

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIXING* (DSM)
10% KAPUR DIAMETER 5 CM BERPOLA *TRIANGULAR* TERHADAP
DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

Rendy Hartama Kosasih, Harimurti, Yulvi Zaika
Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono No. 167, Malang 65145, Indonesia
Email: rendyhartama33@gmail.com

ABSTRAK

Tanah ekspansif merupakan tanah yang memiliki sifat kembang susut yang tinggi, tanah jenis ini dapat dijumpai di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro. Untuk mengurangi sifat kembang susut tanah ekspansif yang tinggi dan untuk meningkatkan daya dukung tanah tersebut, maka dilakukan penelitian mengenai stabilisasi menggunakan metode Deep Soil Mixing (DSM) dengan diameter kolom 5 cm berpola *triangular* dan penambahan bahan *additive* kapur 10% pada media *box* ukuran 30x30x30 cm³. Digunakan bahan *additive* kapur karena dengan adanya penambahan kapur diharapkan dapat meningkatkan daya dukung tanah ekspansif dan mengurangi sifat kembang susutnya. Berdasarkan hasil pengolahan data, terlihat bahwa semakin dekat jarak DSM dan semakin panjang DSM akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah. Daya dukung terbesar didapatkan pada jarak DSM (L) 1D = 5 cm dengan panjang DSM (Df) 20 cm, yaitu sebesar 19,28 kg/cm² dengan penurunan 5,5 mm, serta berdasarkan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) didapatkan nilai BCI sebesar 274%. Selain itu, dapat mengurangi potensi pengembangan (*swelling*) dari 4,13% (tanah asli) hingga 0,78% (tanah stabilisasi) pada rasio volume DSM 91,08%.

Kata Kunci: variasi jarak, variasi panjang, *Deep Soil Mixing*, *triangular*, kapur, tanah ekspansif, daya dukung, *swelling*.

ABSTRACT

Expansive clay is soil that has a high shrinkage and swell properties, this type of soil can be found in the District Ngasem, Bojonegoro. To reduce the nature of high shrinkage and swell of expansive soil and increase the bearing capacity of the soil, it is needed a research on stabilization using Deep Soil Mixing (DSM) with a column diameter of 5 cm and triangular configuration using additive materials 10% lime in the media box of 30x30x30 cm³. The addition of lime is expected to increase the bearing capacity of expansive soil and reducing the shrinkage and swell potential. Based on the results of data processing, the closer DSM spacing and the longer DSM length will provide a greater effect on bearing capacity of the soil. The bearing capacity is obtained at a distance of DSM (L) 1D = 5 cm and at a length of DSM (Df) 20 cm, which amounted to 19,28 kg/cm² with a settlement of 5,5 mm, and based on the analysis of Bearing Capacity Improvement (BCI), it is obtained a BCI value of 274%. In addition, it can reduce the potential of expansion (swelling) from 4,13% (unstabilized soil) to 0,78% (stabilized soil) at DSM volume ratio of 91,08%.

Keywords: spacing variation, length variation, *Deep Soil Mixing*, *triangular*, lime, expansive soil, bearing capacity, *swelling*.

PENDAHULUAN

Tanah merupakan media yang utama dalam suatu pembangunan konstruksi gedung maupun konstruksi jalan. Jenis konstruksi yang akan dibangun di atas permukaan tanah harus disesuaikan dengan kondisi atau keadaan tanah tersebut. Kondisi tanah di setiap tempat berbeda-beda, yang perlu diwaspadai adalah jenis tanah lempung ekspansif. Tanah ekspansif merupakan tanah yang mempunyai sifat kembang susut yang tinggi, hal ini disebabkan oleh adanya mineral-mineral tanah yang dapat menyerap air dan mengembang secara ekstrem serta dapat menyusut secara drastis pada saat musim kemarau. Tanah jenis ini dapat dijumpai di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.

Permasalahan pada tanah lempung ekspansif dapat diatasi dengan cara mengurangi sifat kembang susutnya, di antaranya dapat dilakukan dengan menggunakan metode stabilitas tanah mekanik dan kimiawi. Pada penelitian ini digunakan metode stabilitas kimiawi, yaitu dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah tersebut. Fungsinya adalah untuk mengurangi sifat kembang susut tanah dan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Pada penelitian ini digunakan kapur sebagai bahan *additive* pada tanah lempung ekspansif. Mekanisme dasar stabilisasi tanah dengan penambahan kapur adalah adanya ikatan ion Ca, Mg, dan Na yang dapat menyebabkan bertambahnya ikatan antara partikel tanah, sehingga terjadi proses sementasi (antara kapur dan tanah serta meningkatkan kekuatan geser atau daya dukung tanah). Sebagai contoh penelitian yang dilakukan oleh Warsiti (2009) tentang perbaikan tanah lempung di daerah Sendang Mulyo yang dicampur dengan 10% kapur terbukti

mampu meningkatkan nilai CBR hingga 22,1% dan menurunkan nilai *swelling* hingga 1,331%.

Apabila kedalaman tanah yang akan diperbaiki lebih dari 1,5 meter maka sebaiknya digunakan metode pencampuran *Deep Soil Mixing* (DSM), seperti pada tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur dengan kedalaman sekitar 1- 3 meter. *Deep Soil Mixing* (DSM) merupakan teknologi yang digunakan untuk stabilisasi tanah dengan cara mencampur tanah dengan bahan *additive* pada lokasi tanah yang ingin diperbaiki kualitasnya dengan panjang yang diinginkan menggunakan bantuan *crane* yang dilengkapi dengan alat hidrolis dan *auger*. Metode pelaksanaan stabilisasi tanah jenis ini masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Walaupun dalam pelaksanaannya metode ini lebih sederhana dibanding dengan metode pencampuran permukaan, metode *Deep Soil Mixing* (DSM) membutuhkan alat yang lebih canggih karena dalam waktu yang bersamaan alat harus dapat mengebor dan mencampur tanah dengan bahan *additive* secara rata.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

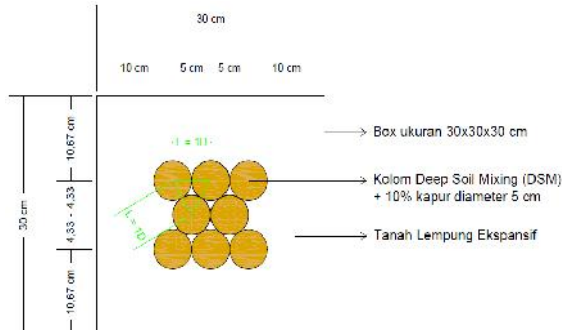
1. Untuk mengetahui adanya pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 5 cm berpola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 5 cm berpola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.

- Untuk mengetahui pengaruh potensi pengembangan (*swelling*) terhadap persentase tanah yang telah distabilisasi.

METODE PENELITIAN

Untuk mendukung penelitian ini, dilakukan penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang akan diuji adalah jenis tanah lempung ekspansif. Penelitian pendahuluan terdiri dari beberapa macam pengujian, yaitu:

- Pemeriksaan *specific gravity* (ASTM 1992 D 854-92);
- Pemeriksaan batas cair, batas plastis indeks plastisitas tanah (ASTM 1984 D 4318-84);
- Pemeriksaan batas susut (ASTM D 427-04);
- Pengujian klasifikasi tanah metode USCS (ASTM 1992 D 2487-92);
- Pengujian proktor standar (ASTM D-698 (Metode B)).



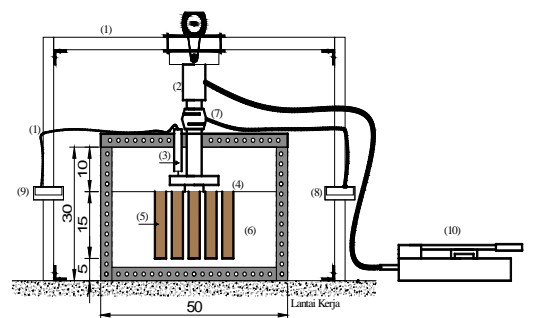
Gambar 1 Pemodelan DSM pola *triangular*

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan dongkrak hidrolik (*hydraulic jack*). Untuk mengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton. Untuk mengukur besarnya penurunan tanah yang terjadi akibat uji pembebanan, digunakan *dial LVDT*.

Proses uji beban diawali dengan persiapan alat uji beban dengan meletakkan *frame* uji beban tepat di tengah

box sampel tanah agar model pondasi berada tepat di tengah benda uji. Setelah *frame* dipasang dilanjutkan dengan meletakkan alat pemberat pada *frame* dengan tujuan agar *frame* uji beban tidak terangkat ketika uji beban berlangsung. Selanjutnya dilakukan pemasangan dongkrak hidrolik, *load cell*, *piston* dan pelat model pondasi.

Pada uji beban vertikal, ujung atas dari dongkrak hidrolik dihubungkan dengan *frame* pembebanan yang terbuat dari baja profil. Sedangkan ujung bawah dongkrak hidrolik dihubungkan pada *load cell* dilanjutkan dengan *piston* untuk meneruskan beban pada pelat baja. Pelat baja berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari *piston* menjadi beban merata yang digunakan sebagai permodelan pondasi. Letak dongkrak hidrolik diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada 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 Hidrolik | 6. Sampel Lempung Ekspansif | 10. Pompa Hidrolik |
| 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 tanah stabilisasi variasi jarak dan panjang DSM:

Tabel 1 Rancangan variasi jarak dan panjang kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak DSM (cm)	Panjang DSM (cm)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (kg)	Daya Dukung (kg/cm ²)	
Tanah Asli	-	2B = 10 cm	-	-	-	
		1D = 5 cm				3B = 15 cm
		4B = 20 cm				
Tanah + 10% Kapur	1,25D = 6,25 cm	2B = 10 cm	-	-	-	
		3B = 15 cm				
		4B = 20 cm				
	1,5D = 7,5 cm	2B = 10 cm	-	-	-	
		3B = 15 cm				
		4B = 20 cm				

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

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

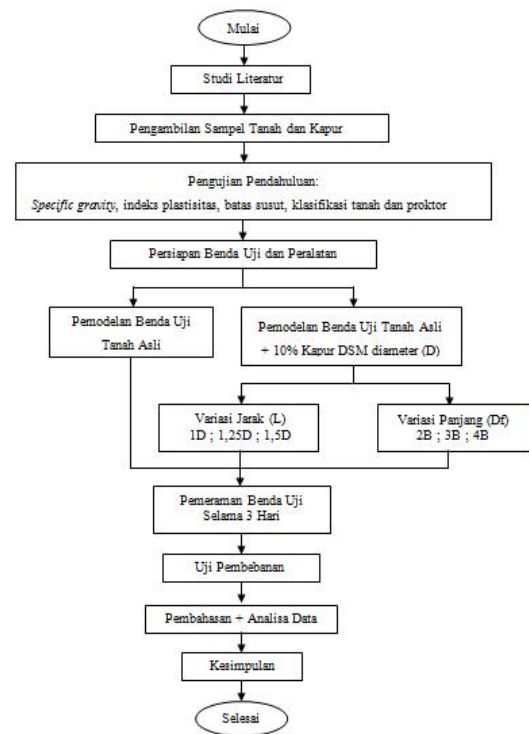
Hasil analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) kemudian disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 2 *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk variasi jarak (L)

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		1D = 5 cm			
2	2B = 10 cm	1,25D = 6,25 cm			
3		1,5D = 7,5 cm			
4		1D = 5 cm			
5	3B = 15 cm	1,25D = 6,25 cm			
6		1,5D = 7,5 cm			
7		1D = 5 cm			
8	4B = 20 cm	1,25D = 6,25 cm			
9		1,5D = 7,5 cm			

Tabel 3 *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk variasi panjang (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		2B = 10 cm			
2	1D = 5 cm	3B = 15 cm			
3		4B = 20 cm			
4		2B = 10 cm			
5	1,25D = 6,25 cm	3B = 15 cm			
6		4B = 20 cm			
7		2B = 10 cm			
8	1,5D = 7,5 cm	3B = 15 cm			
9		4B = 20 cm			



Gambar 3 Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujiian Pendahuluan

1. Pemeriksaan *Spesific Gravity* (GS)

Specific gravity (GS) merupakan pengujiian laboratorium yang dilakukan untuk mengetahui berat jenis suatu bahan yang akan digunakan sebagai sampel benda uji.

Tabel 4 Hasil pemeriksaan *spesific gravity*

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

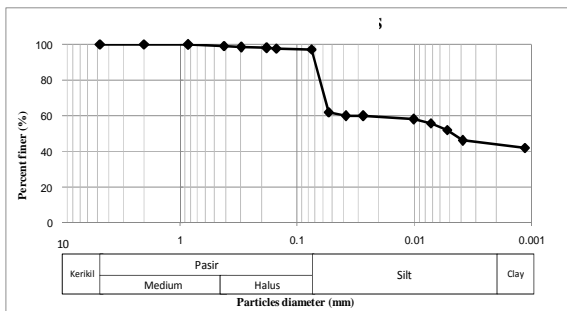
Sumber : Hasil Pengujiian dan Perhitungan

Dari hasil pemeriksaan yang telah dilakukan, didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan yaitu Gs = 2,556.

2. Klasifikasi Tanah

Pada uji klasifikasi tanah dilakukan dua jenis pengujiian. Analisis saringan (*mechanical grain size*) digunakan untuk menentukan butiran kasar dan butiran halus yang tertahan pada saringan no. 200. Analisis hidrometer digunakan untuk

mengetahui distribusi ukuran butiran 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 distribusi 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 ini 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

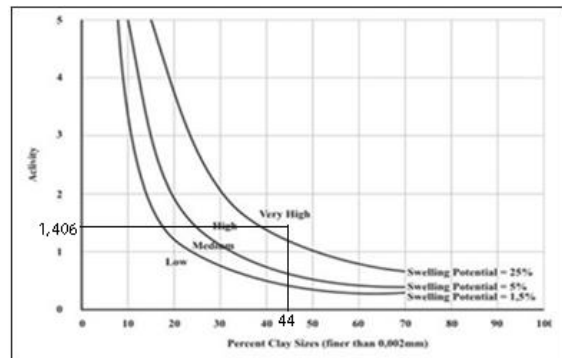
Sumber: Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari hasil pemeriksaan didapatkan nilai batas cair (LL) 79,11%, batas plastis (PL) 31,30%, batas susut (SL) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%.

4. Sifat Ekspansifitas Tanah

Nilai-nilai dari batas Atteberg digunakan untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah lempung. Didapatkan nilai aktivitas sebesar 1,406 dan tanah tersebut termasuk

tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Setelah didapatkan nilai aktivitas dan persentase lolos saringan no. 200, kemudian hasil dapat diplotkan pada Gambar 5. Dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk tanah dengan potensi pengembangan sangat tinggi.



Gambar 5 Grafik klasifikasi potensi mengembang

5. Penentuan Kadar Air Optimum

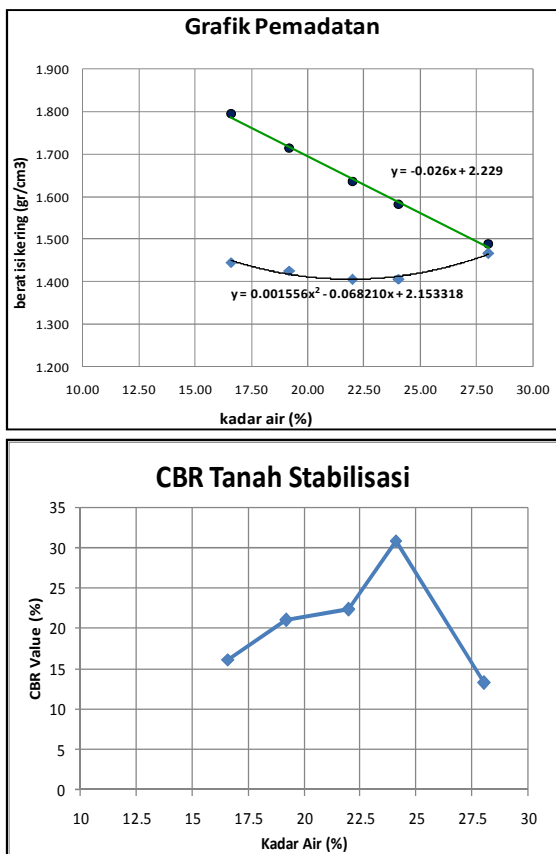
Penentuan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah asli, didasarkan pada hasil uji pemadatan standar yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015) didapatkan hasil seperti pada Gambar 6.



Gambar 6 Hasil pemadatan tanah asli

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa besarnya kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum ($\rho_{d maks}$) 1,409 gr/cm³.

Sedangkan penentuan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah stabilisasi kapur 10% melalui uji pemadatan standar (yang dilakukan sebanyak 3 kali) tidak didapatkan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimumnya (γ_d maks), seperti terlihat pada Gambar 7. 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 (γ_{dmaks}) 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 7.



Gambar 7 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. Kepadatan Tanah Model

Pengujian ini menggunakan 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/cm^3 (Kurniawan, 2015).

Tabel 6 Uji *density* pada tanah model

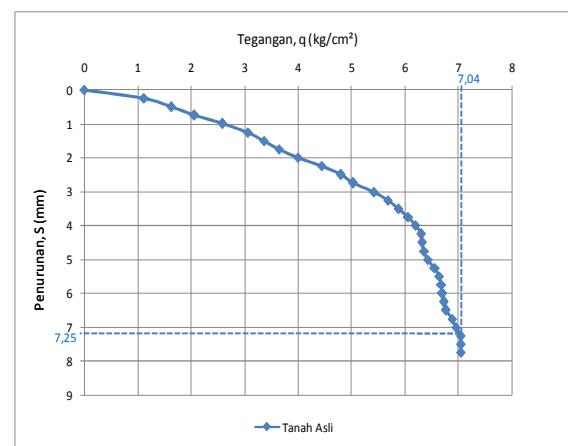
No. Ring		I	II	III	IV
Kadar air, (w)	%	27.88	27.43	27.95	28.35
Berat isi tanah (t)	gr/cm^3	1.656	1.600	1.649	1.637
Berat isi kering, (d)	gr/cm^3	1.295	1.255	1.289	1.275
Rata-rata berat isi tanah,	gr/cm^3	1.635			
Rata-rata berat isi kering,	gr/cm^3	1.279			

Sumber : Kurniawan (2015)

Hasil Pengujian

1. 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/cm^2 . Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8 Hubungan tegangan dan penurunan tanah asli

2. Uji Pembebanan Tanah Stabilisasi Deep Soil Mixing (DSM)

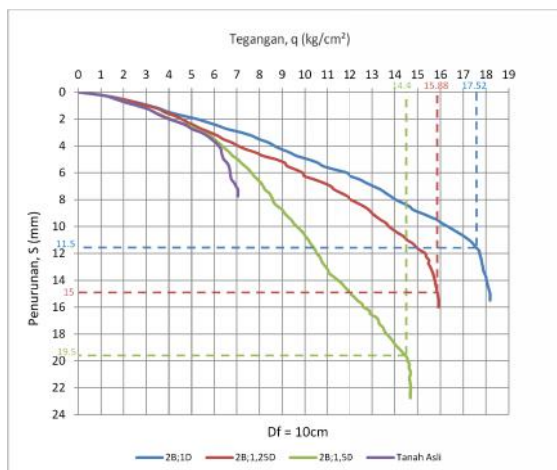
Uji pembebanan pada tanah stabilisasi dilakukan berdasarkan variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df) DSM pola *triangular* dengan diameter kolom 5 cm. Kemudian dapat diketahui pengaruh jarak dan panjang stabilisasi DSM.

Tabel 7 Beban dan penurunan hasil pengujian berdasarkan variasi jarak DSM

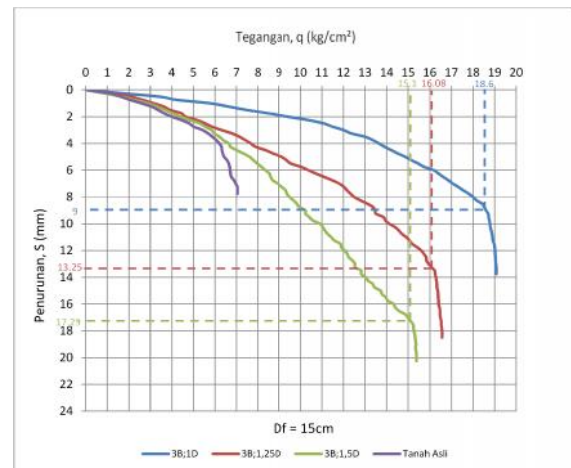
No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1	2B = 10 cm	1D = 5 cm	11.5	438
2		1,25D = 6,25 cm	12	383.5
3		1,5D = 7,5 cm	19.5	360
4	3B = 15 cm	1D = 5 cm	9	465
5		1,25D = 6,25 cm	13.25	402
6		1,5D = 7,5 cm	17.25	377.5
7	4B = 20 cm	1D = 5 cm	5.5	482
8		1,25D = 6,25 cm	10.5	416
9		1,5D = 7,5 cm	16	397

Tabel 8 Beban dan penurunan pengujian berdasarkan variasi panjang DSM

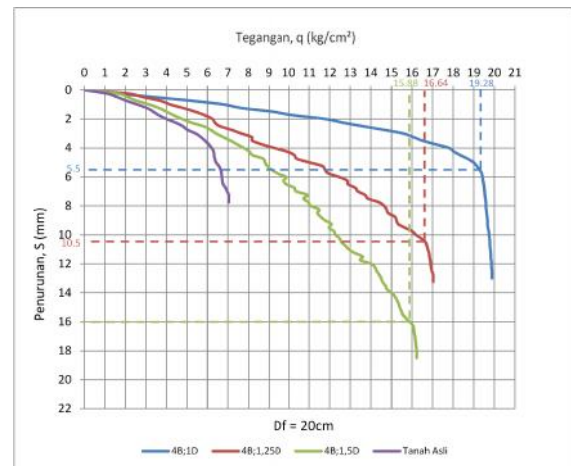
No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1	1D = 5 cm	2B = 10 cm	11.5	438
2		3B = 15 cm	9	465
3		4B = 20 cm	5.5	482
4	1,25D = 6,25 cm	2B = 10 cm	12	383.5
5		3B = 15 cm	13.25	402
6		4B = 20 cm	10.5	416
7	1,5D = 7,5 cm	2B = 10 cm	19.5	360
8		3B = 15 cm	17.25	377.5
9		4B = 20 cm	16	397



Gambar 9 Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang 2B = 10 cm



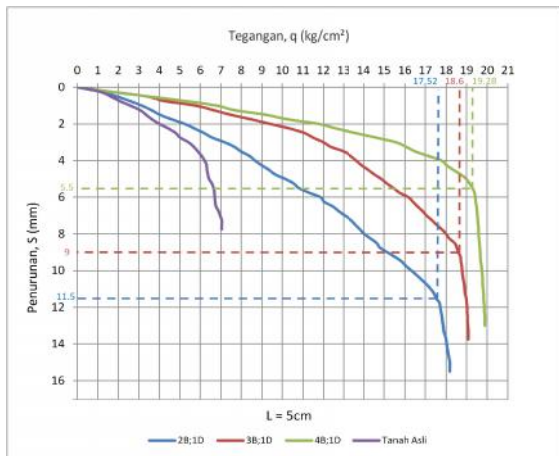
Gambar 10 Hubungan daya dukung dan penurunan pada variasi jarak dengan panjang 3B = 15 cm



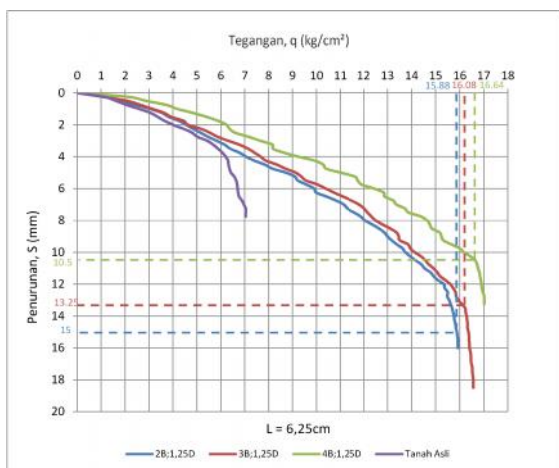
Gambar 11 Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang 4B = 20 cm

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Dari hasil tersebut terlihat bahwa jarak DSM (L) yang semakin dekat dapat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah jika dibandingkan dengan jarak DSM yang semakin jauh. Berdasarkan analisis variasi jarak, nilai daya dukung paling tinggi terjadi pada jarak DSM 1D = 5 cm pada panjang DSM 20 cm yaitu sebesar 19,28 kg/cm² dengan penurunan 5,5 cm. Pengaruh jarak DSM 5 cm dapat terjadi karena DSM dapat

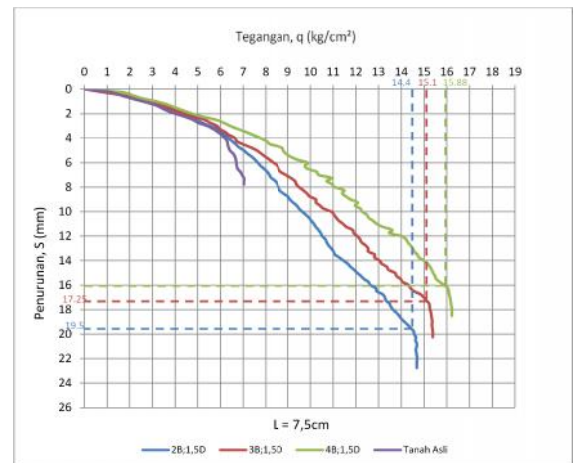
mengurangi penyebaran distribusi tegangan pada tanah asli dan ditahan oleh DSM.



Gambar 12 Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak $1D = 5$ cm



Gambar 13 Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak $1,25D = 6,25$ cm



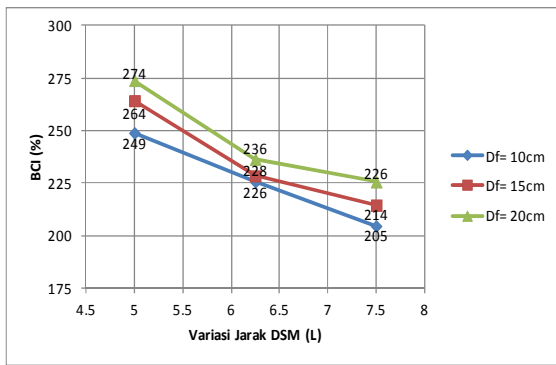
Gambar 14 Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak $1,5D = 7,5$ cm

Berdasarkan hasil analisis ketiga variasi tersebut, terlihat bahwa panjang DSM (D_f) mempunyai pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Dari hasil pengolahan data, diketahui bahwa semakin panjang DSM (D_f) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibandingkan dengan panjang DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 20 cm dan jarak DSM 5 cm yaitu sebesar $19,28 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 5,5 mm.

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

Tabel 9 Nilai BCI untuk variasi jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (D_f)	Jarak DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)
1		$1D = 5$ cm		17.52	249
2	$2B = 10$ cm	$1,25D = 6,25$ cm		15.88	226
3		$1,5D = 7,5$ cm		14.4	205
4		$1D = 5$ cm		18.6	264
5	$3B = 15$ cm	$1,25D = 6,25$ cm	7.04	16.08	228
6		$1,5D = 7,5$ cm		15.1	214
7		$1D = 5$ cm		19.28	274
8	$4B = 20$ cm	$1,25D = 6,25$ cm		16.64	236
9		$1,5D = 7,5$ cm		15.88	226

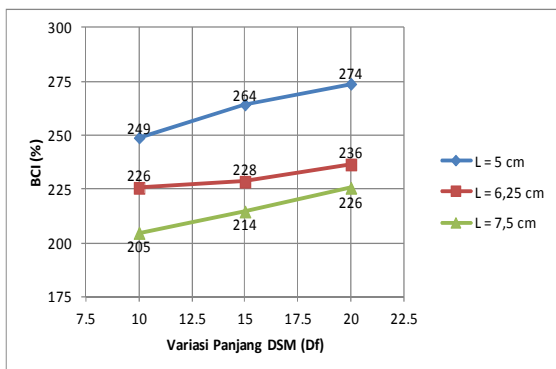


Gambar 15 Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L)

Dari Gambar 15 terlihat bahwa semakin dekat jarak DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah yang lebih besar jika dibandingkan dengan jarak DSM yang letaknya berjauhan. Jarak DSM maksimum yang dapat meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro terletak pada jarak DSM 5 cm dan dengan nilai BCI sebesar 274%.

Tabel 10 Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		2B = 10 cm		17.52	249
2	1D = 5 cm	3B = 15 cm		18.6	264
3		4B = 20 cm		19.28	274
4		2B = 10 cm		15.88	226
5	1,25D = 6,25 cm	3B = 15 cm	7.04	16.08	228
6		4B = 20 cm		16.64	236
7		2B = 10 cm		14.4	205
8	1,5D = 7,5 cm	3B = 15 cm		15.1	214
9		4B = 20 cm		15.88	226

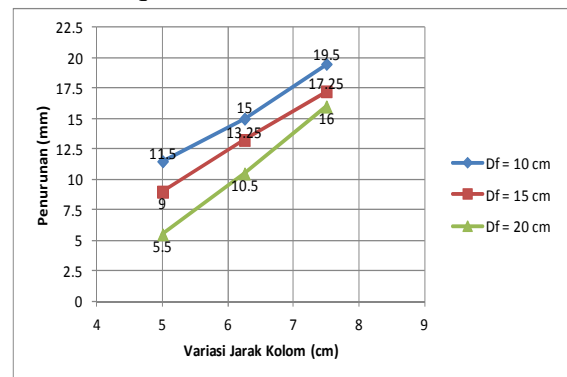


Gambar 16 Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

Dari Gambar 16 terlihat bahwa, semakin panjang DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah yang lebih besar dibandingkan dengan panjang DSM yang lebih pendek, panjang DSM maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terletak pada panjang 20 cm dengan nilai BCI sebesar 274%.

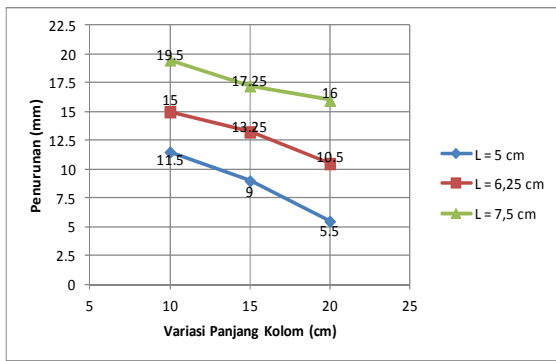
4. Analisis Penurunan Tanah

Berdasarkan dari hasil pengujian pembebanan yang telah dilakukan pada benda uji model akan diperoleh nilai pembacaan hubungan tegangan dan penurunan (*settlement*). Peninjauan dilakukan pada saat terjadi tegangan *ultimate* (q_u).



Gambar 17 Grafik hubungan penurunan saat q_u terhadap variasi jarak antar kolom

Dari Gambar 17 dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df) 2B = 10 cm, 3B = 15 cm, dan 4B = 20 cm besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, dimana besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.

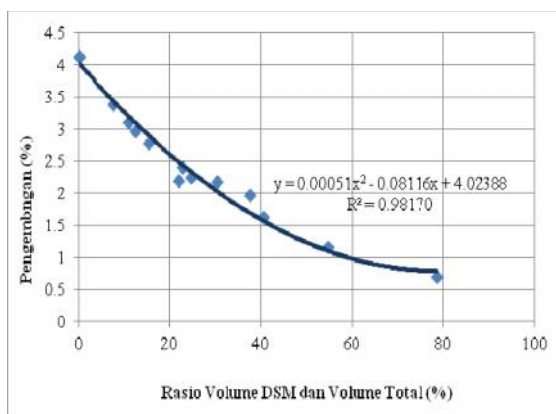


Gambar 18 Grafik hubungan penurunan saat q_u terhadap variasi panjang kolom

Dari Gambar 18 dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) $1D = 5$ cm dan $1,5D = 7,5$ cm besarnya penurunan (*settlement*) sesuai dengan hipotesa yang ada, dimana besarnya *settlement* akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya panjang kolom.

5. Analisis Pengembangan (Swelling)

Dalam penelitian ini tidak dilakukan uji pengembangan, namun pengembangan tanah dalam *box* dapat diperkirakan berdasarkan rasio volume tanah yang distabilisasi dengan DSM dalam *box*. Uji pengembangan dilakukan dalam *mold* sesuai dengan variasi persentase volume DSM dalam *mold* (Firdaus, 2016).



Gambar 19 Grafik persentase volume DSM dan volume total dengan persentase pengembangan (*swelling*) dalam *mold*

Sumber: Firdaus (2016)

Berdasarkan persamaan yang diperoleh dari grafik persentase volume tanah stabilisasi dengan persentase pengembangan (*swelling*) dalam *mold*, maka dapat dihitung persentase pengembangan (*swelling*) tanah dalam *box* dengan cara substitusi persentase stabilisasi tanah dalam *box* terhadap persamaan pada Gambar 19.

Tabel 11 Persentase volume tanah stabilisasi dan persentase pengembangan (*swelling*) dalam *box*

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi %	Swelling %	Penurunan Swelling dari tanah asli %
Tanah Asli	-	0	4.13	0
L = 1D ; Df = 2B		45.54	1.36	2.77
	L = 1,25D ; Df = 2B	26.90	2.20	1.93
Tanah Asli + Kolom	L = 1,5D ; Df = 2B	16.32	2.83	1.30
	L = 1D ; Df = 3B	68.31	0.81	3.32
Stabilisasi	L = 1,25D ; Df = 3B	40.35	1.56	2.57
	L = 1,5D ; Df = 3B	24.48	2.34	1.80
DSM dengan 10% Kapur	L = 1D ; Df = 4B	91.08	0.78	3.36
	L = 1,25D ; Df = 4B	53.80	1.10	3.03
	L = 1,5D ; Df = 4B	32.64	1.91	2.23

Dari Tabel 11 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*swelling*). Hal tersebut dapat terjadi karena kepadatan tanah akan mengingkat seiring dengan bertambahnya persentase volume DSM. Selain itu, hasil yang diperoleh dari pemeriksaan potensi pengembangan (*swelling*) tersebut sesuai dengan pernyataan Warsiti (2009) yang mengatakan bahwa dengan adanya penambahan kapur memperbaiki tanah asli karena dapat memperkecil persentase *swelling*, yang berarti mengubah dari tanah yang mempunyai persentase *swelling* tinggi menjadi tanah yang mempunyai persentase *swelling* rendah.

Pada Tabel 11 untuk variasi jarak DSM $L = 1D$ dan variasi panjang DSM $Df = 2B$ diperoleh data persentase stabilisasi 45,54% dan persentase *swelling* 1,36%, untuk variasi jarak DSM $L = 1D$ dan variasi panjang DSM $Df = 3B$ diperoleh

data persentase stabilisasi 68,31% dan persentase *swelling* 0,81%, dan untuk variasi jarak DSM $L = 1D$ dan variasi panjang DSM $D_f = 4B$ diperoleh data persentase stabilisasi 91,08% dan persentase *swelling* 0,78%. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa semakin dekat jarak antar kolom DSM ($L = 1D$) dan semakin panjang kolom DSM ($D_f = 4B$) maka potensi pengembangan (*swelling*) akan semakin kecil.

Menurut Madhyannapu (2014), besar pengembangan tanah yang diizinkan untuk struktur *flexible pavement* adalah 12 mm (0,5 inch) dan untuk struktur *rigid pavement* adalah 18 mm (0,7 inch). Di lokasi pengambilan sampel memiliki kedalaman rata-rata 1,5 meter, sehingga persentase pengembangan maksimum yang diizinkan untuk struktur *flexible pavement* adalah 0,8%. Berdasarkan analisa uji pengembangan (*swelling*) terhadap permodelan yang dilakukan di laboratorium, dapat diketahui bahwa variasi jarak dan panjang DSM yang memenuhi batas maksimum persentase pengembangan adalah pada jarak $L = 1D$ dan panjang $D_f = 4B$, dengan persentase sebesar 0,78%.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 5 cm berpola *triangular* terhadap daya dukung tanah ekspansif di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin dekat jarak DSM dan semakin panjang DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif.
2. Jarak dan panjang maksimum DSM untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif pada

penelitian ini terdapat pada variasi jarak antar kolom (L) = 5 cm dan panjang kolom (D_f) = 20 cm.

3. Kenaikan rasio volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*swelling*). Pada rasio volume DSM 91,08% mampu mengurangi potensi pengembangan (*swelling*) hingga 0,78%.

Berikut adalah saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian tentang stabilisasi tanah ekspansif menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) lebih lanjut antara lain:

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. Memperbanyak variasi jarak dan panjang untuk mengetahui jarak dan panjang paling maksimum pada DSM diameter 5 cm pola *triangular*.
3. Dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan variasi bahan *additive* jenis lain untuk mengetahui pengaruh campuran bahan pada *Deep Soil Mix* (DSM).

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyani, Ninik. 2015. Pengaruh Penambahan Kapur pada Tanah Lempung Ekspansif dari Dusun Bodrorejo Klaten. *Jurnal*. Yogyakarta: UKRIM.
- Badariah, Cut N. 2012. Perbaikan Tanah Dasar Jalan Raya dengan Penambahan Kapur. *Jurnal Rancang Sipil Volume 1 Nomor 1*. Medan: Teknik Sipil Institut Teknologi Medan.
- Bowles, Joseph E. 1986. *Analisis dan Desain Pondasi*. Jakarta: Erlangga.

- Bowles, Joseph E. 1991. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Bruce, Donald A. 2000. Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Application. *Report Document No. FHWA-RD-99-138*. Virginia: U.S. Department of Commerce.
- Bruce, Marry E. C. 2013. "Deep Mixing for Embankment and Foundation Support" dalam *Federal Highway Administration Design Manual*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary C. 1999. *Mekanika Tanah 1*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum.
- Hardiyatmo, Hary C. 2010. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on the Transition Zone and the Boundary Layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Msc Thesis Division of Soil and Rock Mechanics Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm. Sweden.
- Kumor, Maciej K. 2008. Selected Geotechnical Problems of Expansive Clays in the Area of Poland. *Jurnal*. Faculty Civil and Environmental Engineering University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz. Poland.
- Kurniawan, Ichvan D. 2015. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Deep Soil Mix (DSM) 15% Fly Ash Diameter 3 cm 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. *Jurnal ASCE*. hlm. 3.
- Palar, Hariman. 2013. Pengaruh Campuran Trass dan Kapur pada Lempung Ekspansif terhadap Nilai Daya Dukung. *Jurnal Sipil Statik Vol. 1 No. 6*. Sulawesi Utara: Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi.
- SK SNI S-01-1994-03. 1996. *Spesifikasi Kapur Untuk Stabilisasi Tanah*. Departemen PU.
- Sukirman, S. 1992. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.
- Sutikno. 2009. Stabilisasi Tanah Ekspansif dengan Penambahan Kapur (Lime): Aplikasi pada Pekerjaan Timbunan. *Jurnal Nomor 2 Volume 11*. Jakarta: Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.
- Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Volume 14 Nomor 1*. Semarang: Teknik Sipil Politeknik Negeri Semarang.
- Zakaria, Z. 2006. *Daya Dukung Tanah Fondasi dangkal*. Bandung: Laboratorium Geologi Teknik UNPAD.