

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

Frangky¹⁾, Yulvi Zaika²⁾, Suroso³⁾

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya
Jl. Mayjen Haryono 167, Malang 65145 – Telp (0341) 580120
E-mail: frangky944@gmail.com¹⁾

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Semakin bertambah kadar air yang terkandung didalam tanah dapat menyebabkan tanah mengembang sehingga menurunkan daya dukung pada tanah. begitu pula sebaliknya, semakin berkurang kadar air didalam tanah menyebabkan tanah menyusut sehingga meningkatkan daya dukung tanah tersebut.

Metode Deep Soil Mixing merupakan upaya perbaikan tanah dalam yang dilakukan dengan cara mencampurkan bahan additive pada tanah untuk meningkatkan stabilitas tanah. Jenis additive yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapur, hal ini dikarenakan penambahan kapur pada tanah ekspansif mampu meningkatkan daya dukung tanah. Dalam penelitian ini digunakan 9 variasi jarak dan kedalaman kolom antara lain variasi jarak antar kolom $L = (4, 5 \text{ dan } 6 \text{ cm})$ dan variasi kedalaman kolom $D_f = (10, 15 \text{ dan } 20 \text{ cm})$.

Hasil dari stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan metode deep soil mixing berpola single square dengan diameter kolom 4 cm menunjukan daya dukung terbesar pada variasi jarak antar kolom 1D dan panjang kolom 4B sebesar $19,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan sebesar 9,25 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 peningkatan daya dukung tanah hingga 273% dari daya dukung tanah asli. Stabilisasi dengan bahan additive 10% kapur pada metode DSM berpola single square dapat mengurangi nilai pengembangan (Swelling) seiring dengan meningkatkan volume tanah yang distabilisasi. Nilai pengembangan (Swelling) minimum yaitu 0,7955% dengan peningkatan rasio volume tanah yang di stabilisasi sebesar 78,54% dari tanah asli.

Kata kunci: tanah lempung ekspansif, kapur, *deep soil mixing*, jarak dan panjang, daya dukung, *swelling*.

ABSTRACT

Expansive Soil is the type of very sensitivity soil to changes in water content. The increasing of water content in soil can cause the soil become swollen and decrease bearing capacity of the soil. In reverse, the decreasing of water content in soil can cause the the soil become shrinked and increase the bearing capacity of the soil.

. Deep Soil Mixing method is a deep soil improvemet which is conducted by mixing the additive material into the soil that improving the quality of the soil. Kind of additives used in this research is lime, this is due to the addition of lime into on expansive soil can improve soil bearing capacity. This research amount 9 variation of distance and length of column, among the others variation in the distance between the column $L = (4, 5, \text{ and } 6 \text{ cm})$ and the column length variation $D_f = (10, 15, \text{ and } 20 \text{ cm})$.

The test result of the stabilization of expansive clay using Deep Soil Mixing with single square pattern and 4 cm diameter shows the largest bearing capacity in the variation of the distance between the columns 1D and 4B column length of $19,24 \text{ kg / cm}^2$ with settlement 9,25 mm. The closer of distance between the column and the higher value of length of DSM can increase the value of the soil bearing capacity. Based on analysis of Bearing Capacity Improvement (BCI), the maximum bearing capacity occurred at DSM closest distance 1D and 4B longest column length by increasing the bearing capacity of up to 273% of the bearing capacity of the original soil. Stabilization of the additive material 10% lime on DSM with single square pattern can reduce development value (Swelling) in line with the increasing of ratio volume of soil stabilized. The minimum value of Swelling is 0,7955% by the increasing of volume ratio of stabilization soil is 78,54% of original soil.

Keywords: expansive soil, lime, deep soil mixing, distance and length, bearing capacity, swelling.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Semakin bertambah kadar air yang terkandung didalam tanah dapat menyebabkan tanah mengembang sehingga menurunkan daya dukung pada tanah. begitu pula sebaliknya, semakin berkurang kadar air didalam tanah menyebabkan tanah menyusut sehingga meningkatkan daya dukung tanah tersebut. Sifat kembang susut pada tanah ekspansif dapat dilihat dengan kasat mata yaitu ketika musim kering/kemarau, permukaan tanah mengalami retak-retak poligonal yang tak beraturan dan retakan tersebut menyebabkan rongga yang cukup dalam dan sebaliknya apabila pada musim penghujan tanah menjadi mengembang dan sangat kohesif. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat tanah yang kurang baik seperti plastisitas yang tinggi, kemampatan atau perubahan volume yang tinggi, kekuatan geser yang rendah dan potensi kembang susut yang besar.

Oleh karena itu, untuk mengatasi permasalahan pada tanah lempung ekspansif dapat dilakukan beberapa cara contohnya untuk memperbaiki sifat kembang susut tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan metode stabilitas tanah mekanik dan kimiawi. Dalam penelitian ini menggunakan stabilitas kimiawi yaitu dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah yang fungsinya untuk mengurangi sifat buruk pada tanah sehingga meningkatkan daya dukung pada tanah. Ada beberapa bahan *additive* yang biasa digunakan dalam metode stabilitas tanah, diantaranya semen, kapur, abu batubara (*fly ash*), abu sekam padi, slag baja dan lain-lain. Pada penelitian kali ini penulis menggunakan kapur sebagai bahan *additive* pada tanah lempung ekspansif.

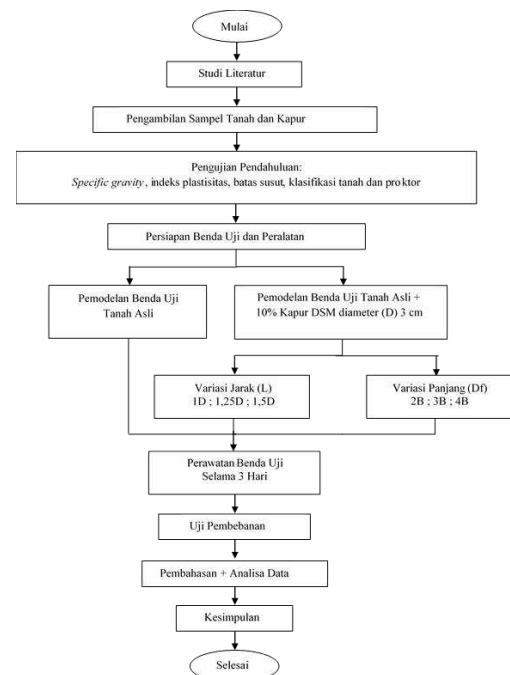
Deep Soil Mix (DSM) merupakan upaya perbaikan tanah dalam yang dilakukan dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada kualitas tanah yang ingin diperbaiki dengan panjang yang diinginkan menggunakan bantuan *crane* dilengkapi alat hidrolik dan auger. Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yaitu, untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang DSM 10% kapur, mengetahui jarak dan panjang maksimum, 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 *single square* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui variasi jarak dan panjang kolom yang memiliki nilai daya dukung maksimum (q_u) pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro dengan kadar campuran kapur 10%.
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 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 plasis indeks plastisitas tanah (ASTM 1984 D 4318-84);
3. Pemeriksaan batas susut (ASTM D 427-04);

- Pengujian klasifikasi tanah metode USCS (ASTM 1992 D 2487-92);
- 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

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 *single square*.

Tabel 1. Variasi Jarak dan Panjang DSM

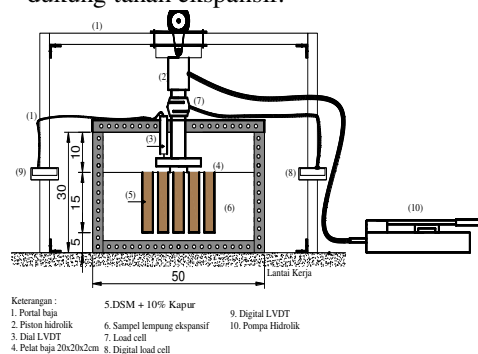
Jarak Antar Kolom (L); Diameter Tanah (D) = 4 cm			
	L = D	L = 1,25D	L = 1,5D
Konfigurasi Pola Single Square			
Panjang Kolom (Df); Lebar Plat (B) = 5 cm	Variasi 1 	Variasi 2 	Variasi 3
	Variasi 4 	Variasi 5 	Variasi 6
	Variasi 7 	Variasi 8 	Variasi 9

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 (lihat Gambar 2). 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:

- Menyiapkan model benda uji.
- Meletakkan pelat baja di tengah pada permukaan benda uji.
- Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan serta dial *LVDT* seperti pada Gambar 2.
- Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolik.
- 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.
- 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 – 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	-	-			
Tanah + 10% Kapur	1D = 4 cm	2B = 10 cm			
		3B = 15 cm			
		4B = 20 cm			
	1,25D = 5 cm	2B = 10 cm			
		3B = 15 cm			
		4B = 20 cm			
	1,5D = 6 cm	2B = 10 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		1,5D = 6 cm			
7	4B = 20 cm	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		4B = 20 cm			

7	1,5D = 6 cm	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		1,5D = 6 cm			
7	4B = 20 cm	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		4B = 20 cm			
7	1,5D = 6 cm	2B = 10 cm			
8		3B = 15 cm			
9		4B = 20 cm			

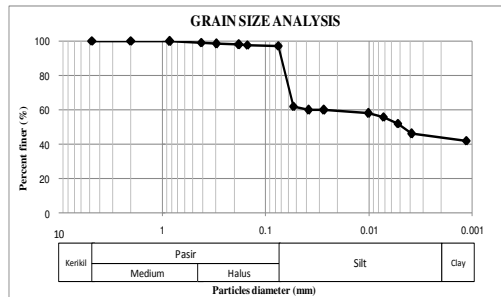
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

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 (Gs) atau berat spesifik adalah perbandingan kerapatan suatu benda yang dibandingkan dengan kerapatan 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. Pengujian batas susut digunakan untuk mengetahui kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu prosentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. 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.

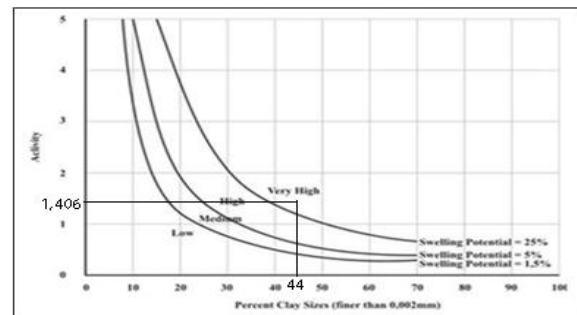
Hasil pemeriksaan batas-batas *Attreberg* didapatkan nilai batas cair (*liquid limit*) 79,11%, batas plastis (*plastic limit*) 31,30%, batas susut (*Shrinkage limit*) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%. Berdasarkan klasifikasi tanah sistem *Unified* (USCS) dan kriteria *specific gravity* (Gs), tanah lempung dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten 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

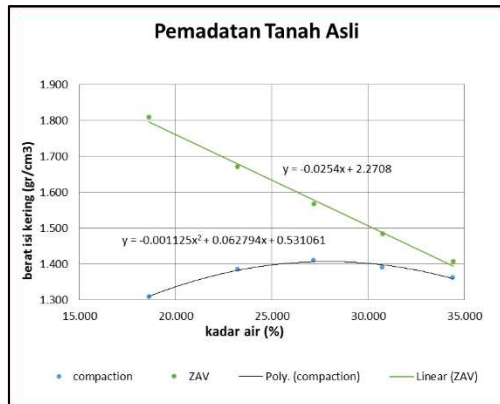
Dari Tabel 9 terlihat bahwa sampel tanah asli yang diambil dari daerah Kec. Ngasem Kab. Bojonegoro, Jawa Timur tersebut termasuk ke dalam tanah lempung ekspansif aktif dengan potensi mengembang yang sangat tinggi.

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 5 berikut ini:

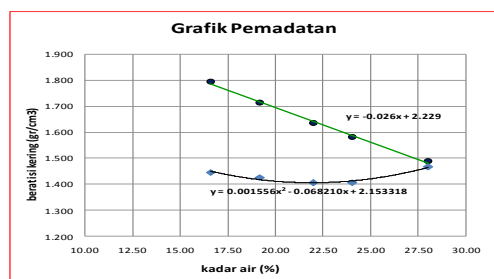


Gambar 5. Grafik hasil pemadatan tanah asli

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 6. Grafik hasil pemadatan tanah stabilisasi 10% kapur

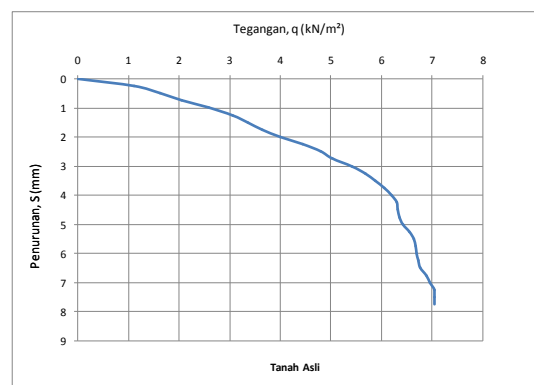
Tabel 10. Rekapitulasi Nilai CBR Tanah Stabilisasi

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 7 berikut ini:



Gambar 7. Grafik hubungan tegangan dan penurunan tanah asli

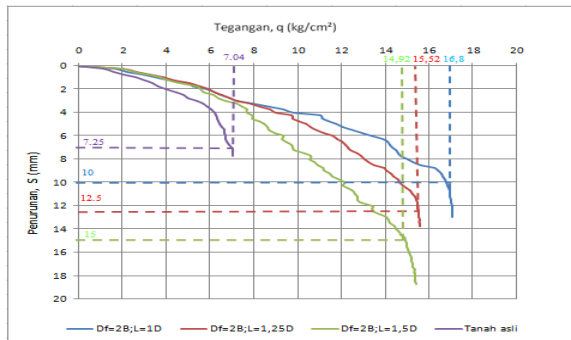
b. Uji Tanah Stabilisasi DSM 10% Kapur

1. Variasi Jarak antar Kolom DSM

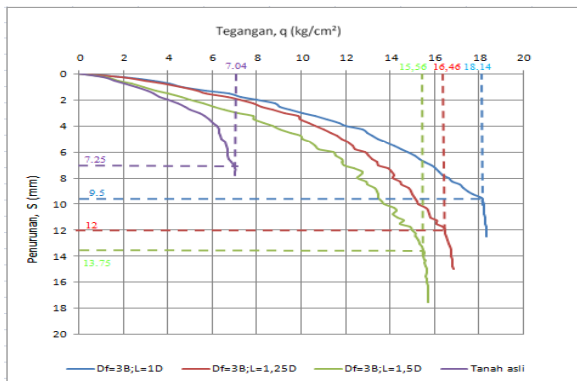
Pada pengujian benda uji sampel ditinjau dari 2 variabel yaitu dari variasi jarak antar kolom DSM dan panjang kolom DSM. Hasil pengujian variasi jarak antar kolom DSM terhadap nilai daya dukung tanah dengan panjang kolom DSM (D_f) ditunjukkan pada Tabel 11 dan Gambar 8 – 9.

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

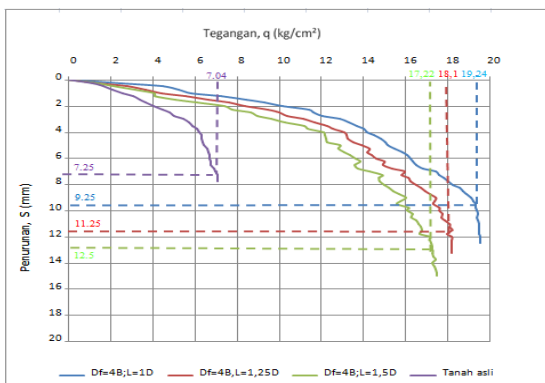
Jenis Sampel	Panjang Kolom (D_f) cm	Jarak Kolom (L) cm	Luas Pondasi (A) cm ²	q_u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7.04	7.25
Tanah Asli + Kolom	2B = 10cm	1D = 4cm	25	16.8	10
		1,25D = 5cm	25	15.52	12.5
	3B = 15cm	1,5D = 6cm	25	14.92	15
		1D = 4cm	25	18.14	9.5
DSM 10% Kapur	4B = 20cm	1,25D = 5cm	25	16.46	12
		1,5D = 6cm	25	15.56	13.75
	1D = 4cm	1D = 4cm	25	19.24	9.25
		1,25D = 5cm	25	18.1	11.25
		1,5D = 6cm	25	17.22	12.5



Gambar 8. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $2B = 10$ cm



Gambar 9. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $3B = 15$ cm



Gambar 10. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $4B = 20$ cm

Pada Gambar 8 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 8 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 $16,8 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi 10 mm diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $15,52 \text{ kg/cm}^2$

dan penurunan yang terjadi $12,5 \text{ mm}$. Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 6$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $14,92 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 15 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 $19,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi $9,5 \text{ mm}$ diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $18,1 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan 12 mm . Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 6$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $15,56 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $13,75 \text{ mm}$.

Pada Gambar 10 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 $19,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan yang terjadi $9,25 \text{ mm}$ diikuti dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm dengan nilai daya dukung sebesar $18,1 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan $11,25 \text{ mm}$. Sedangkan untuk jarak DSM $1,5D = 6$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu $17,22 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $12,5 \text{ mm}$.

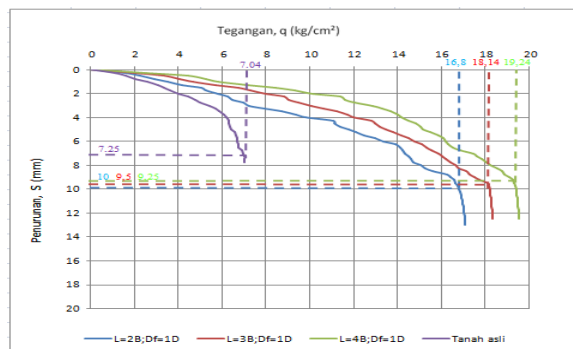
Dari ketiga gambar diatas dapat dilihat tanah yang distabilisasi dengan DSM pada panjang $2B$, $3B$, dan $4B$ dengan variasi jarak kolom diatas memiliki nilai daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli. Dari gambar 8, 9, dan 10 juga terlihat pengaruh dari variasi jarak antar kolom pada panjang kolom 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 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 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

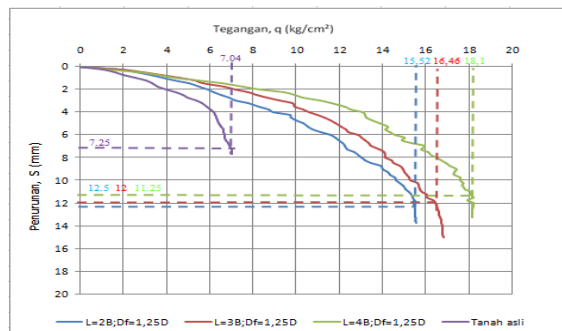
Hasil pengujian variasi panjang kolom DSM terhadap nilai daya dukung tanah dengan jarak antar kolom DSM (L) ditunjukkan pada Tabel 12 dan Gambar 4.9 – 4.12.

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

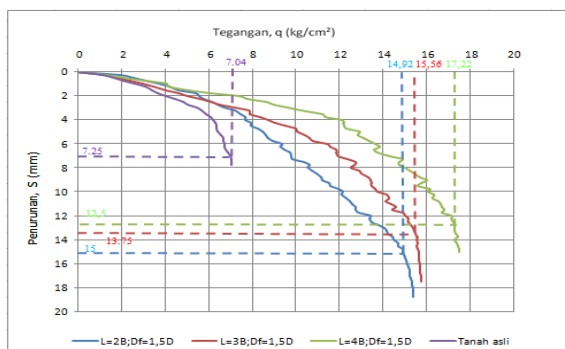
Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	Luas Pondasi (A) cm ²	q _u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1D = 4cm	2B = 10cm	25	16.8	10
		3B = 15cm	25	18.14	9.5
		4B = 20cm	25	19.24	9.25
	1,25D = 5cm	2B = 10cm	25	15.52	12.5
		3B = 15cm	25	16.46	12
		4B = 20cm	25	18.1	11.25
	1,5D = 6cm	2B = 10cm	25	14.92	15
		3B = 15cm	25	15.56	13.75
		4B = 20cm	25	17.22	12.5



Gambar 11. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (Df) dengan jarak antar kolom (L) 1 D = 4 cm



Gambar 12. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (Df) dengan jarak antar kolom (L) 1.25 D = 5 cm



Gambar 13. Grafik hubungan daya dukung terhadap penurunan tanah pada variasi panjang kolom (Df) dengan jarak antar kolom (L) 1.5 D = 6 cm

Gambar 11-13 menunjukkan grafik hasil uji pembebanan pada jarak antar kolom 1D = 4 cm dengan variasi panjang kolom 2B, 3B, dan 4B. Pada gambar 11 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 19,24 kg/cm² dengan penurunan yang terjadi 9,25 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar 18,14 kg/cm² dan penurunan yang terjadi 9,5 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 16,8 kg/cm² dengan penurunan 10 mm.

Gambar 12 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 18,1 kg/cm² dengan penurunan yang terjadi 11,25 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar 16,46 kg/cm² dan penurunan yang terjadi 12 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 15,52 kg/cm² dengan penurunan 12,5 mm.

Pada Gambar 13 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 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Pada panjang kolom DSM 4B = 20 cm memiliki daya dukung terbesar yaitu 17,22 kg/cm² dengan penurunan yang terjadi 12,5 mm diikuti dengan panjang DSM 3B = 15 cm dengan nilai daya dukung sebesar 15,56 kg/cm² dan penurunan yang terjadi 13,75 mm. Sedangkan untuk panjang DSM 2B = 10 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 14,92 kg/cm² dengan penurunan 15 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 11, 12 dan 13 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 10 cm x 10 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.

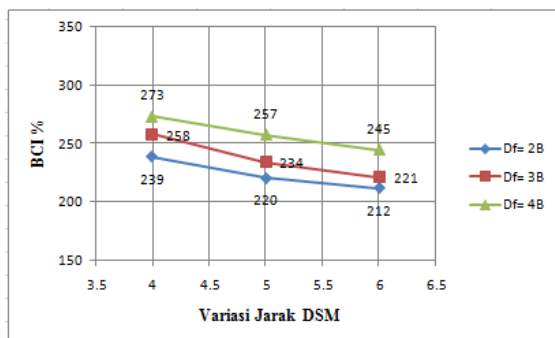
4.3. Analisis *Bearing Capacity Improvement*(BCI)

a. Variasi Jarak Antar Kolom DSM

Analisis BCI menggunakan rumus 3-2. untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi panjang DSM (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 4.9 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada Gambar 14.

Tabel 13. 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)	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)
1		1 D = 4 cm		16.8	239	139
2	2 B = 10 cm	1,25 D = 5 cm	7.04	15.52	220	120
3		1,5 D = 6 cm		14.92	212	112
4		1 D = 4 cm		18.14	258	158
5	3 B = 15 cm	1,25 D = 5 cm	7.04	16.46	234	134
6		1,5 D = 6 cm		15.56	221	121
7		1 D = 4 cm		19.24	273	173
8	4 B = 20 cm	1,25 D = 5 cm	7.04	18.1	257	157
9		1,5 D = 6 cm		17.22	245	145



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

Dari tabel 13 dan gambar 14 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 173% 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 145%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin rapat dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dibanding dengan jarak DSM yang renggang dan jarak DSM maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada jarak DSM 4 cm, dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 173% 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 15.

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)	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)
1		2 B = 10 cm		16.8	239	139
2	1 D = 4 cm	3 B = 15 cm	7.04	18.14	258	158
3		4 B = 20 cm		19.24	273	173
4		2 B = 10 cm		15.52	220	120
5	1,25 D = 5 cm	3 B = 15 cm	7.04	16.46	234	134
6		4 B = 20 cm		18.1	257	157
7		2 B = 10 cm		14.92	212	112
8	1,5 D = 6 cm	3 B = 15 cm	7.04	15.56	221	121
9		4 B = 20 cm		17.22	245	145

Gambar 15. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

Dari tabel 14 dan Gambar 15 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 173% dari tanah asli dan pada variasi panjang 15 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 158% dari tanah asli. Sedangkan peningkatan yang paling rendah terjadi pada panjang kolom DSM 10 cm dengan peningkatan daya dukung sebesar 139%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, panjang kolom DSM yang semakin besar dapat

meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dan jarak DSM maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada panjang DSM 20 cm, dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 173% dari tanah asli.

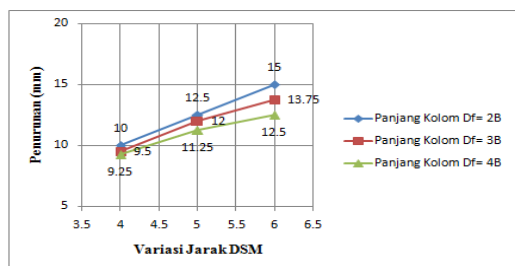
4.4. Analisis Penurunan Tanah

a. Variasi Jarak Antar Kolom DSM

Besarnya penurunan (*settlement*) pada masing-masing variasi ditinjau pada saat terjadi tegangan *ultimate* (q_u). Berikut analisis penurunan terhadap variasi jarak antar kolom (L) pada panjang kolom (Df) yang dapat dilihat pada Tabel 15 dan Gambar 16.

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

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df) cm	Jarak Kolom (L) cm	Luas Pondasi (A) cm ²	q_u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	2B = 10cm	1D = 4cm	25	16.8	10
		1,25D = 5cm	25	15.52	12.5
		1,5D = 6cm	25	14.92	15
	3B = 15cm	1D = 4cm	25	18.14	9.5
		1,25D = 5cm	25	16.46	12
		1,5D = 6cm	25	15.56	13.75
Kapur	4B = 20cm	1D = 4cm	25	19.24	9.25
		1,25D = 5cm	25	18.1	11.25
		1,5D = 6cm	25	17.22	12.5



Gambar 16. Grafik Hubungan Penurunan pada q_u terhadap Variasi Jarak antar Kolom

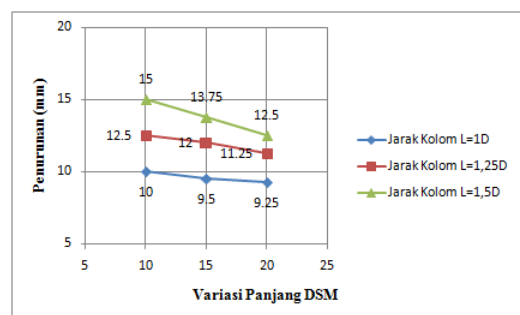
Dari Tabel 15 dan Gambar 16, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df) 2B= 10, 3B= 15 cm, dan 4B=20 semakin renggang jarak antar kolom DSM, penurunan (*settlement*) yang terjadi semakin besar. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal dimana semakin renggang jarak antar kolom maka semakin besar penurunan yang terjadi. Gambar 16 menunjukkan semakin renggang jarak antar kolom DSM, semakin kecil nilai q_u yang ditahan oleh tanah.

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 17.

Tabel 16. Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom(Df)

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	Luas Pondasi (A) cm ²	q_u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1D = 4cm	2B = 10cm	25	16.8	10
		3B = 15cm	25	18.14	9.5
		4B = 20cm	25	19.24	9.25
	1,25D = 5cm	2B = 10cm	25	15.52	12.5
		3B = 15cm	25	16.46	12
		4B = 20cm	25	18.1	11.25
Kapur	1,5D = 6cm	2B = 10cm	25	14.92	15
		3B = 15cm	25	15.56	13.75
		4B = 20cm	25	17.22	12.5

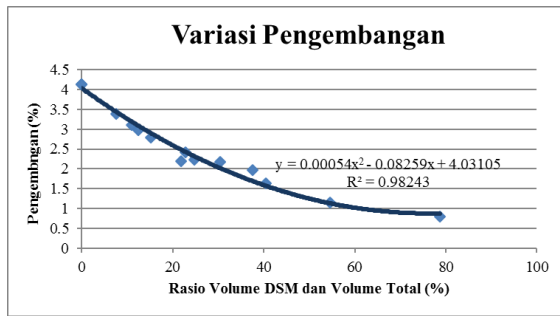


Gambar 17. Grafik Hubungan Penurunan pada q_u terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Tabel 16 dan Gambar 17, 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 17 dimana semakin besar panjang kolom maka *settlement* menjadi lebih kecil.

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. Pada penelitian kali ini, digunakan variasi ukuran kolom yakni 25 mm, 30 mm, dan 38 mm. Data hasil penelitian mengenai pengaruh pengembangan terhadap prosentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Tabel 17.



Gambar 18. Perbandingan hasil *swelling* terhadap rasio volume *deep soil mix* dan volume total

Sumber : Hasil Penelitian Adelina (2016)

Dari Gambar 18 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 persentase stabilisasi kolom *deep soil mix* (DSM)

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi %	<i>Swelling</i> %	Penurunan <i>Swelling</i> %
Tanah Asli	-	0	4.13	0
Tanah Asli + Kolom	L = 4 ; Df = 10 cm	39.27	1.6232	2.51
	L = 5 ; Df = 10 cm	25.13	2.3063	1.83
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 6 ; Df = 10 cm	17.45	2.7627	1.37
	L = 4 ; Df = 15 cm	58.90	1.0128	3.12
	L = 5 ; Df = 15 cm	37.70	1.6890	2.44
	L = 6 ; Df = 15 cm	26.18	2.2487	1.88
	L = 4 ; Df = 20 cm	78.54	0.7955	3.34
	L = 5 ; Df = 20 cm	50.27	1.2329	2.90
	L = 6 ; Df = 20 cm	34.91	1.8123	2.32

Dari tabel 17 dapat dilihat persentase nilai *swelling* terbesar yaitu pada variabel jarak kolom 6 cm dan panjang kolom 10 cm sebesar 2,7627 % dengan persentase stabilisasi 17,45 %. Sedangkan persentase nilai *swelling* terkecil yaitu pada variabel jarak kolom 4 cm dan panjang kolom 20 cm sebesar 0,7955% dengan persentase stabilisasi 78,54%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rapat jarak antar kolom DSM serta semakin panjang kolom DSM akan meningkatkan persentase stabilisasi sehingga menurunkan nilai *swelling* yang ada.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *single square* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro dapat ditarik beberapa 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 yang memberi peningkatan nilai daya dukung (q_u) paling maksimum yaitu jarak antar kolom terkecil 4 cm dan kedalaman kolom terbesar 20 cm. Daya dukung paling maksimum tersebut sebesar 19,24 kg/cm² atau meningkat 173% dari tanah sebelum distabilisasi.
3. Persentase *swelling* tanah dapat turun secara signifikan seiring dengan bertambahnya persentase stabilisasi. Tanah yang distabilisasi kolom DSM dengan panjang 20 cm dan jarak antar kolom 4 cm memiliki nilai *swelling* minimum yaitu 0,7955% dengan persentase stabilisasi sebesar 78,54%.

5.2 Saran

Dari 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 digunakan alat pengaduk khusus dalam pencampuran bahan stabilisasi sehingga pencampuran dapat distandarisasi guna menghindari ketidakseragaman dalam perlakuan dan untuk mendapatkan hasil campuran yang lebih homogen.
2. Perlu dilakukan variasi lama waktu pemeraman (*curing*) benda uji pada jarak dan kedalaman kolom DSM yang sama, sehingga dapat diketahui waktu yang optimum bagi tanah untuk dapat bereaksi dengan kapur.
3. Perlu dilakukan variasi kadar air dan kepadatan tanah dasar pada jarak dan kedalaman kolom DSM yang sama, sehingga pengaruh perulangan siklus basah-kering terhadap nilai daya dukung kolom stabilisasi dapat diketahui.
4. Perilaku *swelling* tanah lempung ekspansif sangat tergantung pada kondisi kadar air awal dan density, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait perilaku *swelling* dengan kondisi kadar air awal dan density yang lainnya.
5. Box benda uji hendaknya bisa dibongkar kembali guna untuk meninjau pola keruntuhan yang terjadi pada benda uji tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM, (1992), *Annual Book of ASTM Standards*, section 4, volume 04.08. USA: Eastern MD.
- ASTM, D4318 (1992), Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soil, *Annual Book of ASTM Standards*, section 4, Volume 04.08. USA: Eastern MD.
- Bowles, Joseph E. 1986. *Analisis dan Desain Pondasi*. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, Joseph E. 1991. *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. 2013. "Deep Mixing for Embankment and Foundation Support" dalam *Federal Highway Administration Design Manual*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Casagrande, A., 1948, *Classification and Identification of Soils*, Trans. ASCE, vol. 113, pp. 901-930.
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amsterdam: Eisevier Scientific
- Croce P, Russo G. 2003. *Experimental Investigation on Lime Stabilized Soil*. In: Proc XIII European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Prague.
- 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.
- Ingles, O.G and Metcalf. 1972. *Principles Of Foundation Engineering*. PWS-Kent Publishing company, Boston USA.
- 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. Sweden.
- 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*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Madhyannapu, R. S. and 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.
- Pradika, Ivan. I. 2016. Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom dengan Diameter 3cm pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Metode DSM Berpola Triangular terhadap Daya Dukung Tanah. *Skripsi*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Seed, H. B., Woodward R.J, and Lundgren R. 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal ASCE. Soil Mechanics and Foundations Div., Vol.88*.
- SK SNI S-01-1994-03. 1996. *Spesifikasi Kapur Untuk Stabilisasi Tanah*. Departemen PU.
- Skempton, A. W. 1953. *The Colloidal Activity of Clays*. *Journal Vol. 1*, 57-61. London: 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Terzaghi, K., dan Peck, R., 1943. *Theoretical Soil Mechanic*. John Wiley & Sons, New York.
- Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Volume 14 Nomor 1*. Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang.
- Wesley, L.D. 1977. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.