

**PENGARUH JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIXING* BERPOLA
TRIANGULAR TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF**
*(The Effect Spacing and Length of Deep Soil Mixing by Using Triangular Configuration
on The Bearing Capacity of Expansive Soil)*

Anisa Oktavia Ardiyansari, Yulvi Zaika, Arief Rachmansyah

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: anisasipil@gmail.com

ABSTRAK

Tanah ekspansif adalah tanah yang mempunyai perilaku kembang susut akibat adanya perubahan kadar air. Dalam penelitian ini menggunakan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola triangular. Metode *deep soil mixing* merupakan metode pencampuran dengan bahan *additive* untuk meningkatkan stabilitas tanah. Dari hasil uji klasifikasi tanah, tanah di Kabupaten Bojonegoro termasuk jenis tanah ekspansif. Variasi Jarak antar kolom yang digunakan yaitu 1D, 1,25D dan 1,5D, dimana D adalah diameter kolom 3cm. Sedangkan variasi panjang kolom adalah 2B, 3B dan 4B, dimana B adalah lebar plat pondasi. Hasil dari stabilisasi tanah ekspansif menggunakan metode *deep soil mixing* berpola *triangular* diameter kolom 3 cm menunjukkan bahwa jarak dan panjang kolom maksimum adalah jarak antar kolom 1D dan panjang kolom 4B dengan peningkatan nilai daya dukung tanah hingga 281%. Selain itu, persentase tanah yang distabilisasi sebesar 91,2% mampu menurunkan pengembangan dari tanah asli sebesar 3,36%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa stabilisasi 10% kapur dengan metode DSM berpola *triangular* dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mampu mengurangi potensi pengembangan seiring dengan meningkatnya volume tanah yang distabilisasi.

Kata Kunci : tanah ekspansif, kapur, *deep soil mixing*, jarak, panjang, daya dukung.

ABSTRACT

Expansive soil is soil that has a swelling-shrinkage behaviour that is affected by water content in the soil. In this research using a triangular configuration of deep soil mixing (DSM). Deep soil mixing method is a method of soil mixing with additive to the soil to improve soil stability. From the test results of soil classification, soil in the district of Bojonegoro including expansive soil type. The variations of spacing between the column are 1D, 1,25D and 1,5D, where D is the diameter of column 3cm. While the variation in the length column are 2B, 3B and 4B, where B is the width of the foundation plate. The results of expansive soil stabilization using a triangular configuration of deep soil mixing method with diameter of column 3 cm show that maximum spacing and length variations of the column are 1D and 4B respectively, with an increase of the soil bearing capacity to 281%. In addition, with 91,2% soil stabilization, it is able to reduce swelling of the native soil by 3.36%. In conclusion that the stabilization using additive 10% lime with a triangular configuration DSM method can increase the bearing capacity of soil and were able to reduce the potential swelling with the increasing volume of soil stabilization.

Keywords : *expansive soil, lime, Deep Soil Mixing, spacing, length, bearing capacity*

PENDAHULUAN

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

Pembangunan konstruksi diatas tanah tidak selalu berada pada tanah yang baik. Salah satu permasalahan yang terjadi adalah pada tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat kembang susut yang tinggi karena tersusun dari mineral-mineral yang dapat menyerap air secara ekstrem.

Dalam penelitian ini menggunakan metode stabilitas kimiawi dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah yang fungsinya untuk daya dukung pada tanah. Bahan *additive* yang digunakan adalah kapur. Pertimbangan penggunaan kapur sebagai bahan *additive* adalah adanya sifat *pozzolanic* yaitu kemampuan untuk mengeras apabila bereaksi dengan air sehingga dapat mengikat butiran lempung.

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

Deep Soil Mixing (DSM) merupakan upaya stabilisasi tanah dalam dimana tanah

dicampur dengan bahan *additive* berupa kapur pada lokasi tanah yang ingin diperbaiki. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan (2015), stabilisasi tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro menggunakan metode DSM bahan *additive fly ash* dengan diameter 3cm berpola *panels* menghasilkan daya dukung maksimum yang terjadi pada jarak antar kolom ($L=3\text{cm}$) dan panjang kolom ($D_f=15\text{cm}$) dapat meningkatkan daya dukung sebesar 179% dari tanah asli.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh jarak dan panjang kolom stabilisasi menggunakan bahan *additive* kapur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) pola *triangular* untuk mengetahui daya dukung tanah ekspansif.

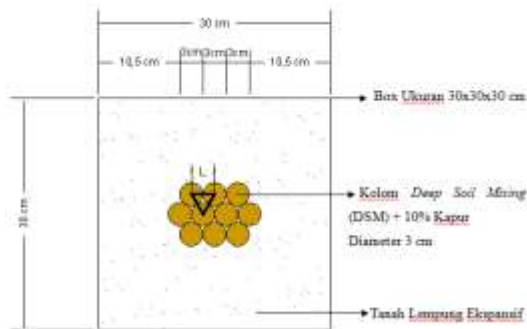
Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

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

METODOLOGI PENELITIAN

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-batas *atteberg* 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)).



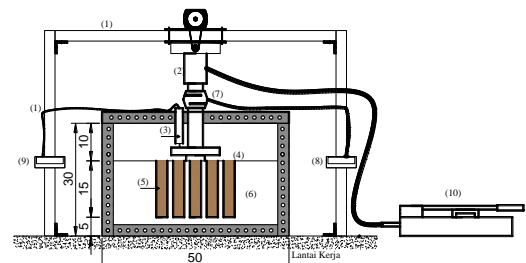
Gambar 1 Pemodelan DSM Pola Triangular

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack* atau dongkrak hidrolis. 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 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* menjadi beban merata yang digunakan sebagai model pondasi. Letak dongkrak hidrolis 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.



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

Gambar 2 Skema Uji Pembebanan

Berikut adalah tabel rancangan perhitungan daya dukung tanah asli dan variasi jarak dan panjang DSM:

Tabel 1 Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

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

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

$$BCI = \frac{qu \text{ tanah dengan DSM}}{qu \text{ tanah asli}} \times 100\% \quad (1)$$

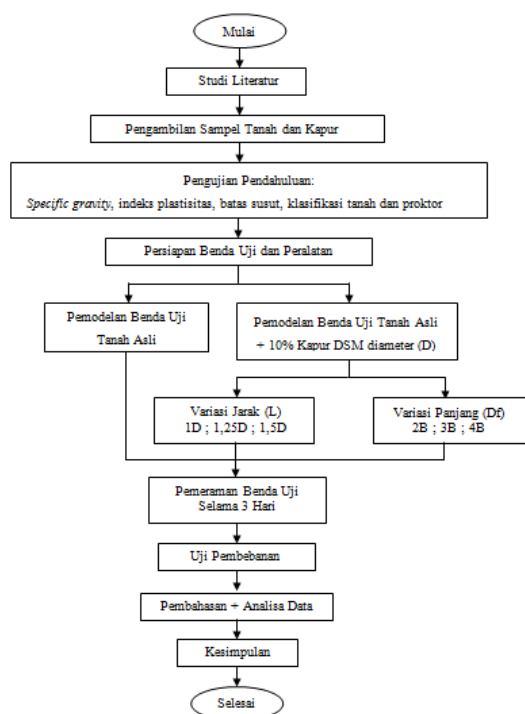
Hasil analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) kemudian disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 2 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		1D = 4 cm			
2	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm			
3		1,5D = 6 cm			
4		1D = 4 cm			
5	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm			
6		1,5D = 6 cm			
7		1D = 4 cm			
8	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm			
9		1,5D = 6 cm			

Tabel 3 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		2B = 10 cm			
2	1D = 3 cm	3B = 15 cm			
3		4B = 20 cm			
4	1,25D = 3,75 cm	2B = 10 cm			
5		3B = 15 cm			
6		4B = 20 cm			
7		2B = 10 cm			
8	1,5D = 4,5 cm	3B = 15 cm			
9		4B = 20 cm			



Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Pendahuluan

1. *Specific Gravity*

Pemeriksaan *specific gravity* sendiri merupakan pengujian laboratorium yang

dilakukan untuk mengetahui berat jenis suatu bahan yang akan digunakan sebagai sampel benda uji.

Tabel 4 Hasil Pemeriksaan *Specific Gravity*

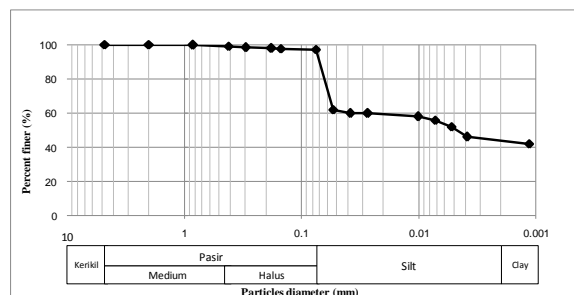
Labu Ukur	1	2
Specific Gravity (Gs)	2,557	2,554
Rata-rata (Gs)	2,556	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari pengujian yang sudah dilakukan, didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan yaitu $G_s = 2,556$.

2. Klasifikasi Tanah

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



Gambar 4 Analisis Saringan dan Hidrometer

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa tanah di Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki persentase lolos saringan no. 200 sebesar 97,03% (di atas 50%) dari total tanah. Menurut sistem klasifikasi tanah analisis saringan dan hidrometer termasuk jenis tanah berbutir halus.

3. Atteberg Limit

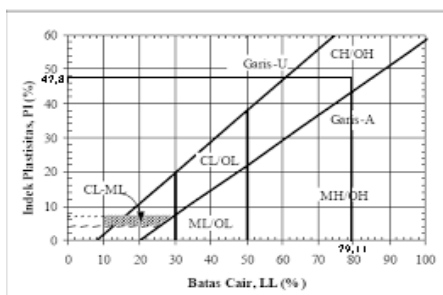
Pengujian terdiri dari uji batas cair (LL), uji batas plastis (PL), uji batas susut (SL) dan indeks plastisitas (PI).

Tabel 5 Hasil Pemeriksaan Batas-batas Atteberg

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

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

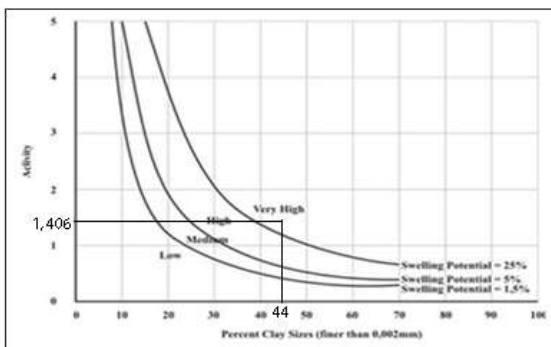
Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa nilai batas cair (LL) 79,11%, batas plastis (PL) 31,30%, batas susut (SL) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%.



Gambar 5 Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

4. Sifat Ekspansifitas Tanah

Nilai-nilai dari batas *Atterberg* dapat digunakan untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah lempung. Didapatkan nilai aktivitas sebesar 1,406 sehingga tanah tersebut termasuk tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Dari nilai aktivitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan pada Gambar 6. Didapatkan bahwa tanah pada Kabupaten Bojonegoro termasuk tanah potensi pengembangan sangat tinggi.



Gambar 6 Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

5. Penentuan Kadar Air Optimum

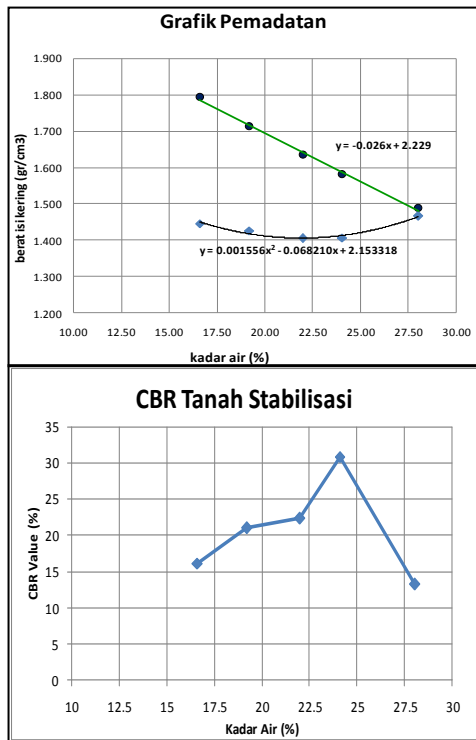
Penentuan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah asli, didasarkan pada hasil uji pemadatan standar yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015) seperti pada Gambar 7.



Gambar 7 Hasil Pemadatan Tanah Asli

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa besarnya kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) 1,409 gr/cm³.

Untuk menentukan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah yang distabilisasi kapur 10% dilakukan uji pemadatan. Namun setelah dilakukan 3 kali uji pemadatan tidak didapatkan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah campuran stabilisasi 10% kapur. Hal tersebut disebabkan karena sifat tanah ekspansif yang kurang stabil sehingga sangat sulit didapatkan kepadatan maksimumnya. Selanjutnya penentuan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah stabilisasi 10% kapur ditentukan dari pengujian *California Bearing Ratio* (CBR). Hasil dari uji Pemadatan dan uji CBR pada tanah stabilisasi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik Hasil Pemadatan dan CBR tanah Stabilisasi

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

6. Uji Kepadatan Tanah Asli dalam Box

Pengujian ini memakai uji *density* yang berfungsi untuk menentukan berat isi kering maksimum dalam *box*. Sehingga untuk pemodelan tanah asli, digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm³ (Kurniawan, 2015).

Tabel 6 Uji *Density* pada Tanah Model

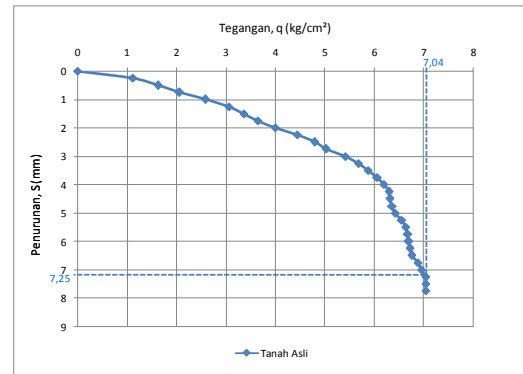
No. Ring		I	II	III	IV
Kadar air, (w)	%	27.88	27.43	27.95	28.35
Berat isi tanah (γt)	gr/cm ³	1.656	1.600	1.649	1.637
Berat isi kering, (γd)	gr/cm ³	1.295	1.255	1.289	1.275
Rata-rata berat isi tanah,	gr/cm ³	1.635			
Rata-rata berat isi kering,	gr/cm ³	1.279			

Sumber : Kurniawan (2015)

7. Uji Pembebanan Tanah Asli

Hasil dari uji pembebanan tanah asli didapatkan data penurunan dari pembacaan digital LVDT dan beban dari pembacaan

digital *Load Cell*. Beban maksimum yang dapat ditahan tanah (P_u) sebesar 176 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 7,25 mm. Setelah data dianalisis didapatkan nilai daya dukung tanah ultimate (q_u) sebesar 7,04 kg/cm². Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9 Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli

8. Uji Pembebanan pada Tanah dengan Perbaikan DSM

Instalasi kolom dibuat berdasarkan variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df) DSM pola *triangular* yang sudah ditentukan dengan diameter kolom 3 cm.

Tabel 7 Beban dan Penurunan Berdasarkan Variasi Jarak DSM

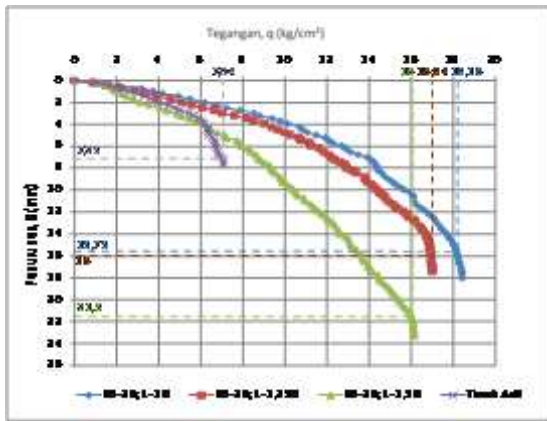
No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1		1D = 3cm	15,75	459
2	2B = 10cm	1,25D = 3,75cm	13,5	412,5
3		1,5D = 4,5cm	21,5	400
4	3B = 15cm	1D = 3cm	8,5	468
5		1,25D = 3,75cm	11,25	416,5
6		1,5D = 4,5cm	19,75	414,5
7	4B = 20cm	1D = 3cm	8,25	484,5
8		1,25D = 3,75cm	14,5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

Sumber : Hasil Pengujian

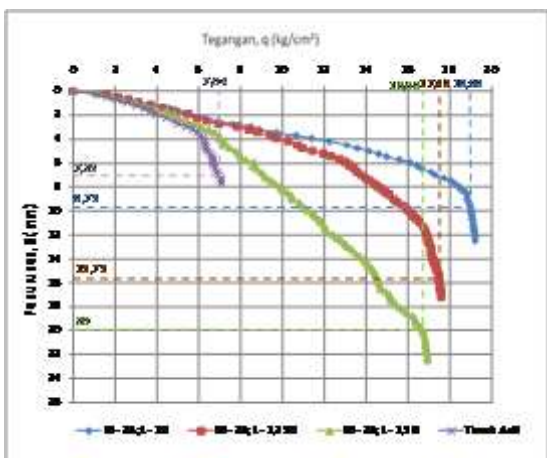
Tabel 8 Beban dan Penurunan Berdasarkan Variasi Panjang DSM

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

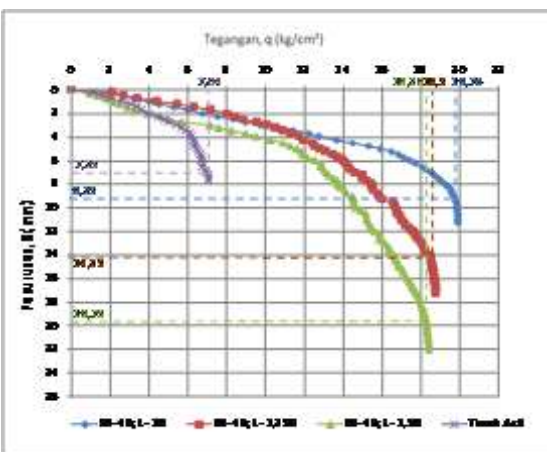
Sumber : Hasil Pengujian



Gambar 10 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Jarak dengan Panjang $2B = 10\text{cm}$



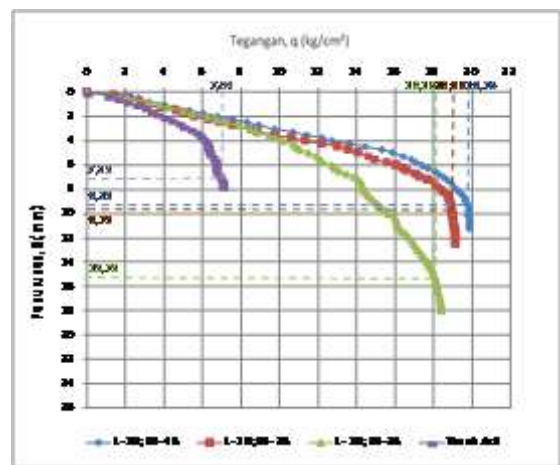
Gambar 11 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Jarak dengan Panjang $3B = 15\text{cm}$



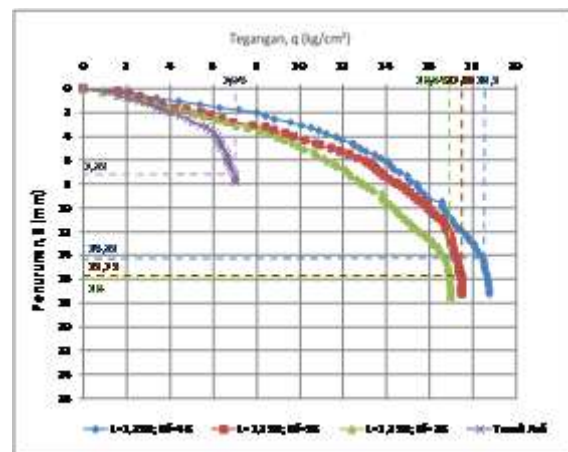
Gambar 12 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Jarak dengan Panjang $4B = 20\text{cm}$

Dari ketiga hasil analisis dapat menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung

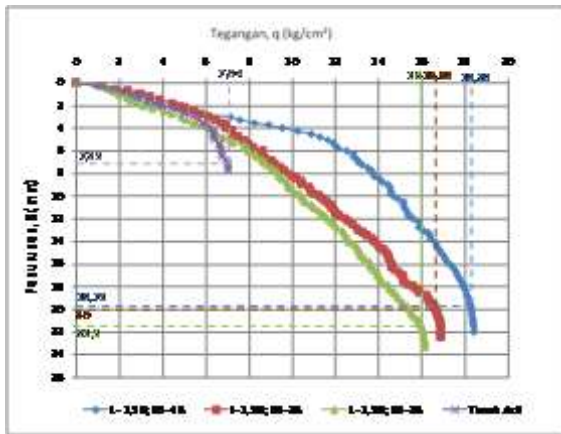
tanah Kabupaten Bojonegoro. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh. Pada analisis variasi jarak, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM 1D pada panjang DSM 4B yaitu sebesar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



Gambar 13 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Panjang dengan Jarak $1D = 3\text{cm}$



Gambar 14 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Panjang dengan Jarak $1,25D = 3,75\text{cm}$

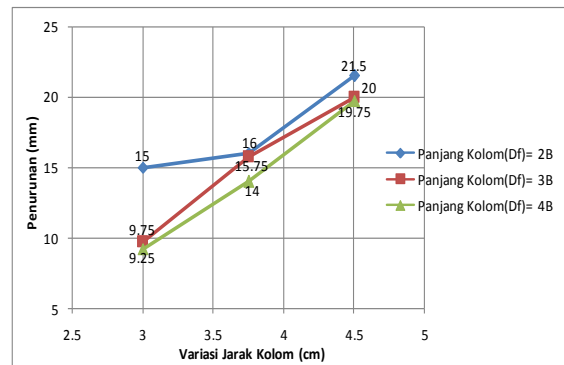


Gambar 15 Hubungan Daya Dukung dan Penurunan pada Variasi Panjang dengan Jarak $1,5D = 4,5\text{cm}$

Dari ketiga hasil analisis menunjukkan bahwa semakin panjang kolom DSM (D_f) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding panjang kolom DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang kolom DSM 4B dengan jarak DSM 1D yaitu sebesar $19,76\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{mm}$. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang kolom DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli.

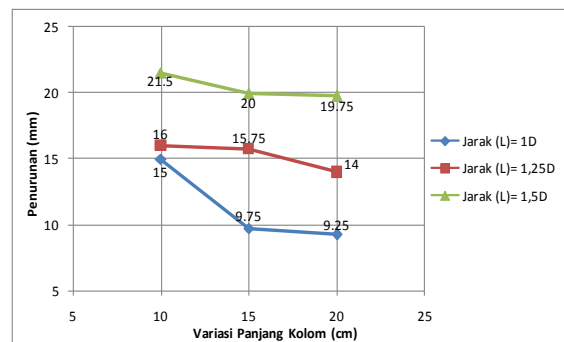
9. Analisis Penurunan Tanah

Berdasarkan dari hasil pengujian pembebanan yang telah dilakukan pada benda uji model akan diperoleh nilai pembacaan hubungan tegangan dan penurunan (*settlement*). Sehingga besarnya penurunan dapat langsung didapatkan dari grafik.



Gambar 16 Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Jarak Kolom

Dari Gambar 16 dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (D_f) $2B = 10\text{ cm}$, $3B = 15\text{ cm}$ dan $4B = 20\text{ cm}$ besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, hal ini sesuai hipotesa bahwa besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.



Gambar 17 Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Panjang Kolom

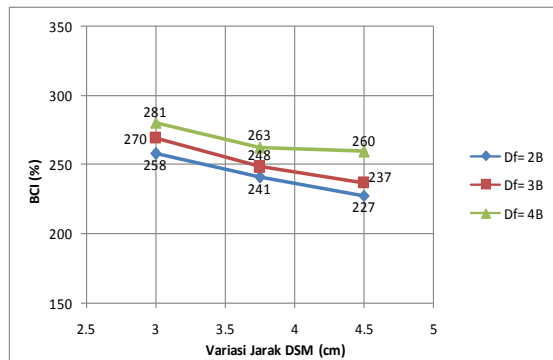
Dari Gambar 17 dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) $1D = 3\text{cm}$, $1,25D = 3,75\text{cm}$ dan $1,5D = 4,5\text{cm}$ besarnya nilai penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan panjang kolom. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana besarnya *settlement* akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya panjang kolom.

10. Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) Berdasarkan Daya Dukung Ultimit

Tabel 9 Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (cm)	Jarak DSM (cm)	qs tanah asli (t/cm^2)	qs dengan DSM (t/cm^2)	BCI (%)
1		1D=3cm		18.16	258
2	2B=10cm	1,25D=3,75cm		16.94	241
3		1,5D=4,5cm		16	227
4		1D=3cm		18.98	270
5	3B=15cm	1,25D=3,75cm	7.04	17.48	248
6		1,5D=4,5cm		16.68	237
7		1D=3cm		19.76	281
8	4B=20cm	1,25D=3,75cm		18.5	263
9		1,5D=4,5cm		18.78	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



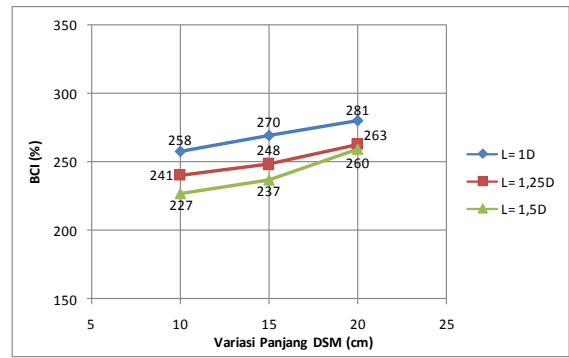
Gambar 18 Perbandingan Penigkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Dari Gambar 18 terlihat bahwa terjadi penurunan daya dukung pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi jarak 1D, yaitu sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan.

Tabel 10 Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qs tanah asli (t/cm^2)	qs dengan DSM (t/cm^2)	BCI (%)
1		2B=18cm		18.16	258
2	1D=3cm	3B=15cm		18.98	270
3		4B=20cm		19.76	281
4		2B=18cm		16.94	241
5	1,25D=3,75cm	3B=15cm	7.04	17.48	248
6		4B=20cm		18.5	263
7		2B=18cm		16	227
8	1,5D=4,5cm	3B=15cm		16.68	237
9		4B=20cm		18.78	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

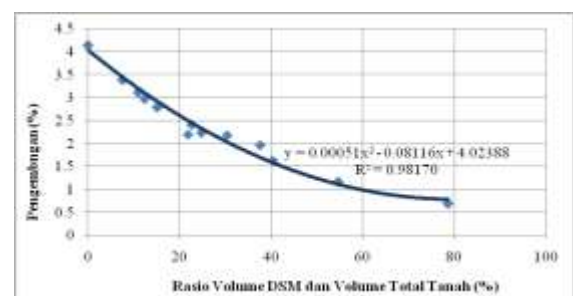


Gambar 19 Perbandingan Penigkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Dari Gambar 19 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai BCI pada tanah ketika DSM semakin panjang. Hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 4B, yaitu terjadi peningkatan sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan nilai BCI lebih besar dibanding dengan panjang kolom DSM yang lebih pendek.

11. Analisis Pengembangan (Swelling)

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh (Firdaus, 2016) mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi dengan metode *deep soil mixing*(DSM), dimana penelitian tersebut mengidentifikasi jumlah kolom DSM yang berarti berhubungan dengan persentase tanah stabilisasi yang digunakan akan mempengaruhi nilai pengembangan tanah lempung ekspansif Bojonegoro. Hasil penelitian tersebut disajikan pada Gambar 20.



Gambar 20 Perbandingan Hasil *Swelling* terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total Tanah

Dari Gambar 20 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. Perbandingan persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11 Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi

Jenis Rendah Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi		Persentase Swelling dari tanah asli	
		%	%	%	%
Tanah Asli	-	0	4,33	0	0
	L- 3D; Df- 3B	46,6	3,86	2,77	2,77
	L- 1,5D; Df- 3B	26,66	2,39	1,83	1,83
Tanah Asli + Kalsium Hidroksida 10%	L- 3D; Df- 3B	17,02	2,76	1,37	1,37
	L- 1,5D; Df- 3B	8,4	0,81	0,32	0,32
	L- 1,5D; Df- 4B	48,44	1,56	2,58	2,58
Kapur	L- 3D; Df- 3B	26,33	2,34	1,89	1,89
	L- 3D; Df- 4B	81,2	0,78	0,36	0,36
	L- 1,5D; Df- 4B	53,88	1,19	1,89	1,89
L- 1,5D; Df- 4B	24,86	1,89	2,33	2,33	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm (0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata tanah lempung ekspansif di lokasi penelitian memiliki kedalaman 1,5 meter yang berarti bahwa persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%. Dari analisa uji pengembangan terhadap pemodelan di laboratorium yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi panjang kolom (Df) = 4B dan jarak antar kolom (L) = 1D dengan nilai *swelling* 0,78% dan didapat penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar 3,36 %.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian berupa pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mixing* (DSM) 10% kapur diameter 3cm berpola *triangular* terhadap daya dukung tanah ekspansif di Bojonegoro dapat ditarik beberapa kesimpulan bahwa semakin dekat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah. Selain itu, jarak dan panjang kolom maksimum DSM dengan daya dukung maksimum terjadi pada DSM jarak terdekat L = 1D (3cm) dan panjang kolom Df = 4B (20cm) dengan nilai BCI sebesar 281%. Semakin besar volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*).

Beberapa saran yang direkomendasikan untuk penelitian serupa yang akan datang :

1. Perlu dilakukan analisis lebih detail mengenai usaha pemadatan dalam *box* sehingga berat isi kering maksimum dalam *box* dapat memenuhi kriteria berat isi kering maksimum berdasarkan uji proktor standar.
2. Operator pembebanan vertikal harus selalu membawa *stopwatch*, agar penurunan yang dihasilkan dari pembacaan beban dapat berjalan konstan, karena dalam penelitian ini pembebanan masih dilakukan secara manual.
3. Karena tanah yang diuji merupakan jenis tanah ekspansif, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui pengaruh DSM terhadap kembang susut-tanah dalam *box*.
4. Memperbanyak variasi jarak dan panjang untuk mengetahui jarak dan panjang paling optimum pada DSM diameter 3cm pola *triangular*. Dalam penelitian ini pengaruh jarak dan panjang masih belum terlihat signifikan sehingga diperlukan tambahan variasi jarak dan panjang untuk mengetahui batas pengaruh jarak dan panjang DSM terhadap nilai daya dukung tanah ekspansif.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. E. 1986. *Sifat-Sifat Fisis Tanah 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. Department of Commerce.
- Casagrande, A. 1948. *Classification and Identification of Soils*. Journal ASCE. Vol. 113.
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Chen, F. H. 1988. *Foundation on Expansive Soil 2nd ed*. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary C. 1999. *Mekanika Tanah I*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum.
- 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.
- 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. & 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 Muhamadiyah Yogyakarta.
- Seed, H.B., Woodward R.J, & Lundgren R. 1962. *Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays*. Journal ASCE. Soil Mechanics and Foundations Div., Vol.88.
- Skempton, A. W. 1953. *The Colloidal Activity of Clays*. Journal Vol. 1, 57-61. London: 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- SK SNI S-01-1994-03. 1996. *Spesifikasi Kapur Untuk Stabilisasi Tanah*. Departemen PU.
- Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley dan Sons.
- 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