

**PERBAIKAN TANAH EKSPANSIF (DAYA DUKUNG DAN PENGEMBANGAN)
METODE *DEEP SOIL MIXING* POLA *SINGLE SQUARE* DIAMETER 4,8 CM
DENGAN PENAMBAHAN KAPUR PADA VARIASI KEDALAMAN DAN JARAK**

Salwa Saputri¹⁾, Yulvi Zaika²⁾, Suroso³⁾

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

ABSTRAK

Tanah ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai sifat kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air, hal ini tentunya akan berpengaruh terhadap daya dukung dari tanah tersebut. Adapun dalam penelitian ini menggunakan metode *Deep Soil Mixing* pola *Single Square* dengan penambahan kapur 8% yang dilakukan dengan cara membuat kolom-kolom tanah stabilisasi dengan variasi jarak dan kedalaman tertentu. Metode yang dilakukan yaitu membuat benda uji pada *box* akrilik berukuran 30x30x30 cm³ dengan volume tanah 30x30x20 cm³. Pada lapisan bawah diisi dengan pasir kering setebal 3 cm dengan berat 3,15 kg, instalasi kolom DSM berdiameter 4,8 cm terbagi dalam beberapa variasi jarak antar kolom yaitu 1D, 1,25D dan 1,5D serta variasi kedalaman kolom yaitu 10 cm, 15 cm dan 20cm, kemudian pada lapisan atas diisi oleh pasir kering setebal 1 cm dengan berat 1,05 kg. Uji pembebanan dilakukan pada titik pusat permukaan benda uji dengan meletakkan pelat baja berukuran 5x5x2 cm² yang dibebani oleh dongkrak hidrolik, besarnya beban yang terjadi ditunjukkan dengan *load cell* dan besarnya penurunan ditunjukkan oleh pembacaan LVDT. Guna mendapatkan beban maksimum dilakukan pembacaan beban hingga tiga kali sama untuk menghasilkan daya dukung batas tanah. Berdasarkan hasil penelitian dan analisis didapatkan daya dukung tanah asli adalah 13 kg/cm², sedangkan ketika dilakukan stabilisasi metode *Deep Soil Mixing* dengan penambahan kapur 8% terjadi peningkatan daya dukung pada jarak antar kolom 4,8 cm kedalaman 20 cm sebesar 38,4 kg/cm². Selain itu juga pada jarak dan kedalaman kolom yang sama terbukti dapat menurunkan persentase pengembangan menjadi 0,627% dari persentase pengembangan tanah asli yang sebesar 5,66%.

Kata-kata kunci: Tanah Ekspansif, Stabilisasi Tanah, Kapur, *Deep Soil Mixing*, Jarak, Kedalaman, Daya Dukung, *Swelling*.

ABSTRACT

Expansive soil is composed of clay minerals that have high shrinkage properties in case of changes in water content, this will certainly affect the bearing capacity of the soil. This research used single square of Deep Soil Mixing Method with addition of 8% lime which is done by making the column of soil stabilization with depth and space variation. This research will be focused to determine the effect of variation depth and space stabilization of column soil bearing capacity and the pertage of swelling expansive soil. Expansive soil stabilization process using lime content 8% with deep soil mixing (DSM). Stabilization soil conducted in the laboratory, small scale model use the box size (30x30x30) cm for a test load (load test). In the process DSM's installation column, variations space between the columns (L) = 1D, 1,25D, 1,5D and variations in the depth stabilization (Df) = 10 cm, 15 cm, and 20 cm. after modeling carried out test sampels, and curing sampels test for 3 days prior before loading test. Based on the results of research, the untreated soil have bearing capacity 13 kg/cm², when stabilized soil by Deep Soil Mixing Method with of 8% lime 38.4 kg/cm² at the space of columns 4.8 cm and depth of 20 cm . At the same distance and depth it can be proved to decrease the percentage of swelling to 0.627% from the percentage swelling of the untreated soil is 5.66%.

Keywords : *Expansive Clay Soil, Soil Stabilization, Lime, CBR, Swelling, tress and strain*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Material dasar yang sangat penting dalam bidang konstruksi adalah tanah, karena pada tanah inilah suatu konstruksi bertumpu. Namun, tidak semua tanah yang ada memiliki kondisi yang baik untuk digunakan sebagai penumpu konstruksi, hal ini disebabkan terdapat beberapa jenis tanah dasar yang bermasalah baik dari segi daya dukungnya maupun dari segi pengembangan (*swelling*) tanahnya. Terdapat banyak karakteristik tanah yang dapat merugikan bagi pembangunan konstruksi apabila tidak segera ditangani, misalnya yaitu tanah ekspansif. Salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki karakteristik tanah ekspansif yaitu di Desa Jelu Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Frangky (2016) mengenai *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan penambahan kapur sebesar 10% berpola *single square* dengan diameter kolom 3,8 cm dan panjang 20 cm pada tanah ekspansif dapat meningkatkan daya dukung tanah sebesar 173,3% yaitu dari semula hanya 7,04 kg/cm² meningkat menjadi 19,24 kg/cm². Hubungan tegangan dan regangan tanah memperlihatkan bahwa tanah yang sudah distabilisasi sangat kaku.

Ranggaesa, R.A. (2016) melakukan penelitian mengenai stabilisasi tanah ekspansif menggunakan campuran kapur 0%, 6%, 8%, 9%, dan 10% lama pemeraman 3 hari dengan menggunakan persentase kadar kapur yang paling stabil pada persentase 8%. Peningkatan nilai CBR keadaan *unsoaked* hingga 22,52% dari 14,76% dan nilai CBR *soaked* dari 4,66% meningkat sebesar 12,04%. Sedangkan nilai kembang (*swelling*) tanah lempung dengan bertambahnya persentase kadar kapur maka nilai kembang semakin kecil.

Tujuan penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah :

1. Untuk mengetahui perubahan daya dukung dan pengembangan tanah tanpa perbaikan dan 100% perbaikan.
2. Untuk mengetahui perubahan daya dukung bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom.
3. Untuk mengetahui perubahan *swelling* bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom.
4. Untuk mengetahui jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi daya dukung yang diijinkan di daerah Bojonegoro.
5. Untuk mengetahui jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi *swelling* yang diijinkan di daerah Bojonegoro.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Lempung

Berdasarkan ASTM D-653 secara fisik batasan ukuran partikel lempung antara 0,002 mm sampai dengan 0,005 mm. selain digolongkan berdasarkan ukuran butir, tanah lempung juga dapat digolongkan berdasarkan kandungan mineralnya. Berdasarkan dari segi materialnya, tanah lempung mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang “Menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah apabila dicampur dengan air” (Grim, 1953 dalam Das, 1995). Terdapat tiga jenis kelompok material penyusun lempung yaitu *kaolinite*, *illite* dan *montmorillite* (Das, 1995).

Tanah Lempung Ekspansif

Pengertian tanah ekspansif menurut Buku Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan Departemen Pekerjaan Umum tahun 2005, yang dimaksud dengan tanah ekspansif adalah tanah atau batuan yang kandungan lempungnya memiliki potensi kembang susut tinggi akibat perubahan kadar air.

Stabilisasi Tanah dengan Kapur

Proses pencampuran tanah dengan kapur berarti suatu stabilisasi kimia dengan bahan tambahan dalam bentuk kalsium oksida atau kalsium hidroksida dengan suatu proses pemadatan dengan kandungan air tertentu. Akibat penambahan kalsium maka akan mereduksi plastisitas tanah, meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah, mengurangi penyerapan air dan volume pengembangan (*swelling potential*) yang diakibatkan oleh air.

Deep Soil Mixing (DSM)

Salah satu teknologi perbaikan tanah di lapangan langsung (*in situ soil treatment technology*) dimana tanah dicampur dengan bahan aditif dengan kedalaman tertentu menggunakan bantuan *crane* dilengkapi dengan hidrolis dan *augers* adalah stabilisasi tanah dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Menurut Moseley (2000) sejak tahun 1970-an, telah ditemukan metode baru mengenai stabilisasi tanah, yaitu metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang dikembangkan di Jepang. Metode ini dilakukan untuk perbaikan sifat teknis tanah dari tanah lunak berkoheisi pada kedalaman mencapai 50 m. metode ini merupakan stabilisasi tanah dalam dengan bahan pencampur aditif seperti halnya stabilisasi di tanah permukaan. Dalam bukunya juga (Moseley, 2000) menjelaskan bahwa dengan metode DSM kuat geser dan CBR tanah dapat mengalami peningkatan dan penurunan struktur di tempat dapat berkurang.

Daya Dukung Batas Tanah

Analisis daya dukung batas menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$qu = \frac{Pu}{A}$$

Keterangan: qu = daya dukung batas (kg/cm²)
Pu = beban batas (kg)
A = luas pondasi (cm²)

Bearing Capacity Improvement (BCI)

Analisis *bearing capacity improvement* (BCI) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$BCI = \frac{quI}{qu}$$

Keterangan: BCI = perbandingan daya dukung
quI = daya dukung tanah dengan stabilisasi (kg/cm²)
qu = daya dukung tanah asli(kg/cm²)

Pengembangan Tanah (Swelling)

Analisis pengembangan tanah (*swelling*) menggunakan persamaan sebagai berikut:

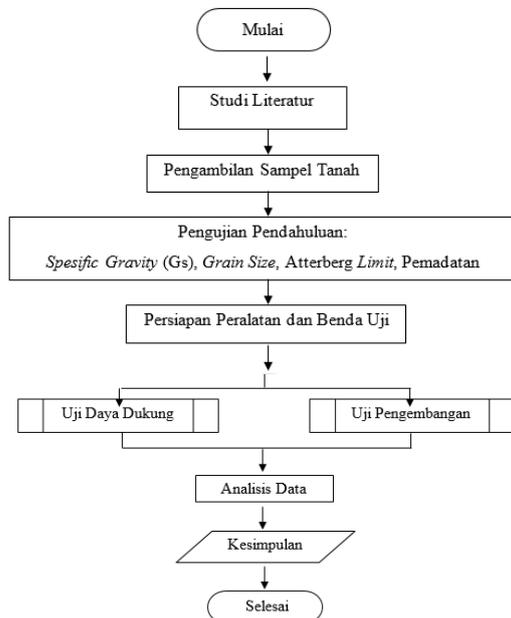
$$SP = \frac{Hi - Hf}{Hi} \times 100\%$$

Keterangan: Hi = tinggi awal benda uji
Hf = tinggi akhir benda uji

METODE PENELITIAN

Tahap Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Rancangan Penelitian Daya Dukung

Terdapat tiga jenis benda uji dalam penelitian ini, yaitu benda uji berupa tanah asli sebelum distabilisasi, tanah lempung ekspansi dengan stabilisasi menggunakan tanah yang telah distabilisasi dengan campuran 8% kapur dan tanah lempung dengan stabilisasi menggunakan campuran 8% kapur metode *Deep Soil Mixing* (DSM) tipe *single square*. Nantinya akan diperoleh

perilaku tegangan-penurunan tanah sebelum dan sesudah distabilisasi sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman kolom yang telah ditentukan sebelumnya.

Rancangan Penelitian Pengembangan

Pengujian pengembangan menggunakan 5 buah benda uji, yaitu 1 buah benda uji berupa tanah asli dan 4 buah benda uji berupa tanah yang distabilisasi dengan DSM, adapun variasi benda uji untuk tanah yang distabilisasi dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Rancangan Penelitian Uji Pengembangan

Benda Uji	Waktu	Pembacaan	Pengembangan (%)
Tanah Asli			
DSM 7 kolom (D=3,2 cm)			
DSM 6 kolom (D=4 cm)			
DSM 5 kolom (D=4,8 cm)			
DSM 7 kolom (D=4,8 cm)			
Stabilisasi 100%			

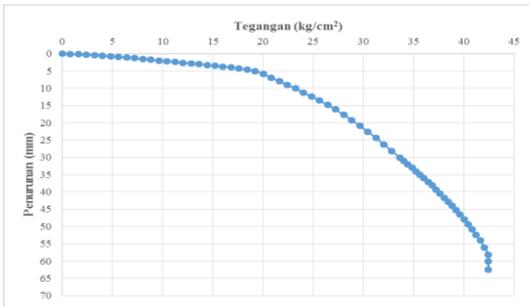
Langkah-Langkah Pengujian

Langkah – langkah pengujian pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan benda uji
2. Melakukan pengukuran terhadap titik tengah permukaan tanah dengan bantuan penggaris dan tali.
3. Melakukan perataan permukaan tanah untuk perletakan pelat pondasi dengan bantuan *waterpass* sebagai pengontrol kerataan permukaan tanah.
4. Meletakkan pelat baja dengan ukuran 5x5 cm pada titik Tengah permukaan yang telah diukur sebelumnya.
5. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan.
6. Melakukan uji pembebanan menggunakan dongkrak hidrolik.
7. Pembebanan dilakukan bertahap dengan interval dial LVDT 50 dan kemudian pembebanan dihentikan ketika pada alat pembaca menunjukkan 3 kali beban sama namun penurunan tetap terjadi.
8. Mencatat beban dan penurunan yang terjadi sesuai dengan format.

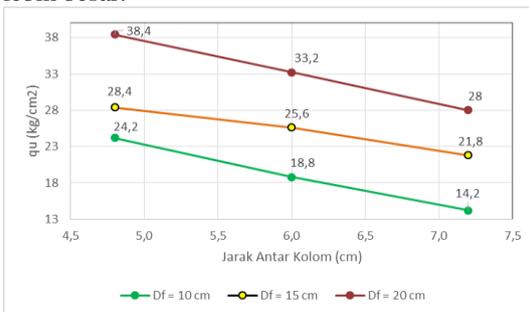
Langkah – langkah pengujian pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sampel tanah dijemur atau dioven hingga sampel tanah cukup kering sehingga gumpalan tanah mudah dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak dengan saringan No. 4
3. Sampel tanah yang lolos saringan No. 4 ditambah air sebesar kadar air optimum (OMC)
4. Sampel tanah dicetak pada mold seperti uji pemadatan standar berdasarkan ASTM D-698 (Metode B)
5. Dibuat 5 buah benda uji



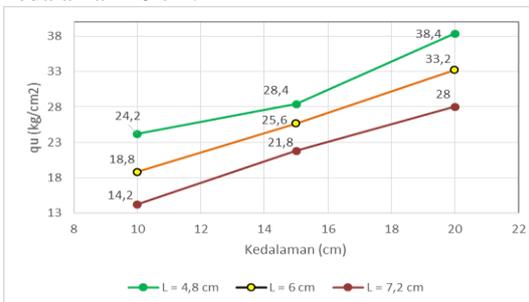
Gambar 5. Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Stabilisasi 100%

Dengan adanya stabilisasi menggunakan kolom DSM nilai q_u mengalami peningkatan seiring dengan semakin rapat jarak antar kolom dilihat pada kedalaman yang sama. Nilai daya dukung paling tinggi pada kedalaman terjadi pada variasi jarak 4,8 cm (1D). Hal tersebut terjadi karena, luasan tanah terstabilisasi yang diterima plat beban menjadi lebih besar. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh kepadatan tanah disekitar kolom yang meningkat, sehingga nilai daya dukungnya menjadi lebih besar.



Gambar 6. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak antar Kolom

Perbandingan nilai daya dukung dengan variasi kedalaman terhadap jarak antar kolom menunjukkan bahwa q_u mengalami peningkatan dengan seiring bertambahnya kedalaman kolom. Dalam grafik tersebut terlihat bahwa nilai daya dukung (q_u) yang terbesar berada pada variasi kedalaman 20 cm.

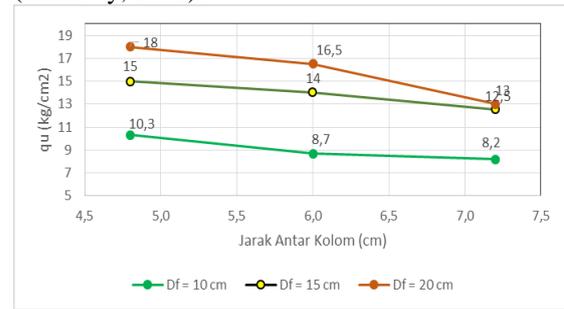


Gambar 7. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman

Analisa Daya Dukung Tanah dengan *Tangen Intersection Method* (TIM)

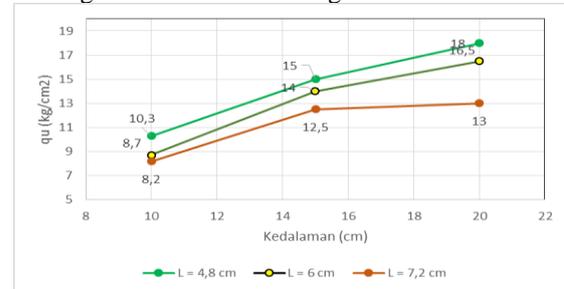
Dalam pengujian yang dilakukan terhadap benda uji dihasilkan pembacaan daya dukung dan penurunan. Salah satu metode mencari nilai daya

dukung adalah dengan *tangen intersection method* (Kulhaway, 1988).



Gambar 8. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak TIM

Gambar 7 menjelaskan bahwa variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh pada peningkatan daya dukung tanah. Pada kedalaman yang sama yaitu (Df) 10 cm, (Df) 15 cm, dan (Df) 20 cm, semakin kecil jarak kolom maka daya dukung tanah semakin meningkat.



Gambar 9. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman TIM

Gambar 8 menjelaskan bahwa variasi kedalaman memberikan pengaruh pada peningkatan daya dukung tanah. Pada jarak yang sama yaitu (L) 4,8 cm, (L) 6 cm, dan (L) 7,2 cm, daya dukung tanah semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman kolom. Nilai daya dukung tanah yang telah distabilisasi dengan kolom DSM mengalami peningkatan terhadap daya dukung tanah asli. Nilai daya dukung terbesar yaitu 18 kg/cm² pada jarak 4,8 cm dengan kedalaman kolom 20 cm.

Pengaruh Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom terhadap Nilai Daya Dukung Tanah

Guna mengetahui seberapa besar pengaruh variasi jarak antar kolom dan kedalaman kolom stabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* terhadap nilai daya dukung tanah, merupakan salah satu tujuan dari penelitian ini.

Secara umum, stabilisasi tanah ekspansif metode *Deep Soil Mixing* dengan penambahan 8% kapur terbukti dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh penambahan nilai kepadatan tanah akibat reaksi dari bahan stabilisasi tersebut dalam hal ini berupa penambahan kapur.

Tabel 3. Perbandingan Peningkatan BCIu

Variasi Jarak (VL)		Peningkatan BCI		Variasi Kedalaman (VDf)		Peningkatan BCI		Keterangan
Df	L	%	%	L	Df	%	%	
cm	cm			cm	cm			
10	4,8	41,54	35,38	4,8	10	32,31	76,92	VL > VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL < VDf
15	4,8	21,54	29,23	6	10	52,31	58,46	VL < VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL < VDf
20	4,8	40,00	40,00	7,2	10	58,46	47,69	VL < VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL < VDf

Dari tabel 3 tersebut dapat disimpulkan bahwa variasi kedalaman lebih berpengaruh pada metode stabilisasi *Deep Soil Mixing* pola *single square* diameter 4,8 cm. hal ini dibuktikan dengan lebih besarnya peningkatan BCI yang terjadi yaitu terbesar 76,92% pada variasi kedalaman.

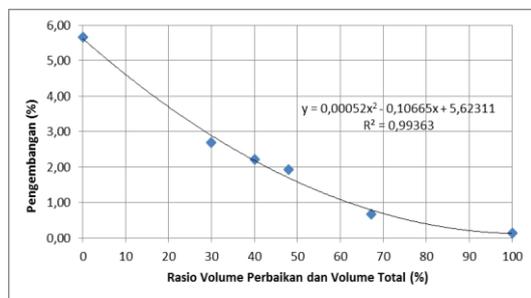
Tabel 4. Perbandingan Peningkatan BCIs

Variasi Jarak (VL)		Peningkatan BCIs		Variasi Kedalaman (VDf)		Peningkatan BCIs		Keterangan
Df	L	%	%	L	Dr	%	%	
cm	cm			cm	cm			
10	4,8	29,63	9,26	4,8	10	87,04	55,56	VL < VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL < VDf
15	4,8	18,52	27,78	6	10	98,15	46,30	VL < VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL < VDf
20	4,8	27,78	64,81	7,2	10	79,63	9,26	VL < VDf
	6				15			VL < VDf
	7,2				20			VL > VDf

Dari tabel 4 dapat disimpulkan sama halnya dengan hasil dari perbandingan peningkatan BCIu bahwa variasi kedalaman lebih berpengaruh pada metode stabilisasi *Deep Soil Mixing* pola *single square* diameter 4,8 cm. hal ini dibuktikan dengan peningkatan BCIs terbesar terjadi pada variasi kedalaman yaitu sebesar 98,15%.

Pengujian Swelling (Pembangunan)

Pemeriksaan uji pengembangan dilakukan dengan kadar air optimum (OMC) dengan variasi jumlah kolom DSM yang berguna untuk mengetahui pengaruh persentase yang distabilisasi terhadap nilai pengembangan (*swelling*). Hasil pemeriksaan pengembangan ditampilkan pada grafik berikut ini.



Gambar 10. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman TIM

Dengan memasukkan nilai variabel x dengan besarnya persentase stabilisasi, maka akan didapat besarnya nilai persentase pengembangan.

Hasil perhitungan persentase pengembangan terhadap stabilisasi kolom DSM di dalam *box* ditampilkan dalam tabel berikut ini.

Tabel 5 Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Kedalaman	Jarak	Persentase Stabilisasi	Persentase Pengembangan	Penurunan Pengembangan
	(cm)	(cm)	(%)	%	%
Tanah Asli	20	-	0	5,66	0
Tanah Asli + 100% stabilisasi	20	-	100	0,14	97,59
	10	4,8	36,19	2,44	56,81
	10	6	29,99	2,89	48,90
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	10	7,2	18,72	3,81	32,69
	15	4,8	54,29	1,37	75,86
	15	6	44,99	1,88	66,83
	15	7,2	28,08	3,04	46,31
	20	4,8	72,38	0,63	88,90
	20	6	59,99	1,10	80,62
	20	7,2	37,44	2,36	58,31

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diijinkan adalah 12 mm untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata tanah lempung ekspansif di daerah Bojonegoro memiliki kedalaman hingga 1,5 meter, hal ini menunjukkan bahwa persentase mengembang maksimum yang diijinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8% dan 1,2% untuk *rigid pavement*. Adapun dari analisa uji pengembangan terhadap pemodelan laboratorium yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang untuk struktur *flexible pavement* dan struktur *rigid pavement* adalah konfigurasi jarak (L) = 4,8 cm dan kedalaman kolom (Df) = 20 cm. Sedangkan konfigurasi DSM pada jarak (L) = 6 cm dan kedalaman kolom (Df) = 20 cm memiliki nilai pengembangan 1,096% hanya memenuhi untuk struktur *rigid pavement*.

KESIMPULAN

1. Besarnya daya dukung tanah tanpa perbaikan didapatkan 13 kg/cm² dan besarnya pengembangan sebesar 5,659%. Terjadi perubahan nilai daya dukung ketika dilakukan 100% perbaikan, yaitu meningkat menjadi 42,4 kg/cm² serta persentase pengembangan menurun menjadi 0,136%.
2. Berdasarkan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI), terjadi peningkatan daya dukung tanah bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* pola *Single Square* diameter 4,8 cm pada variasi jarak dan kedalaman. Nilai BCI terbesar yaitu 295,38% pada jarak 4,8 cm kedalaman 20 cm, hal ini membuktikan bahwa nilai daya dukung setelah perbaikan lebih tinggi yaitu sebesar 38,4 kg/cm². Berdasarkan perbandingan peningkatan BCIu dihasilkan variasi kedalaman lebih berpengaruh, terbukti dengan

peningkatan BCIu terbesar yang terjadi pada variasi kedalaman yaitu 76,92%. Dan berdasarkan BCIs variasi kedalaman lebih berpengaruh terbukti nilai BCIs terbesar pada variasi kedalaman yaitu 98,15%.

3. Stabilisasi tanah ekspansif dengan metode DSM 8% kapur, terbukti dapat menurunkan persentase pengembangan. Penurunan persentase mengembang tanah dapat turun secara signifikan seiring dengan bertambahnya persentase perbaikan. Variasi DSM dengan kedalaman kolom 20 cm dan jarak antar kolom 4,8 cm memiliki nilai pengembangan paling kecil yaitu 0,627%, hal ini menunjukkan penurunan pengembangan 88,9% dari tanah tanpa stabilisasi.
4. Berdasarkan perhitungan beban luar dan daya dukung ijin, diketahui bahwa besarnya beban luar persatuan luas untuk tipe jalan kelas I adalah sebesar 2,521 kg/cm². Besarnya daya dukung ijin semua variasi menghasilkan nilai lebih besar dari beban luar tersebut, sehingga semua variasi stabilisasi layak dan mampu untuk digunakan atau diterapkan untuk desain jalan tipe I.
5. Rata-rata kedalaman tanah lempung ekspansif di daerah Bojonegoro adalah 1,5 meter, sehingga persentase mengembang maksimum yang diijinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%, pada dan 1,2% untuk *rigid pavement*. Sehingga variasi DSM 8% kapur pada jarak 4,8 cm dan kedalaman kolom 20 cm dengan nilai pengembangan 0,627% memenuhi untuk struktur *flexible pavement* dan *rigid pavement*. Sedangkan pada jarak 6 cm dan kedalaman kolom DSM 20 cm memiliki nilai pengembangan 1,096% hanya memenuhi untuk struktur *rigid pavement*.

SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan kepadatan lapisan pasir di atas dan di bawah lapisan tanah benda uji yang mendekati dengan kondisi lapangan agar diperoleh data yang lebih mendekati dengan kondisi lapangan.
2. Perlu digunakan *box* dengan material yang lebih kuat, sehingga *box* tidak mudah mengalami pecah atau rusak.

DAFTAR PUSTAKA

Barnes, G.E. 2000, *Soil Mechanics Principles and Practice (Second Edition)*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.

Bouassida, M. dan Porbaha, A. (2004). Ultimate Bearing Capacity of Soft Clays Reinforced by a Group of Columns - Application to a Deep Mixing Technique. Article in Soil and Foundations. Tokyo: Japanese Geotechnical Society.

Bowles, J. E. 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils (Second Edition)*. New York: McGraw-Hill College.

Chen, F. H. 1975. *Foundations on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Das, B. M. 1993. *Mekanika Tanah, Jilid II*. Cetakan I. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Surabaya: Institut Teknologi 10 November.

Das, B. M. 1995. *Mekanika Tanah, Jilid I*. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Jakarta: Erlangga.

Departemen Pekerjaan Umum. 1994. Peraturan SK SNI S-01-1994-03. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.

Departemen Pekerjaan Umum. 2005. Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.

Frangky. 2016. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Deep Soil Mixing (DSM) 10% Kapur Diameter 4 cm Berpola Single Square Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif Di Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Ingles, O. G. dan Metcalf, J. B. 1972. *Soil Stabilization Principles and Practice*. Melbourne: Butterworths Pty. Limited.

Kosche, M. 2004. A Laboratory Model Study on The Transition Zone and The Boundary Layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay. Linköping: Swedish Deep Stabilization Research Center.

Laras, A.W. 2017. Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan (Curing) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Tanah Lempung Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Muntohar, A. S. 2010, Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom di Laboratorium. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*. 10 (3):202-207. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Ranggaesa, R.A. 2017. Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Seed, H. B., Wood Ward, R. J. dan Lundgren, R. 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clay. *Journal of The Soil*

Mechanics and Foundations Division. 88 (SM4):107-131. American Society of Civil Engineers.

Skempton, A. W. 1953. The Colloidal "Activity" of Clays. Proc. of The 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering. 1 : 57-61. Zurich: Selected Papers on Soil Mechanics.

Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. Jurnal Wahana Teknik Sipil. 14 (1):38-45. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.