

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan material dasar yang sangat penting karena merupakan tempat dimana struktur akan didirikan. Setiap jenis tanah mempunyai karakteristik yang berbeda tergantung pada letak suatu daerah, kandungan unsur hara dan teksturnya sehingga menyebabkan daya dukung yang dimiliki setiap tanah berbeda-beda sesuai dengan suatu lokasi.

Pembangunan konstruksi diatas tanah tidak selalu berada pada tanah yang baik. Salah satu permasalahan yang terjadi adalah pada tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang susut yang tinggi karena tersusun dari mineral-mineral yang dapat menyerap air secara ekstrem dan dapat menyusut drastis ketika musim kemarau sehingga kurang menguntungkan apabila didirikan bangunan diatasnya karena dapat mengakibatkan kerusakan seperti naik atau turunnya pondasi pada bangunan dan permukaan jalan yang bergelombang.

Upaya memperbaiki sifat kembang susut tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan perbaikan tanah metode stabilitas tanah mekanik dan kimiawi. Dalam penelitian ini menggunakan metode stabilitas kimiawi dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah yang fungsinya untuk daya dukung pada tanah. Bahan *additive* yang digunakan adalah kapur. Pertimbangan penggunaan kapur sebagai bahan *additive* adalah adanya sifat *pozzolanic* yaitu kemampuan untuk mengeras apabila bereaksi dengan air sehingga dapat mengikat butiran lempung. Selain itu, kapur juga lebih ekonomis dan mudah ditemukan di berbagai daerah.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menstabilisasi tanah lempung ekspansif dengan menggunakan bahan *additive* kapur dan telah terbukti dapat memperbaiki sifat tanah dan daya dukungnya. Salah satunya penelitian yang telah dilakukan oleh Warsiti, (2009) melakukan penelitian peningkatan CBR dan memperkecil *swelling* tanah subgrade yang termasuk tanah lempung di daerah Sendang Mulyo Semarang. Hasil pengujian CBR dengan metode standar terhadap tanah yang dicampur dengan kapur peningkatan CBR cukup tinggi. Hasil pengujian 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%. Selain itu hasil pengujian *swelling* menghasilkan *swelling* yang cukup tinggi. *Swelling* tanah asli sebesar 5,127%, tetapi begitu juga tanah yang dicampur dengan kapur besar *swelling* mengalami penurunan seiring penambahan persentase kapur. Dari penelitian tersebut juga disimpulkan bahwa yang paling baik untuk stabilisasi tanah lempung adalah dengan penambahan kapur 10%.

Stabilisasi biasanya hanya dilakukan pada lapisan permukaan saja atau biasa disebut pencampuran permukaan (*shallow soil mixing*) yang hanya dilakukan pada kedalaman tanah kurang dari 1,5 meter. Tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa-Timur ditemui adanya lapisan tanah ekspansif dengan kedalaman sekitar 1-3 meter, sehingga diperlukan adanya metode stabilisasi tanah dalam agar hasilnya lebih efisien dari segi biaya, bahan dan waktu pelaksanaannya.

Deep Soil Mixing (DSM) merupakan upaya stabilisasi tanah dalam dimana tanah dicampur dengan bahan *additive* berupa kapur pada lokasi tanah yang ingin diperbaiki kualitasnya menggunakan mesin bor atau *auger*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan (2015), stabilisasi tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro menggunakan metode DSM bahan *additive fly ash* dengan diameter 3cm berpola *panels* menghasilkan daya dukung maksimum yang terjadi pada jarak antar kolom ($L= 3m$) dan panjang kolom ($D_f= 15m$) dapat meningkatkan daya dukung sebesar 179% dari tanah asli.

Ditinjau dari penelitian sebelumnya maka diperlukan upaya untuk pengembangan metode DSM, sehingga pada penelitian ini penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi menggunakan bahan *additive* kapur dengan menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) pola *triangular* untuk mengetahui daya dukung tanah akibat beban vertikal sebagai upaya perbaikan tanah lempung ekspansif.

1.2 Identifikasi Masalah

Tanah lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang paling dihindari dalam pembangunan suatu bangunan atau jalan. Dari hal tersebut dapat dijelaskan beberapa masalah yang dapat diidentifikasi yaitu:

1. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang susut yang tinggi karena tersusun dari mineral-mineral yang dapat menyerap air secara ekstrem dan dapat menyusut

drastis ketika musim kemarau sehingga kurang menguntungkan apabila didirikan bangunan di atasnya

2. Tanah lempung ekspansif memiliki daya dukung tanah yang rendah sehingga diperlukan upaya stabilitas kimiawi menggunakan bahan *additive* yaitu kapur.
3. Di Indonesia umumnya pencampuran bahan *additive* hanya dilakukan dipermukaan, padahal pencampuran tanah dan bahan *additive* pada permukaan (*shallow soil mixing*) membutuhkan biaya yang relatif besar karena semua tanah pada lokasi pembangunan dicampur dengan bahan *additive* sehingga meningkatkan biaya konstruksi.
4. Di Indonesia penelitian mengenai stabilisasi tanah dalam dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) menggunakan bahan *additive* kapur masih belum ada yang meneliti walaupun penelitian tentang stabilisasi tanah dengan metode DSM menggunakan bahan *additive* lain seperti semen dan *fly ash* sudah pernah dilakukan.

1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3 cm konfigurasi pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro?
2. Berapa jarak dan panjang kolom maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3 cm konfigurasi pola *triangular* untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro?
3. Bagaimana pengaruh penambahan 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif?

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup penelitian, maka diberikan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Sampel tanah yang digunakan merupakan tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Kapur yang digunakan merupakan kapur yang dijual di toko kawasan Kota Malang.
4. Digunakan kadar kapur 10% terhadap berat isi kering tanah sesuai penelitian pendahuluan.

5. Waktu perawatan yang dilakukan selama 3 hari.
6. Kadar air yang digunakan pada tanah asli yaitu 27,9% dengan berat isi kering tanah (γ_d) 1,28 gr/cm³.
7. Kadar air yang digunakan untuk campuran 10% kapur yaitu 24,1% dengan berat isi kering tanah (γ_d) 1,41 gr/cm³, dimana data tersebut didapat dari penelitian pendahuluan.
8. Pada penelitian ini digunakan konfigurasi pola *triangular* pada *Deep Soil Mixing* (DSM).
9. Sampel yang dicampur dengan kapur (DSM) memiliki diameter 3 cm.
10. Tidak dilakukan analisa pengaruh kapur secara mendetail.
11. Variasi jarak antar kolom DSM (L) yang digunakan yaitu 1D; 1,25D; 1,5D; D merupakan diameter kolom yaitu 3 cm.
12. Variasi panjang kolom DSM (Df) yang digunakan dalam pencampuran kapur yaitu 2B, 3B, 4B dengan B merupakan lebar plat beban yang digunakan yaitu 5 cm.
13. Metode pencampuran yang digunakan *dry mixing*.
14. Luas area tanah yang distabilisasi menggunakan DSM adalah 10x10 cm².
15. Pencampuran sampel tanah dengan kapur dianggap homogen dan dilakukan diluar *box*.
16. Tanah dasar yang distabilisasi hanya mencakup pada area yang terpengaruh tegangan vertikal di bawah luasan pelat yang menerima beban merata, yaitu hingga jarak 2xB arah horizontal dan 3xB arah vertikal dari titik pusat beban bekerja.
17. *Box* yang digunakan memiliki dimensi 30x30x30 cm³.
18. Volume tanah dalam *box* 30x30x20 cm³.
19. Uji pembebanan dilakukan dengan beban hidrolis vertikal.
20. Ukuran pelat yang digunakan sebagai model pondasi yaitu 5x5 cm².
21. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali sama dan penurunan masih berlanjut.
22. Alat pemadat yang digunakan untuk memadatkan tanah asli berbentuk persegi dengan ukuran luas 12,5x12,5 cm² dengan berat 9,56kg.
23. Alat pemadat untuk *Deep Soil Mixing* merupakan pejal dengan berat 2,56kg dengan diameter 2,9 cm.
24. Jumlah lapis pada sampel pemadatan sebanyak 4 lapis.
25. Volume tanah yang diperbaiki untuk analisis pengembangan berukuran 10x10x20cm³.

26. Potensial pengembangan (*Swelling*) diperoleh dari rumus pendekatan penelitian oleh Firdaus (2016).

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui adanya pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang kolom maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro.
3. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Dapat digunakan oleh kalangan akademisi sebagai rujukan untuk penelitian pengembangan teknologi stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan bahan *additive* dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM).
2. Dapat menjadi sumber informasi oleh kalangan praktisi sebagai bahan pertimbangan dalam merencanakan sebuah struktur bangunan maupun teknik perbaikan tanah pada tanah lempung ekspansif yang ada di lapangan khususnya di wilayah kabupaten Bojonegoro.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

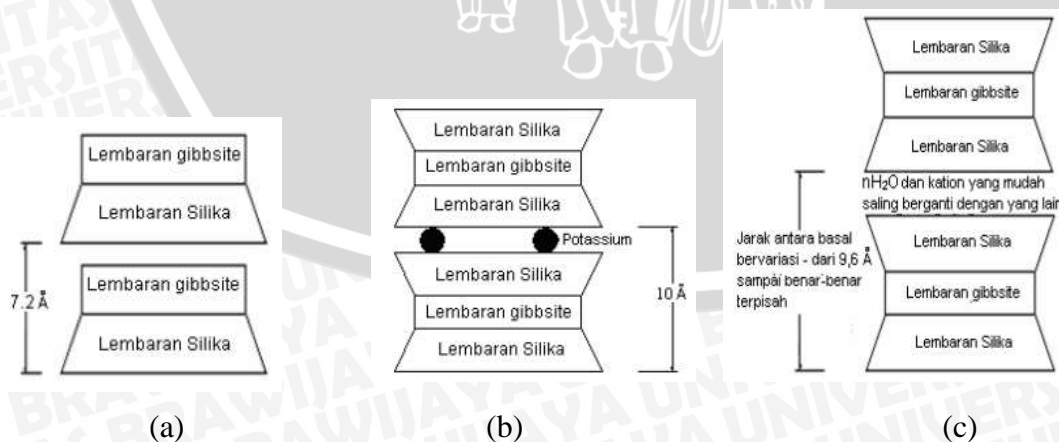
2.1 Tanah Lempung

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 *kaolinite*, *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).

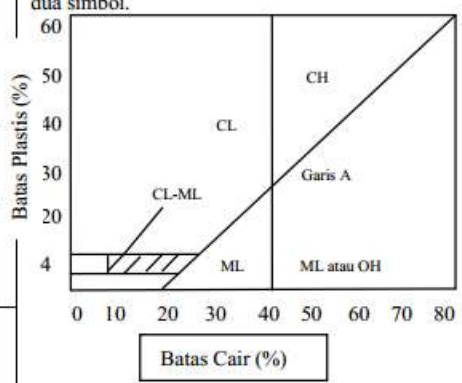
2.2.1 Sistem Klasifikasi USCS

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	
			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 Atterberg 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	Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	



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.

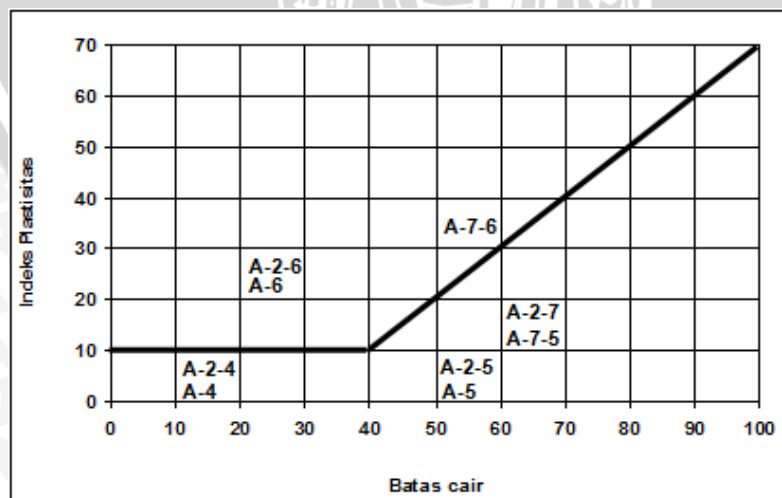
Tabel 2.2. American Association Of State Highway and Transportation Official (AASHTO)

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*

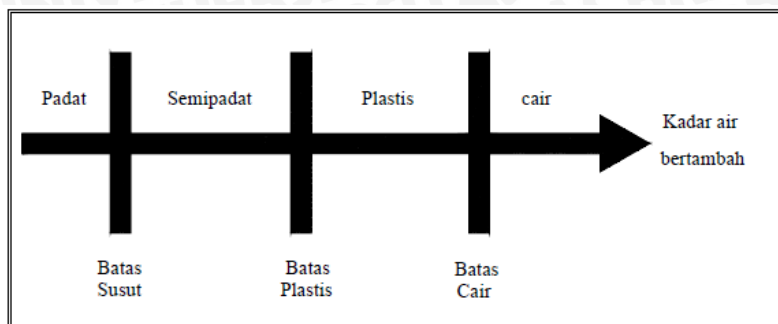
Menurut Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji *Atteberg*. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan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

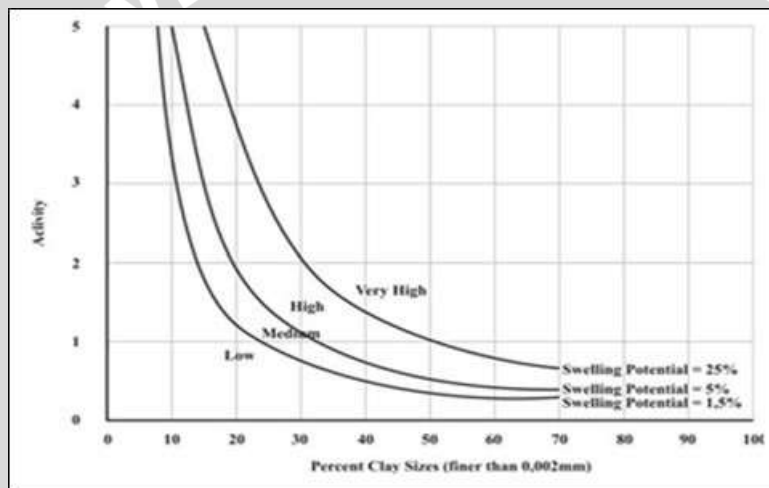
$$\text{Activity (A)} = \frac{PI}{C-10} \dots\dots\dots(2-1)$$

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%

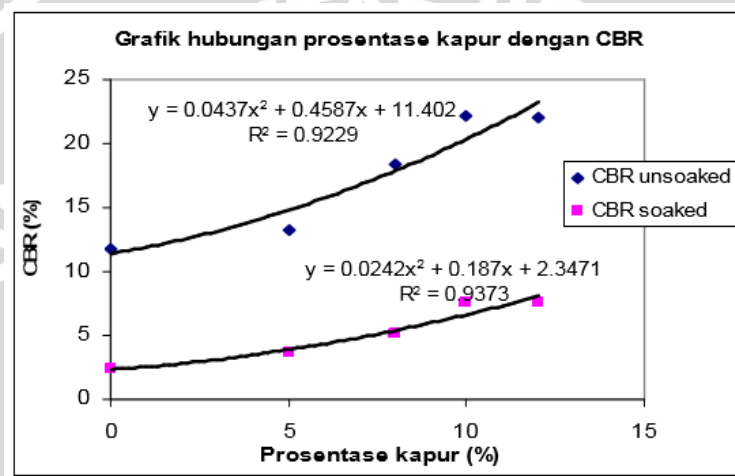
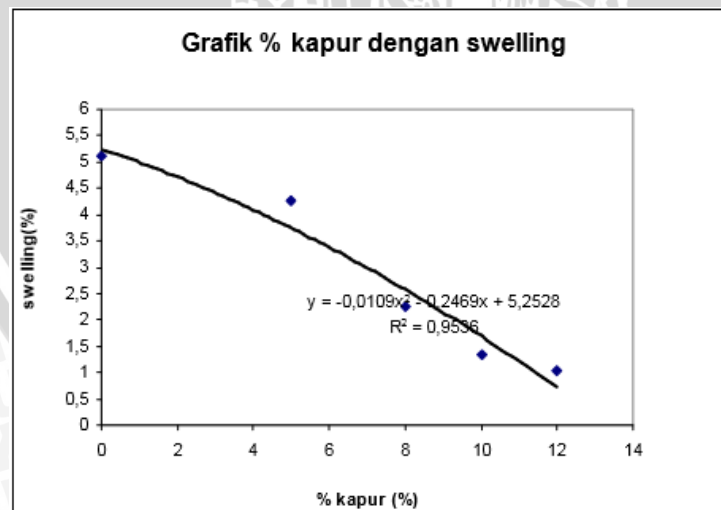
Penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah didasarkan pada sumber-sumber penelitian yang sudah dilakukan diantara lain:

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.

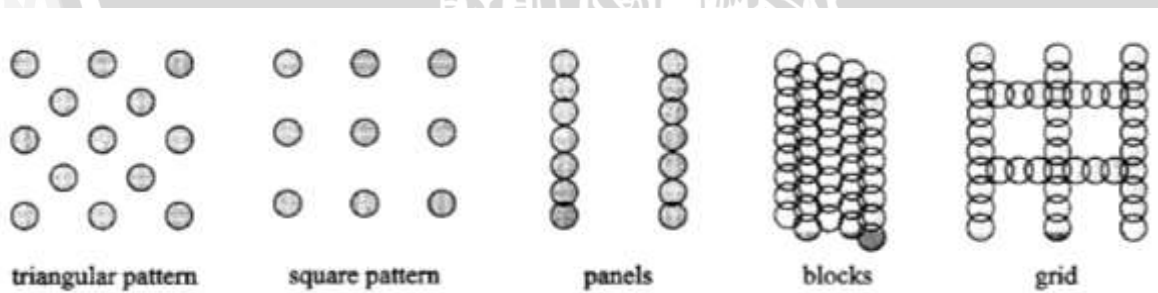
Selain metode basah dalam teknik perbaikan tanah dalam juga dikenal metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode kering tanah dicampur dengan bahan *additive* dalam kondisi kering (berbentuk bubuk) dengan menggunakan tekanan udara. Teknik pencampuran kering biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan 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 menyempromatkan 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 penyempurnaan bahan *additive* dengan cara menyempromatkan 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



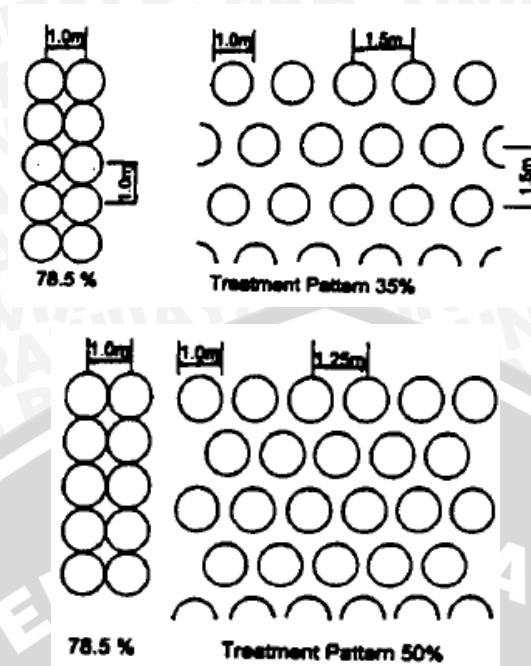
Gambar 2.7. Tipe Rakitan Auger a) Auger Rakitan Tunggal, (b) Auger Rakitan Ganda

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)

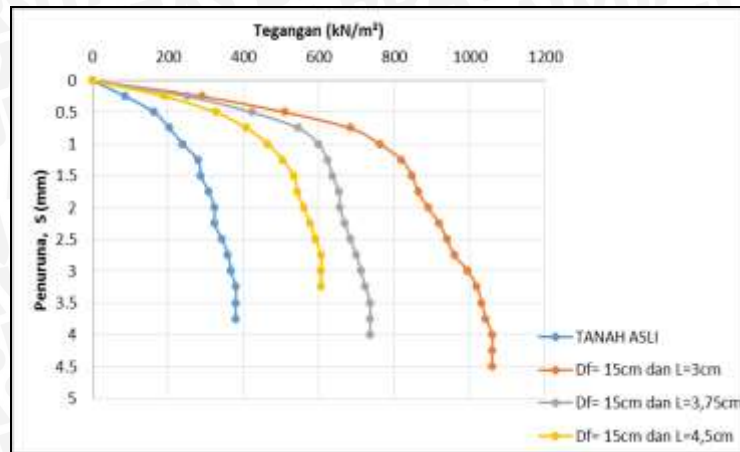
Dalam beberapa kasus di lapangan, variasi konfigurasi dan jarak antar kolom dilakukan guna mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas tanah. Variasi ini pernah dilakukan pada persentaseyek *Tomei Freeway* di Jepang, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 (Bruce, 2000).



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

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

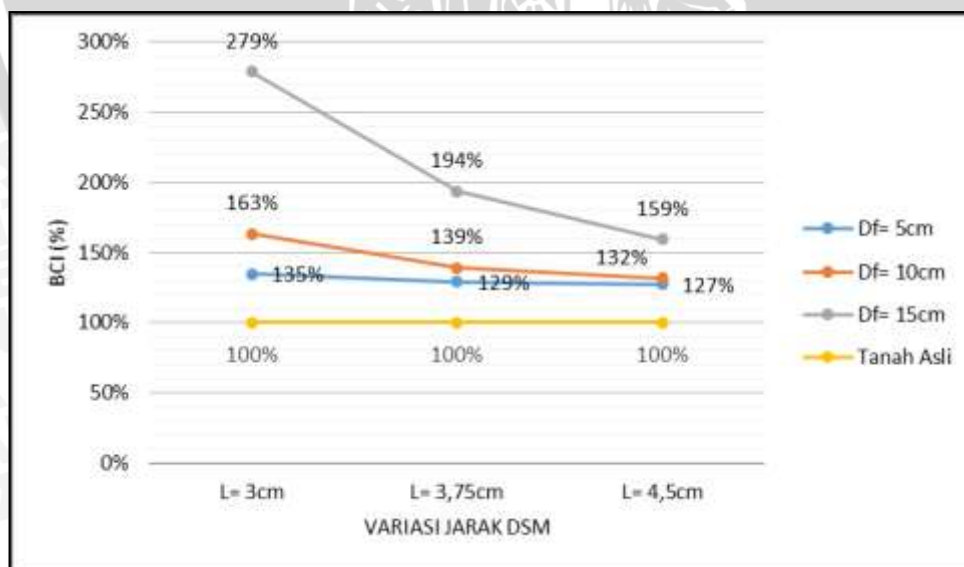
1. Pada tahun 2015 Ichvan Danny K. telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mixing* (DSM) 15% *flyash* diameter 3cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro. Hasil dari penelitian tersebut yaitu daya dukung terbesar terjadi pada 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)

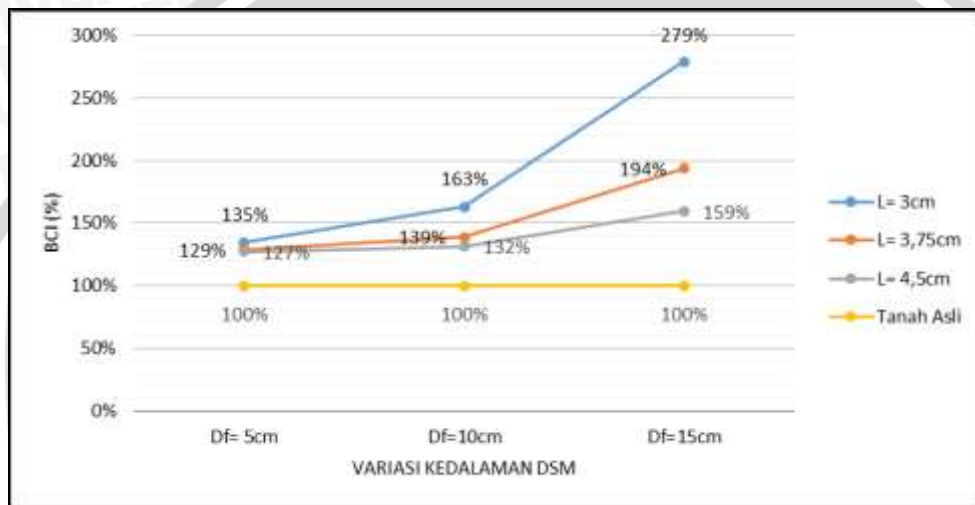
No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kN/m ²)	qu dengan DSM (kN/m ²)	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)	Peningkatan BCI (%)
1	1B= 5cm	1D= 3cm	380	512	135%	35%	4%
2		1,25D= 3,75cm		490	129%	29%	
3		1,5D= 4,5cm		484	127%	27%	
4	2B= 10cm	1D= 3cm		620	163%	63%	17%
5		1,25D= 3,75cm		528	139%	39%	
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)

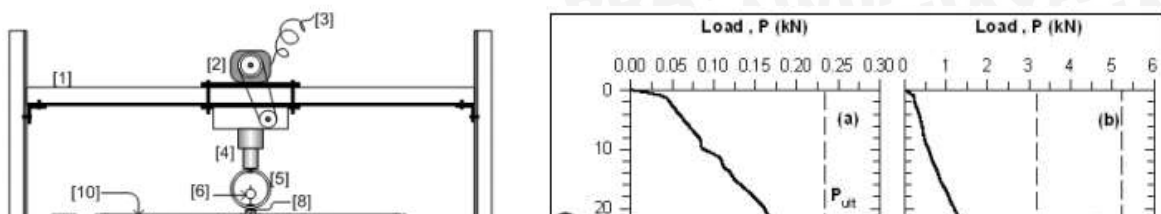
Tabel 2.11. Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

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%	71%
2		2B= 10cm		620	163%	63%		
3		3B= 15cm		1060	279%	179%		
4	1,25D= 3,75cm	1B= 5cm		490	129%	29%	8%	39%
5		2B= 10cm		528	139%	39%		
6		3B= 15cm		736	194%	94%		
7	1,5D= 4,5cm	1B= 5cm		484	127%	27%	3%	21%
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:

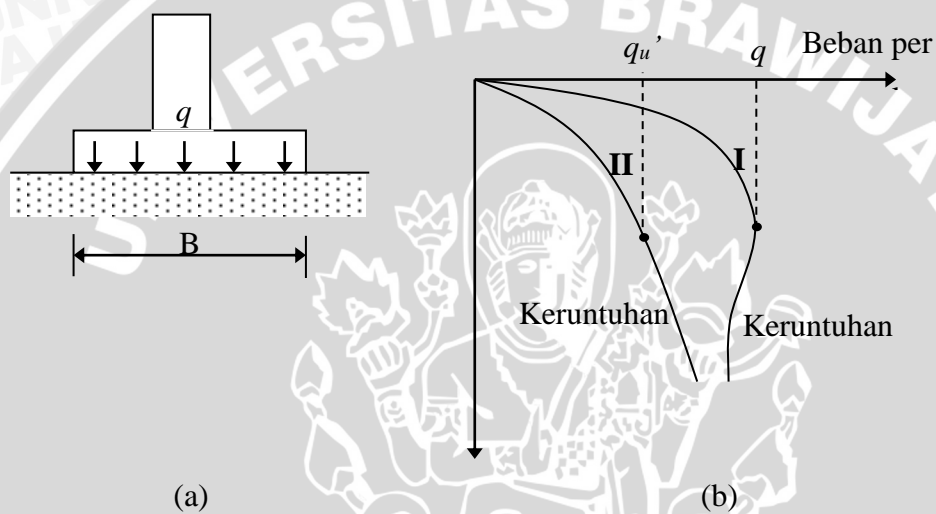
$$\text{Daya dukung ijin } (q_a) = \frac{q_u}{SF} \dots\dots\dots(2-2)$$

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	$q_u = c. N_c + q. N_q + \frac{1}{2}. \gamma. B. N_\gamma$
Segi Empat	$q_u = 1,3.c. N_c + q. N_q + 0,4. \gamma. B. N_\gamma$
Lingkaran	$q_u = 1,3. c. N_c + q. N_q + 0,3. \gamma. B. N_\gamma$

Keterangan : q_u = daya dukung batas

c = kohesi tanah

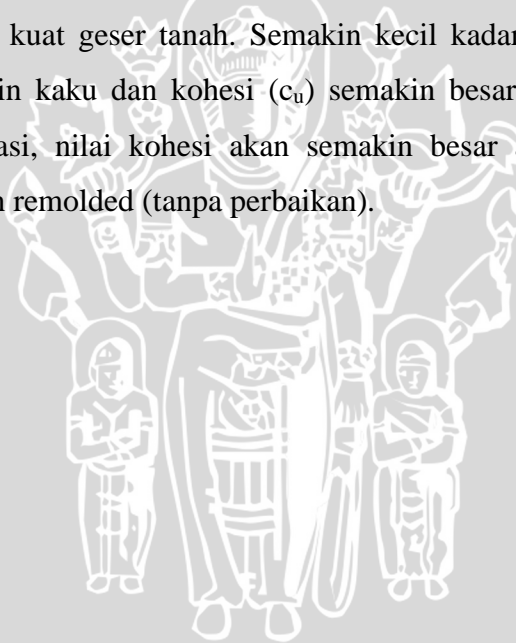
B = lebar pondasi (= diameter untuk pondasi lingkaran)

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).





BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan April 2016 sampai dengan Juni 2016. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.

3.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tanah yang berasal dari Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Kapur dalam bentuk serbuk yang dibeli di toko bangunan.

3.3 Peralatan Penelitian

Untuk mendukung terlaksananya penelitian ini, digunakan peralatan sebagai berikut:

1. Kotak (*box*) dengan ukuran $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ yang terbuat dari *fiberglass*. *Box* dibuat cukup kaku dengan diperkuat menggunakan profil siku 30.30.3 pada ujung-ujung sisinya. Selain itu, penggunaan *fiberglass* berfungsi agar perilaku benda uji dapat diamati pada saat pelaksanaan.
2. Pipa besi dengan diameter 3 cm yang digunakan untuk instalasi kolom *Deep Soil Mixing* (DSM).
3. Saringan No.4.
4. Gelas Ukur
5. Bak Pencampur
6. Sendok
7. Timbangan Digital
8. Alat pemadat untuk sampel tanah asli memiliki berat 9,56 kg dengan luas permukaan $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$.
9. Alat pemadat *Deep Soil Mixing* memiliki berat 2,56 kg dan diameter 3 cm
10. Ring *density*
11. Palu
12. Penggaris

13. Waterpass
14. Plastik kresek
15. Karung goni
16. Alat uji beban vertikal berupa pompa hidrolik, dongkrak hidrolik
17. Pelat baja 5x5 cm² dan tebal 1,5 cm
18. Dial LVDT
19. *Load cell*
20. *Frame* pembebanan (portal)

3.4 Metode Penelitian

3.4.1 Pengujian Pendahuluan

Untuk mendukung penelitian ini maka dilakukan penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang akan diuji merupakan tanah lempung ekspansif. Dalam penelitian pendahuluan terdiri dari beberapa macam pengujian yaitu:

1. Pemeriksaan *specific gravity* (ASTM 1992 D 854-92);
2. Pemeriksaan batas cair, batas plastis indeks plastisitas tanah (ASTM 1984 D 4318-84);
3. Pemeriksaan batas susut (ASTM D 427-04);
4. Pengujian klasifikasi tanah metode USCS (ASTM 1992 D 2487-92);
5. Pengujian proktor standar (ASTM D-698 (Metode B)).

Pengujian *specific gravity*, indeks plastisitas, batas susut dan klasifikasi tanah digunakan untuk memastikan kondisi tanah merupakan tanah jenis lempung ekspansif. Setelah jenis tanah diketahui, penelitian dilanjutkan dengan pengujian proktor standar.

Tujuan dari pengujian proktor standar untuk mendapatkan nilai kadar optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (γ_d) yang selanjutnya akan diaplikasikan ke dalam *box* benda uji. Dalam pengujian proktor standar didapatkan berat isi kering (γ_d) sebesar 1,407gr/cm³ dan kadar air optimum (OMC) 27,9%. Namun setelah diaplikasikan ke dalam *box* benda uji, berat isi kering tanah relatif yang dapat dilaksanakan sebesar 1,28 gr/cm³ dan kadar air (OMC) 27,9%. Percobaan pemadatan dalam *box* dilakukan dengan menggunakan alat dengan berat 9,56 kg dan ukuran permukaan 12,5x12,5cm². Pemadatan dilakukan pada setiap lapis dengan ketinggian 5 cm sebanyak 6 kali putaran dan jumlah lintasan sebanyak 4 lintasan untuk satu putaran. Untuk mendapatkan jumlah tumbukan dan berat isi relatif, dalam percobaan ini dilakukan dengan metode *trial error* yaitu dengan melakukan percobaan berulang-ulang hingga didapat berat isi kering relatif dalam *box*

yang dapat dilaksanakan hingga ditetapkan jumlah tumbukan yang diperlukan. Setelah berat isi kering relatif dan jumlah tumbukan diperoleh dapat dilanjutkan dengan pembuatan sampel pada *box* uji.

Selain kepadatan tanah dalam *box* ditentukan, kepadatan tanah *Deep Soil Mixing* juga ditentukan. Untuk mendapatkan berat isi kering tanah campuran 10% kapur 1,41 gr/cm³ dilakukan kontrol ketinggian tiap 5 cm dengan penumbuk seberat 2,56 kg dengan diameter 2,9cm.

3.4.2 Persiapan Benda Uji

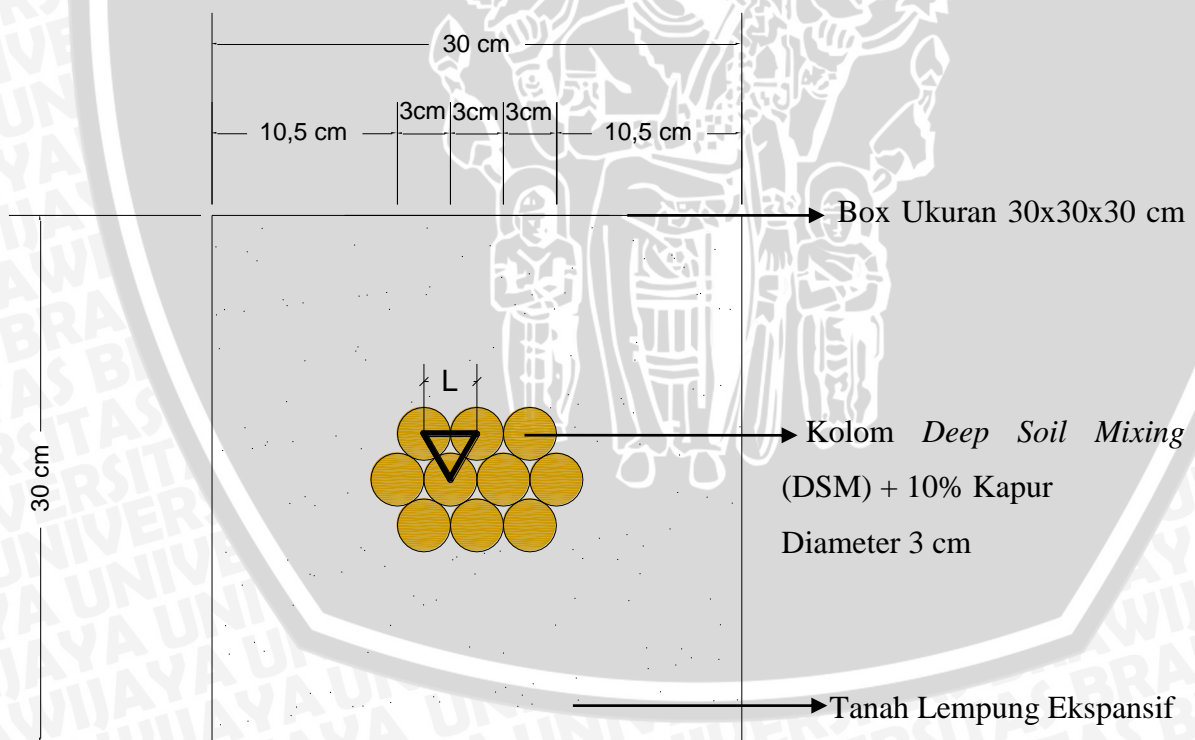
Sampel tanah merupakan tanah lempung ekspansif kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro. Setelah sampel tanah lempung ekspansif dan kapur telah diperoleh, berikutnya adalah tahapan persiapan benda uji. Adapun persiapan benda uji meliputi kegiatan sebagai berikut:

1. Sampel tanah dikeringkan dengan dijemur dibawah terik matahari hingga mudah dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak lolos saringan No.4
3. Sampel tanah yang lolos saringan No.4 kemudian ditambahkan air dengan kadar air optimum(OMC) 27,9% yang digunakan sebagai tanah dasar atau asli. Pencampuran dilakukan hingga merata pada seluruh bagian selama 2 sampai 5 menit. Kemudian sampel dijenuhkan di dalam kresek selama 1 hari sehingga homogen.
4. Pembuatan benda uji dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi *Deep Soil Mixing* dan kondisi tanah dengan stabilisasi *Deep Soil Mixing*.
5. Tanah dasar atau asli dimasukkan ke dalam *box* berukuran (30x30x30) cm hingga ketinggian (H) 20 cm. Sampel dibagi menjadi 4 lapis dengan tinggi tiap lapisnya 5cm. Setiap lapisan dilakukan penumbukan sebanyak 6 kali putaran dengan jumlah lintasan sebanyak 4 lintasan untuk satu putaran. Pemadatan dilakukan menggunakan alat pemadat yang memiliki berat 9,56 kg dengan dimensi permukaan 12,5 x 12,5 cm dan tinggi jatuh tumbukan 21,5cm.
6. Untuk kondisi tanah dengan stabilisasi *Deep Soil Mixing* (DSM), setelah tanah dipadatkan, dilanjutkan dengan pembuatan lubang kolom untuk tanah sesuai dengan instalasi jarak dan panjang yang sudah ditentukan dengan bantuan pipa

besi. Dilanjutkan dengan persentase pencampuran tanah yang dicampur dengan 10% kapur.

7. Sampel tanah yang sudah dicampur 10% kapur dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan jarak dan panjangnya (lihat Tabel 3.1). persentase instalasi dilakukan dengan tahap sebagai berikut :
 - a. Tanah campuran kapur dimasukkan ke dalam lubang dengan beberapa lapisan sesuai dengan tinggi variasi. Setiap lapisan memiliki tebal 5 cm.
 - b. Tiap lapisan dilakukan penumbukan dengan alat yang memiliki diameter 2,9 cm yang dipukul persentase dengan berat 2,56 kg .
8. Setelah proses instalasi selesai dilanjutkan proses waktu perawatan selama 3 hari.
9. Setelah proses waktu perawatan mencapai 3 hari dilanjutkan uji pembebanan.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan panjang pada konfigurasi kolom DSM yang digunakan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap daya dukung tanah. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi pola *triangular* dengan diameter (D) 3 cm yang ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Pemodelan DSM Pola *Triangular*

Adapun variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) berpola *Triangular* akan ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 3.1. Variasi Jarak dan Panjang DSM Diameter (D) 3 cm Berbola *Triangular*

		Jarak Antar Kolom (L) ; Diameter (D) = 3 cm		
		L = 1 D	L = 1,25 D	L = 1,5 D
Panjang Kolom (Df) ; Lebar Plat (B) = 5 cm	Konfigurasi Pola <i>Triangular</i>			
	Df = 2B	Variasi 1 	Variasi 2 	Variasi 3
	Df = 3B	Variasi 4 	Variasi 5 	Variasi 6
Df = 4B	Variasi 7 	Variasi 8 	Variasi 9 	

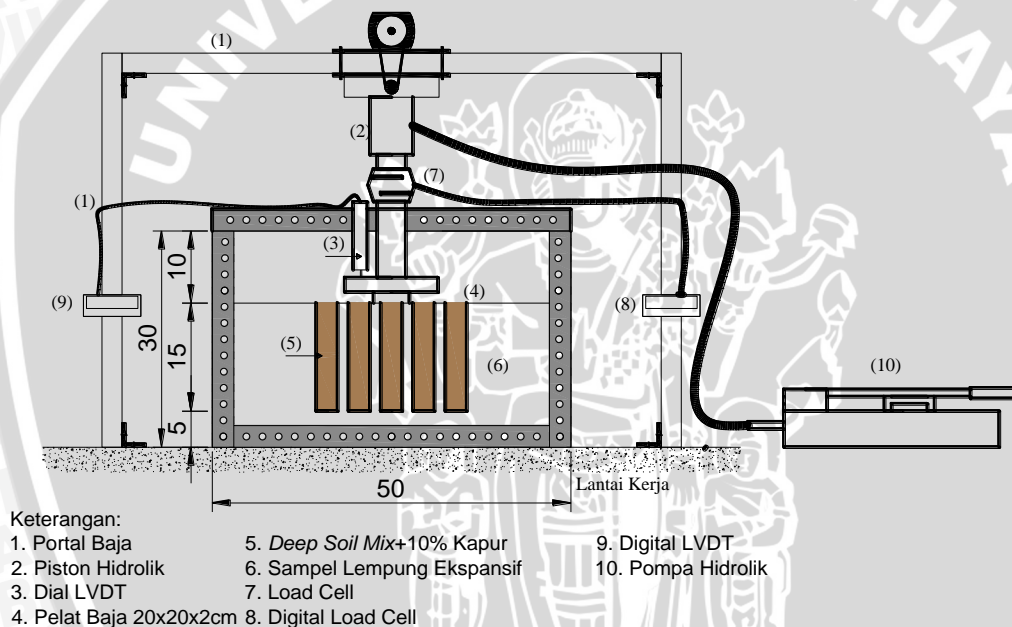
3.4.3 Uji Pembebanan (*Load Test*)

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack* atau dongkrak hidrolik. Sebagai pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton dan dapat langsung dibaca besarnya beban yang terjadi. Untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi, digunakan alat *LVDT*.

Pada proses uji beban diawali dengan persiapan alat uji beban dengan meletakkan *frame* uji beban di tengah *box* sampel tanah agar model pondasi berada tepat di tengah benda uji. Setelah *frame* dipasang dilanjutkan dengan meletakkan alat pemberat pada *frame* dengan tujuan agar *frame* uji beban tidak terangkat ketika uji beban berlangsung.

Selanjutnya dilakukan pemasangan dongkrak hidrolik, *load cell*, *piston* dan pelat model pondasi.

Pada uji beban vertikal model pondasi, ujung atas dari dongkrak hidrolik dihubungkan dengan *frame* pembebanan yang terbuat dari baja profil. Sedangkan ujung bawah dongkrak hidrolik dihubungkan pada *load cell* dilanjutkan dengan *piston* untuk meneruskan beban pada pelat baja. Pelat baja berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari *piston* dongkrak hidrolik menjadi beban merata yang digunakan sebagai model pondasi pada proses pembebanan. Letak dongkrak hidrolik diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat diatas benda uji (lihat Gambar 3.2). Hasil akhir dari uji pembebanan akan diperoleh kurva Beban-penurunan tanah sehingga didapatkan daya dukung tanah ekspansif.



Gambar 3.2. Skema Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli yang belum distabilisasi menggunakan kolom kapur. Hal ini dilakukan guna mengetahui kurva daya dukung tanah asli yang nantinya akan dibandingkan dengan tanah yang telah distabilisasi. Pengujian pembebanan selanjutnya dilakukan terhadap benda uji yang telah distabilisasi menggunakan kolom kapur. Pengujian dilakukan sebanyak 9 kali sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku terhadap daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan panjang optimum kolom kapur yang memberikan pengaruh terbesar pada daya dukung tanah.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan model benda uji
2. Meletakkan pelat baja di tengah pada permukaan benda uji
3. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan serta dial *LVDT* seperti pada Gambar 3.2.
4. Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolik
5. Pembebanan dilakukan bertahap dengan interval pembacaan dial *LVDT* 50 dan kemudian pembebanan dihentikan ketika pada alat pembaca menunjukkan 3 kali beban sama namun penurunan tetap terjadi
6. Mencatat beban dan penurunan yang terjadi (Tabel 3.2)

Tabel 3.2. Pembacaan *Load Cell* dan Dial *LVDT*

Pembacaan <i>LVDT</i>	Interval Δ	Luas Pelat A cm^2	Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm	Pembacaan Beban P kg	Tegangan $q = P/A$ kg/cm^2
0					
50					
100					
150					
200					
250					
300					

3.5 Metode Analisa Data

Data yang telah dicatat dari hasil pembacaan uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah ada dengan bantuan Software Microsoft Excel. Dari penelitian yang dilakukan akan didapatkan nilai beban dan penurunan yang terjadi akibat beban vertikal. Dari beban tersebut maka dapat diketahui berapa daya dukung dari tanah yang diuji berdasarkan luas pondasi model. Kemudian akan dibuat grafik perilaku tegangan dan penurunan tanah lempung ekspansif asli maupun distabilisasi dengan 10% kapur metode *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah hasil pengujian beban vertikal pondasi. Dengan memberikan variasi jarak dan panjang kolom kapur akan diketahui peningkatan daya dukung tanah tersebut. Perhitungan daya dukung digunakan rumus sebagai berikut:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \dots\dots\dots(3-1)$$

dengan, q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m^2)

P_u = beban ultimit (kN)

A = luas pondasi (m^2)

Dari hasil uji beban (*load test*), maka daya dukung batas tanah (q_u) yang bersangkutan untuk pondasi di atas tanah lempung dapat dihitung dengan metode pendekatan berikut:

$$Q_u(\text{pondasi}) = Q_u(\text{pelat})$$

Dari data uji beban, kemudian akan dibuat grafik hubungan antara beban dan penurunan tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 10% kapur menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Dari adanya variasi jarak dan panjang kolom kapur akan diketahui bagaimana pengaruhnya terhadap nilai daya dukung tanah.

3.6 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan dua variabel, yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Pembagian dua variabel tersebut adalah sebagai berikut:

a. Variabel bebas, terdiri dari:

- Konfigurasi
- Diameter
- panjang kolom
- Jarak antar kolom

b. Variabel terikat, terdiri dari:

- Tegangan
- Penurunan yang terjadi akibat pembebanan

3.7. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini dibuat dua jenis benda uji, yaitu benda uji berupa tanah asli dan tanah yang telah distabilisasi dengan campuran 10% kapur menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Pengujian pembebanan dilakukan terlebih dahulu terhadap tanah asli dan kemudian terhadap tanah yang telah distabilisasi. Nantinya akan diperoleh perilaku tegangan-penurunan tanah sebelum dan sesudah stabilisasi yang diberi variasi jarak dan panjang kolom kapur dilakukan. Rancangan penelitian ditampilkan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak DSM (cm)	Panjang DSM (cm)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (kg)	Daya Dukung (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	-	-	-	-
	1D = 3 cm	2 B = 10 cm	-	-	-
		3 B = 15 cm	-	-	-
4 B = 20 cm		-	-	-	
Tanah + 10% Kapur	1,25 D = 3,75 cm	2 B = 10 cm	-	-	-
		3 B = 15 cm	-	-	-
		4 B = 20 cm	-	-	-
	1,5 D = 4,5 cm	2 B = 10 cm	-	-	-
		3 B = 15 cm	-	-	-
		4 B = 20 cm	-	-	-

Tabel 3.4. Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (Dl)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kN/m ²)
1	2 B = 10 cm	1 D = 3 cm	25	-	-	-
2		1,25 D = 3,75 cm	25	-	-	-
3		1,5 D = 4,5 cm	25	-	-	-
4	3 B = 15 cm	1 D = 3 cm	25	-	-	-
5		1,25 D = 3,75 cm	25	-	-	-
6		1,5 D = 4,5 cm	25	-	-	-
7	4 B = 20 cm	1 D = 3 cm	25	-	-	-
8		1,25 D = 3,75 cm	25	-	-	-
9		1,5 D = 4,5 cm	25	-	-	-

Tabel 3.5. Daya Dukung dengan Variasi Panjang DSM

No	Jarak DSM (Dl)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm ²)
1	1 D = 3 cm	2 B = 10 cm	25	-	-	-
2		3 B = 15 cm	25	-	-	-
3		4 B = 20 cm	25	-	-	-
4	1,25 D = 3,75 cm	2 B = 10 cm	25	-	-	-
5		3 B = 15 cm	25	-	-	-
6		4 B = 20 cm	25	-	-	-
7	1,5 D = 4,5 cm	2 B = 10 cm	25	-	-	-
8		3 B = 15 cm	25	-	-	-
9		4 B = 20 cm	25	-	-	-

Untuk mengetahui pengaruh jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk meningkatkan daya dukung tanah dilakukan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI). Nilai BCI dapat diperoleh dengan persamaan (3-2):

$$BCI = \frac{qu \text{ tanah dengan DSM}}{qu \text{ tanah asli}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

Hasil analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) kemudian disajikan dalam tabel berikut:

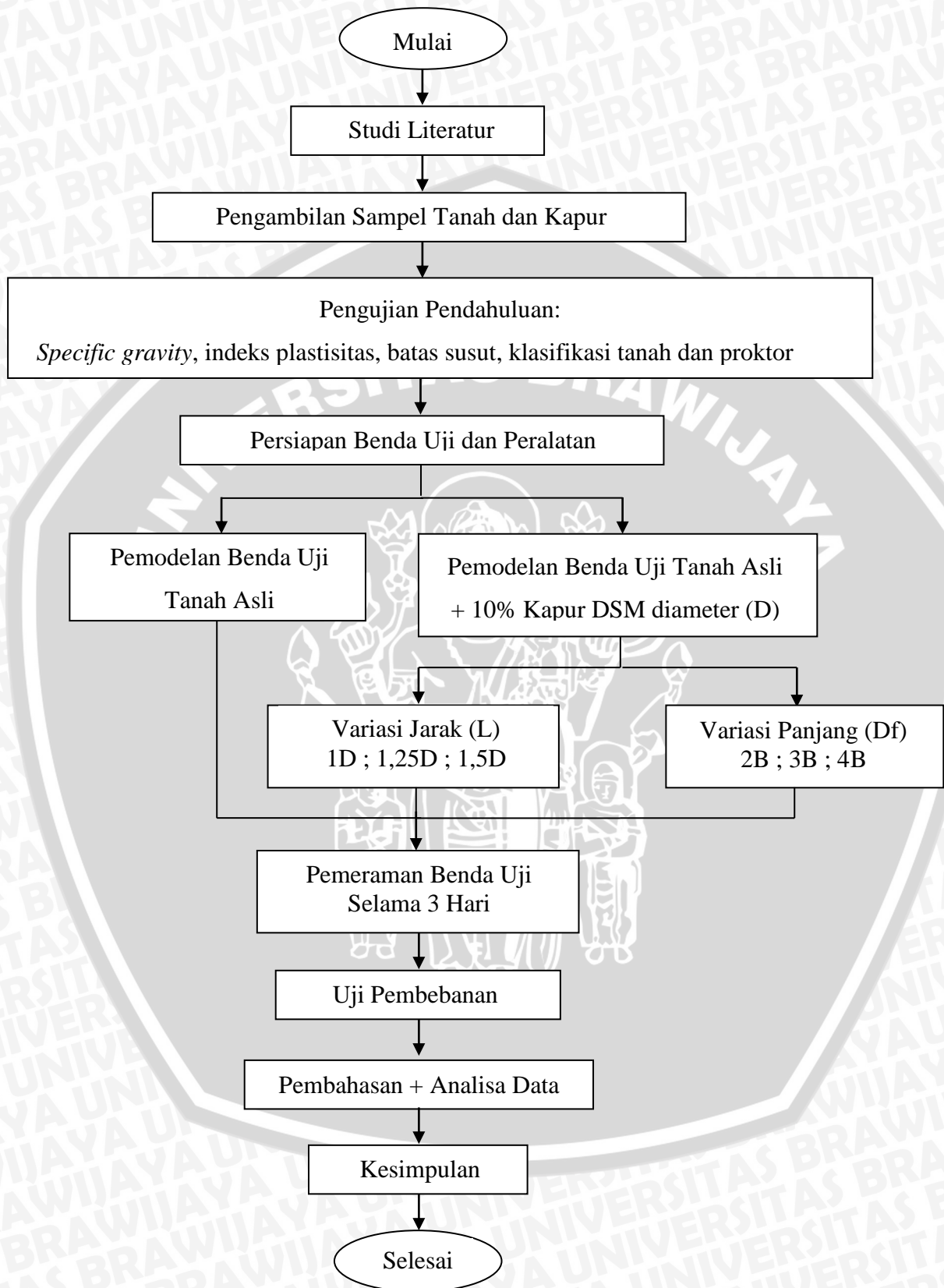
Tabel 3.6. *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk Variasi Jarak DSM

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		1 D = 3 cm			
2	2 B = 10 cm	1,25 D = 3,75 cm			
3		1,5 D = 4,5 cm			
4		1 D = 3 cm			
5	3 B = 15 cm	1,25 D = 3,75 cm			
6		1,5 D = 4,5 cm			
7		1 D = 3 cm			
8	4 B = 20 cm	1,25 D = 3,75 cm			
9		1,5 D = 4,5 cm			

Tabel 3.7. *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk Variasi Panjang DSM

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		2 B = 10 cm			
2	1 D = 3 cm	3 B = 15 cm			
3		4 B = 20 cm			
4		2 B = 10 cm			
5	1,25 D = 3,75 cm	3 B = 15 cm			
6		4 B = 20 cm			
7		2 B = 10 cm			
8	1,5 D = 4,5 cm	3 B = 15 cm			
9		4 B = 20 cm			

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian





BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan merupakan pengujian yang bertujuan untuk menentukan jenis tanah dan sifat tanah yang digunakan sebagai benda uji. Pengujian pendahuluan terdiri dari uji *specific gravity*, uji klasifikasi tanah, uji *atteberg limit*, uji batas susut dan uji proktor standar.

4.1.1 Pemeriksaan *Specific Gravity* (Gs)

Specific gravity (Gs) merupakan perbandingan berat butir tanah dengan berat air pada volume yang sama dan pada suhu tertentu. Pemeriksaan *specific gravity* sendiri merupakan pengujian laboratorium yang dilakukan untuk mengetahui berat jenis suatu bahan yang akan digunakan sebagai sampel benda uji.

Tabel 4.1. Hasil Pemeriksaan *Specific Gravity*

Labu Ukur	1	2
Spesific Gravity (Gs)	2,557	2,554
Rata-rata (Gs)	2,556	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

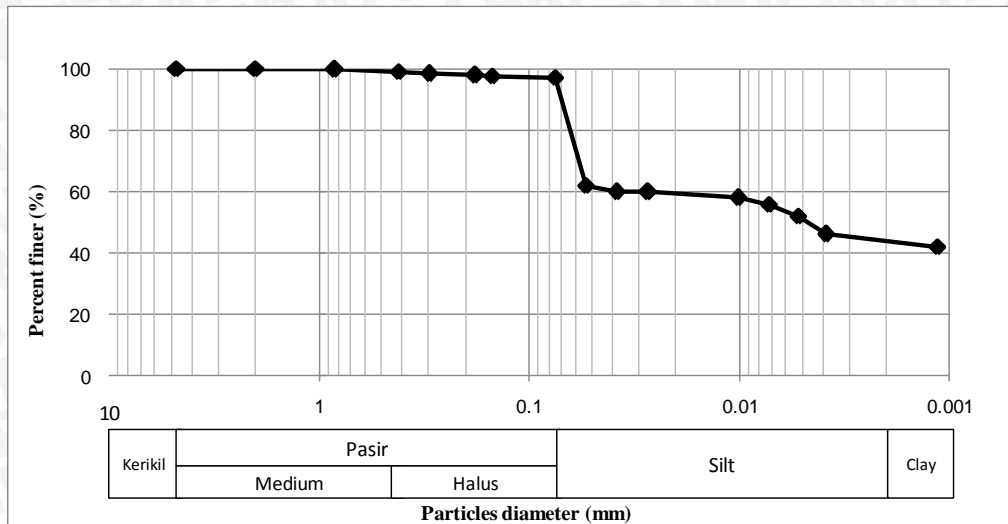
Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa dalam dua kali pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan yaitu $G_s = 2,556$.

4.1.2 Klasifikasi Tanah

Pada uji klasifikasi tanah dilakukan dua jenis pengujian yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer. Analisis saringan (*mechanical grain size*) untuk menentukan butiran kasar dan butiran halus yang tertahan pada saringan no. 200. Analisis hidrometer digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran untuk tanah yang berada di pan atau lolos saringan no. 200. Hasil analisis yang dilakukan ditampilkan pada Gambar 4.1.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





Gambar 4.1. Analisis saringan dan Hidrometer

Dari Gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa tanah dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki persentase lolos saringan no. 200 sebesar 97,03% (di atas 50%) dari total tanah dan menurut sistem klasifikasi tanah analisis saringan dan hidrometer termasuk jenis tanah berbutir halus.

4.1.3 Atterberg Limit

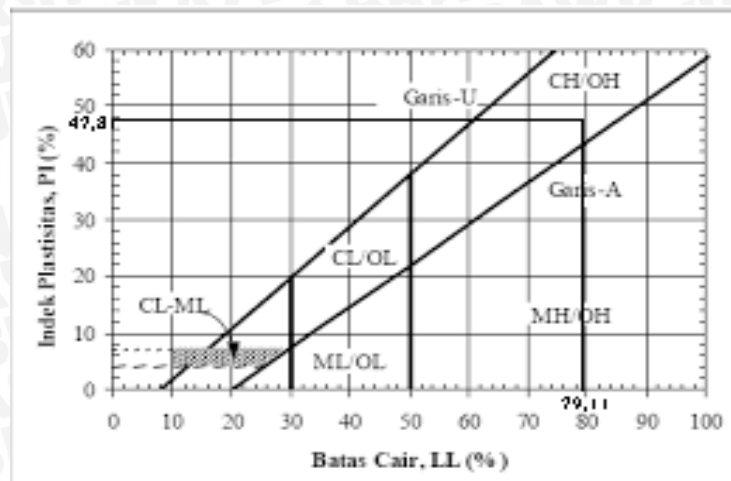
Dari klasifikasi butiran tanah tersebut termasuk jenis tanah berbutir halus, maka penting untuk mengetahui sifat plastisitasnya. Pengujian terdiri dari uji batas cair (LL), uji batas plastis (PL), uji batas susut (SL) dan indeks plastisitas (PI). Pengujian batas susut digunakan untuk mengetahui kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Sedangkan indeks plastisitas digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan jenis tanah yang di uji.

Tabel 4.2 Hasil Pemeriksaan Batas-Batas *Atterberg*

Bahan	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Tanah Asli	79,11	31,30	13,79	47,81

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai batas cair (LL) 79,11%, batas plastis (PL) 31,30%, batas susut (SL) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%.

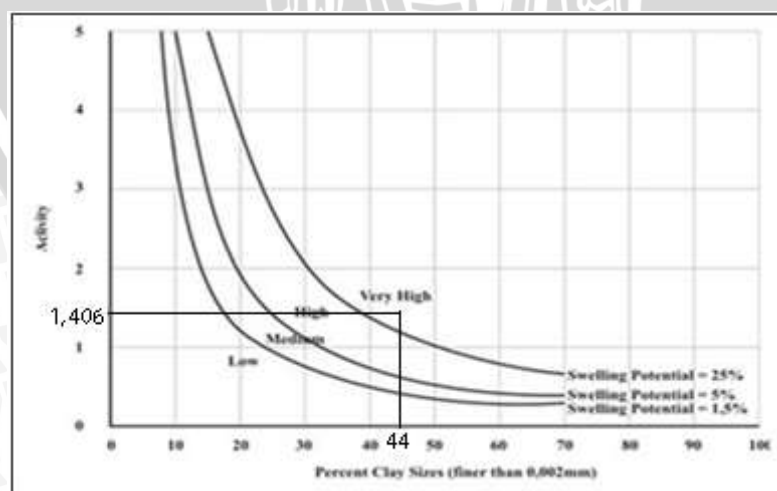


Gambar 4.2. Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

Dari Gambar 4.2 didapatkan klasifikasi tanah lempung berdasarkan sistem USCS dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah CH (lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi).

4.1.4 Sifat Ekspansifitas Tanah

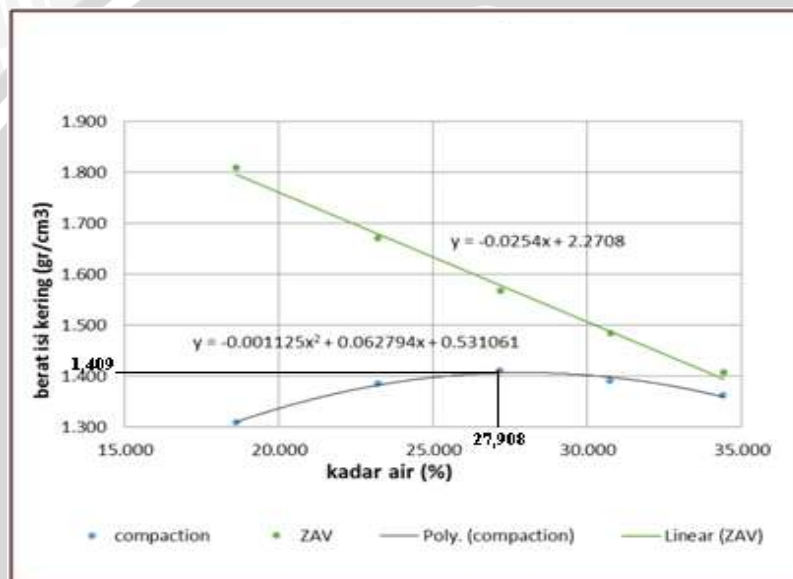
Nilai-nilai dari batas *Atterberg* dapat digunakan untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah lempung. Berdasarkan rumus (2-1) didapatkan nilai aktivitas sebesar 1,406 sehingga tanah tersebut termasuk tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Dari nilai aktifitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan pada Gambar 2.4 maka dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan sangat tinggi seperti yang ditunjukkan Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang
Sumber: Seed (1962)

4.1.5 Penentuan Kadar Air Optimum pada Tanah Asli dan Tanah Perbaikan DSM

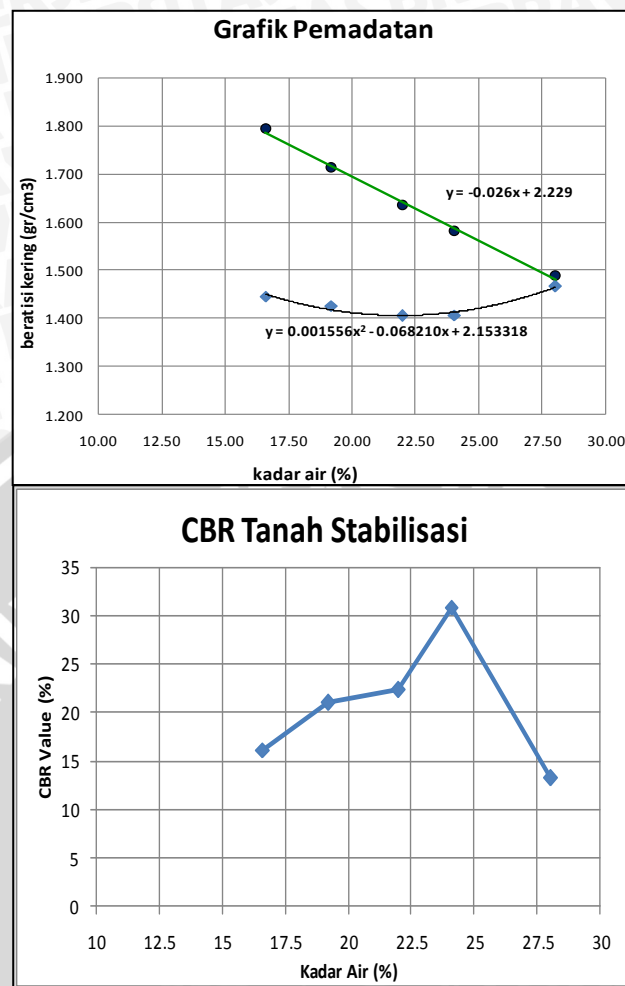
Pemadatan standar digunakan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) ketika tanah memiliki berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sesuai dengan metode **ASTM D-698** Metode B. Penentuan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah asli, didasarkan pada hasil uji pemadatan standar yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015). Pengambilan data tersebut sebagai acuan pemodelan, karena lokasi pengambilan dan jenis tanah yang sama. Grafik hasil pengujian pemadatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini:



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pemadatan Tanah Asli
Sumber : Kurniawan (2015)

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa besarnya kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) 1,409 gr/cm³.

Untuk menentukan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah yang distabilisasi kapur 10% dilakukan uji pemadatan. Namun setelah dilakukan 3 kali uji pemadatan tidak didapatkan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah campuran stabilisasi 10% kapur. Hal tersebut disebabkan karena sifat tanah ekspansif yang kurang stabil sehingga sangat sulit didapatkan kepadatan maksimumnya. Selanjutnya penentuan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah stabilisasi 10% kapur ditentukan dari pengujian *California Bearing Ratio* (CBR). Hasil dari uji Pemadatan dan uji CBR pada tanah stabilisasi dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.3.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pemadatan dan CBR Tanah Stabilisasi

Tabel 4.3 Perbandingan Kadar Air dengan Berat Isi Kering Tanah Stabilisasi

No. Sampel	Kadar air (w) (%)	Berat Isi Kering (γ_d) (gr/cm ³)	CBR Value (0.1'') (%)
1	16.60	1.445	16.12
2	19.20	1.426	20.97
3	21.99	1.406	22.33
4	24.10	1.406	30.87
5	28.03	1.466	13.20

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.3 didapatkan nilai CBR paling besar yaitu 30,87% dengan kadar air sebesar 24,10% dan berat isi kering sebesar 1,406% yang akan digunakan sebagai standarisasi kepadatan pada kolom DSM.

4.2 Analisis Daya Dukung Tanah (Sebelum Perbaikan)

4.2.1 Uji Kepadatan Tanah Asli

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan tanah asli pada *box* karena untuk mencapai kepadatan maksimum seperti yang dilakukan pada pemadatan standar sangatlah sulit untuk mencapai kepadatan rencana ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sebesar 1,409 gr/cm³. Sehingga untuk pemodelan tanah asli, digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm³. Nilai tersebut didapat dari *trial dan error* pemodelan tanah di dalam *box* yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015).

Agar kepadatan yang direncanakan tercapai, pemadatan tanah dikontrol tiap-tiap lapisan dengan tiap lapisan setinggi 5 cm. Hal tersebut dilakukan agar tercapai keseragaman kepadatan pada seluruh sampel uji. Hasil uji *density* untuk pemodelan tanah asli ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Uji *Density* pada Tanah Model

No. Ring		I	II	III	IV
Kadar air, (w)	%	27.88	27.43	27.95	28.35
Berat isi tanah (γ_t)	gr/cm ³	1.656	1.600	1.649	1.637
Berat isi kering, (γ_d)	gr/cm ³	1.295	1.255	1.289	1.275
Rata-rata berat isi tanah,	gr/cm ³	1.635			
Rata-rata berat isi kering,	gr/cm ³	1.279			

Sumber : Kurniawan (2015)

4.2.2 Uji Pembebanan Tanah Asli

Tanah ekspansif yang diuji memiliki data sebagai berikut:

$$\text{Berat isi kering tanah } (\gamma_d) \text{ rata-rata} = 1,28 \text{ gr/cm}^3$$

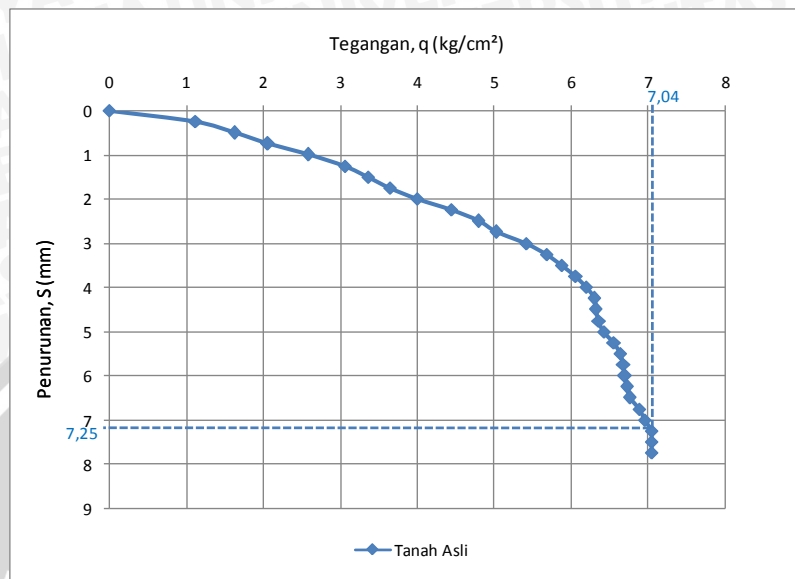
$$\text{Kadar air tanah rata-rata} = 10,49\%$$

$$\text{Luas pelat beban uji} = 25 \text{ cm}^2$$

Dalam pembuatan benda uji dalam *box* tanah dibagi menjadi 4 layer beserta dengan berat tanah yang dimasukkan. Berat tanah yang dimasukkan setiap layer memiliki berat 6,36 kg. Setelah benda uji selesai dipadatkan, pada pengujian tanah asli langsung dilanjutkan pada uji beban vertikal.

Hasil dari uji pembebanan tanah asli didapatkan data penurunan dari pembacaan digital LVDT dan beban dari pembacaan digital *Load Cell*. Beban maksimum yang dapat ditahan tanah (P_u) sebesar 176 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 7,25 mm.

Setelah data dianalisis didapatkan nilai daya dukung tanah. Dengan menggunakan rumus 3.1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate (q_u) sebesar $7,04 \text{ kg/cm}^2$. Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.6. Grafik Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli

4.3 Hasil dan Analisis Tanah dengan Perbaikan DSM

4.3.1 Uji Pembebanan

Dalam penelitian ini volume DSM tergantung pada panjang tanah yang diperbaiki namun memiliki kepadatan tanah yang sama yaitu $1,41 \text{ gr/cm}^3$. Berikut ini berat tanah yang dibutuhkan sebuah kolom DSM sesuai dengan variasi jarak dan panjang dengan berat isi kering $1,41 \text{ gr/cm}^3$.

Tabel 4.5. Berat Kebutuhan Kolom DSM

Berat Tanah+10% kapur (gr)	Panjang (Df)	Jarak DSM (L)		
		1D = 3 cm	1,25D = 3,75 cm	1,5D = 4,5 cm
	2B = 10 cm	99,7 gr	99,7 gr	99,7 gr
	3B = 15 cm	149,56 gr	149,56 gr	149,56 gr
	4B = 20 cm	199,41 gr	199,41 gr	199,41 gr

Sumber : Hasil Perhitungan

Dalam penelitian ini, instalasi kolom dibuat berdasarkan variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df) DSM pola *triangular* yang sudah ditentukan dengan diameter kolom 3 cm. Luas tanah yang distabilisasi yaitu $10 \times 10 \text{ cm}$. Setelah proses instalasi selesai dilanjutkan dengan proses pemadatan. Seperti pada pemadatan pada tanah asli, pemadatan tanah

stabilisasi pada kolom juga dibagi tiap lapisan 5cm. Pemadatan dilakukan dengan alat seberat 2,5 kg dan diameter 2,9 cm. Setelah itu benda uji diratakan, lalu dilanjutkan dengan waktu perawatan selama 3 hari sebelum dilakukan pengujian pembebanan dengan tujuan kapur dapat bereaksi dengan tanah seperti yang ditunjukkan pada penelitian Warsiti (2009) bahwa waktu perawatan kapur dapat meningkatkan kekuatan tanah. Setelah waktu perawatan berlangsung selama 3 hari, dilakukan pembebanan vertikal pada titik tengah dari benda uji menggunakan pelat ukuran $5 \times 5 \text{ cm}^2$ yang ditekan oleh dongkrak hidrolis dengan interval penurunan 50 skala dial LVDT. Setiap penurunan 50 skala LVDT dilakukan pembacaan beban. Beban dihentikan ketika penurunan terus bertambah namun pembacaan beban 3 kali sama berturut-turut.

Tabel 4.6. Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Jarak DSM

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1		1D = 3cm	15,75	459
2	2B = 10cm	1,25D = 3,75cm	13,5	412,5
3		1,5D = 4,5cm	21,5	400
4		1D = 3cm	8,5	468
5	3B = 15cm	1,25D = 3,75cm	11,25	416,5
6		1,5D = 4,5cm	19,75	414,5
7		1D = 3cm	8,25	484,5
8	4B = 20cm	1,25D = 3,75cm	14,5	459,5
9		1,5D = 4,5cm	18,75	452,5

Sumber : Hasil Pengujian

Tabel 4.7. Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Panjang DSM

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1		2B = 10cm	15,75	459
2	1D = 3cm	3B = 15cm	8,5	468
3		4B = 20cm	8,25	484,5
4		2B = 10cm	13,5	412,5
5	1,25D = 3,75cm	3B = 15cm	11,25	416,5
6		4B = 20cm	14,5	459,5
7		2B = 10cm	21,5	400
8	1,5D = 4,5cm	3B = 15cm	19,75	414,5
9		4B = 20cm	18,75	452,5

Sumber : Hasil Pengujian

4.3.2 Analisis Daya Dukung Tanah

4.3.2.1. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Jarak (L)

1. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 2B = 10cm

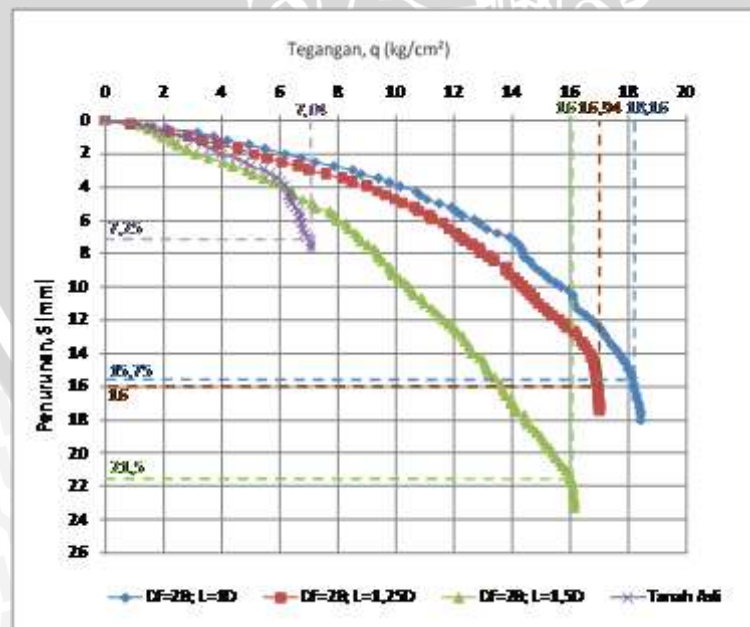
Hasil pengujian pada tanah dengan stabilisasi DSM panjang kolom 2B dengan variasi jarak (L) 1D = 3cm; 1,25D = 3,75cm dan 1,5D = 4,5cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan persamaan (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 2B = 10cm

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pa)	Daya Dukung (qa) (kg/cm ²)
1		1D = 3 cm	25	15.75	454	18.16
2	2B = 10cm	1,25D = 3,75 cm	25	16	423.5	16.94
3		1,5D = 4,5 cm	25	21.5	400	16

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa pada jarak antar kolom DSM paling dekat yaitu 1D memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Selain itu, jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang 2B = 10cm

Dari Gambar 4.7 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang 2B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Pada jarak DSM 1D memiliki daya dukung terbesar yaitu 18,16 kg/cm² dengan penurunan yang terjadi 15,75mm dan jarak DSM 1,5D memiliki daya dukung terkecil yaitu 16 kg/cm² dengan penurunan 21,5mm.

2. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 3B = 15cm

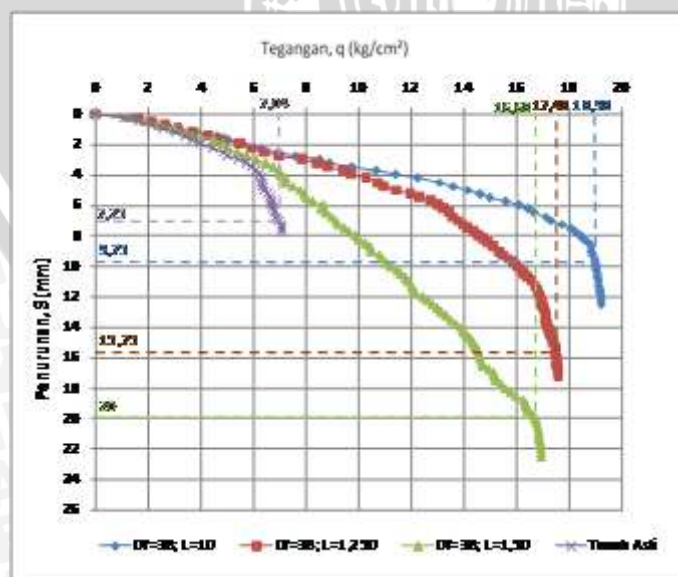
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 3B dengan variasi jarak (L) 1D = 3cm; 1,25D = 3,75 cm dan 1,5D = 4,5cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 3B = 15cm

No	Panjang DSM (D)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qn) (kg/cm ²)
1		1D = 3 cm	25	9.75	474.5	18.98
2	3B = 15cm	1,25D = 3,75 cm	25	15.75	437	17.48
3		1,5D = 4,5 cm	25	20	417	16.68

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa pada jarak antar kolom DSM paling dekat yaitu 1D memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang 3B = 15cm

Dari Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $3B = 15\text{cm}$ selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak $1D$ selalu berada di atas variasi jarak $1,25D$ dan diikuti jarak $1,5D$. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang diuji. Pada jarak DSM $1D$ memiliki daya dukung terbesar yaitu $18,98\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,75\text{mm}$ dan jarak DSM $1,5D$ memiliki daya dukung terkecil yaitu $16,68\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 20mm .

3. Daya dukung tanah dengan panjang DSM $4B = 20\text{cm}$

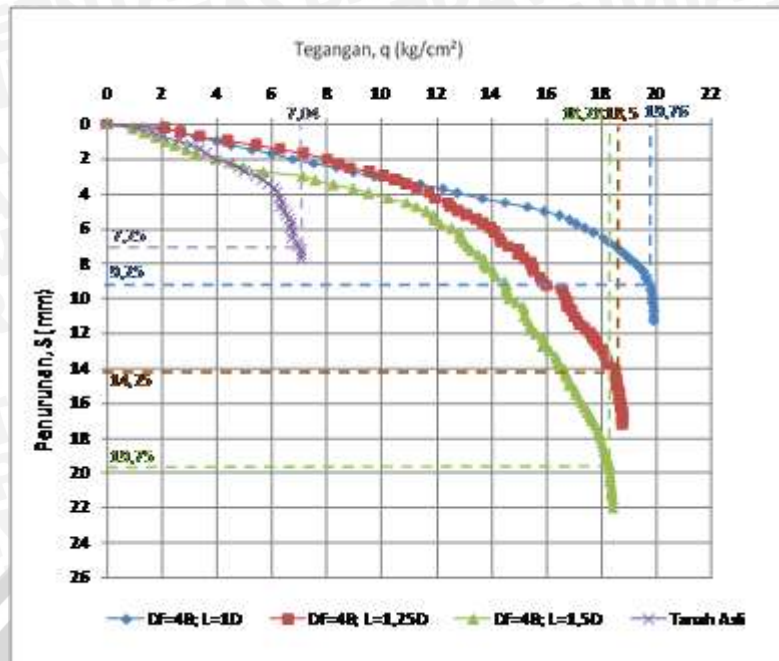
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 20cm dengan variasi jarak (L) $1D = 3\text{cm}$; $1,25D = 3,75\text{cm}$ dan $1,5D = 4,5\text{cm}$; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM $4B = 20\text{cm}$

No	Panjang DSM (D)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pa) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1		$1D = 3\text{ cm}$	25	9,25	494	19,76
2	$4B = 20\text{cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$	25	14,25	462,5	18,5
3		$1,5D = 4,5\text{ cm}$	25	19,75	457	18,28

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.10 dapat diketahui bahwa pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada Tabel 4.10 terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang $4B = 20\text{cm}$

Dari Gambar 4.9 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $4B = 20\text{cm}$ selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 1D selalu berada di atas variasi jarak 1,25D dan diikuti 1,5D. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji. Pada jarak DSM 1D memiliki daya dukung terbesar yaitu $19,76\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{mm}$ dan jarak DSM 1,5D memiliki daya dukung terkecil yaitu $18,28\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $19,75\text{mm}$. Dari gambar 4.7 pengaruh dari variasi jarak DSM terlihat sangat jelas, hal tersebut terlihat dari rentang daya dukung antara jarak DSM 1D dengan jarak DSM 1,25D lebih lebar dibanding rentang daya dukung antara jarak DSM 1,25D dengan jarak DSM 1,5D.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh. Pada analisis variasi jarak, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM 1D pada panjang DSM $4B$ yaitu sebesar $19,76\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{cm}$. Pengaruh jarak DSM 1D dapat terjadi karena DSM dapat mengurangi penyebaran distribusi tegangan pada tanah asli dan ditahan oleh DSM.

4.3.2.2. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Panjang (Df)

1. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

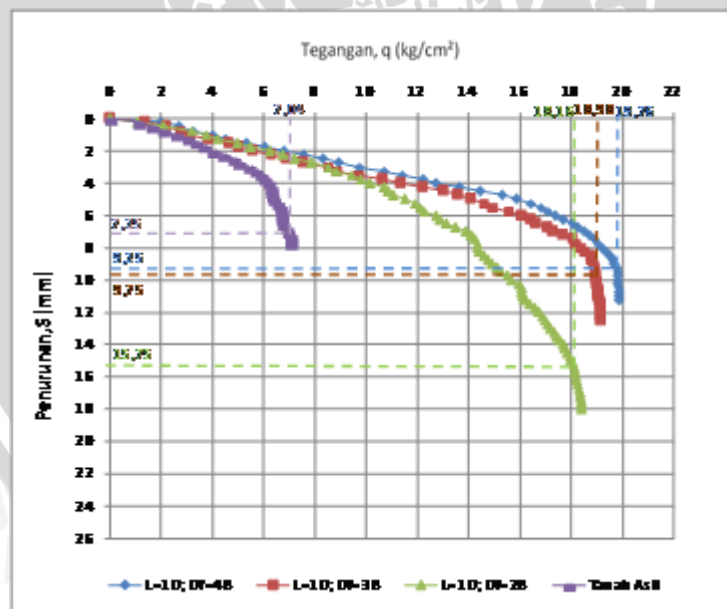
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $1B = 5\text{ cm}$; $2B = 10\text{ cm}$ dan $3B = 15\text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1	1 D = 3 cm	2 B = 10 cm	25	15.75	454	18.16
2		3 B = 15 cm	25	9.75	474.5	18.98
3		4 B = 20 cm	25	9.25	494	19.76

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.11 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $19,76\text{ kg}/\text{cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan

2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Selain itu, peningkatan signifikan daya dukung tanah terlihat pada variasi panjang 4B yang menghasilkan daya dukung sebesar $19,76 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25 \text{ mm}$.

2. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

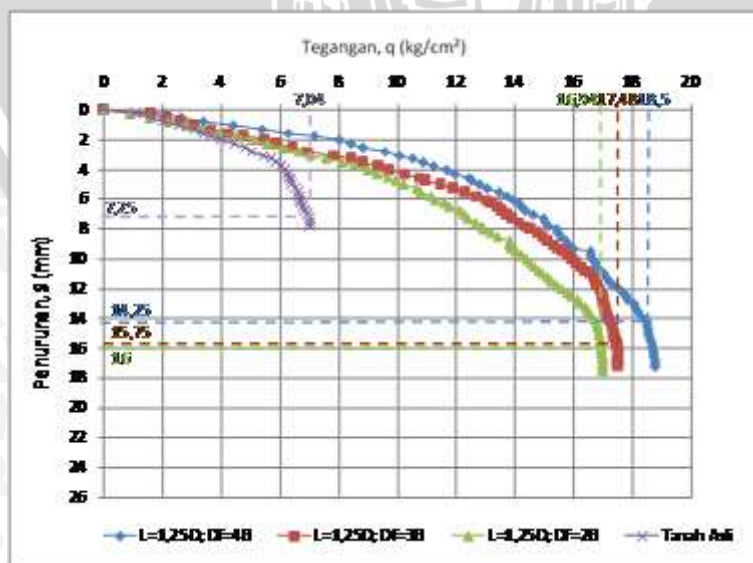
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $2B = 10 \text{ cm}$; $3B = 15 \text{ cm}$ dan $4B = 20 \text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pa)	Daya Dukung (qa) (kg/cm^2)
1		$2B = 10 \text{ cm}$	25	16	423,5	16,94
2	$1,25D = 3,75 \text{ cm}$	$3B = 15 \text{ cm}$	25	15,75	437	17,48
3		$4B = 20 \text{ cm}$	25	14,25	462,5	18,5

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $18,78 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $16,25 \text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

Dari Gambar 4.11 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B atau 20cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan 2B.

3. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

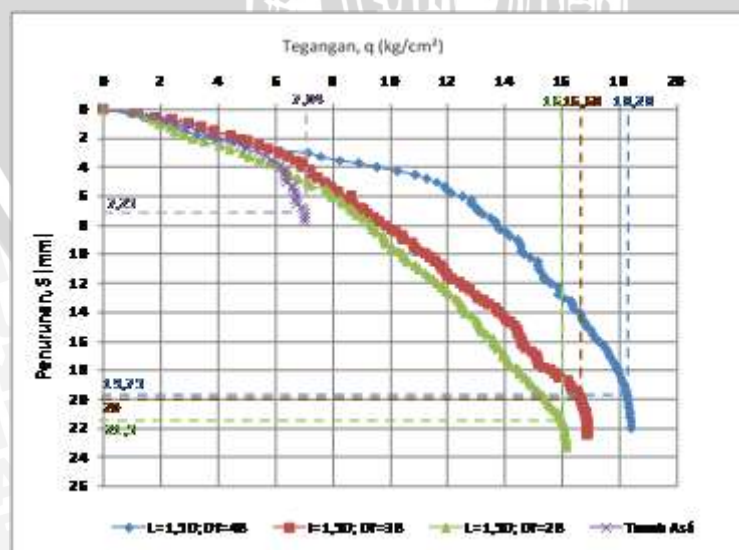
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3cm dengan variasi panjang $2B = 10\text{cm}$; $3B = 15\text{cm}$ dan $4B = 20\text{cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1		2 B = 10 cm	25	21.5	400	16
2	1,5 D = 4,5 cm	3 B = 15 cm	25	20	417	16.68
3		4 B = 20 cm	25	19.75	457	18.28

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.13 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $18,28 \text{ kg}/\text{cm}^2$ dengan penurunan maksimum 19,75 mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

Dari Gambar 4.12 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan 2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

Dari ketiga hasil analisis menunjukkan bahwa Panjang kolom DSM (Df) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung pada variasi panjang kolom DSM antara 4B dengan 3B dibanding rentang daya dukung antara variasi panjang DSM 3B dan 2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang kolom DSM (Df) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding panjang kolom DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang kolom DSM 4B dengan jarak DSM 1D yaitu sebesar $19,76 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{mm}$. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang kolom DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli. Selain itu pengaruh panjang DSM juga dapat disebabkan karena distribusi tegangan pada panjang 4B masih besar, seperti yang dijelaskan Beussinesq bahwa tegangan akan turun sesuai dengan panjang yang digambarkan pada garis-garis isobar dalam grafik *Bulb Pressure*.

4.4 Analisis Penurunan Tanah

Berdasarkan dari pengujian pembebanan yang telah dilakukan pada benda uji model akan diperoleh nilai pembacaan tegangan dan penurunan (*settlement*). Sehingga besarnya penurunan dapat langsung didapatkan dari grafik hubungan tegangan dengan penurunan. Seperti halnya analisis daya dukung, pada analisis penurunan tanah juga dianalisis pada masing-masing variasi jarak antar kolom dan panjang kolom dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi tersebut terhadap penurunan tanah.

4.4.1 Penurunan Tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi jarak (L)

Setelah dilakukan uji pembebanan pada benda uji model tanah asli, maka berikutnya uji pembebanan dilakukan pada benda uji yang telah distabilisasi dengan kolom DSM 10% kapur. Untuk mengetahui besarnya penurunan (*settlement*) pada masing-masing variasi, peninjauan dilakukan pada saat terjadi tegangan *ultimate* (q_u). Adapun analisis penurunan pada variasi jarak antar kolom (L) terhadap panjang kolom (Df):

Tabel 4.14 Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	q_u	Penurunan
	cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
	2B = 10cm	1D = 3cm	25	18,16	15,75
		1,25D = 3,75cm	25	16,94	16
		1,5D = 4,5cm	25	16	21,5
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	3B = 15cm	1D = 3cm	25	18,98	9,75
		1,25D = 3,75cm	25	17,48	15,75
		1,5D = 4,5cm	25	16,68	20
	4B = 20cm	1D = 3cm	25	19,76	9,25
		1,25D = 3,75cm	25	18,5	14,25
		1,5D = 4,5cm	25	18,28	19,75

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

**Gambar 4.13** Grafik Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Jarak Kolom

Dari Tabel 4.14 dan Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df) 2B = 10 cm, 3B = 15 cm dan 4B = 20 cm besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, hal ini sesuai hipotesa bahwa besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.

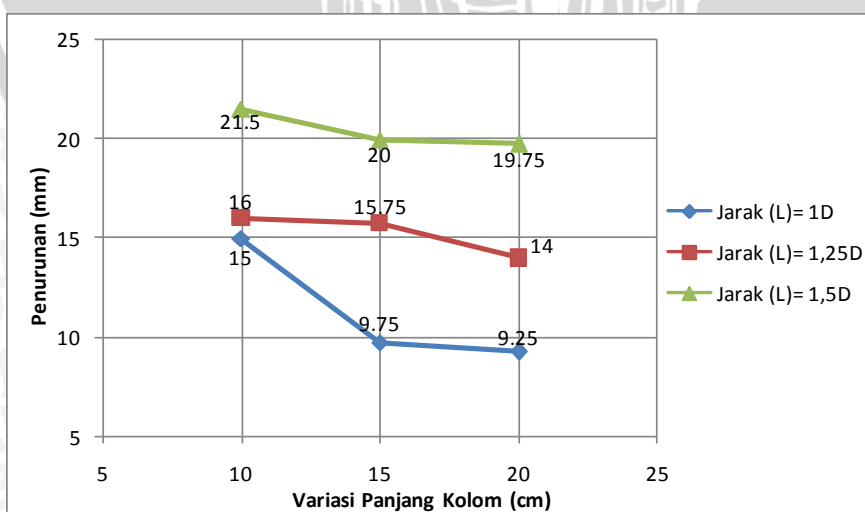
4.4.2. Penurunan tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi panjang (Df)

Analisis penurunan tidak hanya ditinjau dari variasi jarak kolom terhadap panjang kolom saja, melainkan analisis penurunan pada variasi panjang kolom terhadap jarak antar kolom juga dilakukan. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variasi jarak dan panjang kolom DSM terhadap penurunan tanah. Adapun analisis penurunan pada variasi panjang kolom(Df) terhadap jarak antar kolom(L):

Tabel 4.15 Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (Df)

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (Df)	Luas Pondasi (A)	q_u	Penurunan
	cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
	1D = 3cm	2B = 10cm	25	18,16	15,75
		3B = 15cm	25	18,98	9,75
		4B = 20cm	25	19,76	9,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 3,75cm	2B = 10cm	25	16,94	16
		3B = 15cm	25	17,48	15,75
		4B = 20cm	25	18,5	14,25
	1,5D = 4,5cm	2B = 10cm	25	16	21,5
		3B = 15cm	25	16,68	20
		4B = 20cm	25	18,28	19,75

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Tabel 4.15 dan Gambar 4.14, dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) $1D = 3\text{cm}$, $1,25D = 3,75\text{cm}$ dan $1,5D = 4,5\text{cm}$ besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan panjang kolom. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana besarnya *settlement* akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya panjang kolom.

4.5 Analisis *Bearing Capacity Improvement* Berdasarkan Daya Dukung Ultimit

Analisis BCI adalah analisa yang digunakan untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Hasil Analisis BCI juga dapat mengetahui nilai peningkatan daya dukung tanah akibat stabilisasi dengan menggunakan *deep soil mixing* (DSM).

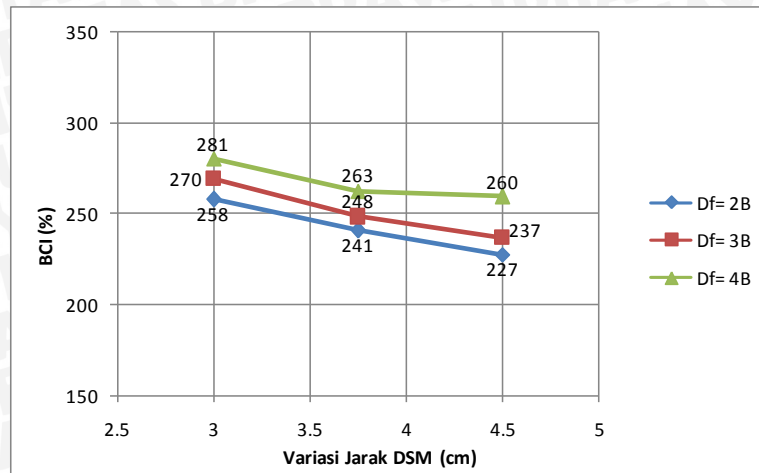
4.5.1 Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Untuk analisis BCI digunakan rumus (3-2). untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi jarak DSM (L). Jarak DSM yang digunakan adalah $1D = 3\text{cm}$; $1,25D = 3,75\text{cm}$; dan $1,5D = 4,5\text{cm}$, D merupakan diameter DSM yaitu 3cm . Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 4.16 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada Gambar 4.15.

Tabel 4.16. Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (D)	Jarak DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)
1		$1D = 3\text{ cm}$		18.16	258
2	$2B = 10\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$		16.94	241
3		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		16	227
4		$1D = 3\text{ cm}$		18.98	270
5	$3B = 15\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$	7.04	17.48	248
6		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		16.68	237
7		$1D = 3\text{ cm}$		19.76	281
8	$4B = 20\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$		18.5	263
9		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		18.28	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4.15. Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Dari Tabel 4.14 dan Gambar 4.15 terlihat bahwa terjadi penurunan daya dukung pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Pada jarak DSM yang semakin dekat terjadi nilai nilai BCI semakin meningkat, seperti yang tampak pada panjang DSM (Df) = 4B. Pada jarak 1,5D nilai BCI sebesar 260%, BCI meningkat pada variasi 1,25D sebesar 263%. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi jarak 1D, yaitu sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan dan jarak DSM maksimum untuk meningkatkan nilai BCI terjadi terletak pada jarak DSM 1D, dengan peningkatan nilai BCI terbesar yaitu 281%.

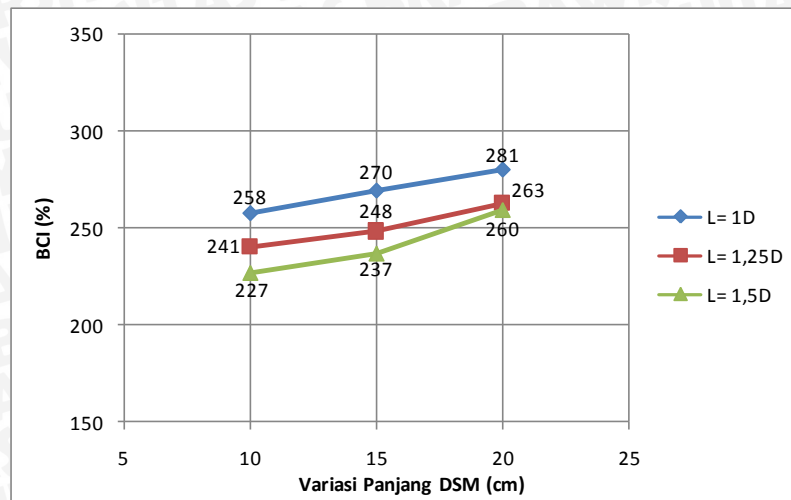
4.5.2 Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Untuk analisis BCI digunakan rumus (3-2). untuk mengetahui nilai BCI akibat variasi Panjang kolom DSM (Df). Jarak DSM yang digunakan adalah 2B = 10cm; 3B = 15cm; dan 4B = 20cm, B lebar pelat uji yaitu 5cm. Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 4.17 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap nilai BCI dapat dilihat pada gambar 4.16.

Tabel 4.17. Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)
1		2 B = 10 cm		18.16	258
2	1 D = 3 cm	3 B = 15 cm		18.98	270
3		4 B = 20 cm		19.76	281
4		2 B = 10 cm		16.94	241
5	1,25 D = 3,75 cm	3 B = 15 cm	7.04	17.48	248
6		4 B = 20 cm		18.5	263
7		2 B = 10 cm		16	227
8	1,5 D = 4,5 cm	3 B = 15 cm		16.68	237
9		4 B = 20 cm		18.28	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

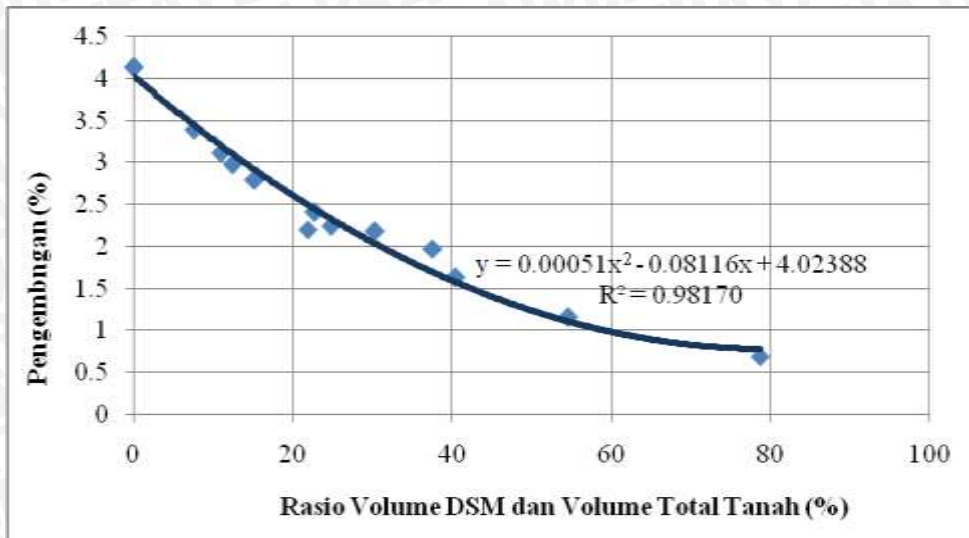


Gambar 4.16. Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Dari Tabel 4.15 dan Gambar 4.16 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai BCI pada tanah ketika DSM semakin panjang. Pada jarak DSM 1D dengan variasi panjang 2B terjadi peningkatan nilai BCI sebesar 258% data tersebut meningkat pada variasi panjang 3B dengan nilai BCI sebesar 270%. Hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 4B, yaitu terjadi peningkatan sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan nilai BCI lebih besar dibanding dengan panjang kolom DSM yang lebih pendek dan panjang DSM maksimum untuk meningkatkan nilai BCI terletak pada panjang 4B dengan peningkatan nilai BCI terbesar yaitu 281%.

4.6 Analisis Pengembangan (*Swelling*)

Pada data hasil penelitian yang dilakukan oleh (Firdaus, 2016) mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi dengan metode *deep soil mixing*(DSM), maka pada penelitian ini pun bisa membandingkan terhadap hasil penelitian tersebut. Di mana penelitian tersebut mengidentifikasi jumlah kolom DSM yang berarti berhubungan dengan persentase tanah stabilisasi yang digunakan akan mempengaruhi nilai pengembangan tanah lempung ekspansif Bojonegoro. Data hasil penelitian mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Perbandingan Hasil *Swelling* terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total Tanah

Sumber : Komunikasi pribadi dengan Firdaus (2016)

Dari Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa semakin besar rasio volume DSM dalam tanah mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*). Hal tersebut dapat terjadi karena kepadatan pada tanah yang memiliki volume DSM lebih besar memiliki kepadatan yang tinggi dan volume kadar kapur juga lebih tinggi sehingga dapat mengurangi potensi pengembangan. Tabel perbandingan persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi	<i>Swelling</i>	Penurunan <i>Swelling</i> dari tanah asli
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4.13	0
	L = 1D ; Df = 2B	45.6	1.36	2.77
	L = 1,25D ; Df = 2B	26.96	2.20	1.93
	L = 1,5D ; Df = 2B	17.42	2.76	1.37
Tanah Asli + Kolom	L = 1D ; Df = 3B	68.4	0.81	3.32
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 1,25D ; Df = 3B	40.44	1.56	2.58
	L = 1,5D ; Df = 3B	26.13	2.24	1.89
	L = 1D ; Df = 4B	91.2	0.78	3.36
	L = 1,25D ; Df = 4B	53.92	1.10	3.03
	L = 1,5D ; Df = 4B	34.84	1.80	2.33

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.18 tersebut dapat diketahui bahwa tanah yang distabilisasi dengan metode DSM untuk variasi panjang kolom 4B dan jarak antar kolom 1D memiliki nilai *swelling* paling kecil yaitu 0,78% dan didapat penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar

3,36 %. Sehingga dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan persentase tanah yang distabilisasi maka pengembangan (*swelling*) akan semakin menurun. Jadi penurunan *swelling* paling besar terjadi pada variasi panjang kolom 4B dan jarak kolom 1D dengan penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar 3,36 %.

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm(0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata tanah lempung ekspansif di lokasi penelitian memiliki kedalaman 1,5 meter yang berarti bahwa persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%. Dari analisa uji pengembangan terhadap pemodelan di laboratorium yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi panjang kolom (D_f) = 4B dan jarak antar kolom (L) = 1D.





BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dalam penelitian ini menggunakan metode *deep soil mixing* (DSM) dengan cara membuat kolom campuran tanah dengan bahan *additive* yang dipadatkan dengan harapan dapat meningkatkan daya dukung tanah ekspansif di Bojonegoro. Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3cm berpola *triangular* terhadap daya dukung tanah ekspansif di Bojonegoro dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin dekat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah.
2. Jarak dan panjang kolom maksimum DSM dengan daya dukung maksimum terjadi pada DSM jarak terdekat $L = 1D$ (3cm) dan panjang kolom $D_f = 4B$ (20cm) dengan nilai BCI sebesar 281%.
3. Semakin besar volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*) dan penurunan *swelling* paling besar terjadi pada panjang kolom 4B dan jarak antar kolom 1D dengan penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar 3,36% dengan persentase tanah yang distabilisasi sebesar 91,2%.

5.2 Saran

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan dalam penelitian ini, masih terdapat banyak kelemahan yang perlu diperhatikan. Untuk itu agar penelitian selanjutnya kelemahan-kelemahan yang terjadi dapat diminimalisir maka diperlukan beberapa upaya untuk menghindari kesalahan dalam penelitian, diantaranya:

1. Perlu dilakukan analisis lebih detail mengenai usaha pemadatan dalam *box* sehingga berat isi kering maksimum dalam *box* dapat memenuhi kriteria berat isi kering maksimum berdasarkan uji proktor standar.

2. Operator pembebanan vertikal harus selalu membawa *stopwatch*, agar penurunan yang dihasilkan dari pembacaan beban dapat berjalan konstan, karena dalam penelitian ini pembebanan masih dilakukan secara manual.
3. Karena tanah yang diuji merupakan jenis tanah ekspansif, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui pengaruh DSM terhadap kembang susut-tanah dalam *box*.
4. Memperbanyak variasi jarak dan panjang untuk mengetahui jarak dan panjang paling optimum pada DSM diameter 3cm pola *triangular*. Dalam penelitian ini pengaruh jarak dan panjang masih belum terlihat signifikan sehingga diperlukan tambahan variasi jarak dan panjang untuk mengetahui batas pengaruh jarak dan panjang DSM terhadap nilai daya dukung tanah ekspansif.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

