah terjadinya pengembangan dengan cara menambah beban di atasnya setiap saat. Metode ini biasanya disebut *constan volume method*.

2.4 Stabilisasi Tanah

Dalam suatu pekerjaan konstruksi terdapat kondisi tanah yang tidak memenuhi kualitas persyaratan fisik maupun teknis. Karena itu perlu dilakukan usaha perbaikan sifat-sifat tanah yang disebut stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah adalah suatu cara yang digunakan untuk meningkatkan kemampuan daya dukung tanah dasar terhadap konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Stabilisasi tanah dibagi menjadi dua metode, yaitu stabilisasi secara mekanis dan kimiawi. Stabilisasi tanah dengan cara mekanis adalah perbaikan dengan berbagai jenis pemadatan mekanis, seperti mesin gilas, benda berat yang dijatuhkan (*pounder*), peledakan dengan alat peledakan, dan lain-lain. Sedangkan stabilisasi tanah secara kimiawi adalah perbaikan dengan bahan *additive* seperti semen, gamping/kapur, *fly ash*, dan lain-lain. Metode ini sangat bergantung pada lama waktu pemeraman, hal ini disebabkan karena persentase perbaikan sifat-sifat tanah terjadi persentase kimia yang membutuhkan waktu lama untuk zat kimia yang ada didalam zat *additive* untuk bereaksi.

2.4.1 Stabilisasi tanah menggunakan Kapur

Kapur adalah salah satu bahan bangunan yang dapat digunakan untuk bahan stabilisasi tanah. Alternatif penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah merupakan proses perbaikan tanah secara kimiawi. Kapur dihasilkan dari pembakaran batu gamping, sedangkan batu gamping terbentuk dari sedimen kimia yang terdiri dari kalsit.

Istilah kapur mengandung tiga pengertian yaitu kalsium karbonat (CaCO_3) untuk keperluan pertanian, kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang terhidrasi atau kapur mati (*slake lime*), dan kalsium oksida (CaO) yang disebut kapur hidup atau *quick lime*. Sebagai bahan stabilisasi biasanya digunakan kapur mati (*slake lime*) atau kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang dihasilkan dari kalsium karbonat (CaCO_3) ditambahkan air (H_2O). Apabila kapur dengan mineral lempung bereaksi, maka akan terbentuk gel yang keras yaitu kalsium silikat yang mengikat partikel tanah. Gel silika bereaksi dengan melapisi dan mengikat partikel lempung dan menutup pori-pori tanah sehingga memperkecil indeks plastisitas tanah yang disebabkan karena naiknya nilai batas plastis dan disertai dengan penurunan batas cair.

Menurut peraturan SK SNI S-01-1994-03 yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum mensyaratkan bahan kapur untuk stabilisasi adalah sebagai berikut:

1. Kapur berbentuk butiran halus

2. Jenis Kapur yang digunakan sebagai bahan stabilisasi adalah kapur padam dan kapur tohor
3. Spesifikasi ini mencakup persyaratan kapur tipe I dan II, yang masing-masing tipe terdiri dari kelas A, B, C. Kapur tipe I adalah kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi, dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4% berat. Kapur tipe II adalah kapur magnesium atau dolomit yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan paling tinggi 36% berat. Sedangkan ukuran butiran maksimum kelas A, B, C dan persyaratan kimia kapur tipe I dan II dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Persyaratan Kimia Kapur Tipe I dan Tipe II

| No | Senyawa | Kelas | | |
|----|--|-------|-----|-----|
| | | A | B | C |
| 1 | HYDRATE ALKALINITY CA(OH) | 90% | 85% | 75% |
| 2 | KALSIUM OKSIDA ANHIDRATE (CO) MAKSIMUM | 7% | 8% | 9% |
| 3 | KADAR AIR BEBAS MAKSIMUM | 3% | 3% | 2% |

| Tipe II | | | | |
|---------|--|-------|-----|-----|
| No | Senyawa | Kelas | | |
| | | A | B | C |
| 1 | KALSIUM OKSIDA MAGNESIUM OKSIDA (CAOMGO) MINIMUM | 98% | 96% | 94% |
| 2 | KALSIUM OKSIDA ANHIDRAT (CO) | 7% | 8% | 9% |
| 3 | KADAR AIR BEBAS MAKSIMUM | 3% | 3% | 2% |

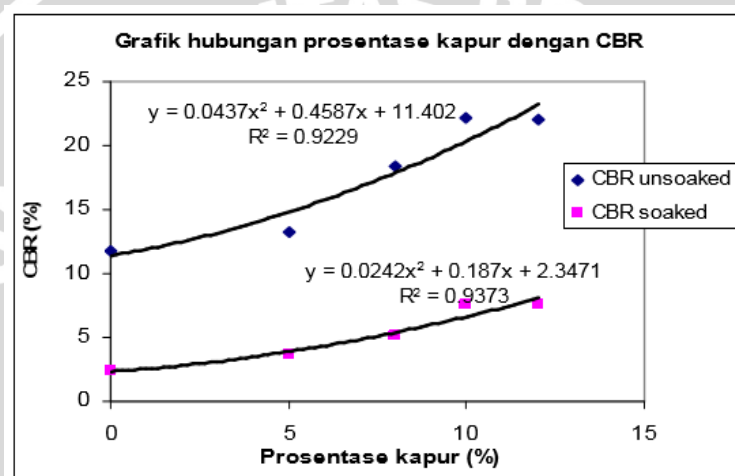
Penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah didasarkan pada sumber-sumber penelitian yang sudah dilakukan diantara lain:

1. Warsiti (2009) dengan judul “Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur”. Pada Penelitian tersebut digunakan kadar kapur sebesar 5%, 8%, 10%, dan 12% dengan waktu *curing* 3 hari. Hasil penelitian Warsiti menunjukkan bahwa penambahan kapur 10% dengan waktu *curing* 3 hari dapat meningkatkan CBR. Dalam kondisi *unsoaked* akan mengalami perbaikan dari 11,88% menjadi 22,1% pada persentase kapur 10%. Begitu pula hasil CBR dalam kondisi *soaked* mengalami peningkatan yang cukup besar, yaitu dari 2,45% menjadi 7,6% pada persentase kapur 10%. Hasil pengujian *swelling* menghasilkan penurunan dengan bertambahnya persentase kapur dengan kata lain semakin banyak persentase kapur semakin kecil *swelling* yang terjadi.

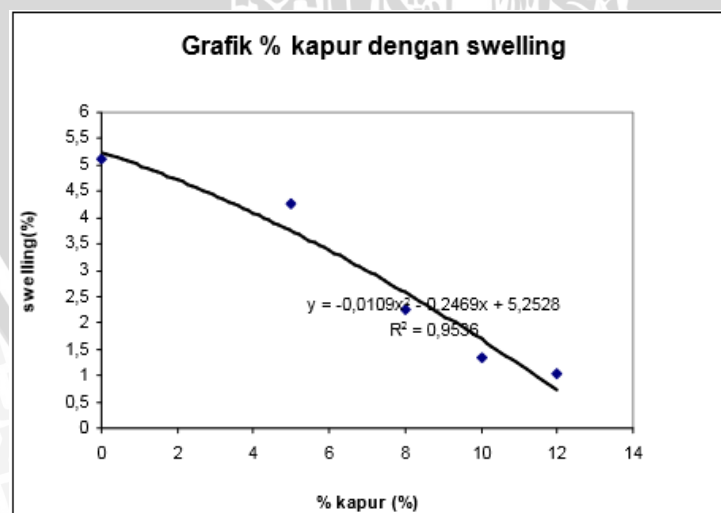
Tabel 2.9. Hasil Pengujian Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur

| Jenis penelitian Kd air opt(%) | Prosentase kapur | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------|------|-------|-------|
| | 0 % | 5 % | 8 % | 10 % | 12 % |
| Kpdt kering mak | 24.0 | 21.6 | 19.8 | 17.10 | 19.2 |
| CBR unsoaked (%) | 1,49 | 1,580 | 1,62 | 1,65 | 1,64 |
| CBR soaked (%) | 11,8 | 13.3 | 18.4 | 22.1 | 22 |
| Kd air opt (%) | 2,45 | 3.6 | 5.1 | 7.6 | 7.58 |
| Swell potensial (%) | 5,13 | 4,25 | 2,25 | 1,331 | 1,025 |

Sumber: Warsiti (2009)

**Gambar 2.5.** Grafik Hubungan Persentase Kapur dengan CBR

Sumber: Warsiti (2009)

**Gambar 2.6.** Grafik hubungan prosentase kapur dengan Swelling

Sumber: Warsiti (2009)

2.5 Metode Pencampuran Tanah Dalam (*Deep Soil Mixing Method*)

Metode *Deep Soil Mixing* (DSM) merupakan metode pencampuran tanah dengan bahan *additive* dan pada tanah agar terjadi pengikatan antara bahan *additive* dengan tanah. Metode ini dilakukan untuk perbaikan sifat teknis dari tanah lunak berkoheesi pada kedalaman mencapai 50 m.

Pada umumnya metode pencampuran terbagi menjadi dua yaitu metode basah (*Deep wet mixing*) dan metode kering (*Deep dry mixing*), tergantung pada spesifikasi tanah dan proyek. Pada metode basah (*Deep wet mixing*) bahan *additive* dicampurkan dalam keadaan basah seperti bubur kemudian diinjeksikan pada tanah untuk dicampur. Metode pencampuran basah merupakan metode yang paling umum digunakan untuk pencampuran tanah dalam (*Deep Soil Mixing*). Pada metode basah kondisi muka air tanah tidak berpengaruh sehingga metode ini cocok untuk berbagai kondisi tanah. Agar tanah tidak melekat pada pisau poros berputar (*auger*) maka alat pencampurnya biasanya dilengkapi dengan baling-baling anti-rotasi.

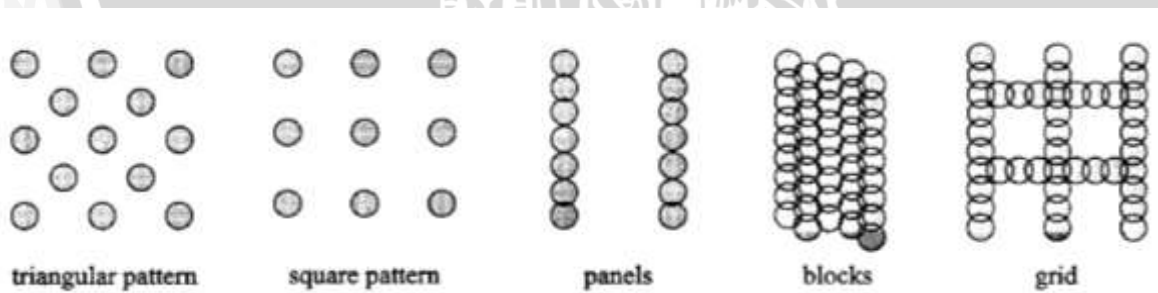
Selain metode basah dalam teknik perbaikan tanah dalam juga dikenal metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode kering tanah dicampur dengan bahan *additive* dalam kondisi kering (berbentuk bubuk) dengan menggunakan tekanan udara. Teknik pencampuran kering biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi kompresibilitas tanah lempung yang sangat lembut. Pada pencampuran metode kering harus diperhatikan kondisi kadar air tanah asli yaitu minimal 20% karena tidak ditambahkan air pada bahan *additive* untuk reaksi hidrasi.

Pencampuran pada metode ini digunakan bantuan *crane* yang dilengkapi *auger* hidrolik yang dapat menyempatkan bahan *additive* pada ujung dan sisi *auger*. Pencampuran diawali dengan pengeboran pada titik yang telah direncanakan pada panjang tertentu, setelah panjang yang diinginkan tercapai dilanjutkan dengan penyampuran bahan *additive* dengan cara menyempatkan bahan *additive* pada *auger* dengan putaran terbalik dengan kecepatan yang lebih tinggi sambil menarik *auger* ke atas. Setelah pencampuran selesai dilanjutkan dengan pemadatan pada titik tanah daerah yang diperbaiki kondisi tanahnya. Biasanya pelaksanaan di lapangan alat *auger* dirakit hanya satu *auger* atau lebih, tergantung keperluan proyek seperti pada Gambar 2.7



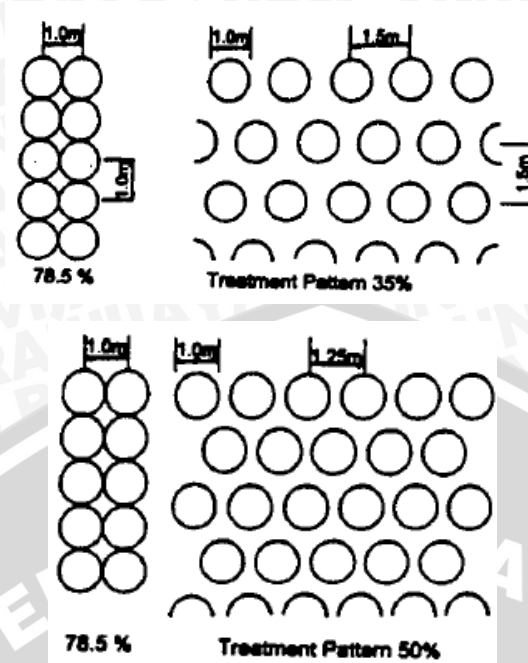
Gambar 2.7. Tipe Rakitan Auger a) Auger Rakitan Tunggal, (b) Auger Rakitan Ganda

Dalam metode pelaksanaan *Deep soil mixing* (DSM) terdapat beberapa pola yang sering diterapkan. Pola-pola tersebut diantaranya pola *triangular pattern*, pola *square pattern*, pola *panels*, pola *blocks*, dan pola *grid*. Gambar pola *deep soil mixing* dapat dilihat pada Gambar 2.8(Kosche, 2004).



Gambar 2.8. Pola *Deep Soil Mixing* (DSM)
Sumber: Kosche (2004)

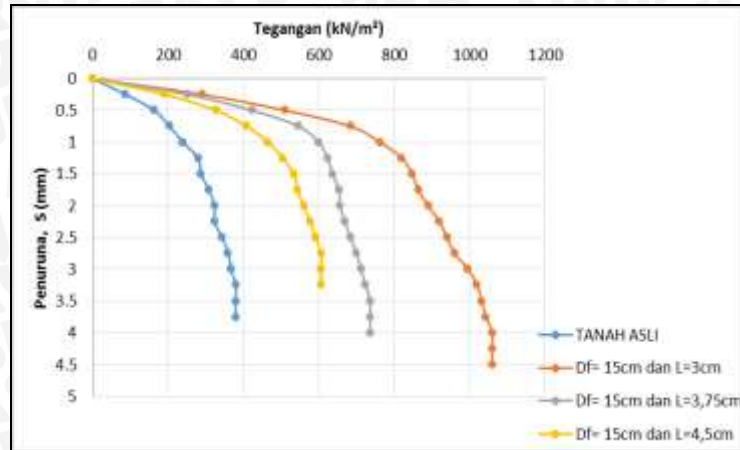
Dalam beberapa kasus di lapangan, variasi konfigurasi dan jarak antar kolom dilakukan guna mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas tanah. Variasi ini pernah dilakukan pada persentaseyek *Tomei Freeway* di Jepang, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 (Bruce, 2000).



Gambar 2.9. Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM
Sumber: Bruce (2000)

Ada beberapa penelitian *Deep Soil Mixing* (DSM) yang pernah dilakukan sebelumnya, diantaranya:

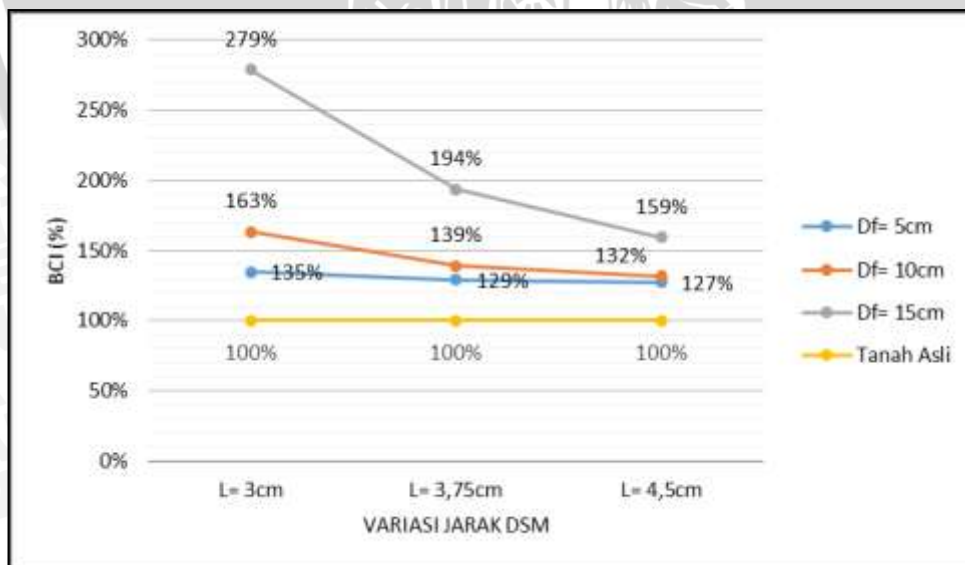
1. Pada tahun 2015 Ichvan Danny K. telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mixing* (DSM) 15% *flyash* diameter 3cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro. Hasil dari penelitian tersebut yaitu daya dukung terbesar terjadi pada panjang $3B = 15\text{cm}$ dengan jarak DSM 3cm yaitu sebesar 1060 kN/m^2 dengan penurunan 4,5mm. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli. Selain itu, hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 15cm, terjadi peningkatan daya dukung tanah sebesar 179% dari tanah asli. Berikut ini adalah grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM dan grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L) dan panjang DSM (Df) :



Gambar 2.10. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang 3B= 15cm

Tabel 2.10. Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L)

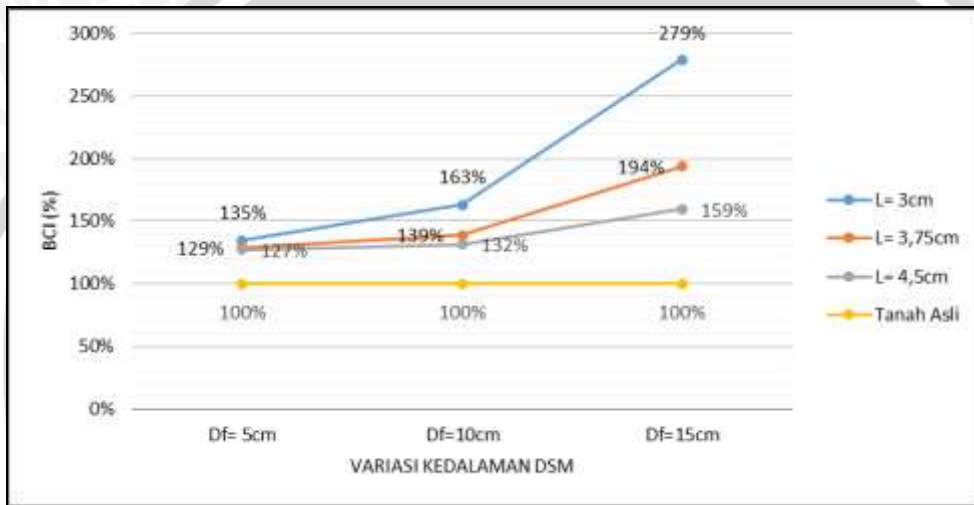
| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) |
|----|------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 4% |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | | 490 | 129% | 29% | |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | | 484 | 127% | 27% | |
| 4 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | | 620 | 163% | 63% | 17% |
| 5 | | 1,25D= 3,75cm | | 528 | 139% | 39% | |
| 6 | | 1,5D= 4,5cm | | 500 | 132% | 32% | |
| 7 | 3B= 15cm | 1D= 3cm | | 1060 | 279% | 179% | 44% |
| 8 | | 1,25D= 3,75cm | | 736 | 194% | 94% | |
| 9 | | 1,5D= 4,5cm | | 606 | 159% | 59% | |



Gambar 2.11. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L)

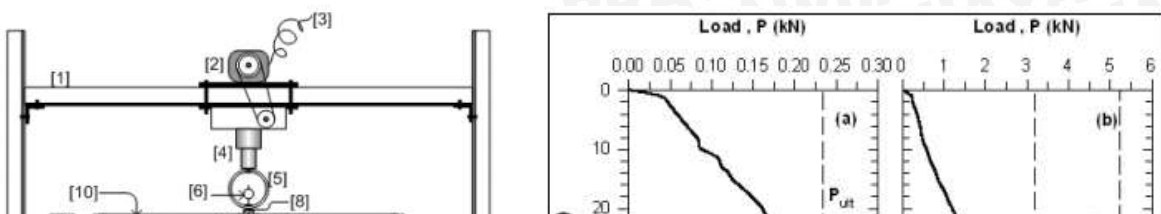
Tabel 2.11. Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) |
|----|---------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 21% |
| 2 | | 2B= 10cm | | 620 | 163% | 63% | |
| 3 | | 3B= 15cm | | 1060 | 279% | 179% | |
| 4 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | | 490 | 129% | 29% | 8% |
| 5 | | 2B= 10cm | | 528 | 139% | 39% | |
| 6 | | 3B= 15cm | | 736 | 194% | 94% | |
| 7 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | | 484 | 127% | 27% | 3% |
| 8 | | 2B= 10cm | | 500 | 132% | 32% | |
| 9 | | 3B= 15cm | | 606 | 159% | 59% | |



Gambar 2.12. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

2. Pada tahun 2010 Agus Setyo M. telah melakukan penelitian mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak Bantul-Yogyakarta di laboratorium menggunakan *load test*. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Dalam penelitian Muntohar (2010) kolom kapur yang digunakan merupakan kolom tunggal dengan diameter 50 mm dengan kedalaman 200 mm dan diletakkan dalam kotak baja berukuran 1,2 m x 1,2 m dan tinggi 1 m. Hasil dari penelitian tersebut yaitu seiring dengan penambahan kadar kapur, daya dukung tanah meningkat sebesar 0,23 kN tanpa menggunakan kolom kapur menjadi 5,2 kN dengan kolom kapur. Berikut ini adalah gambar skema pengujian dengan *load test* dan grafik beban-penurunan tanah:





(a) (b)

Gambar 2.13. (a) Skema Uji Pembebanan dan (b) Grafik Beban dan Penurunan Tanah
 Sumber: Muntohar (2010)

2.6. Daya Dukung Tanah

Tanah yang akan dibangun suatu konstruksi di atasnya, diharuskan mempunyai nilai daya dukung tanah yang besar. Daya dukung tanah adalah parameter tanah yang berkenaan dengan kekuatan tanah untuk menopang suatu beban di atasnya. Daya dukung tanah dipengaruhi oleh jumlah air yang terdapat di dalamnya, kohesi tanah, sudut geser dalam, dan tegangan normal tanah. Apabila kekuatan tanah terlampaui maka penurunan yang berlebihan akan mengakibatkan kerusakan struktur di atasnya.

Daya dukung batas (*ultimate bearing capacity*) = q_u , didefinisikan sebagai tegangan terkecil yang dapat menyebabkan keruntuhan geser pada tanah pendukung tepat di bawah dan di sekeliling pondasi. Daya dukung ultimit suatu tanah terutama di bawah beban pondasi dipengaruhi oleh kuat geser tanah (*shear strength*). Sedangkan daya dukung ijin (*allowable bearing capacity*) = q_a , didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang diterima pada tanah sehingga nilainya harus lebih kecil dari daya dukung batas. Daya dukung ijin (q_a) bergantung pada faktor keamanan (SF) seperti pada rumus berikut:

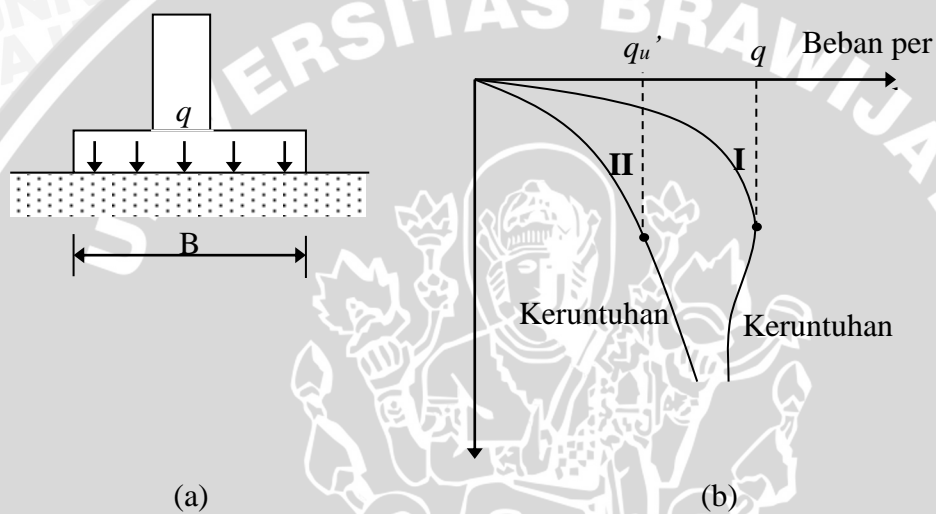
$$\text{Daya dukung ijin } (q_a) = \frac{q_u}{SF} \dots\dots\dots(2-2)$$

Keterangan: q_u = daya dukung batas

SF = faktor keamanan (nilai sekitar 2 sampai 5)



Konsep perhitungan daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilihat dalam model pondasi menerus dengan lebar (B) yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat (tanah yang kaku) seperti pada Gambar 2.14a. Apabila beban terbagi rata (q) tersebut ditambah, maka penurunan pondasi akan bertambah pula. Bila besar beban terbagi rata $q = q_u$ (q_u = daya dukung tanah batas) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q lebih lanjut seperti Gambar 2.14b. Hubungan antara beban dan penurunan ditunjukkan pada kurva I pada Gambar 2.14b. Untuk keadaan ini, q_u didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah (Das, 1995)



Gambar 2.14. Daya Dukung Batas Tanah untuk Kondisi Dangkal

(a) Model pondasi

(b) Grafik hubungan antara beban dan penurunan

Sumber : Das (1995)

Menurut Terzaghi (1943), kapasitas daya dukung tanah dibagi menurut beberapa jenis pondasi seperti terlihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Kapasitas Daya Dukung Tanah berbagai Jenis Pondasi Menurut Terzaghi

| Jenis Pondasi | Kapasitas Daya Dukung |
|----------------|---|
| Lajur/ Menerus | $q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$ |
| Segi Empat | $q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$ |
| Lingkaran | $q_u = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$ |

Keterangan : q_u = daya dukung batas

c = kohesi tanah

B = lebar pondasi (= diameter untuk pondasi lingkaran)

γ = berat isi tanah

$N_c; N_q; N_\gamma$ = faktor daya dukung yang bergantung pada sudut geser dalam tanah (\emptyset)

Menurut Bowles (1986), daya dukung tanah untuk pondasi dangkal bergantung dari kohesi (c) dan sudut geser dalam (\emptyset). Apabila kadar air tanah (w) meningkat maka nilai kohesi tanah (c) dan sudut geser dalam (\emptyset) akan menurun. Dengan demikian kekuatan tanah juga akan menurun. Nilai kohesi dan sudut geser dalam akan meningkat apabila dalam kondisi kering atau kondisi kadar air tanah tidak berpengaruh pada pondasi.

Hubungan kuat geser dengan variasi kadar air dan persentase stabilisasi telah dijelaskan Firdaus (2016) kadar air pada tanah lempung ekspansif dengan campuran 10% kapur berpengaruh terhadap kuat geser tanah. Semakin kecil kadar air grafik tegangan-regangan tanah akan semakin kaku dan kohesi (c_u) semakin besar. Sedangkan semakin besar rasio volume stabilisasi, nilai kohesi akan semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah kondisi asli dan remolded (tanpa perbaikan).

