

PERBAIKAN TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE DSM POLA SINGLE SQUARE MENGGUNAKAN PENAMBAHAN KAPUR VARIASI KEDALAMAN DAN JARAK ($D = 4 \text{ cm}$) TERHADAP DAYA DUKUNG DAN PENGEMBANGAN

Ismiralda Citra, Yulvi Zaika, Suroso

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan Mayjen Haryono 167, Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia
Email : ismiraldac@gmail.com

ABSTRAK

Tanah dengan kembang susut tinggi banyak ditemukan di Indonesia dan biasa disebut dengan tanah lempung ekspansif. Tingginya kadar air menyebabkan tanah ini mengembang dan rendahnya kadar air menyebabkan tanah ini menyusut. Konstruksi bangunan yang berada di atas tanah lempung ekspansif memiliki daya dukung rendah dan nilai swelling tinggi. Melihat banyaknya kasus serupa, maka diperlukan stabilisasi tanah lempung ekspansif untuk meningkatkan daya dukung dan mereduksi swelling. Penelitian dilakukan menggunakan metode DSM dengan variasi kedalaman dan jarak pola *single square* menggunakan 8% kadar kapur. Hasil dari analisis dan pembahasan pada penelitian yang dilakukan mampu meningkatkan nilai daya dukung dan mereduksi nilai swelling tanah. Variasi jarak dan kedalaman kolom memiliki pengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah terhadap tanah asli. Semakin kecil jarak antar kolom dan semakin dalam kolom DSM, maka nilai daya dukung yang dihasilkan semakin meningkat. Berdasarkan analisis BCI jarak (L) = $1D$ (4 cm) dan panjang kolom (D_f) = $4B$ (20 cm) mengalami peningkatan daya dukung terbesar, yaitu 186,15% dari tanah asli. Semakin besar rasio perbaikan, maka semakin kecil nilai swelling yang didapatkan. Rasio terbesar dengan variasi jarak (L) = $1D$ (4 cm) dan panjang kolom (D_f) = $4B$ (20 cm) memiliki nilai pengembangan 0,53% dan mereduksi 90,64% dari pengembangan tanah asli.

Kata kunci : tanah lempung ekspansif, stabilisasi tanah, deep soil mixing, daya dukung, swelling

ABSTRACT

Soil with high shrink and swell properties lot to be found in Indonesia and usually called with expansive soil. High water content causing this soil to expand and low water content cause it to shrink. Building construction that located above the expansive soil have a low bearing capacity and high potential swelling. Seeing a lot of common cases, it needs stabilization of expansive soil to increase the bearing capacity and decrease the swelling potential of the soil. The research was carried out using DSM method with depth and space variations of single square pattern using 8% of lime. Based on result of the research, the stabilization increased the value of the bearing capacity and reduces the swelling potential. The depth and space variation of the column has an impact on the increased value of the bearing capacity of the expansive soil. The smaller space between the columns and the deeper column, will increase bearing capacity. Based on the analysis of the BCI, space (L) = $1D$ (4 cm) and depth of the column (D_f) = $4B$ (20 cm) has the biggest bearing capacity, that increased 186,15% from untreated expansive soil. The largest ratio of improvement in this pattern is (L) = $1D$ (4 cm) and (D_f) = $4B$ (20 cm) which is has potential swelling 0.53% and reduction 90.64% from untreated expansive soil.

Keywords: expansive clays soils, soil stabilization, deep soil mixing, soil bearing capacity, swelling

PENDAHULUAN

Pada pembangunan berbagai konstruksi, hal dasar yang harus diperhatikan adalah kondisi tanah dan sifat tanah karena tanah yang akan menahan beban konstruksi. Konstruksi yang aman sebaiknya dibangun di atas tanah dasar yang memiliki daya dukung tinggi dan memiliki sifat tanah yang baik. Sifat tanah buruk yang seringkali ditemukan di lapangan adalah tanah yang memiliki sifat kembang susut yang tinggi. Tanah dengan sifat kembang susut tinggi ini sangat sensitif terhadap kadar air, tingginya kadar air menyebabkan tanah ini mengembang dan rendahnya kadar air menyebabkan tanah ini menyusut. Sifat kembang susut tersebut dapat menimbulkan kerusakan konstruksi seperti retak-retak pada bangunan, serta konstruksi jalan yang bergelombang karena perbedaan penurunan pada tanah dasar. Tanah dengan sifat seperti di atas disebut dengan tanah lempung ekspansif.

Jenis tanah yang ada di daerah Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur merupakan jenis tanah ekspansif yang memiliki daya dukung rendah. Melihat banyaknya kasus serupa yang terjadi, maka diperlukan stabilisasi tanah lempung ekspansif untuk meningkatkan daya dukung tanah tersebut. Stabilisasi tanah adalah suatu usaha memperbaiki sifat tanah dasar dengan harapan tanah tersebut memiliki daya dukung atau mutu yang lebih baik. Penelitian ini menggunakan bahan tambahan kapur untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif dan akan difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi terhadap nilai daya dukung dan nilai *swelling* tanah lempung ekspansif yang diambil dari Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro. Metode DSM ini dimodelkan dalam box berukuran (30x30x30) cm dengan variasi jarak dan panjang kolom tipe *single square* dengan diameter 4 cm serta bahan aditif kapur sebesar 8% dan dilakukan *curing* selama 3 hari.

TUJUAN

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui perubahan daya dukung dan pengembangan (*swelling*) tanah ekspansif tanpa perbaikan dan 100% perbaikan.
2. Untuk mengetahui perubahan daya dukung bila tidak dilakukan perbaikan 100% dengan menggunakan perbaikan metode DSM berpola *single square* variasi jarak dan kedalaman kolom.

3. Untuk mengetahui perubahan pengembangan (*swelling*) bila tidak dilakukan perbaikan 100% dengan perbaikan menggunakan metode DSM 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 diizinkan di daerah Bojonegoro.
5. Untuk mengetahui jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi pengembangan (*swelling*) yang diizinkan di daerah Bojonegoro.

TINJAUAN PUSTAKA

Identifikasi Lempung Ekspansif

Identifikasi lempung ekspansif secara tidak langsung dapat dilakukan dengan uji laboratorium yang umumnya menggunakan nilai ATL dan persentase kandungan lempung untuk menggambarkan potensi pengembangan suatu tanah secara kualitatif.

Tabel 1. Hubungan PI dengan Potensi Mengembang

Potensi Mengembang	Indeks Plastisitas
Rendah	0-15
Sedang	10-35
Tinggi	20 - 55
Sangat Tinggi	35 <

Tabel 2. Hubungan SL dengan Derajat Mengembang

Batas Susut Atterberg (%)	Derajat Mengembang
< 10	Kritis
10 – 12	Sedang
> 12	Tidak Kritis

Stabilisasi Tanah dengan Kapur

Pemilihan bahan kapur padam sebagai bahan stabilisasi cocok untuk tanah lempung ekspansif dibandingkan dengan bahan stabilisator lain, hal ini ditentukan berdasarkan ukuran butir tanah yang lolos saringan No. 200 dan nilai PI seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Indeks Plastis	Lolos # No. 200 > 25%			Lolos # No. 200 < 25%		
	IP ≤ 10	10 < IP < 20	IP ≥ 20	IP ≤ 6 IP x % P200 ≤ 60	IP ≤ 10	IP > 10
Bahan Stabilisasi						
Semen						
Kapur						
Aspal						
Kombinasi Aspal/semen						
Kimia Lain						
Keterangan						
	Cocok	Meragukan	Tidak Cocok			

Gambar 1. Kriteria Bahan Stabilisator

Tanah lempung ekspansif yang memiliki nilai plastisitas dan persentase butiran tanah lolos saringan Nomor 200 yang sangat tinggi tergolong tanah yang cocok distabilisasi menggunakan bahan aditif kapur.

Pemodelan DSM di Laboratorium

Pada penelitian yang dilakukan oleh Astriyanto (2016) yang meneliti tentang pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode DSM tipe *single square* diameter 3 cm terhadap daya dukung tanah.

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Astriyanto (2016), nilai BCI yang terbesar terjadi saat variasi jarak antar kolom 3 cm dan panjang kolom 20 cm yaitu sebesar 283,52%. Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak dan panjang kolom DSM yang memberikan nilai daya dukung maksimum berdasarkan analisis terhadap peningkatan terhadap daya dukung (BCI) terjadi pada jarak (L) = 1D (3 cm) dan panjang kolom (Df) = 4B (20 cm).

Daya Dukung

Daya dukung batas (*ultimate bearing capacity*) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat memikul beban tanpa mengalami keruntuhan. Persamaan daya dukung dapat ditulis sebagai berikut :

$$q_u = P_u/A$$

dimana : q_u = daya dukung ultimate

P_u = beban ultimate

A = luas pondasi

Swelling

Pengembangan (*swell*) adalah bertambahnya elevasi atau dilasi dari suatu kolom tanah akibat penyerapan air. Nilai *swelling* dapat dihitung menggunakan persamaan rumus :

$$SP = \frac{H_i - H_f}{H_i} \times 100\%$$

dimana: H_i : tinggi sampel tanah

H_f : tinggi akhir sampel tanah

METODE PENELITIAN

Persiapan Benda Uji

Penelitian ini dimodelkan dalam *box fiberglass* dengan ukuran (30x30x30) cm. Sampel tanah asli yang dicetak adalah (30x30x20) cm dengan kadar air 21,8% dan berat isi kering 1,17 gr/cm³, sedangkan untuk pemodelan kolom DSM stabilisasi 8% kapur menggunakan kadar air 21,8% dengan berat isi kering 1,43 gr/cm³. Pada lapisan bawah digunakan pasir dengan volume (30x30x3) cm dengan berat 3,15 kg, sedangkan untuk lapisan atas digunakan pasir dengan volume (30x30x1) cm dengan berat 1,05 kg. Lapisan pasir yang berada di atas dan bawah tanah lempung ekspansif digunakan untuk drainase tanah lempung tersebut.

Benda uji ini dibuat dengan variasi jarak 4 cm (1D); 5 cm (1,25D); 6 cm (1,5D) dan variasi kedalaman kolom 10 cm (0,5 Df); 15 cm (0,75 Df); 20 cm (Df) berpola *Single Square*. Setelah pembuatan benda uji, dilakukan *curing* selama 3 hari dan dilanjutkan dengan uji pembebanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Tanah Asli

Dari hasil pengujian karakteristik tanah, didapatkan data sebagai berikut :

Tabel 2. Karakteristik Tanah Asli

No.	Jenis Percobaan	Satuan	Hasil
1.	Kadar Air	%	44,96
2.	Berat Jenis	-	2,524
3.	Berat Volume	gr/cm ³	1,69
4.	Batas-Batas Aterberg		
	• Batas Cair (LL)	%	77,06
	• Batas Plastis (PL)	%	29,84
	• Indeks Plastisitas (PI)	%	47,22
	• Batas Susut (SL)	%	8,30
5.	Fraksi Lempung	%	43

Berdasarkan nilai LL dan PI yang kemudian diplotkan ke dalam bagan plastisitas, maka tanah dapat diklasifikasikan sebagai tanah CH (lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi).

Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Metode yang digunakan untuk identifikasi tanah lempung ekspansif pada penelitian ini adalah identifikasi secara tidak langsung. Identifikasi ini dilakukan melalui uji laboratorium dengan menggunakan Batas Atterberg dan presentase kandungan fraksi lempung.

Dari hasil percobaan didapat bahwa sampel tanah asli yang diambil dari Desa Jelu, Kec. Ngasem, Kab. Bojonegoro, Jawa Timur tersebut memiliki nilai indeks plastisitas (PI) sebesar 47,22%, dan berdasarkan pada Tabel 1 memiliki derajat ekspansifitas yang tinggi. Tabel 2 menunjukkan bahwa tanah memiliki potensi mengembang yang kritis dengan nilai SL 8,3%.

Hasil Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan yang dilakukan akan menghasilkan nilai daya dukung. Daya dukung pada penelitian ini didapat dengan menggunakan 2 metode, yaitu dengan keruntuhan yang langsung didapat pada grafik (q_u) dan menggunakan *tangen intersection method* (q_{us}).

Daya Dukung pada Variasi Kedalaman (Df)

Berikut merupakan hasil pengujian terhadap nilai daya dukung ultimate (q_u) tanah pada variasi kedalaman.

Tabel 3. Nilai Daya Dukung (q_u) pada Variasi Kedalaman (Df)

Jenis Beban Uji	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (D _f)	P _u	q _u
	cm	cm	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	325	13
		10	630	25,2
		15	770	30,8
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	4	20	820	37,2
		10	545	21,8
		15	620	24,8
	5	20	820	29,2
		10	520	20,8
		15	570	22,8
	6	20	660	26,4

Sedangkan nilai daya dukung dengan *tangen intersection method* (q_{us}) dapat dilihat pada Tabel 4. berikut :

Tabel 4. Nilai Daya Dukung (q_{us}) pada Variasi Kedalaman (Df)

Jenis Beban Uji	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (D _f)	q _{us}
	cm	cm	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	5,4
		10	7,2
		15	11,6
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	4	20	14
		10	6,8
		15	10,5
	5	20	12
		10	6,5
		15	8,7
	6	20	10,4

Daya Dukung pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Berikut merupakan hasil pengujian terhadap nilai daya dukung ultimate (q_u) tanah pada variasi jarak antar kolom.

Tabel 5. Nilai Daya Dukung (q_u) pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Beban Uji	Kedalaman Kolom (D _f)	Jarak Kolom (L)	P _u	q _u
	cm	cm	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	325	13
		4	630	25,2
		5	545	21,8
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	10	6	520	20,8
		4	770	30,8
		5	620	24,8
	15	6	570	22,8
		4	820	37,2
		5	820	30
	20	6	660	26,4

Sedangkan nilai daya dukung dengan *tangen intersection method* (q_{us}) pada variasi jarak antar kolom dapat dilihat pada Tabel 6. berikut :

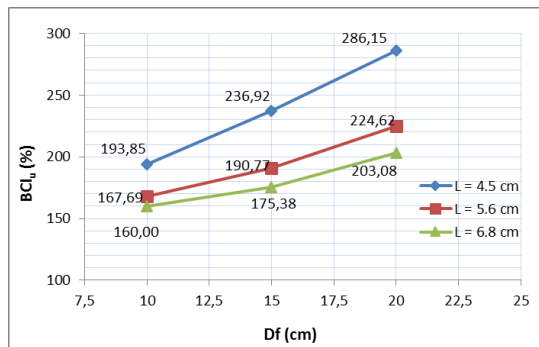
Tabel 6. Nilai Daya Dukung (q_{us}) pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Beban Uji	Kedalaman Kolom (D _f)	Jarak Kolom (L)	q _{us}
	cm	cm	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	5,4
		4	7,2
		5	6,8
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	10	6	6,5
		4	11,6
		5	10,5
	15	6	8,7
		4	14
		5	12
	20	6	10,4

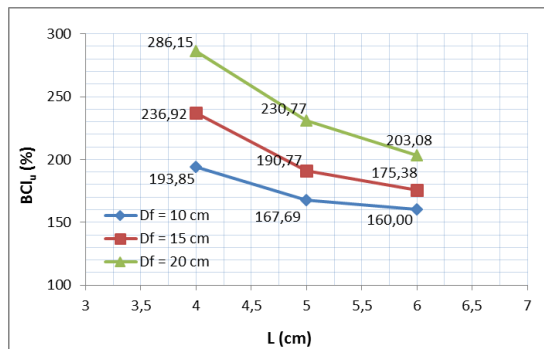
Analisis BC_{Iu} pada Daya Dukung Tanah

Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BC_{Iu}) merupakan analisis perbandingan antara daya dukung batas saat tanah distabilisasi dengan daya dukung batas tanah saat belum distabilisasi. Analisis ini juga dapat untuk mengetahui variasi manakah yang lebih berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah.

Grafik hubungan BC_{Iu} dengan variasi kedalaman (Df) dapat dilihat pada Gambar 2., sedangkan variasi jarak antar kolom (L) dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Hubungan Variasi Kedalaman dengan Nilai BC_{Iu}



Gambar 3. Hubungan Variasi Jarak antar Kolom dengan Nilai BC_{Iu}

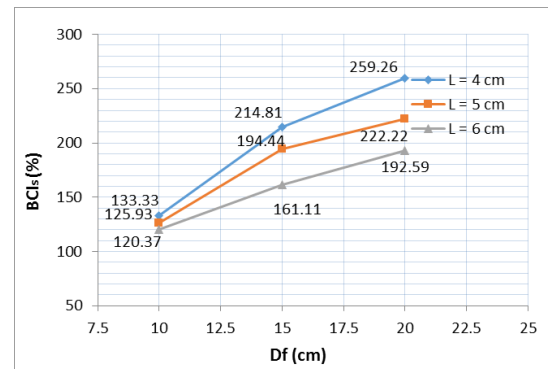
Dari gambar yang ada, dapat dilihat nilai BC_{Iu} terbesar terjadi pada variasi kedalaman 20 cm dan jarak 3 cm dengan nilai BC_{Iu} sebesar 286,15%.

Analisis BC_Is pada Daya Dukung Tanah

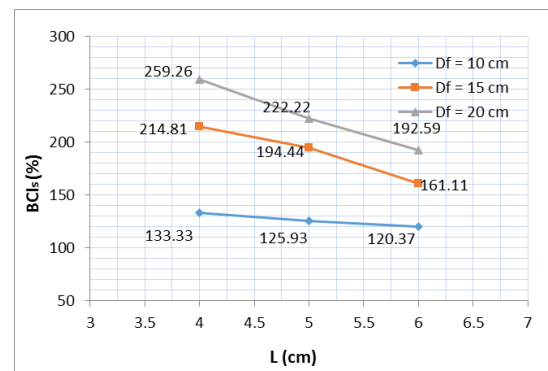
Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BC_Is) merupakan analisis perbandingan antara daya dukung *Tangen Intersection Method* (q_us) dengan daya dukung tanah saat belum distabilisasi dan distabilisasi.

Grafik hubungan BC_Is dengan variasi kedalaman (Df) ditunjukkan pada Gambar 4,

sedangkan variasi jarak antar kolom (L) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Hubungan Variasi Kedalaman dengan Nilai BC_Is



Gambar 5. Hubungan Variasi Jarak antar Kolom dengan Nilai BC_Is

Dari analisa BC_Is didapat bahwa variasi kedalaman 20 cm dan variasi jarak antar kolom 4 cm memiliki nilai BC_Is terbesar, yaitu 259,26%. Hal ini sama dengan analisis menggunakan BC_{Iu}, semakin kecil jarak antar kolom maka nilai BC_I yang dihasilkan akan semakin besar.

Daya Dukung Izin

Daya dukung izin yang terjadi pada setiap konfigurasi harus lebih besar dari tegangan yang terjadi agar konfigurasi tersebut aman yang diaplikasikan di lapangan. Daya dukung izin didapatkan dari hasil daya dukung ultimate (q_u) setiap konfigurasi dan dibagi dengan angka keamanan FS (*Factor of Safety*). Menurut Departemen Pekerjaan Umum tentang penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan, digunakan FS sebesar 1,4. Hasil rekapitulasi dari daya dukung izin ditampilkan pada Tabel 7.

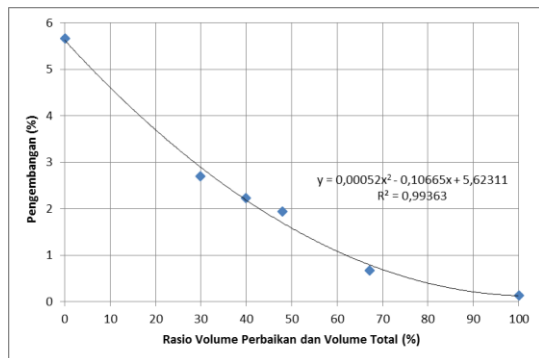
Tabel 7. Nilai Daya Dukung Izin Tanah Perbaikan

Benda Uji	Variabel	q_u	q_{ijin} (q_u/FS)
		kg/cm ²	kg/cm ²
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 4 cm ; Df = 10 cm	25,2	18
	L = 5 cm ; Df = 10 cm	21,8	15,57
	L = 6 cm ; Df = 10 cm	20,8	14,86
	L = 4 cm ; Df = 15 cm	30,8	22
	L = 5 cm ; Df = 15 cm	24,8	17,71
	L = 6 cm ; Df = 15 cm	22,8	16,29
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	37,2	26,57
	L = 5 cm ; Df = 20 cm	30	21,43
	L = 6 cm ; Df = 20 cm	26,4	18,86

Tegangan yang terjadi di jalan raya didapatkan dari pembebanan beban “T” dan beban lapisan perkerasan. Tegangan akibat beban “T” yang didapat sebesar 2,42 kg/cm² dari beban kendaraan truk yang mempunyai beban roda ganda sebesar 10 ton. Tegangan akibat lapisan perkerasan yang didapat sebesar 0,2015 kg/cm² dari beban lapisan aspal setebal 25 cm dan lapisan pondasi setebal 35 cm. Dengan menganggap 2,5215 kg/cm² sebagai tegangan yang terjadi untuk jalan raya, maka semua konfigurasi model DSM memiliki daya dukung izin yang memenuhi.

Pemeriksaan Pengembangan (Swelling)

Pemeriksaan pengembangan dilakukan untuk mengetahui konfigurasi dari variasi yang masuk kedalam nilai swelling izin.



Gambar 6. Hubungan Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Madhyannapu dan Puppala (2014) dalam penelitiannya menyatakan bahwa toleransi besar potensi mengembang tanah yang diizinkan adalah sebesar 12 mm (0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Jika dikorelasikan dengan nilai swelling pada penelitian ini, maka persentase swelling yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8% dengan menggunakan kedalaman tanah lempung ekspansif sebesar 1,5 m (Zaika dan Rachmansyah, 2016). Dengan

menganggap 0,8% sebagai batas maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* mengembang, maka konfigurasi model DSM yang yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi jarak (L) = 4 cm dan kedalaman kolom (Df) = 20 cm.

Sedangkan untuk struktur rigid pavement, persentase mengembang maksimum yang diizinkan adalah sebesar 1,2%. Dengan demikian, konfigurasi model DSM yang yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi dengan jarak (L) = 4 cm dengan kedalaman kolom (Df) = 20 cm.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan hasil pada penelitian ini, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan daya dukung pada tanah ekspansif tanpa perbaikan dan 100% perbaikan sangat signifikan, tanah dengan stabilisasi 100% memiliki nilai daya dukung 42,4 kg/cm² meningkat 226,15% dari daya dukung sebelum dilakukan perbaikan. Sedangkan *swelling* perbaikan 100% memiliki nilai 0,14% yang artinya mereduksi 97,53% dari nilai *swelling* tanah asli.
2. Variasi jarak dan kedalaman kolom DSM berdiameter 4 cm memiliki pengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah terhadap tanah asli. Semakin kecil jarak antar kolom dan semakin dalam kolom DSM, maka nilai daya dukung semakin meningkat. Berdasarkan analisis BCI jarak (L) = 1D (4 cm) dan panjang kolom (Df) = 4B (20 cm) mengalami peningkatan daya dukung terbesar, yaitu 186,15% dari tanah asli. Variasi kedalaman kolom memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap peningkatan nilai daya dukung dibandingkan variasi jarak antar kolom dengan rata-rata peningkatan 32,05%.
3. Nilai pengembangan (*swelling*) mengalami perubahan sesuai dengan rasio perbaikan pada tanah ekspansif. Semakin besar rasio perbaikan yang dilakukan, maka semakin kecil nilai *swelling* yang didapatkan. Rasio terbesar dengan variasi jarak (L) = 1D (4 cm) dan panjang kolom (Df) = 4B (20 cm) memiliki nilai pengembangan 0,53% dan mereduksi 90,64% dari pengembangan tanah asli.
4. Berdasarkan analisis nilai daya dukung izin, semua variasi jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* berdiameter 4 cm memiliki daya dukung izin lebih besar dari tegangan yang terjadi yaitu 2,5215 kg/cm².

5. Jarak dan kedalaman kolom DSM yang memberikan nilai *swelling* izin untuk *flexible pavement* dan *rigid pavement* di Bojonegoro dengan kedalaman tanah ekspansif 1,5 m adalah jarak (L) = 1D (4 cm) dan panjang kolom (D_f) = 4B (20 cm) dengan nilai *swelling* terkecil sebesar 0,53%.

SARAN

Dari analisis dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka muncul saran-saran untuk pengembangan penelitian tentang stabilisasi tanah metode *Deep Soil Mix* lebih lanjut. Saran-saran yang dapat diberikan adalah:

1. Perlu dilakukan penelitian menggunakan lapisan pasir di atas dan di bawah lapisan tanah dasar dengan kepadatan tertentu, sehingga diperoleh data yang lebih mendekati kondisi di lapangan.
2. Perlu digunakan alat pengaduk khusus sehingga dalam pencampuran bahan stabilisasi dapat distandarisasi, sehingga didapat keseragaman dalam perlakuan dan dapat memberikan hasil campuran yang lebih homogen.
3. Perlu digunakan *box* dengan material yang lebih kuat, sehingga *box* tidak mengalami pecah atau retak.

DAFTAR PUSTAKA

- Astriyanto, Vicky D. 2016. Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom Deep Soil Mix Tipe Single Square Diameter 3 cm terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- AUSTROAD. 1998. *Guide to Stabilization in Roadworks*. Austroad Publication No. AP-60/98: Sydney.
- AustStab. 2008. *Lime Stabilisation Practice. AustStab Technical Note No.1F*. Australian Stabilisation Industry Association. Chatswood, NSW
- 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. 1984. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta
- Bowles, Joseph E. 1986. *Analisis dan Desain Pondasi*. Jakarta: Erlangga.
- Chen, F. H. 1975. *Foundations on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Croce, P. dan Russo, G. 2003. Soil Water Characteristic Curves of Lime Stabilized Soils. Dalam Vermeer., Schweiger., Karstunen., & Cudny (Penyunting). *International Workshop on Geotechnics of Soft Soils - Theory and Practice*. Essen: VGE Verlag.
- Das, B.M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Das, B.M. 2006. *Principles of Geotechnical Engineering (Sixth Edition)*. Kanada: Thomson.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1987. *Pedoman Perencanaan Pembebanan Jembatan Jalan Raya*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Federal Highway Administration. 2000. *An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications*. United State: Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Grim, R. E. 1959. Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 85, No. SM2, 1-17
- Hardiyatmo, H.C. 1992. *Mekanika Tanah 1*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama
- Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press
- Ingels, O.G. and Metcalf, J. B. 1972. *Soil Stabilization Principle and Practice*.
- Kosche, M. 2004. *A Laboratory Model Study on The Transition Zone and The Boundary layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Linkoping : Swedish Deep Stabilization Research Center.
- Laras, Ario W. 2016. Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan (Curing) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Tanah Lempung Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.

- Madhyanapu, R. S. dan Puppala, A. J. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 140. American Society of Civil Engineers.
- Ranggaesa, Riota A. 2016. 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 Potensial for Compacted Clay. *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*. 88 (SM4):107-131. American Society of Civil Engineers. Melbourne: Butterworths
- Skempton, A. W. 1953. The Colloidal "Activity" of Clays. *Proc. Of The 3rd Internasional Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1 : 57-61. Zurich: Selected Papers on Soil Mechanics.
- Soedarmo, G. D. & Purnomo, S. J. E. 1997. *Mekanika Tanah 1*. Jogjakarta: Kanisius
- Zaika, Y dan Rachmansyah, A. 2016. Improvement of High Expansive Soils by Deep Soil Mixing Method in The Small Scale Laboratory Experiment. *Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Bangkok, Thailand, Nov. 14-16, 2016, ISBN: 978-4-9905958-6-9 C3051*. Malang: Universitas Brawijaya.