

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

M. Rizky Hari Saputra¹⁾, Yulvi Zaika²⁾, As'ad Munawir³⁾

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono 167, Malang 65145 – Telp (0341) 580120
E-mail: mrizky.hsaputra@gmail.com¹⁾

ABSTRAK

Tanah lempung yang merupakan tanah kohesif umumnya menjadi permasalahan karena mempunyai sensitifitas yang tinggi terhadap perubahan kadar air. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat – sifat yang kurang baik dalam perencanaan suatu struktur. Sifat – sifat tanah lempung ekspansif yang sensitif terhadap perubahan kadar air, perubahan volume dan potensi susut yang besar serta plastisitas tinggi tersebut yang membahayakan jika suatu struktur dibangun di atasnya.

Salah satu metode yang dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi dalam perbaikan tanah adalah *Deep Soil Mix* (DSM). DSM adalah metode peningkatan kualitas tanah untuk perbaikan tanah dalam dengan bantuan crane yang dilengkapi alat hidrolis dan auger untuk mencampurkan bahan additive pada lokasi tanah yang akan digunakan untuk mendirikan struktur di atasnya.

Hasil pengujian benda uji tanah asli didapatkan nilai beban maksimum sebesar 176 kg dengan penurunan sebesar 7,25 mm serta nilai daya dukung ultimate sebesar 7,04 kg/cm². Hasil dari pengujian tanah dengan stabilisasi DSM 10% kapur, daya dukung terbesar pada variasi jarak antar kolom 1D dan panjang kolom 4B sebesar 18,62 kg/cm² dengan penurunan 10.75 mm. Semakin rapat jarak antar kolom dan panjang DSM semakin besar nilai daya dukung tanah. Berdasarkan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI), daya dukung maksimum terjadi pada DSM jarak terdekat 1D dan panjang kolom 4B dengan meningkatkan daya dukung tanah hingga 264% dari daya dukung tanah asli. Kenaikan rasio volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi swelling dan penurunan swelling paling besar terjadi pada panjang kolom 4B dan jarak antar kolom 1D dengan penurunan swelling dari tanah asli sebesar 3,35%.

Kata Kunci : *deep soil mix, daya dukung, kapur, swelling, tanah lempung ekspansif*

ABSTRACT

Clay soil is cohesive soils generally become a problem because it has a high sensitivity to changes in water content. Expansive clay has properties that are less good in the planning of a structure. Nature of expansive clay that are sensitive to changes in water content, changes in volume and potential large losses as well as high plasticity are harmful if a structure built upon.

One method that can improve the effectiveness and efficiency in soil improvement is *Deep Soil Mix* (DSM). DSM is a method of improving the quality of the soil for soil improvement with the help of a hydraulic crane with tools and auger to mix the additive materials in the location of the land that will be used to establish a structure thereon.

The test results of the test specimen native land values obtained maximum load of 176 kg with a settlement equals 7.25 mm and the value of the ultimate bearing capacity of 7.04 kg / cm². The results of testing the soil with lime stabilization DSM 10%, the largest carrying capacity in the variation of the distance between the columns 1D and 4B column length of 18.62 kg / cm² with settlement equals 10.75 mm. The closer the distance between the column and the length of DSM greater the value of the soil bearing capacity. Based on analysis of *Bearing Capacity Improvement* (BCI), the maximum carrying capacity occurred at DSM closest distance 1D and 4B column length by increasing the bearing capacity of up to 264% of the carrying capacity of the native land. The increase in the ratio of the volume of DSM in the soil can reduce swelling and decrease the potential for the greatest swelling occurred in 4B column length and the distance between the columns 1D with decreased swelling of the native land of 3.35%.

Keywords : *Bearing Capacity, Deep Soil Mix, Expansive Soil, Lime, Swelling*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan dasar dari suatu struktur atau konstruksi bangunan gedung maupun jalan. Struktur yang berada diatas tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah dibawahnya. Sebagai seorang engineer, sangat diperlukan keterampilan untuk mengetahui kondisi tanah sebelum mendirikan suatu struktur diatas tanah. Tanah lempung yang merupakan tanah kohesif umumnya menjadi permasalahan karena mempunyai sensitifitas yang tinggi terhadap perubahan kadar air. Sifat dari tanah kohesif tersebut yang dapat menjadi permasalahan dalam mendirikan suatu bangunan atau jalan.

Tanah lempung ekspansif memiliki sifat – sifat yang kurang baik dalam perencanaan suatu struktur. Sifat – sifat tanah lempung ekspansif yang sensitif terhadap perubahan kadar air, perubahan volume dan potensi susut yang besar serta plastisitas tinggi tersebut yang membahayakan jika suatu struktur dibangun diatasnya. Tanah lempung ekspansif memiliki daya dukung tanah yang rendah pada kondisi muka air yang tinggi dan kemampuan mengembang yang cukup besar mengakibatkan terjadinya penurunan yang tidak dapat dipikul oleh kekokohan struktur diatasnya. Salah satu metode yang dapat meningkatkan efektifitas dan efisiensi dalam perbaikan tanah adalah *Deep Soil Mix* (DSM). DSM adalah metode peningkatan kualitas tanah untuk perbaikan tanah dalam dengan bantuan *crane* yang dilengkapi alat hidrolis dan auger untuk mencampurkan bahan *additive* pada lokasi tanah yang akan digunakan untuk mendirikan struktur diatasnya. Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yaitu, untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang DSM 10% kapur, mengetahui jarak dan panjang optimum, serta mengetahui pengaruh penambahan kapur terhadap nilai *swelling* tanah lempung ekspansif dan besar kadar kapur untuk mendapatkan nilai *swelling* minimum.

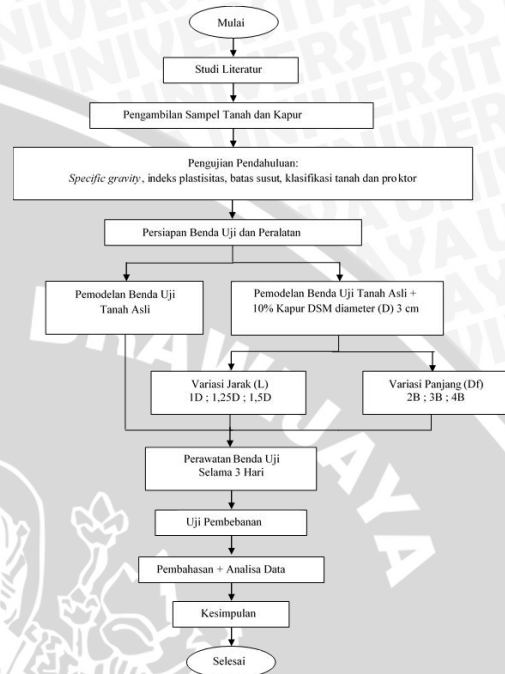
1.2. Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum *Deep Soil Mix* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro.
3. Untuk mengetahui pengaruh penambahan kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif dan besar

kadar kapur untuk mendapatkan nilai *swelling* minimum.

3 METODE PENELITIAN

3.1 Tahap Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir

3.2 Pengujiian Pendahuluan

Pengujiian pendahuluan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemeriksaan *specific gravity*
2. Pemeriksaan batas cair, batas plasis indeks plastisitas tanah
3. Pemeriksaan batas susut
4. Pengujiian klasifikasi tanah metode USCS
5. Pengujiian proktor standar

Pengujiian *specific gravity*, Indeks plastisitas, batas susut dan klasifikasi tanah digunakan untuk memastikan kondisi tanah merupakan tanahjenis lempng ekspansif. Setelah jenis tanah diketahui, penelitian dilanjutkan dengan pengujiian proktor standar.

Tujuan dari pengujiian 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 pengujiian proktor standar didapatkan

3.3 Persiapan Benda Uji

Pada penelitian ini digunakan variasi jarak *Deep Soil Mix* yang terdiri dari 1D ; 1,25D ; dan 1,5D dimana D adalah diameter kolom yaitu 4 cm serta variasi panjang 2B ; 3B ; dan 4B dimana B adalah lebar pelat beban yaitu 5 cm. Berikut ditabelkan

variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) dengan diameter 4 cm pola panels.

Tabel 1. Variasi Jarak dan Panjang DSM

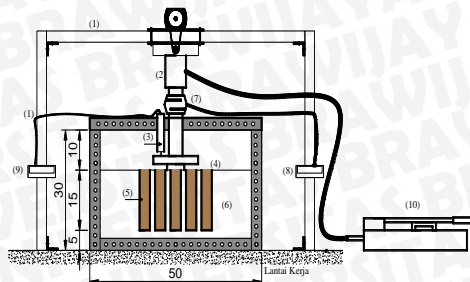
		Jarak Antar Kolom (L), Kedalaman Tanah (H) = 20 cm		
		L = 1 D	L = 1.25 D	L = 1.5 D
Pengaruh Panjang Kolom (DF), Lebar Pelat (B) = 5 cm	Konfigurasi Pola Panel			
	DF = 2B			
	DF = 3B			
	DF = 4B			

3.4 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. Hasil akhir dari uji pembebanan akan diperoleh kurva Beban-penurunan tanah sehingga didapatkan daya dukung tanah ekspansif.



Gambar 2. Skema Uji Pembebanan

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 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 2).

Tabel 2. Pembacaan Load Cell dan Dial LVDT

Pembacaan LVDT	Interval	Luas Pelat	Penurunan	Pembacaan Beban	Tegangan
	Δ	A	$S = \Delta \times 0,005$	P	$q = P/A$
		m ²	mm	kg	kN/m ²
	0				
	50				
	100				
	150				
	200				
	250				
	300				

3.5 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 Mix* (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 dan tabel 4.

Tabel 3. Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak DSM (cm)	Panjang DSM (cm)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (kg)	Daya Dukung (kN/m ²)		
Tanah Asli	-	-	-	-	-		
						1D = 4 cm	2B = 10 cm
						3B = 15 cm	4B = 20 cm
Tanah + 10% Kapur	1,25D = 5 cm	2B = 10 cm	1D = 4 cm				
		3B = 15 cm	1,25D = 5 cm				
	1,5D = 6 cm	2B = 10 cm	1,5D = 6 cm				
		3B = 15 cm	4B = 20 cm				

Tabel 4. Daya Dukung dengan Variasi Panjang DSM

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

Tabel 5. Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM

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

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

$$BCI = \frac{qu \text{ tanah dengan DSM}}{qu \text{ tanah asli}} \times 100\%$$

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

Tabel 6. Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk variasi jarak

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

9 1,5D= 6 cm

Tabel 7. Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk variasi panjang

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

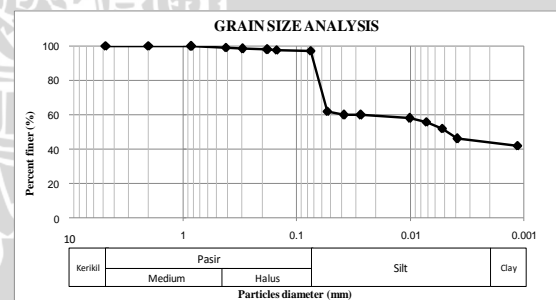
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan dilakukan untuk menentukan sifat dan jenis tanah yang akan digunakan sebagai benda uji. Pengujian pendahuluan terdiri dari uji klasifikasi tanah, *specific gravity*, uji Indeks plastisitas, uji batas susut dan uji proktor standar.

a. Klasifikasi Tanah

Untuk mengetahui klasifikasi tanah pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer. Analisis saringan (*mechanical grain size*) bertujuan untuk menentukan butiran kasar dan halus yang tertahan pada saringan no. 200 sedangkan analisis hidrometer digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran tanah yang lolos saringan no. 200 atau berada di pan. Hasil analisis yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 3 berikut ini:



Gambar 3. Analisis saringan dan Hidrometer

b. *Specific Gravity*

Specific gravity (*G_s*) atau berat spesifik adalah perbandingan kerapatan suatu benda yang dibandingkan dengan kerapan benda yang digunakan sebagai acuan. Dari hasil pemeriksaan ini didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan adalah 2,556.

c. *Atterberg Limit*

Pengujian batas-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. Berikut adalah hasil dari pengujian batas-batas atterberg.

Tabel 8. Hasil pemeriksaan batas-batas atterberg

LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
79.11	31.30	13.79	47.81

Dari hasil tersebut nantinya akan dimasukkan ke dalam suatu gambar yang bertujuan untuk menggolongkan jenis tanah tersebut berdasarkan kriteria-kriteria tertentu.

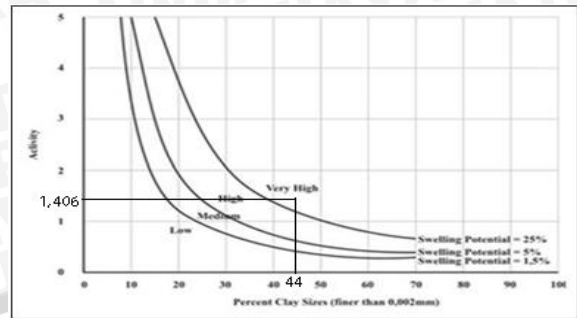
Hasil pemeriksaan batas-batas *Attreberg* didapatkan nilai batas cair (*liquid limit*) 79,11%, batas plastis (*plastic limit*) 31,30%, batas susut (*Shrinkage limit*) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%. Berdasarkan klasifikasi tanah USCS dan *specific gravity* (Gs), tanah lempung di Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH).

d. Kriteria Lempung Ekspansif

Dari hasil pengujian batas-batas atterberg, untuk menentukan parameter tanah lempung ekspansif diantaranya adalah berdasarkan prosentase PI yang disajikan pada tabel 9.

Tabel 9. Identifikasi tanah lempung ekspansif

Metode Klasifikasi			
1	Chen, 1967	Hubungan PI dengan Tingkat Pengembangan	
		PI (%)	Tingkat Pengembangan
		0 - 15	Rendah
		10 - 35	Sedang
		20 - 55	Tinggi
		> 35	Sangat Tinggi
	Nilai sampel uji	47,81%	
	Kesimpulan	Potensi mengembang sangat tinggi	
2	Activity Method (A)	Skempton 1953	
		A = PI/(C - 10)	A < 0.75 Tidak Aktif
			0.75 < A < 1.25 Normal
			A > 1.25 Aktif
	Nilai sampel uji	PI = 47,81% C = 44%	
	Kesimpulan	A = 1.406, tanah tersebut termasuk aktif.	



Gambar 4. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

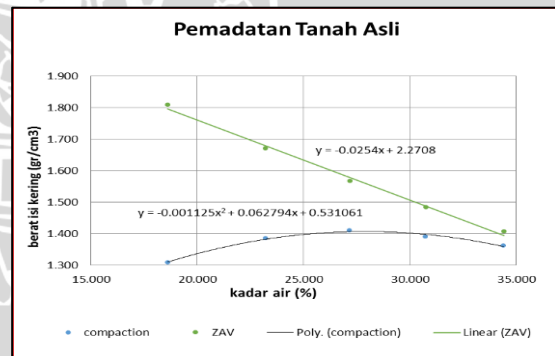
Dari tabel 9 terlihat bahwa sampel tanah asli yang diambil dari daerah Kec. Ngasem Kab. Bojonegoro, Jawa Timur tersebut termasuk ke dalam tanah lempung ekspansif aktif dengan potensi mengembang yang sangat tinggi.

e. Pemadatan Tanah Asli

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 4 berikut ini:



Gambar 4. Grafik hasil pemadatan tanah asli

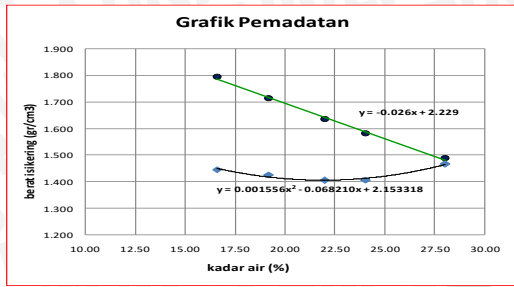
Dari hasil uji pemadatan standar didapatkan nilai kadar air optimum (OMC) sebesar 27,9% dan berat isi kering maksimum (γ_d maks) sebesar 1,407 gr/cm³. Data tersebut akan digunakan untuk pembuatan benda uji dalam *box*.

f. Pemadatan Tanah Stabilisasi 10% Kapur

Data pemadatan tanah yang dicampur 10% kapur diperoleh dari penelitian yang digunakan sebagai bahan stabilisasi DSM. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan berat isi kering maksimum tanah dengan stabilisasi 10% kapur (γ_d maks)



sebesar 1,41 gr/cm³ dengan kadar air optimum (OMC) adalah 24,1%.



Gambar 5. Grafik hasil pemadatan tanah stabilisasi 10% kapur

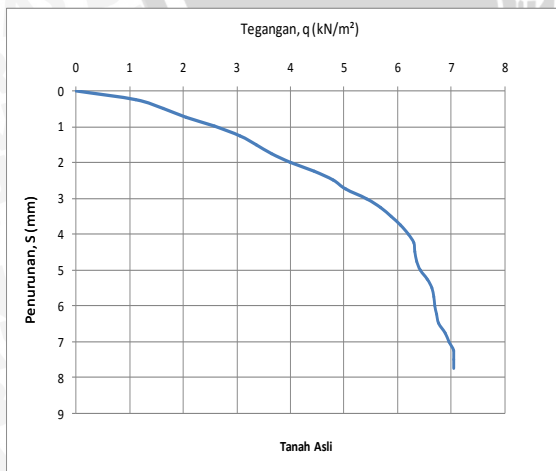
Tabel 10. Rekapitulasi Nilai CBR Tanah Stabilisasi

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

4.2 Hasil Uji Pembebanan

a. Uji Tanah Asli

Uji pembebanan tanah asli yang telah dilakukan menghasilkan data penurunan dari pembacaan digital LVDT dan beban dari pembacaan digital *Load Cell*. Setelah data dianalisis didapatkan nilai daya dukung tanah. Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai beban maksimum (P_u) sebesar 176 kg dengan penurunan sebesar 7,25 mm. Dengan menggunakan rumus 3-1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate (q_u) sebesar 7,04 kg/cm². Nilai Beban persatuan luas dan penurunan tanah asli disajikan pada gambar 6 berikut ini:



Gambar 6. Grafik hubungan tegangan dan penurunan tanah asli

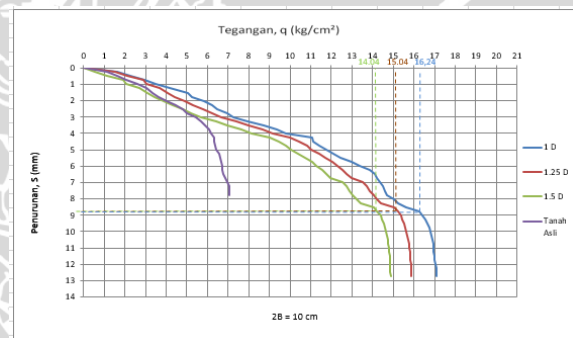
b. Uji Tanah Stabilisasi DSM 10% Kapur

1. Variasi Jarak antar Kolom DSM

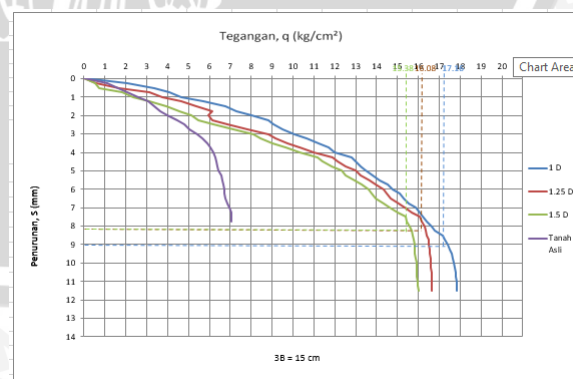
Pada pengujian benda uji sampel ditinjau dari 2 variabel yaitu dari variasi jarak antar kolom DSM dan panjang kolom DSM. Hasil pengujian variasi jarak antar kolom DSM terhadap nilai daya dukung tanah dengan panjang kolom DSM (D_f) ditunjukkan pada tabel 11 dan gambar 7 – 9.

Tabel 11. Variasi Jarak Antar Kolom (L) dengan Panjang Kolom (D_f) Terhadap Daya Dukung Tanah

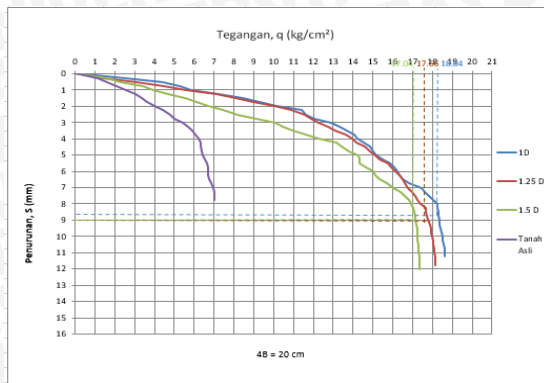
N o	Panjang DSM (D _f)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm ²)
1	1D=4cm	25	12,25	427	17,08	
2	2B=10cm	1,25D=5cm	25	12,5	397	15,88
3	1,5D=6cm	25	12,75	372	14,88	
4	1D=4cm	25	11	445,5	17,82	
5	3B=15cm	1,25D=5cm	25	11,5	416,5	16,66
6	1,5D=6cm	25	11,75	400,5	16,02	
7	1D=4cm	25	10,75	465,5	18,62	
8	4B=20cm	1,25D=5cm	25	12,25	453	18,12
9	1,5D=6cm	25	12,5	434	17,36	



Gambar 7. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) 2B = 10 cm



Gambar 8. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) 3B = 15 cm



Gambar 9. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $4B = 20$ cm

Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $2B = 10$ cm memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli (tanah tanpa stabilisasi). Pada gambar 7 juga dapat dilihat perbedaan dari variasi jarak antar kolom yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Pada jarak kolom DSM $1D = 4$ cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $16,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi $8,75$ mm diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $15,04 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan yang terjadi $8,75$ mm. Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 4,5$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $14,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $8,75$ mm.

Gambar 9 menunjukkan tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $3B = 15$ cm memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli dengan variasi jarak antar kolom yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Pada jarak kolom DSM $1D = 4$ cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $17,16 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi $7,5$ mm diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $16,08 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan $7,5$ mm. Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 4,5$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $15,38 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $8,5$ mm.

Pada gambar 9 tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $4B = 20$ cm juga memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli pada variasi jarak antar kolom yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Pada jarak kolom DSM $1D = 4$ cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $18,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi $7,75$ mm diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $17,66 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan $8,25$ mm. Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 4,5$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $17,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $8,25$ mm.

Dari ketiga gambar diatas dapat dilihat tanah yang distabilisasi dengan DSM pada panjang $2B, 3B,$ dan $4B$ dengan variasi jarak kolom diatas memiliki nilai daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli. Dari gambar juga terlihat pengaruh dari variasi jarak antar kolom pada panjang kolom tertentu terhadap nilai daya dukung tanah. Semakin

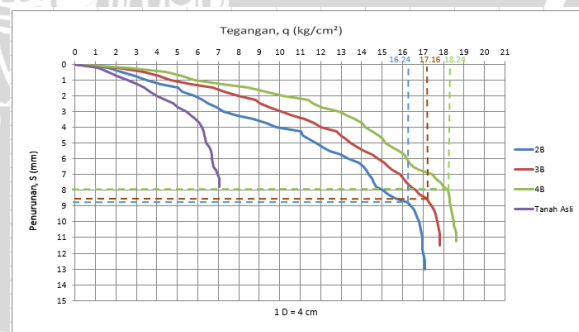
rapat jarak antar kolom, semakin besar pula nilai daya dukung tanah. Hal ini disebabkan karena jumlah kolom yang masuk dalam daerah perbaikan $9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ lebih banyak pada jarak kolom yang rapat dibandingkan jarak antar kolom yang renggang. Kolom yang tersebar merata dengan jarak antar kolom yang rapat di luasan area perbaikan menghasilkan daya dukung di luasan area tersebut memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah asli.

2. Variasi Panjang Kolom DSM

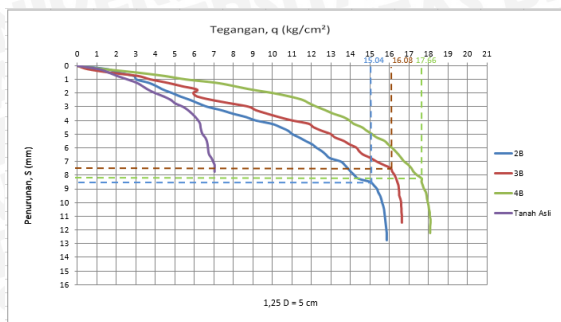
Hasil pengujian variasi panjang kolom DSM terhadap nilai daya dukung tanah dengan jarak antar kolom DSM (L) ditunjukkan pada tabel 12 dan Gambar 10-12.

Tabel 12. Variasi Panjang Kolom dengan Jarak Kolom (L) Terhadap Daya Dukung

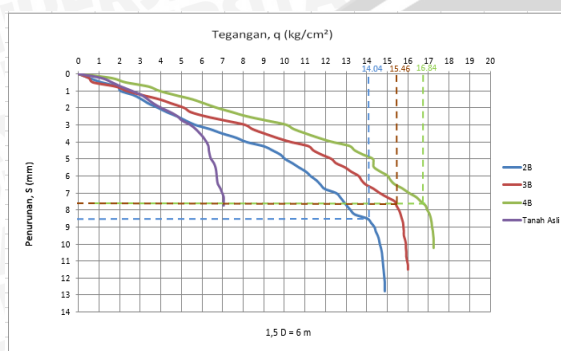
No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (D_f)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (S) (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1	$1D = 4$ cm	$2B = 10$ cm	25	12.25	427	17.08
2		$3B = 15$ cm	25	11	445.5	17.82
3		$4B = 20$ cm	25	10.75	465.5	18.62
4	$1,25D = 5$ cm	$2B = 10$ cm	25	12.5	397	15.88
5		$3B = 15$ cm	25	11.5	416.5	16.66
6		$4B = 20$ cm	25	12.25	453	18.12
7	$1,5D = 6$ cm	$2B = 10$ cm	25	12.75	372	14.88
8		$3B = 15$ cm	25	11.75	400.5	16.02
9		$4B = 20$ cm	25	12.5	434	17.36



Gambar 10. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (D_f) dengan jarak antar kolom (L) $1D = 4$ cm



Gambar 11. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (D_f) dengan jarak antar kolom (L) $1.25 D = 5$ cm



Gambar 12. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (D_f) dengan jarak antar kolom (L) $1.5 D = 6$ cm

Gambar 10 menunjukkan grafik hasil uji pembebanan pada jarak antar kolom $1D = 4$ cm dengan variasi panjang kolom 2B, 3B, dan 4B. Pada gambar 10 tanah yang distabilisasi DSM dengan jarak antar kolom $1D = 4$ cm menunjukkan peningkatan daya dukung dibandingkan dengan tanah asli (tanah tanpa stabilisasi). Terdapat 3 variasi panjang kolom DSM yaitu 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Pada panjang kolom DSM 4B = 20 cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $18,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi 8 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar $17,16 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan yang terjadi 8,5 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $16,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 8,75 mm.

Gambar 11 menunjukkan tanah yang distabilisasi DSM dengan jarak $1,25D = 5$ cm mengalami peningkatan daya dukung dari tanah asli dengan variasi panjang kolom DSM yaitu 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Pada panjang kolom DSM 4B = 20 cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $17,66 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi 8,25 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar $16,08 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan yang terjadi 7,5 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $15,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 8,5 mm.

Pada gambar 12 tanah yang distabilisasi DSM dengan jarak antar kolom $1,5D = 6$ cm juga memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli dengan variasi panjang kolom yaitu 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Pada panjang kolom DSM 4B = 20 cm memiliki daya dukung terbesar yaitu $16,84 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi 7,75 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar $15,46 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan yang terjadi 7,75 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $14,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 8,5 mm.

Dari ketiga gambar diatas dapat dilihat tanah yang distabilisasi dengan DSM pada jarak kolom 1D, 1,25D, dan 1,5D dengan variasi panjang kolom mengalami peningkatan nilai daya dukung yang dari tanah asli. Dari gambar 10 terlihat pengaruh dari variasi panjang kolom pada jarak kolom tertentu terhadap nilai daya dukung tanah. Semakin dalam panjang kolom, semakin besar pula nilai daya dukung tanah. Hal ini disebabkan karena volume tanah stabilisasi pada kolom DSM lebih besar. Volume tanah stabilisasi yang besar seperti pada panjang kolom DSM 4B = 20 cm dalam area perbaikan $9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ mengakibatkan tanah stabilisasi menahan seluruh beban dari atas dibandingkan dengan panjang kolom DSM 2B dan 3B yang sebagian ditahan oleh tanah asli. Hal ini dapat dilihat dari nilai daya dukung tanah pada panjang DSM 4B yang lebih besar dari panjang DSM 3B dan 2B pada gambar diatas.

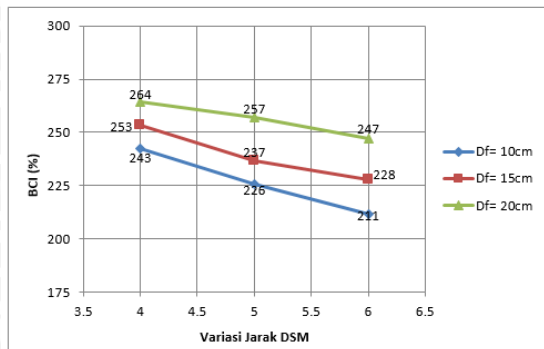
4.3. Analisis Bearing Capacity Improvement (BCI)

a. Variasi Jarak Antar Kolom DSM

Analisis BCI menggunakan rumus 3-2. untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi panjang DSM (D_f). Panjang DSM yang digunakan adalah 2B= 10 cm; 3B= 15 cm; dan 4B= 20 cm, serta B adalah lebar pelat bebabn yaitu 5cm. Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 13 dan Gambar 13.

Tabel 13. Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (D_f)

No	Panjang DSM (D_f)	Jarak DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BC I (%)
1	ID =4cm	2B=10cm	7,04	17,08	243
2		3B=15cm		17,82	253
3		4B=20cm		18,62	264
4	1,25D =5cm	2B=10cm	7,04	15,88	226
5		3B=15cm		16,66	237
6		4B=20cm		18,1	257
7	1,5D =6cm	2B=10cm	7,04	14,88	211
8		3B=15cm		16,02	228
9		4B=20cm		17,38	247



Gambar 13. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

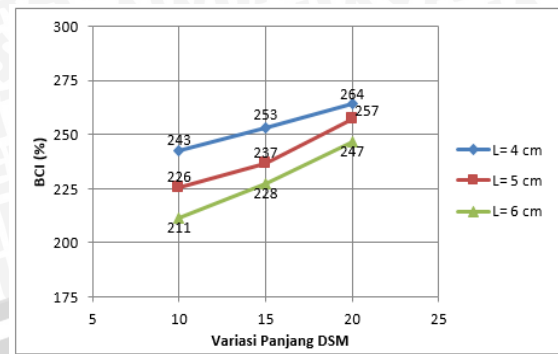
Dari tabel 12 dan gambar 13 terlihat variasi jarak antar kolom DSM mempengaruhi peningkatan daya dukung tanah. Peningkatan daya dukung terbesar terjadi pada jarak kolom DSM yang rapat dan panjang kolom DSM yang besar. Pada jarak DSM yang semakin rapat terjadi peningkatan seperti yang tampak pada panjang DSM 4B. Pada jarak 4 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 164% dari tanah asli dan pada variasi jarak 5 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 157% dari tanah asli. Sedangkan peningkatan yang paling rendah pada panjang DSM 4B terjadi pada jarak kolom DSM 6 cm dengan peningkatan daya dukung sebesar 147%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin rapat dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dibanding dengan jarak DSM yang renggang dan jarak antar kolom DSM maksimum terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada jarak DSM 4 cm, dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 164% dari tanah asli.

b. Variasi Panjang Kolom DSM

Analisis BCI menggunakan rumus 3-2. untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi panjang DSM (Df). Panjang DSM yang digunakan adalah 2B= 10 cm; 3B= 15 cm; dan 4B= 20 cm, B lebar pelat uji yaitu 5cm. Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 14 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada gambar 14.

Tabel 14. Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (Df)

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BC I (%)
1	ID =4cm	2B=10cm	7,04	17,08	243
2		3B=15cm		17,82	253
3		4B=20cm		18,62	264
4	1,25D =5cm	2B=10cm		15,88	226
5		3B=15cm		16,66	237
6		4B=20cm		18,1	257
7	1,5D =6cm	2B=10cm		14,88	211
8		3B=15cm		16,02	228
9		4B=20cm		17,38	247



Gambar 14. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

Dari tabel 13 dan gambar 14 terlihat variasi panjang kolom DSM mempengaruhi peningkatan daya dukung tanah. Peningkatan daya dukung terbesar terjadi pada panjang kolom DSM yang besar. Hal ini dikarenakan volume tanah terstabilisasi pada kolom lebih besar sehingga tanah stabilisasi pada kolom seluruhnya menahan beban. Pada panjang kolom DSM yang semakin besar terjadi peningkatan seperti yang tampak pada jarak antar kolom DSM 1D. Pada panjang 20 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 164% dari tanah asli dan pada variasi panjang 15 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 153% dari tanah asli. Sedangkan peningkatan yang paling rendah terjadi pada panjang kolom DSM 10 cm dengan peningkatan daya dukung sebesar 143%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, panjang kolom DSM yang semakin besar dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dan jarak DSM maksimum terhadap peningkatan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada panjang DSM 20 cm, dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 164% dari tanah asli.

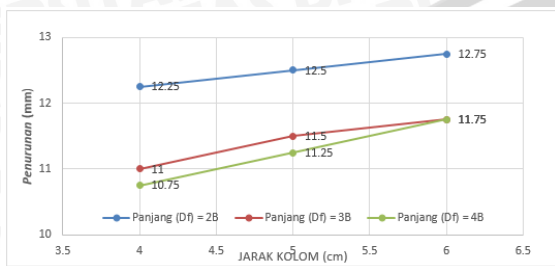
4.4. Analisis Penurunan Tanah

a. Variasi Jarak Antar Kolom DSM

Besarnya penurunan (*settlement*) pada masing-masing variasi ditinjau pada saat terjadi tegangan *ultimate* (qu). Berikut analisis penurunan terhadap variasi jarak antar kolom (L) pada panjang kolom (Df) yang dapat dilihat pada tabel 15 dan gambar 15.

Tabel 15. Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondas i (A)	qu	Penurunan
	cm	cm	cm ²	kg/cm ²	Mm
Tanah Asli	-	-	25	7.04	7.25
	2B = 10cm	1D= 4 cm	25	17.08	12.25
		1,25D= 5 cm	25	15.88	12.5
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	3B = 15cm	1,5D= 6 cm	25	14.88	12.75
		1D= 4 cm	25	17.82	11
		1,25D= 5 cm	25	16.66	11.5
	4B = 20cm	1,5D= 6 cm	25	16.02	11.75
		1D= 4 cm	25	18.62	10.75
		1,25D= 5 cm	25	18.12	11.25
		1,5D= 6 cm	25	17.36	11.75



Gambar 15. Grafik Hubungan Penurunan pada qu terhadap Variasi Jarak antar Kolom

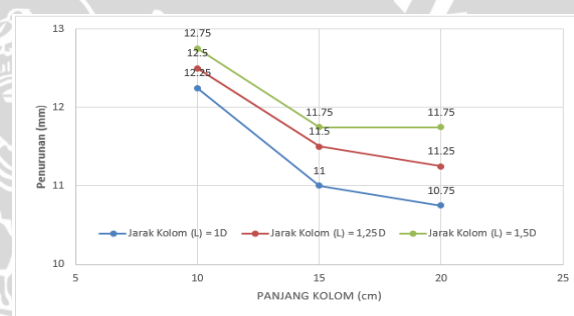
Dari tabel 15 dan gambar 15, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df) 2B= 10, 3B= 15 cm, dan 4B=20 semakin renggang jarak antar kolom DSM, penurunan (*settlement*) yang terjadi semakin kecil. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal dimana semakin renggang jarak antar kolom maka semakin besar penurunan yang terjadi. Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa pada penurunan yang sama, nilai qu untuk jarak antar kolom 1D lebih besar dibandingkan jarak yang lain. Sedangkan untuk penurunan yang sama, nilai qu untuk jarak antar kolom 1,5D lebih kecil diantara ketiga variasi. gambar 7 menunjukkan semakin renggang jarak antar kolom DSM, semakin kecil nilai qu yang ditahan oleh tanah. Namun pada gambar 7 benda uji terlihat tidak terlalu kaku dengan penambahan volume tanah stabilisasi. Hal ini kurang sesuai dengan hipotesa dimana semakin besar volume tanah stabilisasi benda uji semakin kaku. Perbedaan hasil ini dimungkinkan karena berbagai faktor seperti tidak konstannya penggunaan *hydraulic pump* saat uji pembebanan yang menyebabkan penetrasi beban tidak konstan. Selain itu, kurang padatnya tanah stabilisasi pada saat instalasi kolom serta kurangnya kadar kapur akibat pencampuran yang tidak sempurna juga menyebabkan *settlement* yang terjadi dapat lebih besar.

b. Variasi Panjang Kolom DSM

Hasil analisis penurunan terhadap variasi panjang kolom (Df) pada jarak antar kolom (L) yang dapat dilihat pada Tabel 16 dan gambar 16.

Tabel 16. Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (Df)

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (Df)	Luas Pondas i (A)	qu	Penurunan	
	cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 5 cm	-	25	7.04	7.25	
		2B = 10cm	25	17.08	12.25	
		3B = 15cm	25	17.82	11	
	1,5D = 6 cm	4B = 20cm	25	18.62	10.75	
		2B = 10cm	25	15.88	12.5	
		3B = 15cm	25	16.66	11.5	
	1D = 4 cm	4B = 20cm	25	18.12	11.25	
		2B = 10cm	25	14.88	12.75	
		3B = 15cm	25	16.02	11.75	
			4B = 20cm	25	17.36	11.75



Gambar 16. Grafik Hubungan Penurunan pada qu terhadap Variasi Panjang Kolom

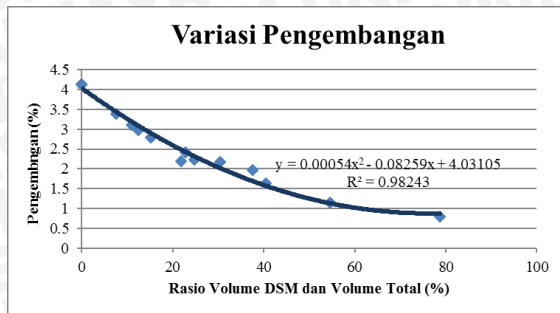
Dari tabel 16 dan gambar 16, dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) 1D, 1,25D dan 1,5D semakin besar panjang kolom maka besarnya penurunan (*settlement*) akan semakin kecil. Hal ini diperkuat pada gambar 10 dimana semakin besar panjang kolom maka *settlement* menjadi lebih kecil. Namun pada gambar 11 terlihat penurunan pada panjang 4B lebih besar dari 3B. Hal ini terjadi karena faktor-faktor kesalahan seperti tidak konstannya penggunaan *hydraulic pump* saat uji pembebanan yang menyebabkan penetrasi beban tidak konstan, kurang padatnya tanah stabilisasi saat instalasi kolom, dan kurang teliti saat pencampuran kapur untuk tanah stabilisasi sehingga kadar kapur untuk tanah stabilisasi berkurang. Hal tersebut dapat menyebabkan *settlement* yang terjadi menjadi lebih besar.

4.5 Analisis Swelling

Hasil analisis pengembangan (*swelling*) mengidentifikasi jumlah kolom dan ukuran kolom DSM yang diinstalasi berhubungan dengan volume



tanah stabilisasi akan mempengaruhi nilai pengembangan tanah lempung ekspansif Bojonegoro. Berikut adalah grafik variasi pengembangan dari hasil penelitian Adelina (2016).



Gambar 17. Perbandingan hasil *swelling* terhadap rasio volume *deep soil mix* dan volume total
 Sumber : Hasil Penelitian Adelina (2016)

Dari gambar 17 dapat dilihat bahwa semakin besar rasio volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*). Hal ini disebabkan karena kepadatan pada tanah dengan volume DSM lebih besar memiliki kepadatan yang tinggi dan volume kadar kapur juga lebih tinggi sehingga dapat mengurangi potensi pengembangan. Dari grafik perbandingan hasil *swelling* terhadap rasio volume DSM dan volume total, didapatkan persamaan yang nantinya digunakan untuk menghitung prosentase stabilisasi dari kolom DSM. Hasil analisis prosentase potensi *swelling* tersebut disajikan pada tabel 17.

Tabel 17. Potensi pengembangan (*Swelling*) berdasarkan prosentase stabilisasi kolom *deep soil mix* (DSM)

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi	Swelling	Penurunan Swelling
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4.13	0
	L = 4 ; Df = 10 cm	39.27	1.62	2.51
	L = 5 ; Df = 10 cm	31.42	1.97	2.16
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 6 ; Df = 10 cm	26.18	2.24	1.89
	L = 4 ; Df = 15 cm	58.90	1.04	3.09
	L = 5 ; Df = 15 cm	47.12	1.34	2.79
	L = 6 ; Df = 15 cm	39.27	1.62	2.51
	L = 4 ; Df = 20 cm	78.54	0.78	3.35
	L = 5 ; Df = 20 cm	62.83	0.97	3.16
	L = 6 ; Df = 20 cm	52.36	1.19	2.95

Dari tabel 17 dapat dilihat prosentase penurunan swelling terkecil yaitu pada variabel jarak kolom 6 cm dan panjang kolom 10 cm sebesar 1,89% dengan prosentase stabilisasi 26,18%. Sedangkan prosentase penurunan swelling terbesar yaitu pada variabel jarak kolom 4 cm dan panjang kolom 20 cm sebesar 3,35% dengan prosentase stabilisasi 78,54%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rapat jarak antar kolom DSM serta semakin panjang kolom DSM akan meningkatkan prosentase stabilisasi sehingga menaikkan nilai prosentase penurunan *swelling*.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin rapat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah.
2. Jarak dan panjang kolom DSM dengan daya dukung maksimum terjadi pada DSM jarak terdekat L = 1D (4 cm) dan panjang kolom Df = 4B (20 cm) dengan nilai BCI 264%.
3. Kenaikan rasio 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 3,35%.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat banyak kekurangan yang perlu diminimalisir dengan dilakukan beberapa upaya diantaranya:

1. Pada saat pencampuran, tempat pencampuran kapur diusahakan kering karena akan mengurangi kadar kapur untuk tanah stabilisasi jika tempat pencampuran basah yang menyebabkan kapur menempel di tempat pencampuran.
2. Pada saat pemadatan benda uji dalam box, perlu diperhatikan kepadatan dari benda uji maupun saat instalasi kolom baik dalam hal jumlah tumbukan maupun kontrol ketinggian. Benda uji yang terlalu padat atau kurang padat dapat mempengaruhi hasil penelitian
3. Pada saat uji pembebanan sebaiknya penggunaan *hydraulic pump* pada saat penambahan beban lebih konstan. Sedangkan untuk operator pembaca *load cell* dapat menggunakan bantuan kamera saat pembebanan karena perubahan beban yang terjadi di awal pembebanan sangat signifikan.
4. Peneliti dapat lebih akurat dalam pembacaan alat karena sangat mempengaruhi hasil dari pengujian serta perlu dilakukan pengecekan terhadap kondisi alat yang digunakan
5. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai pola keruntuhan tanah pada benda uji box yang telah distabilisasi DSM.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyani, Ninik,dkk.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. 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- 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
- Bruce, Marry Ellen C., dkk. 2013. "Deep Mixing for Embankment and Foundation Support" dalam *Federal Highway Administration Design Manual*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amterdam: Esevier Scientific
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 1992. *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.
- Hartosukma, Endang Widorowati. 2005. Perilaku Tanah Lempung Ekspansif Karangawen Demak Akibat Penambahan Semen dan Fly Ash sebagai Stabilizing Agents. *Tesis Terpublikasi Program Pasca Sarjana*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kitazume, Masaki dan Masaki Terashi. 2013. *The Deep Mixing Method*. London: CRC Press.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on the Transition Zone and the Boundary Layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Msc Thesis Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm.
- Kumor, Maciej Kordian. Selected Geotechnical Problems of Ekspansive Clays in the Area of Poland. *Jurnal*. Faculty Civil and Environmental Engineering University of Technology an Life Sciences in Bydgoszcz.
- Kurniawan, Ichvan Danny, dkk. 2015. "Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang *Deep Soil Mix* (DSM) 15% Fly Ash Diameter 3 cm Berpola *Panels* Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro".Malang:Universitas Brawijaya
- Malekpoor. 2014. *Behavior of Compacted Lime-soil Column*. *International Journal of Engineering*. University of Kerman Iran.
- Munawir, As'ad. 2014. *Buku Ajar Perbaikan Tanah*. Hand Out: Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- 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.
- Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil *Swelling* Tanah *Sub Grade* dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. Semarang: Politeknik Negeri Semarang