

PERUBAHAN PERILAKU TANAH EKSPANSIF AKIBAT STABILISASI MENGUNAKAN METODE *DEEP SOIL MIXING* POLA *PANELS* DENGAN KAPUR 8%

(Stabilization of Expansive Soil by using Deep Soil Mixing of 8% Lime with Panels Configuration)

Achmad Gusti Raditya, Yulvi Zaika, Arief Rachmansyah
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia
Email: achmadgustiraditya@gmail.com

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki sifat kembang susut yang tinggi. Hal ini dapat terjadi karena adanya perubahan kadar air yang menyebabkan daya dukungnya rendah. Selain itu, tanah ini memiliki potensi mengembang yang tinggi. Volume tanah akan menyusut pada musim kemarau dan akan mengembang pada musim penghujan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan perilaku tanah akibat pengaruh variasi jarak dan kolom stabilisasi. Proses stabilisasi menggunakan metode *deep soil mixing* dengan kapur 8%. Pemodelan tanah dicetak di dalam *box* akrilik berukuran (30x30x30) cm di laboratorium. Pengujian yang dilakukan adalah uji beban (*load test*). Pada kolom DSM, dilakukan variasi jarak antar kolom (L) = 4,8 cm, 6 cm, 7,2 cm dan variasi kedalaman kolom (D_f) = 10 cm, 15 cm, 20 cm. Sebelum dilakukan uji pembebanan, sampel uji dieramkan (*curing*) selama 3 hari.

Setelah dilakukan stabilisasi menggunakan metode DSM berpola *panels* dengan kapur 8%, perilaku tanah ekspansif di Bojonegoro mengalami perubahan yang signifikan. Daya dukung terbesar mencapai 38,4 kg/cm² terjadi pada variasi kedalaman 20 cm dengan jarak kolom 4,8 cm dan nilai pengembangan terkecil mencapai 0,55% pada variasi kedalaman dengan jarak kolom yang sama, yaitu kedalaman 20 cm dengan jarak kolom 4,8 cm. Variasi jarak dan kedalaman kolom dengan pola *panels* berdiameter 4,8 cm memberikan nilai daya dukung yang memenuhi untuk struktur perkerasan jalan raya. Sedangkan variasi jarak kolom (L) = 4,8 cm dan (L) = 6 cm dengan variasi kedalaman kolom (D_f) = 20 cm memberikan nilai izin *swelling* untuk struktur perkerasan jalan raya dengan nilai 0,55% dan 0,8%.

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

ABSTRACT

Expansive clay is a type of soil that possess a characteristic of high potential for development of shrinkage. This phenomenon occurs due to the change of water level that reduces bearing capacity. Furthermore, this type of soil has a high expansion rate. The volume of the soil will shrink in the summer and expand in the rainy season.

The purpose of this research is to determine the soil change behavior of expansive clay due to the effect of variation and long distance stabilization of the column. Stabilization process utilized deep soil mixing method with 8% lime. Ground modeling molded in (30x30x30) cm acrylic box in the laboratory. One of the examination taken place is the load test. On the stabilization column, variations distance between the columns (L) = 4,8 cm, 6 cm, 7,2 cm and variations in depth of field (D_f) = 10 cm, 15 cm, 20 cm. Prior to load test, the sample was cured for three days.

After the stabilization process using DSM method of panels configuration with 8% lime, the behavior of expansive clay in Bojonegoro went through a significant change. The highest bearing capacity value reached 38,4 kg/cm² which occurred in depth of field (D_f) = 20 cm with the distance between column (L) = 4,8 cm and the lowest swelling value reached 0,55% in the same long distance and depth of column, that is (D_f) = 20 cm with (L) = 4,8 cm. Variations distance and variations depth of column DSM's 4,8 cm panels configuration showed bearing capacity that is sufficient for structure of road. Meanwhile, variations in the distance between the columns (L) = 4,8 cm and (L) = 6 cm with depth of field (D_f) = 20 cm gave swelling value for structure of road amounted to 0,55% and 0,8%.

Keyword : expansive clays, soil bearing capacity, swelling, soil stabilization, deep soil mixing

PENDAHULUAN

Sebagai salah satu wilayah penghasil minyak gas dan bumi di Indonesia dengan pertumbuhan ekonomi tertinggi di Jawa Timur, Kabupaten Bojonegoro merupakan daerah yang sangat strategis. Fasilitas umum akan dibangun, salah satunya adalah bandar udara di Kabupaten Bojonegoro pada tahun 2017 ini. Bangunan-bangunan ini sangat memerlukan fondasi yang stabil, jika tidak maka akan mudah sekali terjadi kerusakan pada bangunan yang berada di atas tanah tersebut. Tanah di daerah Desa Jelu, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur adalah salah satu tempat yang jenis tanahnya lempung ekspansif.

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang memiliki perilaku kembang dan susut yang tinggi. Perilaku ini dapat terjadi karena adanya perubahan kadar air, sehingga daya dukungnya sangat dipengaruhi oleh perubahan kadar air. Pada musim kemarau volume tanah ini akan banyak menyusut, sedangkan pada musim penghujan volume tanah akan mengembang, oleh sebab itu tanah ini sangat berpengaruh oleh musim yang ada di Indonesia.

Efek dari tanah ekspansif akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah, sehingga sangat menyebabkan tanah di daerah tersebut mempunyai kekurangan yang dapat mempengaruhi bangunan di sekitarnya yang memerlukan daya dukung tanah. Oleh karena itu, salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengatasi perilaku tanah ekspansif yang kurang menguntungkan tersebut adalah menggunakan stabilisasi.

Stabilisasi tanah pada dasarnya adalah melakukan pencampuran tanah dengan suatu bahan tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan dan memperbaiki sifat-sifat teknis dari tanah. Setelah dilakukan stabilisasi diharapkan tanah memiliki daya dukung yang meningkat, potensi mengembang yang berkurang, meningkatkan kemudahan dikerjakan, dan sensitifitas terhadap perubahan kadar air akan berkurang. Kapur (*lime*) merupakan salah satu bahan yang dapat digunakan dalam pencampuran tanah dalam proses stabilisasi.

Dalam penelitian ini digunakan metode *deep soil mixing* (DSM) atau biasa dikenal dengan pencampuran pada tanah. DSM merupakan salah satu metode perbaikan tanah dengan pencampuran di lapangan (*in situ*). Stabilisasi tanah dengan metode DSM dilakukan dengan membuat serangkaian kolom tanah dengan konfigurasi, jarak dan kedalaman tertentu. Kolom tanah tersebut nantinya akan diberikan campuran bahan aditif.

Penelitian ini akan difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan kedalaman kolom stabilisasi terhadap tanah ekspansif. Proses stabilisasi tanah lempung ekspansif tersebut menggunakan kadar kapur 8% dengan metode *deep soil mixing* (DSM) tipe *panels* diameter 4,8 cm.

TINJAUAN PUSTAKA

Tanah Ekspansif

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki tingkat sensitifitas yang tinggi terhadap perubahan kadar air. Tanah dasar yang bersifat ekspansif akan mengembang dan dapat menyebabkan bangunan atau struktur lainnya terangkat di saat kondisi kadar air tinggi. Sebaliknya, disaat kadar air rendah, tanah ekspansif akan menyusut dan dapat menyebabkan penurunan bangunan (*settlement*).

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 akibat perubahan kadar air.

Mineral tanah lempung ekspansif memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air.

Pengembangan Tanah (*Swelling*)

Cara untuk menggambarkan sifat tanah ekspansif adalah potensi pengembangan (*swelling potential*) yang umumnya diuji dengan uji pengembangan (*swelling*). *Swelling* adalah pembesaran volume tanah ekspansif akibat bertambahnya kadar air. Besar dan nilai tekanan pengembangan bergantung pada banyaknya mineral lempung dalam tanah dan kadar air awal. Gangguan tanah atau pembentukan kembali tanah lempung dapat menambah sifat mudah mengembang. Potensi pengembangan diartikan sebagai rasio peningkatan ketinggian dengan ketinggian awal tanah pada tanah yang dipadatkan dengan kadar air optimum (OMC). Potensi pengembangan dapat dihitung dengan:

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

dimana:

SP = potensi pengembangan

H_i = ketinggian tanah awal

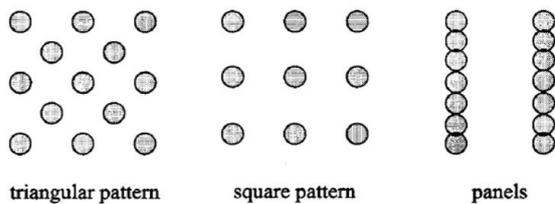
H_f = ketinggian tanah akhir

Deep Soil Mixing

Prinsip dari metode DSM adalah perbaikan tanah menggunakan campuran bahan aditif di lapangan. DSM adalah teknologi modifikasi tanah *in-situ* dimana pengikat basah atau kering disuntikkan ke dalam tanah dan dicampur secara *in-situ* dengan tanah lunak (lempung, gambut atau tanah organik) dengan cara mekanis atau dengan alat pencampuran berupa *rotary mixing tool* (Porbaha et al, 2005; Euro Soil Stab, 2002).

Dalam metode pelaksanaan *Deep Soil Mixing* (DSM) terdapat beberapa pola yang sering diterapkan. Pola-pola tersebut diantaranya pola *triangular pattern*, pola *square*, pola *pattern*, pola

panels, pola *blocks*, dan pola *grid*. Gambar pola *deep soil mixing* dapat dilihat pada gambar berikut. (Kosche, 2004):



Gambar 1. Pola *triangular*, pola *square*, pola *panels*

Korelasi Nilai CBR terhadap Daya Dukung Batas Tanah

CBR merupakan salah satu parameter penting dalam untuk menentukan karakteristik suatu tanah yang digunakan sebagai tanah dasar pada perkerasan jalan. Nilai CBR dapat menentukan tebalnya lapisan perkerasan jalan. Zumrawi & Elmour (2016) melakukan penelitian untuk menentukan hubungan korelasi nilai CBR terhadap daya dukung tanah sehingga didapat persamaan sebagai berikut:

$$q_u \text{ (kPa)} = 65 \times (\text{CBR} - 1,5)$$

Persyaratan Struktur Jalan Raya untuk Tanah dengan Stabilisasi Kapur

Berdasarkan peraturan Departemen Pekerjaan Umum mengenai Pekerjaan Lapisan Pondasi Tanah Kapur No.002-07/BM/2006 menjelaskan bahwa lapis pondasi kapur adalah campuran antara tanah, kapur dan air dengan komposisi tertentu untuk memperbaiki sifat atau daya dukung tanah.

Menurut peraturan Departemen Pekerjaan Umum mengenai Pekerjaan Tanah Dasar pada Sub Bab 10.3.8 mengenai karakteristik yang terkait dengan jalan raya dan lapang terbang disyaratkan nilai tipikal CBR untuk tanah dasar. Secara lengkap dijelaskan pada Tabel 15 halaman 62, nilai CBR diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi tanah USCS.

Untuk batas pengembangan (*swelling*), berdasarkan Madhyannapu dan Puppala (2014), menjelaskan bahwa batas pengembangan untuk struktur perkerasan lentur (*flexible pavement*) adalah 12 mm dan untuk struktur perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah 18 mm. Tanah lempung pada lokasi penelitian rata-rata memiliki kedalaman 1,5 meter, yang berarti persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk struktur perkerasan lentur adalah sebesar 0,8%.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan & Peralatan Penelitian:

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan dan peralatan sebagai berikut:

1. Tanah lempung ekspansif yang berasal dari Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.

2. Kapur padam dan pasir yang diperoleh dari toko bangunan Kota Malang.
3. Pipa aluminium diameter 3,2 cm; 4 cm; 4,8 cm.
4. Kotak (*box*) yang terbuat dari kaca akrilik berbentuk kubus dengan dimensi (30x30x30) cm dengan ketebalan 5 mm.
5. Alat pemadat untuk kolom *Deep Soil Mixing* berbentuk silinder bejal diameter 3,8 cm dengan berat 0,52 kg.
6. *Ring Density*
7. Bak pencampur.
8. *Waterpass*.
9. Gelas ukur.
10. Saringan No. 4.
11. Alat timbang digital.
12. Mistar.
13. Botol penyemprot air (*water sprayer*).
14. Kantong plastik.
15. Karung goni.
16. Palu.
17. *Mold* dan *Proctor* sesuai dengan metode B ASTM D-698; AASHTO T-99.
18. Satu set alat uji *swelling*.

Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk mengetahui klasifikasi tanah yang akan digunakan sebagai benda uji. Berikut ini merupakan penelitian pendahuluan yang akan dilakukan:

1. Penelitian *specific gravity* berdasarkan ASTM 1992 D 854-92.
2. Penelitian *liquid limit* (LL) dan *plastic limit* (PL) berdasarkan ASTM 1984 D 4318-84.
3. Penelitian *shrinkage limit* (SL) berdasarkan ASTM D 427-04.
4. Penelitian klasifikasi tanah USCS berdasarkan ASTM 1992 D 2487-92.
5. Penelitian pemadatan standar berdasarkan ASTM D-698 (Metode B).

Rancangan Penelitian

Pengujian *Swelling*

Rancangan pengujian pembebanan dilakukan menggunakan enam benda uji, yaitu satu tanah asli dan empat benda uji yang distabilisasi dengan kolom DSM. Berikut ini merupakan rancangan penelitian untuk uji *swelling* yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan Penelitian Uji Pengembangan

Benda Uji	Pengembangan (%)
Tanah Asli	
7 kolom DSM diameter 3,2 cm	
6 kolom DSM diameter 4 cm	
5 kolom DSM diameter 4,8 cm	
7 kolom DSM diameter 4,8 cm	
Stabilisasi Penuh	

Pengujian Daya Dukung

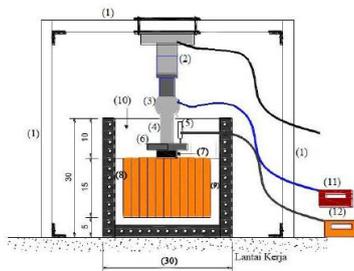
Penelitian ini akan digunakan tiga jenis benda uji, yaitu tanah asli, tanah yang di stabilisasi menggunakan campuran 8% kapur, dan tanah yang distabilisasi menggunakan campuran 8% kapur dengan metode DSM tipe *panel*.

Tabel 2. Rancangan Penelitian Uji Daya Dukung

Jenis Sampel	Jarak	Kedalaman	Pu	qu
	Kolom (L)	Kolom (Df)		
	(cm)	(cm)	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	x	y
Tanah Asli + Campuran Kapur 8%	-	-	x	y
	1D (4,8)	20	x	y
		15	x	y
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	1,25D (6)	20	x	y
		15	x	y
	1,5D (7,2)	20	x	y
		15	x	y
		10	x	y
		10	x	y

Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan dongkrak hidrolik. Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli yang belum distabilisasi menggunakan kapur. Pengujian pembebanan selanjutnya dilakukan terhadap 9 sampel yang berbeda, yaitu sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Sehingga diperoleh jarak dan panjang optimum kolom stabilisasi kapur yang menyumbangkan daya dukung terbesar Skema uji pembebanan disajikan pada Gambar 2

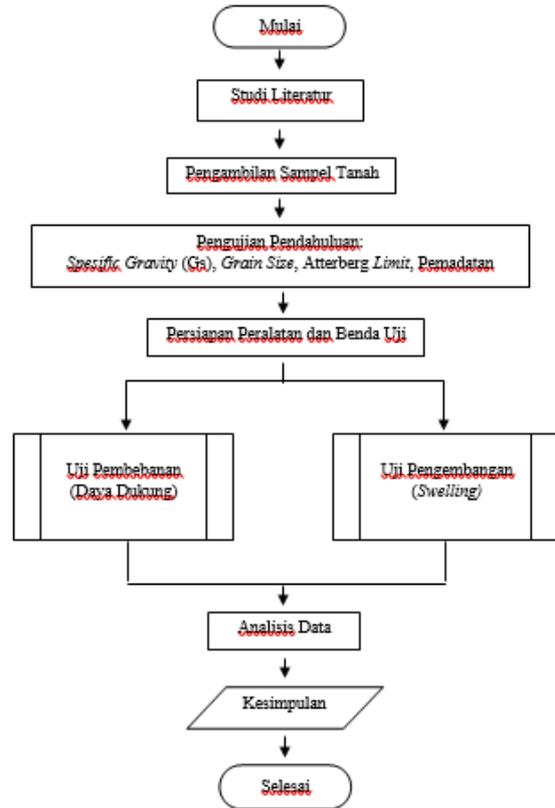


- Keterangan :
- 1. Portal baja
 - 2. Piston hidrolik
 - 3. Load cell
 - 4. Piston besi
 - 5. Lvdt
 - 6. Pelat silinder
 - 7. Pelat baja (5x5x2) cm
 - 8. Kolom stabilisasi DSM
 - 9. Tanah dasar/asli
 - 10. Box ukuran 50x50x30 cm
 - 11. Alat pembaca load cell
 - 12. Alat pembaca lvdt

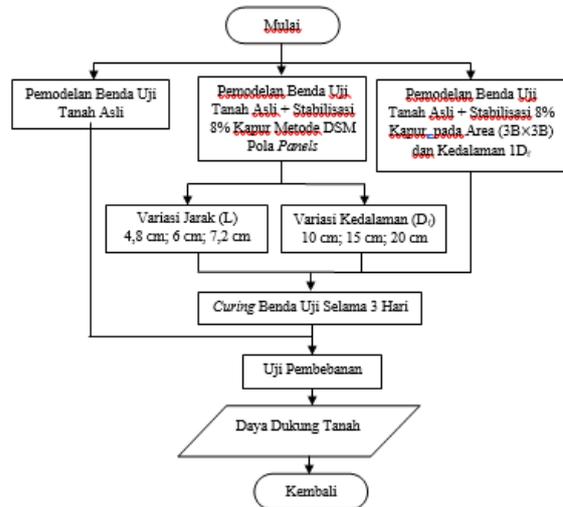
Gambar 2. Skema Uji Pembebanan Sampel

Diagram Alir

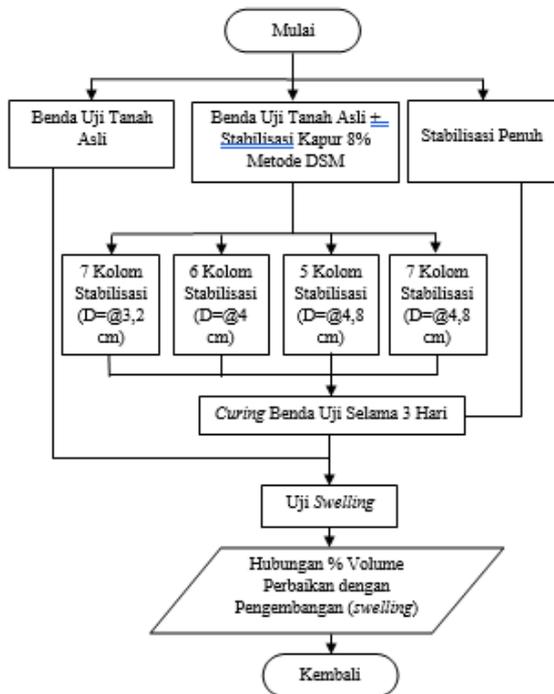
1. Diagram Alir Penelitian



2. Diagram Alir Uji Pembebanan



3. Diagram Alir Uji Pengembangan



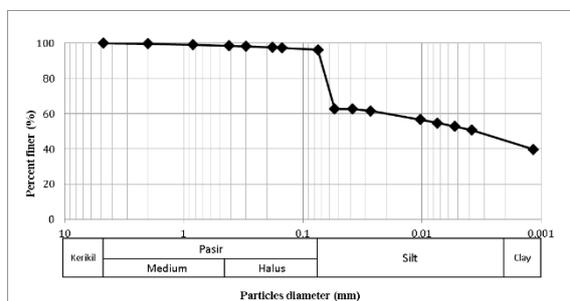
Hasil dan Pembahasan

Penelitian Pendahuluan

Pada penelitian ini, diperoleh data seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Sifat Uji Fisik Tanah

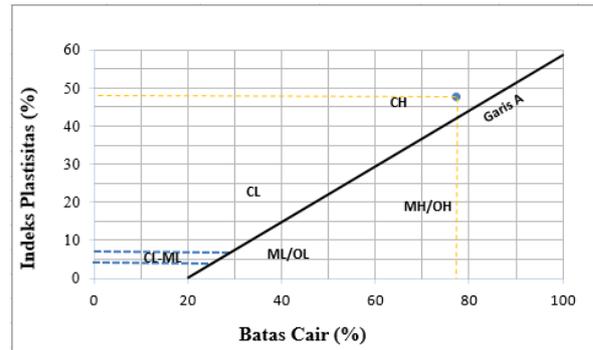
Jenis Pengujian	Satuan	Nilai
Kadar Air (wc)	%	44,96
Berat Volume	gr/cm ³	1,69
Specific Gravity (Gs)	-	2,52
Batas Cair (LL)	%	77,05
Batas Plastis (PL)	%	29,84
Indeks Plastisitas (PI)	%	47,21
Batas Susut (SL)	%	8,3



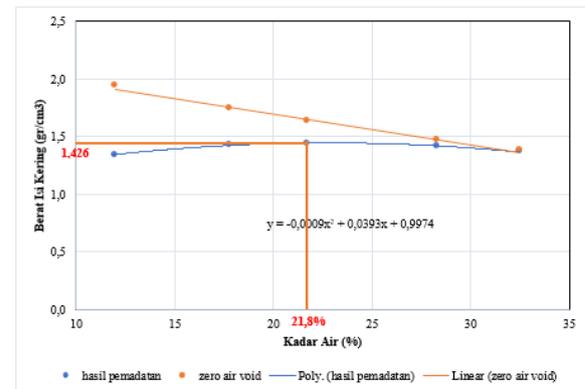
Gambar 3. Gradasi Butiran Hasil Uji Saringan dan Hydrometer

Setelah dilakukan analisis *grain size* dan *hydrometer*, diperoleh lolos saringan No. 200 sebesar 96,24%. Berdasarkan klasifikasi USCS masuk ke dalam tanah butir halus. Dengan nilai LL= 77,05%, PI=47,21% yang diplotkan dalam grafik klasifikasi

USCS termasuk ke dalam tanah lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi (CH).



Gambar 4. Klasifikasi USCS



Gambar 5. Hasil Uji Pemadatan

Uji Pemadatan dilakukan untuk mengetahui kadar air optimum (OMC) pada kondisi berat isi maksimum (γ_d maks). Berdasarkan hasil pengujian diperoleh kadar air optimum sebesar 21,8%

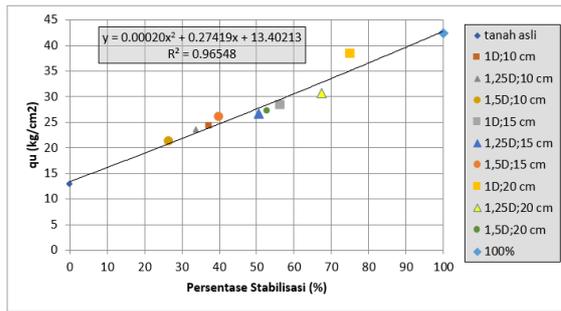
Analisis Daya Dukung Tanah

Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Hasil pengujian pembeban berupa daya dukung, dan hubungannya terhadap persentase volume perbaikan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi

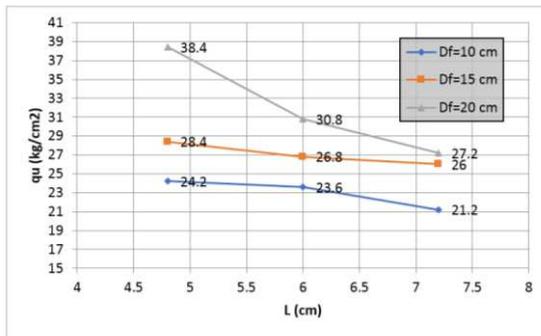
Jenis Benda Uji	Variabel		Persentase Stabilisasi (%)	P _u (kg)	q _u (kg/cm ²)
	Jarak Kolom (cm)	Kedalaman Kolom (cm)			
Tanah Asli	-	-	0	325	13
Tanah Asli + Stabilisasi Penuh	4,8	10	37,4	605	24,2
	6	10	33,7	590	23,6
	7,2	10	26,5	530	21,2
	4,8	15	56,2	710	28,4
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	6	15	50,5	670	26,8
	7,2	15	39,8	650	26
	4,8	20	74,9	960	38,4
	6	20	67,4	770	30,8
	7,2	20	53,1	680	27,2
	4,8	20	74,9	960	38,4



Gambar 6. Hubungan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi

Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Jarak Kolom (L) terhadap Kedalaman Kolom (Df)

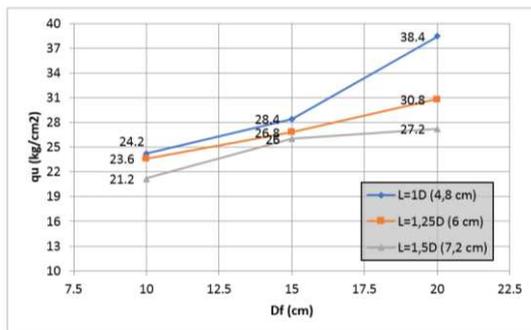
Dari hasil analisis menunjukkan bahwa jarak kolom (L) pada stabilisasi DSM memiliki pengaruh terhadap daya dukung. Hubungan nilai daya dukung dengan variasi jarak pada kedalaman kolom 10, 15, dan 20 cm ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hubungan Daya Dukung dan Variasi Jarak Kolom

Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Kedalaman Kolom (Df) terhadap Jarak Kolom (L)

Hubungan nilai daya dukung dengan variasi kedalaman pada jarak kolom 4,8 cm (1D); 6 cm (1,25D); dan 7,2 (1,5D) cm ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan Daya Dukung dan Variasi Kedalaman Kolom

Hasil Uji Pembebanan Tanah yang Distabilisasi dengan DSM Menggunakan Tangen Intersection Method

Tangen intersection method merupakan salah satu metoda yang digunakan untuk menentukan daya dukung dan penurunan yang terjadi. Penurunan pondasi ditentukan dengan garis tangensial yang ditarik dari atas dan yang lainnya ditarik dari sisi bawah pada kurva seingga akan berpotongan. Perpotongan titik dimana garis vertikal tersebut menyentuh kurva adalah daya dukung dan penurunan yang terjadi (Yrautmann dan Kulhawy, 1988).

Tabel 5. Nilai Daya Dukung TIM dengan Memperhitungkan FS

Jenis Benda Uji	Variabel		q _u (kg/cm ²)	q _u * (kg/cm ²)
	Jarak Kolom (cm)	Kedalaman Kolom (cm)		
Tanah Asli	-	-	5,4	3,86
Tanah Asli + Stabilisasi Penuh	1D = 4,8	10	13,12	9,37
		15	17,08	12,20
		20	24,10	17,21
	1,25D = 6	10	9,57	6,84
		15	16,01	11,44
		20	20,79	14,85
1,5D = 7,2	10	8,02	5,73	
	15	15,11	10,79	
	20	18,88	13,49	

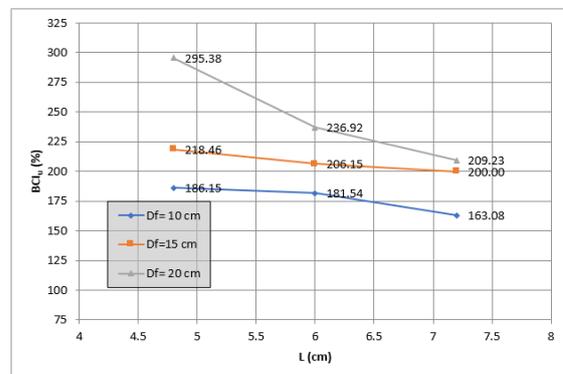
Analisis Bearing Capacity Improvement

Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) digunakan untuk mengetahui kenaikan nilai daya dukung tanah setelah dilakukan usaha perbaikan, penelitian ini melakukan stabilisasi dengan *deep soil mixing* (DSM). BCI diperoleh dari perbandingan nilai daya dukung setelah perbaikan dan nilai daya dukung sebelum perbaikan.

Analisis BCI_u pada Variasi Jarak Kolom (L)

Tabel 6. Nilai BCI_u pada Variasi Jarak Kolom

Df (cm)	L (cm)	q _{ui} (kg/cm ²)	q _u (kg/cm ²)	BCI _u (%)
10	4,8	24,2	13	186,15
	6	23,6	13	181,54
	7,2	21,2	13	163,08
15	4,8	28,4	13	218,46
	6	26,8	13	206,15
	7,2	26	13	200,00
20	4,8	38,4	13	295,38
	6	30,8	13	236,92
	7,2	27,2	13	209,23



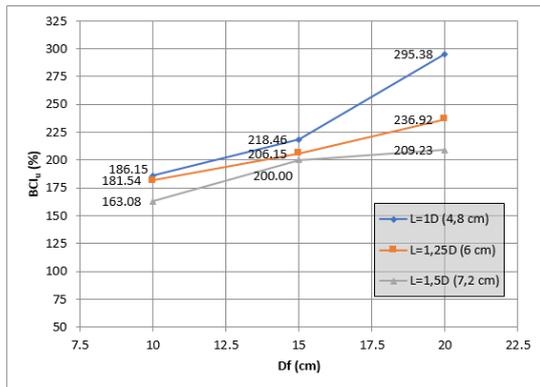
Gambar 9. Hubungan Variasi Jarak Kolom dengan Nilai BCI_u terhadap Variasi Kedalaman Kolom

Dari Tabel 6 terlihat bahwa variasi jarak pada perbaikan tanah ekspansif menggunakan stabilisasi DSM mengakibatkan peningkatan nilai daya dukung tanah, hal ini terlihat dari nilai daya dukung setelah perbaikan (q_{ul}) yang lebih tinggi daripada nilai daya dukung tanpa perbaikan (q_u). Berdasarkan Gambar 9 dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai daya dukung (BCI_u) terbesar terdapat pada jarak kolom yang paling dekat yaitu 4,8 cm (1D) lalu diikuti oleh jarak kolom 6 cm (1,25D), dan 7,2 cm (1,5D).

Analisis BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)

Tabel 7. Nilai BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom

L (cm)	Df (cm)	q_{ul} (kg/cm ²)	q_u (kg/cm ²)	BCI_u (%)
4,8	10	24,2	13	186,15
	15	28,4	13	218,46
	20	38,4	13	295,38
6	10	23,6	13	181,54
	15	26,8	13	206,15
	20	30,8	13	236,92
7,2	10	21,2	13	163,08
	15	26	13	200,00
	20	27,2	13	209,23



Gambar 10. Hubungan Variasi Kedalaman Kolom dengan Nilai BCI_u terhadap Variasi Jarak Kolom

Dari Tabel 7 terlihat bahwa variasi kedalaman pada perbaikan tanah ekspansif dengan stabilisasi DSM mengakibatkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah. Hal ini terlihat dari nilai daya dukung setelah perbaikan (q_{ul}) yang lebih tinggi daripada nilai daya dukung tanpa perbaikan (q_u). Berdasarkan Gambar 10 dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai daya dukung (BCI_u) terbesar terdapat pada kedalaman kolom yang paling besar yaitu 20 cm

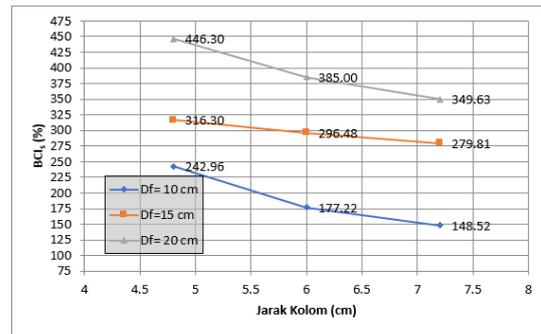
Analisis BCI_s pada Daya Dukung TIM (q_s)

Analisis ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi peningkatan BCI_s menggunakan metode *tangent intersection* ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Nilai BCI_s Pada Daya Dukung TIM (q_s)

Kedalaman Kolom (Df) cm	Jarak Kolom (L) cm	q_{sl} (kg/cm ²)	q_p (kg/cm ²)	BCI_s (%)
10	4,8	13,12	5,4	242,96
	6	9,57	5,4	177,22
	7,2	8,02	5,4	148,52
15	4,8	17,08	5,4	316,30
	6	16,01	5,4	296,48
	7,2	15,11	5,4	279,81
20	4,8	24,10	5,4	446,30
	6	20,79	5,4	385,00
	7,2	18,88	5,4	349,63

Analisis BCI_s pada Variasi Jarak Kolom



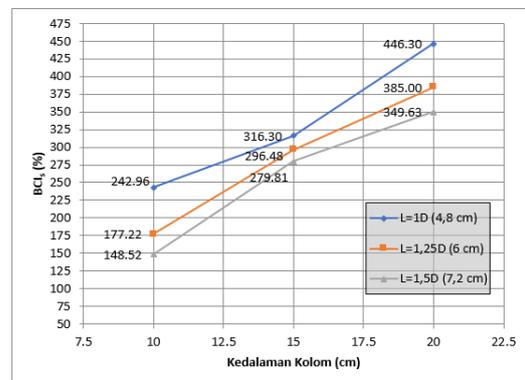
Gambar 11. Hubungan Variasi Jarak Kolom dengan BCI_s terhadap Variasi Kedalaman Kolom

Dari Gambar 11 terlihat bahwa variasi jarak pada perbaikan tanah ekspansif dengan stabilisasi DSM mengakibatkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah, hal ini terlihat dari nilai daya dukung TIM setelah perbaikan (q_{sl}) yang lebih tinggi daripada nilai daya dukung TIM tanpa perbaikan (q_s) atau dengan kata lain BCI_s lebih dari 100%.

Analisis BCI_s pada Variasi Kedalaman Kolom

Gambar 12. Hubungan Variasi Kedalaman Kolom dengan BCI_s terhadap Variasi Jarak Kolom

Berdasarkan Gambar 12 diperoleh BCI_s



tertinggi terjadi pada konfigurasi kedalaman yang paling dalam yaitu Df = 20 cm.

Pemeriksaan Daya Dukung Izin

Daya dukung izin menjadi daya dukung minimal yang dijadikan acuan untuk konfigurasi

DSM apakah bisa diaplikasikan di lapangan sesuai dengan daya dukung yang dibutuhkan atau tidak. Berdasarkan peraturan Departemen Pekerjaan Umum tentang Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan, pada Sub Bab 7.5. untuk kelas jalan 1 menggunakan faktor keamanan (FS) = 1,4. Hasil rekapitulasi dari uji daya dukung ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Nilai Daya Dukung Tanah Perbaikan

Benda Uji	Variabel	qu	q
		kg/cm ²	(qu/FS) kg/cm ²
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	-	24,2	17,28
	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	23,6	16,85
	L = 7,2 cm ; Df = 10 cm	21,2	15,14
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	28,4	20,28
	L = 6 cm ; Df = 15 cm	26,8	19,14
	L = 7,2 cm ; Df = 15 cm	26	18,57
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	38,4	27,42
	L = 6 cm ; Df = 20 cm	30,8	22
	L = 7,2 cm ; Df = 20 cm	27,2	19,42

Daya dukung izin yang digunakan untuk kebutuhan jalan raya, didapatkan dari pembebanan beban "T" dan beban lapisan perkerasan. Daya dukung akibat beban "T" yang didapat sebesar 2,5215 kg/cm² dari beban kendaraan truk yang mempunyai beban roda ganda sebesar 10 ton. Dengan menganggap 2,5215 kg/cm² sebagai daya dukung ijin untuk jalan raya, maka semua konfigurasi model DSM memenuhi batas dari daya dukung izin tersebut.

Daya Dukung Izin untuk Lapisan Tanah Dasar (Subgrade)

Kriteria desain untuk nilai CBR dengan klasifikasi tanah CH memiliki nilai ≤15%. Pada analisis ini diambil nilai CBR tanah sebesar 5%. Nilai CBR tersebut dikonversi menjadi kg/cm², sehingga menghasilkan nilai daya dukung izin sebesar 2,319 kg/cm². Berdasarkan ketentuan tersebut maka didapat hasil sebagai berikut.

Tabel 10. Daya Dukung Izin untuk Lapisan Tanah Dasar (Subgrade)

Jenis	Variabel	qu (kg/cm ²)	q (qu/FS)	Daya Dukung Izin Lapisan Subgrade
Tanah Asli	-	13,0	9,286	Memenuhi
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 4,8 cm; Df = 10 cm	24,2	17,28	Memenuhi
	L = 6 cm; Df = 10 cm	23,6	16,85	Memenuhi
	L = 7,2 cm; Df = 10 cm	21,2	15,14	Memenuhi
	L = 4,8 cm; Df = 15 cm	28,4	20,28	Memenuhi
	L = 6 cm; Df = 15 cm	26,8	19,14	Memenuhi
	L = 7,2 cm; Df = 15 cm	26	18,57	Memenuhi
	L = 4,8 cm; Df = 20 cm	38,4	27,42	Memenuhi
	L = 6 cm; Df = 20 cm	30,8	22	Memenuhi
	L = 7,2 cm; Df = 20 cm	27,2	19,42	Memenuhi

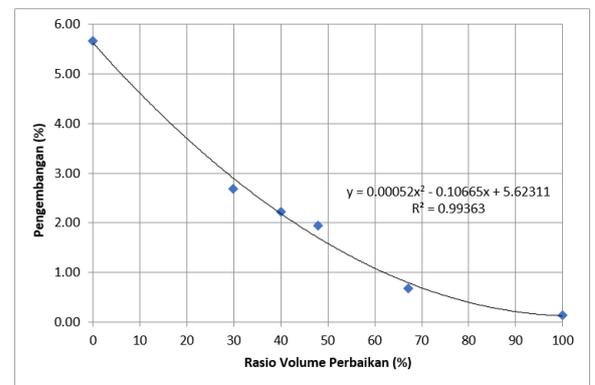
Berdasarkan tabel tersebut, tanah asli dan tanah stabilisasi dengan kolom DSM memenuhi daya dukung izin untuk digunakan sebagai lapisan tanah dasar (subgrade).

Perubahan Pengembangan (Swelling)

Hubungan Antara Volume Tanah Perbaikan dengan Pengembangan

Tabel 11. Rasio Volume Perbaikan terhadap Nilai Pengembangan

Benda Uji	Volume Benda Uji (V)	Volume DSM (V _i)	Rasio Volume Perbaikan (V _i /V)	Pengembangan (Swelling)
	cm ³	cm ³	%	%
Tanah Asli	2075,61	0,00	0	5,66
DSM dengan 7 kolom (D=3,2 cm)	2075,61	619,27	29,84	2,69
DSM dengan 6 kolom (D=4 cm)	2075,61	829,38	39,96	2,23
DSM dengan 5 kolom (D=4,8 cm)	2075,61	995,26	47,95	1,94
DSM dengan 7 kolom (D=4,8 cm)	2075,61	1393,36	67,13	0,67
Tanah Stabilisasi Penuh	2075,61	2075,61	100,00	0,14



Gambar 13. Nilai Pengembangan terhadap Rasio Volume Perbaikan

Berdasarkan Gambar 13, nilai pengembangan tanah (swelling) menurun seiring bertambahnya persentase perbaikan dengan nilai pengembangan terendah adalah sebesar 0,14% pada persentase perbaikan 100%. Hal ini terjadi karena adanya reaksi hidrasi yang ditimbulkan oleh kapur yang semakin memperkuat ikatan antar butiran tanah. Grafik pada Gambar 13 selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui nilai pengembangan masing-masing benda uji deep soil mixing (DSM) yang dimodelkan didalam box.

Penurunan Pengembangan Setelah Perbaikan dengan DSM

Tabel 12. Nilai Pengembangan Benda Uji terhadap Rasio Volume Perbaikan

Jenis Benda Uji	Kolom DSM		Rasio Volume Perbaikan (%)	Swelling (%)	Penurunan Swelling (%)
	Jarak (cm)	Kedalaman (cm)			
Tanah Asli	-	-	0	5,66	
Tanah Asli + Stabilisasi 100%	-	-	100,00	0,14	97,59
	4,8	10	37,45	2,36	58,32
	6	10	33,69	2,62	53,69
	7,2	10	26,54	3,16	44,18
	4,8	15	56,17	1,27	77,50
	6	15	50,53	1,56	72,40
	7,2	15	39,81	2,20	61,10
	4,8	20	74,89	0,55	9024
	6	20	67,37	0,80	85,90
	7,2	20	53,08	1,43	74,78

Dari Tabel 12 dapat dilihat bahwa pada tanah kolom stabilisasi DSM, nilai *swelling* terendah yaitu 0,55% pada jarak kolom 4,8 cm (1D) dan kedalaman kolom 20 cm yang merupakan benda uji DSM dengan persentase perbaikan paling besar

Pengembangan Izin pada Konstruksi Perkerasan Jalan

Menurut Madhyannapu & Puppala (2014), 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 diasumsikan rata-rata kedalaman zona aktif di Kabupaten Bojonegoro adalah 1,5 m, maka persentase pengangkatan tanah (*heave*) yang disarankan adalah 0,8% untuk konstruksi perkerasan lentur dan 1,2% untuk konstruksi perkerasan kaku.

Dengan menganggap 0,8% sebagai batas maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement*, maka konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi jarak (L) = 4,8 cm dan (L) = 6 cm dengan kedalaman kolom (Df) = 20 cm.

Sedangkan untuk struktur *rigid pavement*, konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi jarak (L) = 4,8 cm dan (L) = 6 cm dengan kedalaman kolom (Df) = 20 cm.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian yang telah dilakukan mengenai perubahan perilaku tanah ekspansif di Bojonegoro akibat stabilisasi dengan metode *deep soil mixing* (DSM) tipe *panels* diameter 4,8 cm, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perilaku tanah ekspansif dari Bojonegoro mengalami perubahan yang signifikan setelah perbaikan. Hal ini terlihat dari nilai daya dukung yang awalnya 13 kg/cm² menjadi 42,4 kg/cm² setelah dilakukan perbaikan, atau meningkat sebesar 326,15%. Nilai *swelling* setelah dilakukan perbaikan menunjukkan nilai sebesar 0,14%, artinya mengurangi 97,59% dari nilai *swelling* tanah asli.
2. Daya dukung setelah dilakukan menggunakan metode *deep soil mixing* terlihat mengalami peningkatan. Variasi kedalaman kolom memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap peningkatan daya dukung tanah dibandingkan dengan variasi jarak kolom. Apabila jarak antar kolom diperkecil dan panjang kolom DSM semakin dalam, maka nilai daya dukung semakin meningkat. Daya dukung terbesar mencapai 38,4 kg/cm² terjadi pada variasi kedalaman 20 cm dengan jarak antar kolom 4,8 cm (1D).
3. Nilai *swelling* tanah ekspansif setelah dilakukan perbaikan menggunakan metode *deep soil*

mixing mengalami perubahan. Semakin besar rasio perbaikan tanah yang dilakukan, maka nilai *swelling* semakin kecil. Nilai pengembangan (*swelling*) pada variasi kedalaman 20 cm dengan jarak antar kolom 4,8 cm (1D) merupakan yang terkecil dengan nilai 0,55%.

4. Variasi jarak dan kedalaman kolom dengan pola *panels* berdiameter 4,8 cm memberikan nilai daya dukung yang memenuhi untuk struktur perkerasan jalan raya, karena memiliki daya dukung lebih besar dibandingkan dengan daya dukung izin sebesar 2,5215 kg/cm².
5. Berdasarkan analisis pengembangan, jarak (L) = 4,8 cm dan (L) = 6 cm dengan kedalaman kolom (Df) = 20 cm memberikan nilai *swelling* izin untuk struktur perkerasan jalan raya yaitu sebesar 0,55% dan 0,8%.

SARAN

Setelah melakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil penelitian ini, perlu dilakukan variasi percobaan lain sehingga dapat melengkapi hasil dari penelitian yang sudah dilakukan. Saran-saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Untuk pemodelan benda uji perlu menggunakan *box* yang terbuat dari baja agar memiliki kekuatan yang lebih kuat dan tidak mudah pecah dibandingkan menggunakan *box* yang terbuat dari akrilik.
2. Dalam pencampuran bahan stabilisasi, perlu digunakan alat pengaduk khusus sehingga pencampuran dapat distandarisasi guna menghindari ketidakseragaman dalam perlakuan dan untuk mendapatkan hasil campuran yang lebih homogen.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai kepadatan lapisan pasir di atas dan di bawah lapisan tanah dasar agar diperoleh data yang mendekati kondisi di lapangan.

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.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum
- EuroSoilStab. 2002. *Design Guide Soft Soil Stabilization*. Project No. BE 96 - 3177, Ministry of Transport Public Works and Management.
- 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.
- 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.
- Madhyannapu, 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.
- 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.