

PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIXING* (DSM) 10% KAPUR DIAMETER 4 CM BERPOLA *TRIANGULAR* TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO

(The Effect of Distance and Length Variation of 10% Lime Deep Soil Mixing (DSM) Using 4 cm Diameter with Triangular Configuration on Bearing Capacity of Expansive Soil at Bojonegoro)

Angeline Grace Allo, Yulvi Zaika, Eko Andi Suryo.

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan Mayjend Haryono No. 167 Malang 65145 – Telp (0341) 567886
Email: andien.angeline@gmail.com

ABSTRAK

Di Indonesia memiliki keadaan tanah yang berbeda disetiap tempat. Jenis tanah yang perlu diperbaiki yaitu tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki daya dukung yang rendah dengan muka air yang tinggi, plastisitas yang tinggi dan juga memiliki sifat kembang susut yang tinggi. Penelitian ini menggunakan metode DSM yang dilakukan sama seperti di lapangan tetapi lebih sederhana. Pengujian dilakukan pada box berukuran $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Dalam pengujian tanah yang distabilisasi menggunakan DSM berdiameter 4 cm dengan variasi jarak (4 cm, 5 cm dan 6 cm) dan variasi panjang (10 cm, 15 cm dan 20 cm). Pembebanan dilakukan pada tanah asli dan tanah stabilisasi dengan menggunakan beban vertical (pelat ukuran $5 \times 5 \text{ cm}^2$). Pembacaan beban dilakukan sampai tiga kali pembacaan agar mendapatkan beban maksimum. Hasil dari penelitian ini yaitu semakin dekat jarak antar DSM dan semakin panjang DSM maka semakin besar daya dukung, jarak dan panjang maksimum DSM terjadi pada jarak terdekat ($L = 4 \text{ cm}$) dan panjang DSM sebesar 20 cm, dan pada persentase sebesar 87,52% dapat menghentikan pengembangan (*swelling*) tanah asli.

Kata kunci: Tanah Ekspansif, Stabilisasi Tanah, Kapur, *Deep Soil Mixing*, Daya Dukung

ABSTRACT

Indonesia has a wide range of soil conditions which are different in each place so it is inevitable damage to roads and buildings due to different technical properties of the foundation soil. The type of soil to aware of, and have to be improved, are expansive clays. An expansive clay soil has a very low bearing capacity in condition of high water content, wide range of fluctuation between soaked (swelling) and unsoaked (shrinkage), and high plasticity. This testing is done in a box with the original soil sample volume $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. This soil test consists of 4 cm diameter DSMs with variations in distance 4 cm, 5 cm, 6 cm, and variations of length 10 cm, 15 cm, and 20 cm, patterned triangular in their position configurations. Loading process performed on the original soil and stabilized soil. Loading process using a vertical load to the $5 \times 5 \text{ cm}^2$ plate surface. To get the maximum load is done by reading the measuring instrument up to three times to obtain the soil bearing capacity. The result of the analysis: maximum bearing capacity of the DSM achieved at the closest distance $L = 1D$ (4 cm) and the column length $D_f = 4B$ (20 cm). In addition, DSM volume ratio in the soil can affect the swelling of soil. The bigger the DSM volume ratio the lower the potential for swelling. For this test, the ratio of DSM stabilization ratio of 87.52% has reduce the swelling to 0.75%.

Keywords: Expansive Soil, Soil Stabilization, Lime, Deep Soil Mixing, Bearing Capacity.

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Indonesia memiliki keadaan tanah yang berbeda di setiap tempat. Jenis tanah yang perlu diperhatikan yaitu tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki daya dukung tanah yang rendah pada kondisi muka air yang tinggi, sifat fluktuasi kembang susut (*swelling*) yang besar dan plastisitas yang tinggi sehingga mengakibatkan terjadinya penurunan yang sering kali tidak dapat dipikul oleh struktur di atasnya. Salah satu cara mengatasi untuk menstabilkan tanah ekspansif yaitu dengan stabilisasi tanah.

Stabilitas tanah adalah salah satu cara untuk memperbaiki sifat tanah dengan menambahkan sesuatu pada tanah agar dapat menaikkan kekuatan tanah. Pada penelitian ini, digunakan stabilisasi kimiawi dengan penambahan bahan *additive* untuk memperbaiki dan menambah kekuatan dan kuat dukung tanah. Salah satu bahan aditif yang digunakan pada penelitian ini adalah kapur.

Kapur adalah salah satu bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah. Jenis kapur yang banyak digunakan adalah kapur tohor (CaO) dan kapur hidrasi atau kapur padam. Pada tanah yang mengandung lempung, kapur akan segera bereaksi membentuk suatu struktur campuran yang stabil. Hasil campurannya juga akan bersifat mudah dikerjakan dan di padatkan. Penelitian mengenai pemanfaatan kapur sudah banyak dilakukan di Indonesia.

Deep Soil Mixing (DSM) adalah perbaikan tanah dimana tanah dicampur dengan bahan reagen semen dan dicampur secara mekanik dengan bantuan *crane* dilengkapi alat hidrolik dan auger. Tujuan dari *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi kompresibilitas tanah. Tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur memiliki kedalaman sekitar 1- 3 meter sehingga cocok untuk menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM).

2. Tujuan Penelitian

- Untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
- Untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
- Untuk mengetahui Pengaruh penambahan kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif dan berapa persen penambahan kapur yang didapatkan nilai *swelling* minimum.

METODE PENELITIAN

1. Pengujian Pendahuluan

Sebelum melakukan penelitian, perlu adanya penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang akan di uji merupakan jenis tanah lempung ekspansif. Penelitian pendahuluan terdiri dari:

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)).

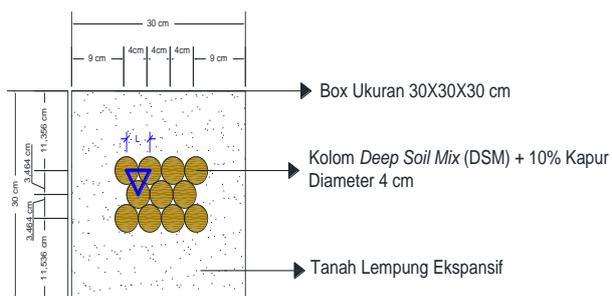
2. Pengujian Benda Uji

Pengujian ini diawali pembuatan benda uji dimana benda uji dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi *Deep Soil Mixing* dan kondisi tanah dengan stabilisasi *Deep Soil Mixing*. Tanah dimasukkan pada *box* berukuran

30x30x30 cm³ hingga ketinggian (H) 20 cm. Sampel dibagi menjadi 4 lapis dengan tinggi masing-masing 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 21,5 cm. Hal ini berlaku untuk 2 kondisi tanah.

Untuk tanah yang akan distabilisasi dengan DSM setelah dilakukan pemadatan dilanjutkan dengan pembuatan lubang dengan menggunakan pipa besi berdiameter 4 cm sesuai dengan variasi jarak dan panjang DSM yang sudah ditentukan. Pada lubang DSM tersebut akan diisi dengan sampel tanah yang sudah dicampur 10% kapur dengan tebal tiap lapisannya 5 cm dan tiap lapisan akan dipadatkan dengan alat yang memiliki diameter 2,9 cm yang dipukul proktor dengan berat 2,56 kg. Setelah proses instalasi selesai, dilakukan *curing* selama 3 hari dan dilanjutkan dengan uji pembebanan.

Berikut ini merupakan contoh pemodelan benda uji:



Gambar 1 Pemodelan DSM Pola *Triangular*

Untuk variasi jarak dan panjang dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

Tabel 1 Variasi Jarak dan Panjang DSM Pola *Triangular*:

		Jarak Antar Kolom (L) ; Diameter (D) = 4 cm		
		L = 1 D	L = 1,25 D	L = 1,5 D
Panjang Kolom (P) ; 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

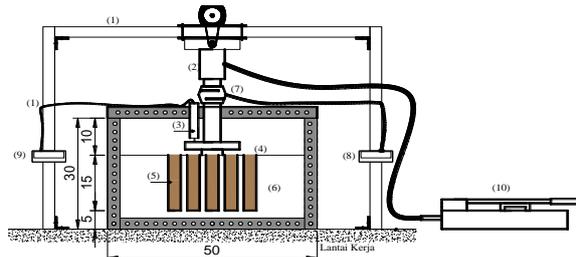
3. Uji Pembebanan

Pengujian 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. Dilanjutkan dengan meletakkan alat pemberat pada *frame* dengan tujuan agar *frame* uji beban tidak terangkat ketika uji beban berlangsung. Selanjutnya dilakukan pemasangan dongkrak hidrolis, *load cell*, *piston* dan pelat model pondasi.

Pada uji beban vertikal model pondasi, ujung atas dari dongkrak hidrolis dihubungkan dengan *frame* pembebanan yang terbuat dari baja profil. Sedangkan ujung bawah dongkrak hidrolis dihubungkan pada *load cell* dilanjutkan dengan *piston* untuk meneruskan beban pada pelat baja. Pelat baja berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari *piston* dongkrak hidrolis menjadi beban merata yang digunakan sebagai model pondasi pada proses pembebanan. Letak dongkrak hidrolis diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat diatas benda uji.

Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli

yang belum distabilisasi menggunakan kolom kapur. Pembebanan pada tanah asli ini untuk mengetahui kurva daya dukung tanah dan akan dibandingkan dengan tanah yang telah distabilisasi. Pengujian pembebanan selanjutnya dilakukan pada benda uji yang telah distabilisasi menggunakan kolom kapur. Pengujian dilakukan sebanyak 9 kali sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Dapat dilihat skema pengujian beban pada Gambar 2:



Keterangan:
 1. Portal Baja
 2. Piston Hidrolik
 3. Dial LVDT
 4. Pelat Baja 20x20x2cm
 5. Deep Soil Mix+10% Kapur
 6. Sampel Lempung Ekspansif
 7. Load Cell
 8. Digital Load Cell
 9. Digital LVDT
 10. Pompa Hidrolik

Gambar 2 Skema Uji Pembebanan

4. Rancangan Penelitian

Setelah pengujian pembebanan didapatkan tegangan dan penurunan pada sampel tanah yang diuji. Rancangan penelitian dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2 Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak antar DSM (L) cm	Panjang DSM (Df) cm	Penurunan mm	Beban Maksimum (Pu) kg	qu kg/cm ²
Tanah Asli	-	-			
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 5 cm	2B = 10cm			
		3B = 15cm			
		4B = 20cm			
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,5D = 6 cm	2B = 10cm			
		3B = 15cm			
		4B = 20cm			

Tabel 3 Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM (L)

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

Tabel 4 Daya Dukung dengan Variasi Panjang DSM (Df)

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

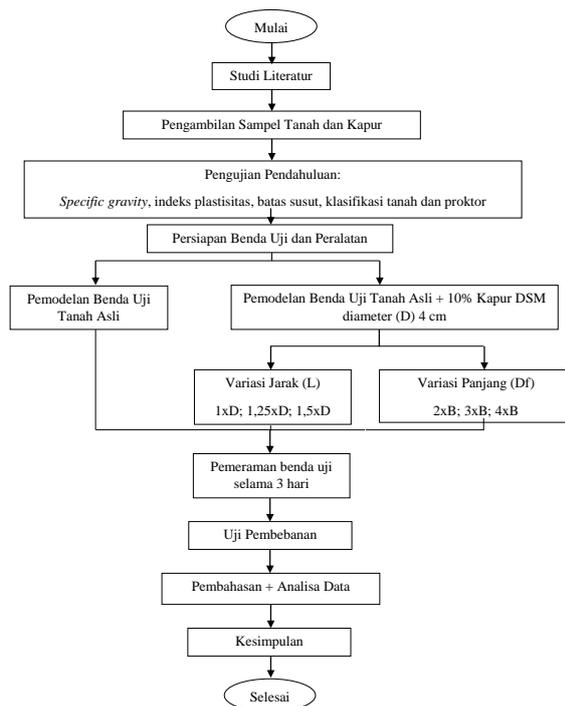
Tabel 5 Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Jarak

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

Tabel 6 Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Panjang

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

5. Diagram Alir



HASIL DAN PEMBAHASAN

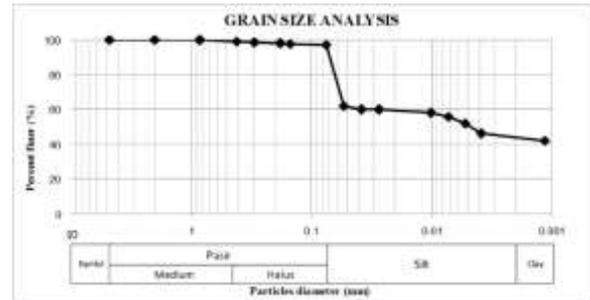
Pengujian pendahuluan merupakan pengujian yang bertujuan untuk menentukan jenis tanah dan sifat tanah yang digunakan sebagai benda uji.

1. *Specific gravity* (Gs)

Specific gravity (Gs) atau berat spesifik merupakan perbandingan berat butiran tanah dengan berat air pada volume yang sama dan pada suhu tertentu. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan adalah 2,556.

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 yang tertahan pada saringan no. 200. Analisis hidrometer digunakan untuk mengetahui tanah yang berada di pan atau lolos saringan no. 200. Hasil analisis yang dilakukan ditampilkan pada gambar 3 berikut ini:



Gambar 3 Analisa Saringan dan Hidrometer

Dari analisa saringan dan hydrometer didapatkan persentase distribusi lolos saringan no. 200 sebesar 97,03%.

3. *Atterberg Limit*

Pengujian batas *atterberg* terdiri dari uji batas cair (*Liquid limit*), uji batas plastis (*Plastic limit*) dan uji batas susut (*Shrinkage limit*). Batas cair dan batas plastis digunakan untuk mengetahui indeks plastisitas. Indeks plastisitas digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan jenis tanah yang di uji. 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. Berikut adalah hasil dari pengujian batas-batas *atterberg*.

Tabel 7 Hasil Pemeriksaan Batas *Atterberg*

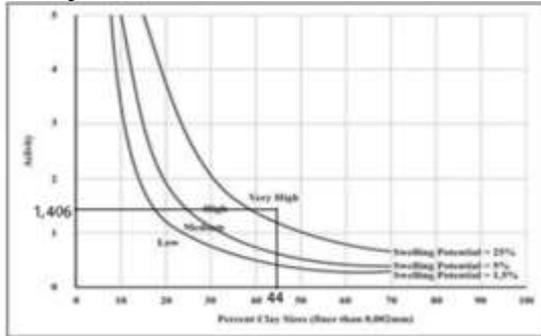
LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
79.11	31.3	13.79	47.81

Sehingga tanah lempung dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH).

4. Sifat Ekspansifitas

Berdasarkan rumus 2.1 nilai aktivitas sebesar 1,406 tanah tersebut termasuk tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Dari nilai aktivitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan padagambar 4 maka dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk

klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan yang tinggi seperti yang ditunjukkan Gambar 4:



Gambar 4 Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang
Sumber: Seed (1962)

5. Pemadatan Standar

Dalam penelitian ini, pemadatan standar digunakan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) ketika tanah memiliki berat isi kering maksimum (γ_d maks) sesuai dengan metode **ASTM D-698 Metode B**. Pengujian pemadatan standar dilakukan dengan metode B dengan spesifikasi alat sebagai berikut

- Diameter cetakan (*mold*) 152 mm (6")
- Bahan lolos saringan no.4 (4,75 mm)
- Berat alat pemukul (*proctor*) 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,48 cm (12")

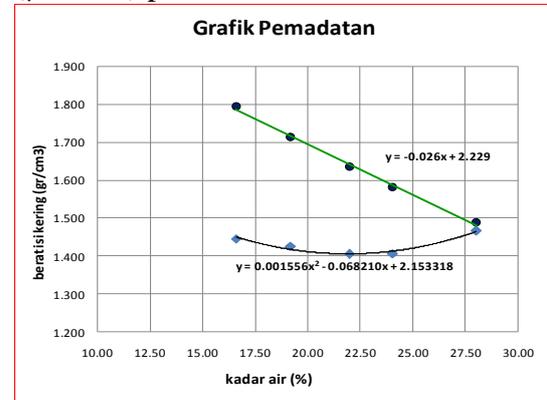
Grafik hasil pengujian pemadatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini:



Gambar 5 Grafik Hasil Pemadatan Tanah Asli

Dari Gambar 5 didapatkan kadar air optimum sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum 1,409 gr/cm³.

Sedangkan penentuan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah stabilisasi 10% kapur berdasarkan uji pemadatan yang dilakukan sebanyak 3 kali, tidak didapatkan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimumnya (γ_d maks) pada Gambar 6



Gambar 6 Grafik Hasil Pemadatan Tanah Stabilisasi

Sehingga penentuan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah stabilisasi 10% kapur ditentukan dari hasil pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) yang mempunyai nilai CBR paling tinggi. Besarnya nilai CBR dari tanah stabilisasi tersebut disajikan pada Tabel 7

Tabel 7 Perbandingan Nilai CBR 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 7, didapatkan nilai kadar air optimum sebesar 24,10% dengan berat isi kering maksimum sebesar 1,406 gr/cm³. Nilai tersebut digunakan sebagai standarisasi kepadatan dalam mencetak kolom DSM stabilisasi tersebut.

6. Analisis Daya Dukung (Sebelum Perbaikan)

• Uji Kepadatan Tanah Asli

Dalam penelitian ini digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm³ untuk mencapai kepadatan rencana (γ_d maks) sebesar 1,409 gr/cm³ dalam pemodelan tanah asli. Nilai *trial dan error* pemodelan tanah di dalam *box* didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan Ichvan, dkk. (2015) pada Tabel 8:

Tabel 8 Uji Density pada Tanah Model

No Ring	Kadar air, (w) %	Berat isi tanah (γ_t) gr/cm ³	Berat isi kering (γ_d) gr/cm ³	Rata-rata berat isi tanah gr/cm ³	Rata-rata berat isi kering gr/cm ³
I	27.88	1.656	1.295		
II	27.43	1.6	1.255	1.635	1.279
III	27.95	1.649	1.289		
IV	28.35	1.637	1.275		

Sumber: Ichvan, dkk (2015)

Dan untuk pemodelan kolom DSM stabilisasi 10% kapur, digunakan kadar air 24,10% dan berat isi kering maksimum 1,406 gr/cm³. Pemodelan dibuat dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan. Dalam pemodelan kolom DSM ini, pengisian sampel tanah ke dalam *box* dibagi menjadi 4 layer dengan tinggi setiap lapisnya 5 cm sehingga kepadatan tanah dalam setiap layer menjadi seragam hingga ketinggian total sampel mencapai 20 cm. Setiap lapisan dilakukan penumbukan sebanyak 4 kali putaran dengan jumlah lintasan sebanyak 16 lintasan untuk satu putaran. Penumbukan dilakukan dengan alat penumbuk yang memiliki berat 9,6 kg dengan ukuran permukaan kontak tumbukan 12,5 cm x 12,5 cm dan tinggi jatuh tumbukan 21,5 cm.

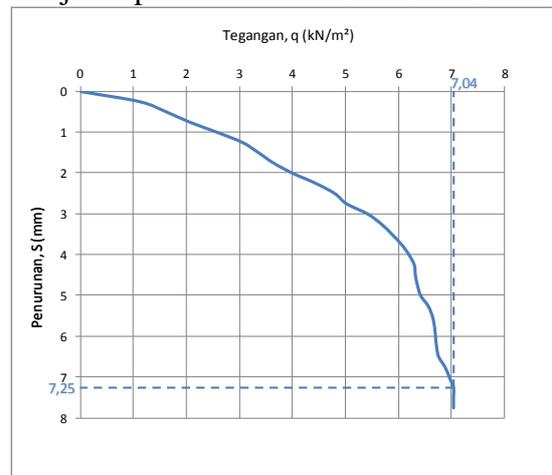
• Uji Pembebanan Tanah Asli

Pengujian benda uji diawali dengan pengujian tanah asli. Yang dimaksud tanah asli dalam penelitian ini adalah tanah lempung ekspansif tanpa stabilisasi DSM. Tanah ekspansif yang diuji memiliki data sebagai berikut:

Berat isi kering tanah (gd) rata-rata	1,28	gr/cm ³
Kadar air tanah rata-rata	10,49	%
Luas pelat beban uji	25	cm ²

Dari data tersebut didapatkan hasil pengujian besar beban maksimum yang dapat ditahan tanah (P_u) sebesar 176 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 7,25 mm.

Dengan menggunakan Rumus 3.1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate (q_u) sebesar 7,04 kg/m². Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 7 berikut ini:



Gambar 7 Grafik Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli

Volume DSM tergantung pada panjang tanah yang diperbaiki namun memiliki kepadatan tanah yang sama yaitu 1,406 gr/cm³. Berikut ini berat tanah yang dibutuhkan sebuah kolom DSM sesuai dengan variasi jarak dan panjang dengan berat isi kering 1,28 gr/cm³:

Tabel 9 Berat Kebutuhan Kolom DSM

Berat	Panjang (Df)	Jarak DSM (L)		
		1D = 4 cm	1,25D = 5 cm	1,5D = 6 cm
Tanah+10% kapur (gr)	2B = 10 cm	177,26 gr	177,26 gr	177,26 gr
	3B = 15 cm	265,89 gr	265,89 gr	265,89 gr
	4B = 20 cm	221,57 gr	221,57 gr	221,57 gr

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Instalasi DSM diawali dengan pembuatan lubang DSM dengan diameter 4 cm dengan panjang dan jarak sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Setelah DSM dipadatkan dengan alat seberat 2,5 kg dan diameter 3 cm maka

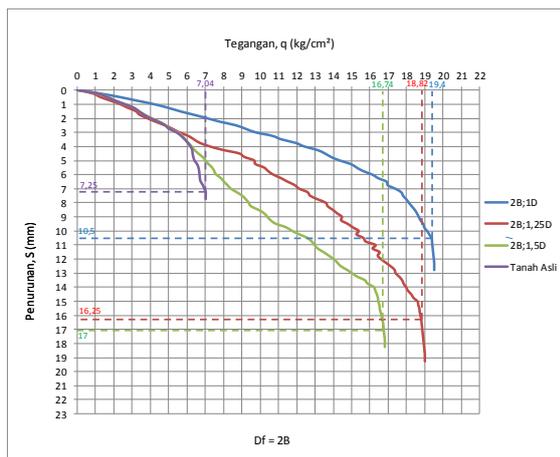
dilanjutkan dengan meratakan permukaan tanah yang masih bergelombang. Setelah benda uji diratakan dilanjutkan dengan proses waktu perawatan selama 3 hari dan dilakukan pembebanan vertikal pada titik tengah dari benda uji menggunakan pelat ukuran $5 \times 5 \text{ cm}^2$ yang ditekan oleh dongkrak hidrolik 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.

Untuk hasil pembebanan dan penurunan berdasarkan variasi jarak DSM dapat dilihat dibawah ini:

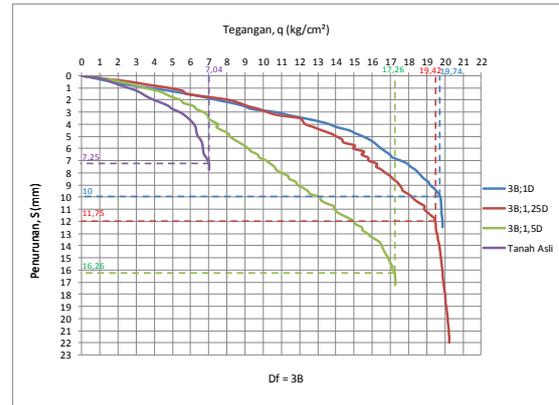
Tabel 10 Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Jarak DSM

No	Panjang DSM (Df)	Jarak antar DSM (L)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)
1		1D = 4 cm	25	10.5	485
2	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm	25	16.25	471
3		1,5D = 6 cm	25	17	419
4	3B = 15 cm	1D = 4 cm	25	10	494
5		1,25D = 5 cm	25	11.75	486
6		1,5D = 6 cm	25	16.25	432
7	4B = 20 cm	1D = 4 cm	25	8.25	519
8		1,25D = 5 cm	25	11.75	518
9		1,5D = 6 cm	25	14	446

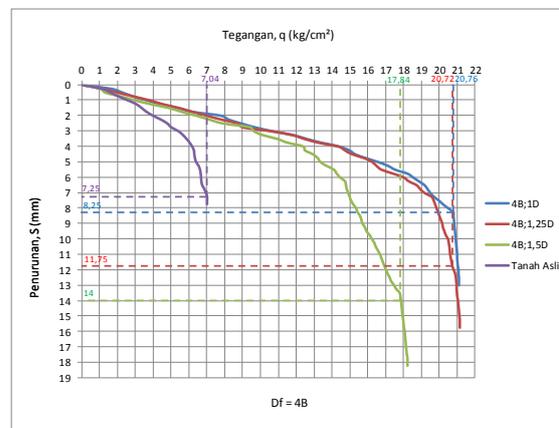
Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 8 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Jarak dengan Panjang 2B= 10 cm



Gambar 9 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Jarak dengan Panjang 3B= 15 cm



Gambar 10 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Jarak dengan Panjang 4B= 20 cm

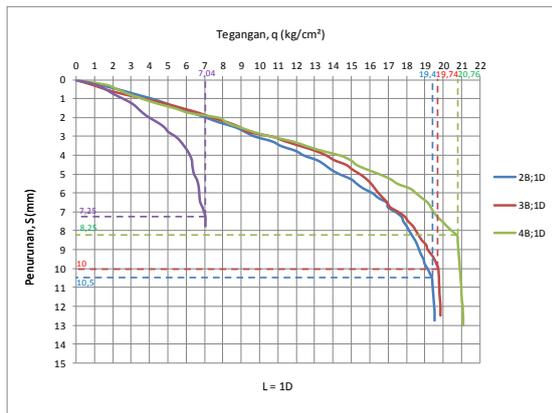
Dari ketiga hasil analisis, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM 1D= 4 cm pada panjang DSM 20 cm yaitu sebesar $20,76 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 8,25 mm. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh.

Sedangkan untuk hasil pembebanan dan penurunan berdasarkan variasi panjang DSM dapat dilihat dibawah ini:

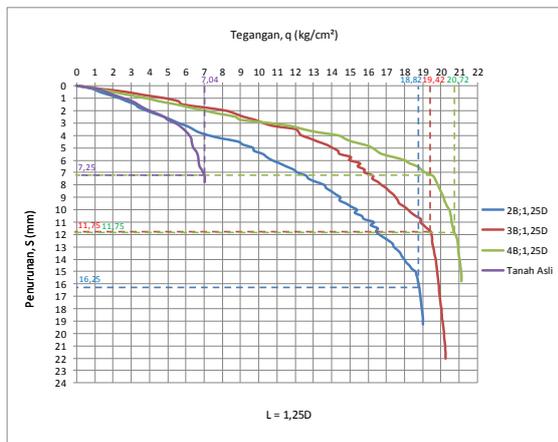
Tabel 10 Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Panjang DSM

No	Jarak antar DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)
1		2 B = 10 cm	25	10.5	485
2	1D = 4 cm	3 B = 15 cm	25	10	493.5
3		4 B = 20 cm	25	8.25	519
4		2 B = 10 cm	25	16.25	470.5
5	1,25D = 5 cm	3 B = 15 cm	25	11.75	485.5
6		4 B = 20 cm	25	11.75	518
7		2 B = 10 cm	25	17	418.5
8	1,5D = 6 cm	3 B = 15 cm	25	16.25	431.5
9		4 B = 20 cm	25	14	446

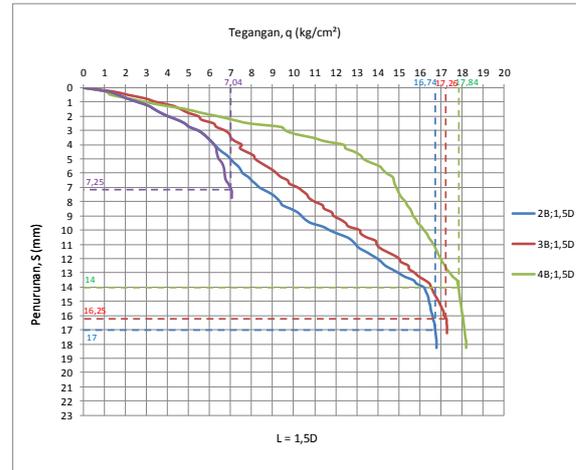
Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 11 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Panjang dengan Jarak DSM 1D = 4 cm



Gambar 12 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Panjang dengan Jarak DSM 1,25D = 5 cm.



Gambar 13 Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan Variasi Panjang dengan Jarak DSM 1,5D = 6 cm

Dari ketiga hasil analisis, daya dukung terbesar terjadi pada panjang 4B atau 20 cm dengan jarak DSM 4 cm yaitu sebesar 20,76 kg/cm² dengan penurunan 8,25 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 DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli.

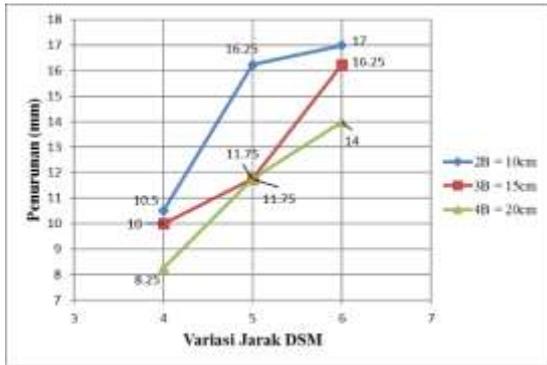
7. Analisis Penurunan Tanah

• Variasi Jarak

Tabel 11 Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom(L)

Jenis Sampel	Panjang DSM		Luas Pondasi (A) cm ²	q _u kg/cm ²	Penurunan mm
	(Df) cm	Jarak antar DSM (L) cm			
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm	25	18,82	16,25
		1,5D = 6 cm	25	16,74	17
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1D = 4 cm	25	19,74	10	
	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm	25	19,42	11,75
		1,5D = 6 cm	25	17,26	16,25
	1D = 4 cm	25	20,76	8,25	
	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm	25	20,72	11,75
		1,5D = 6 cm	25	17,84	14

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



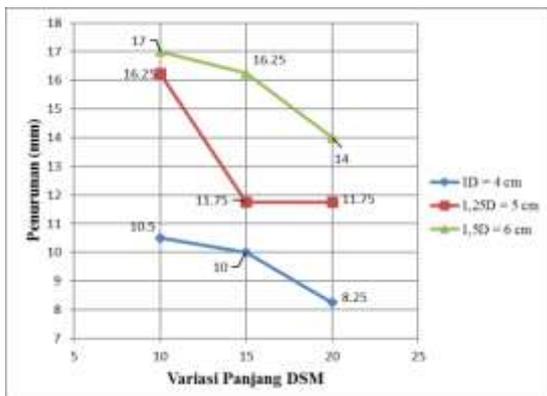
Gambar 14 Grafik Hubungan Penurunan pada $q_{ultimit}$ terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari Tabel 11 dan Gambar 14, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (D_f) $2B = 10$ cm, $3B = 15$ cm dan $4B = 20$ cm besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, dimana besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.

Tabel 12 Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (D_f)

Jenis Sampel	Panjang DSM		Luas Pondasi (A) cm^2	q_u kg/cm^2	Penurunan mm
	Jarak antar DSM (L) cm	(D_f) cm			
Tanah Asli	-	-	25	7.04	7.25
	1D = 4 cm	2B = 10 cm	25	19.4	10.5
		3B = 15 cm	25	19.74	10
		4B = 20 cm	25	20.76	8.25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1.25D = 5 cm	2B = 10 cm	25	18.82	16.25
		3B = 15 cm	25	19.42	11.75
		4B = 20 cm	25	20.72	11.75
	1.5D = 6 cm	2B = 10 cm	25	16.74	17
		3B = 15 cm	25	17.26	16.25
		4B = 20 cm	25	17.84	14

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 15 Grafik Hubungan Penurunan pada $q_{ultimit}$ terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Tabel 12 dan Gambar 15, dapat dilihat bahwa besarnya penurunan (*settlement*) sesuai dengan hipotesa yang ada, dimana besarnya *settlement* akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya panjang kolom. Sedangkan pada jarak antar kolom (L) $1,25D = 5$ cm, besarnya penurunan (*settlement*) tidak mengalami penurunan pada panjang 20 cm sehingga tidak sesuai hipotesa. Hal ini terjadi karena faktor-faktor kesalahan yang terjadi pada saat pengujian pembebanan yang dilakukan secara manual menggunakan *hydraulic pump* juga dapat menyebabkan penetrasi beban tidak konstan (lebih cepat atau lebih lambat), hal ini menyebabkan *settlement* yang terjadi dapat lebih besar atau lebih kecil. Pemotongan kolom saat sebelum pembebanan juga mengurangi kepadatan kolom DSM yang mempengaruhi besar kecilnya *settlement*.

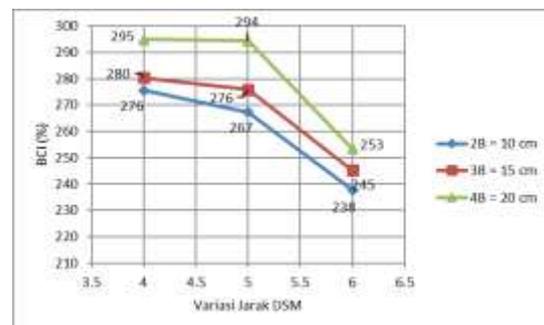
8. Analisis BCI Berdasarkan Daya Dukung Ultimit

• Variasi Jarak

Tabel 13 Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (D_f)	Jarak antar DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)
1	1D = 4 cm	1D = 4 cm	7.04	19.40	276
2	2B = 10 cm	1.25D = 5 cm	7.04	18.82	267
3		1.5D = 6 cm		16.74	238
4	1D = 4 cm	1D = 4 cm	7.04	19.74	280
5	3B = 15 cm	1.25D = 5 cm		19.42	276
6	1.5D = 6 cm	1.5D = 6 cm	7.04	17.26	245
7		1D = 4 cm		20.76	295
8	4B = 20 cm	1.25D = 5 cm	7.04	20.72	294
9		1.5D = 6 cm		17.84	253

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 16 Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

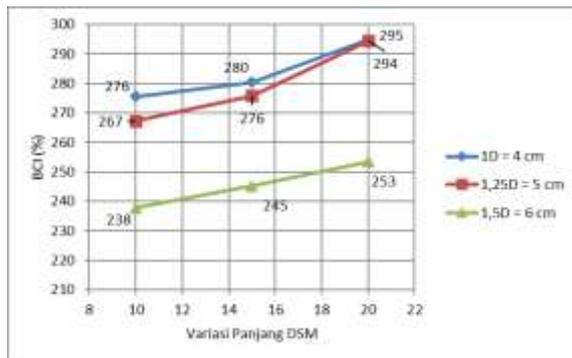
Dari Tabel 13 dan Gambar 16 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai BCI pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan dan jarak DSM maksimum terletak pada jarak DSM 4 cm dengan nilai BCI sebesar 295%.

• **Variasi Panjang**

Tabel 14 Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

No	Jarak antar DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		2B = 10 cm		19,4	276
2	1D = 4 cm	3B = 15 cm	7,04	19,74	280
3		4B = 20 cm		20,76	295
4		2B = 10 cm		18,82	267
5	1,25D = 5 cm	3B = 15 cm	7,04	19,42	276
6		4B = 20 cm		20,72	294
7		2B = 10 cm		16,74	238
8	1,5D = 6 cm	3B = 15 cm	7,04	17,26	245
9		4B = 20 cm		17,84	253

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



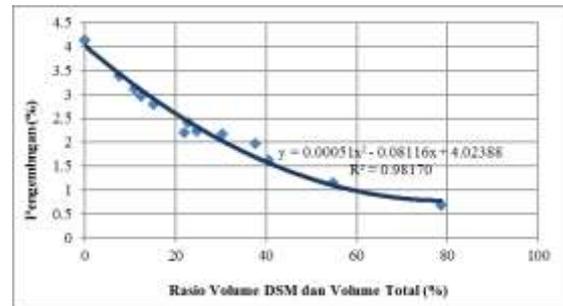
Gambar 17 Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Dari Tabel 14 dan Gambar 17 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai BCI pada tanah ketika DSM semakin panjang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang DSM dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan panjang DSM yang lebih pendek dan panjang DSM maksimum terletak pada panjang DSM 20 cm dengan nilai BCI sebesar 295%.

9. Analisis Pengembangan Tanah

Pada data hasil penelitian yang dilakukan oleh Firdaus, A.M (2016)

mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing*, mengidentifikasi jumlah kolom DSM yang berartiberhubungan 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 18.



Gambar 18Perbandingan Hasil *Swelling* terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total

Sumber: Firdaus (2016)

Dari Gambar 18 dapat 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 15.

Tabel 15 Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi Penelitian DSM

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi %	Swelling %	Penurunan Swelling dari Tanah Asli %
Tanah Asli	-	0	4.133	0
	L = 1D ; Df = 2B	43.76	1.43	2.70
	L = 1,25D ; Df = 2B	25.9	2.26	1.88
Tanah Asli + Kolom	L = 1,5D ; Df = 2B	20	2.60	1.53
	L = 1D ; Df = 3B	65.64	0.85	3.28
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 1,25D ; Df = 3B	38.85	1.62	2.51
	L = 1,5D ; Df = 3B	30	2.04	2.10
	L = 1D ; Df = 4B	87.52	0.75	3.39
	L = 1,25D ; Df = 4B	51.8	1.16	2.97
	L = 1,5D ; Df = 4B	40	1.58	2.56

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), besarnya 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 kedalaman tanah lempung ekspansif pada lokasi penelitian yaitu 1,5 meter sehingga persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk struktur *flexible pavement* sebesar 0,8%.

Sehingga dari Tabel 15 dapat disimpulkan analisa uji pengembangan terhadap pemodelan di laboratorium yang dilakukan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase pengembangan adalah konfigurasi jarak (L) = 4 cm dan kedalaman (D_f) = 20 cm.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan, bahwa:

1. Semakin dekat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah.
2. Jarak dan panjang maksimum DSM terjadi pada DSM jarak terdekat $L = 1D$ (4 cm) dan panjang kolom $D_f = 4B$ (20cm).
3. Persentase stabilisasi tanah dengan bahan *additive* 10% kapur sebesar 87,52% telah mampu menghentikan pengembangan (*swelling*) tanah asli.

Saran

Dari pengujian yang telah dilakukan, masih ada kesalahan-kesalahan yang dilakukan. Sehingga perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Perlu adanya analisis detail mengenai pemadatan dalam *box* sehingga berat isi kering maksimum dalam *box* dapat tercapai berdasarkan uji proktor standar
2. Operator pembebanan vertikal harus membawa *stopwatch*, agar penurunan dari pembacaan beban dapat berjalan

konstan, karena dalam penelitian ini pembebanan dilakukan secara manual.

3. Dalam menggunakan alat harus dalam kondisi yang baik, keakuratan pembacaan alat mempengaruhi hasil pengujian. Sehingga diperlukan kontrol untuk menjaga kondisi alat yang digunakan

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyani, Ninik. 2009. Pengaruh Penambahan Kapur Pada Tanah Lempung Ekspansif Dari Dusun Bodrorejo Klaten. Yogyakarta: Teknik Sipil Fakultas Teknik UKRIM
- Bowles, Joseph E. 1986. *Analisis dan Desain Pondasi*. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, Joseph E. 1991. *Sifat-sifat Fisik dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Bruce, Marry Ellen C. 2013. "Deep Mixing for Embankment and Foundation Support" dalam *Federal Highway Administration Design Manual*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Bruce, Donald A. 2000. Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Application. *Report Document No. FHWA-RD-99-138*. Virginia: U.S. Departement of commerce
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amterdam: Esvier Scientific
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 1999. *Mekanika Tanah 1*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2010. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2011. *Analisis dan Perancangan Fondasi 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Kurniawan, Ichvan Danny. 2015. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang

- Deep Soil Mix (DSM) 15% Fly Ash Diameter 3cm Berpola Panels terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro. *Skripsi* tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Madhyannapu, R. S. & Puppala, A. J. 2014. *Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils*. Journal ASCE. hlm. 3.
- Muntohar, Agus Setyo. 2010. Uji Model Kuat dan Karakteristik Beban-Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom Kapur di Laboratorium. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil Vol. 10/No. 3*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- S. Monintja, Turangan A. E. 2013. Pengaruh Pencampuran Tras dan Kapur pada Lempung Ekspansif terhadap Nilai Daya Dukung. *Jurnal Sipil Statik Volume 1 Nomor 6*. Sulawesi Utara: Universitas Sam Ratulangi.
- Skempton, A. W. 1953. *The Collodial Activity of Clays*. *Journal Vol. 1*, 57-61. London: 3rd International Conference of Soil Mecanics and Foundation Engineering.
- SK SNI S-01-1994-03. 1996. Spesifikasi Kapur Untuk Stabilisasi Tanah. Departemen PU.
- Usman, Angelina. 2014. Studi Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Gambut menggunakan Kombinasi Perkuatan Anyaman Bambu dan Grid Bambu dengan Variasi Lebar dan Jumlah Lapisan Perkuatan. *Jurnal Volume 2 Nomor 3*. Sumatra Selatan: Universitas Sriwijaya.
- Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Volume 14 Nomor 1*. Semarang: Politeknik Negeri.
- Zakaria, Zufialdi. 2006. *Daya Dukung Tanah Fondasi Dangkal*. Bandung: Universitas Padjadjaran.