

# PERUBAHAN DAYA DUKUNG DAN PENGEMBANGAN TANAH EKSPANSIF AKIBAT STABILISASI DENGAN DSM BERPOLA TRIANGULAR DENGAN VARIASI JARAK DAN PANJANG KOLOM DIAMETER 4 CM MENGGUNAKAN KAPUR

Abthal Hazazi Puspito, Harimurti, Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan Mayjen Haryono 167, Malang, 65145, Indonesia

Email : [puspito.abthal@gmail.com](mailto:puspito.abthal@gmail.com)

## ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai daya dukung serta potensi mengembang (*swelling*) akibat stabilisasi. Selain dilakukan stabilisasi penuh, akan dilakukan beberapa variasi stabilisasi menggunakan kolom DSM tipe *triangular* dengan diameter 4cm. Hasil dari penelitian ini menunjukkan meningkatkan nilai daya dukung tanah dari 13 kg/cm<sup>2</sup> menjadi 42,4 kg/cm<sup>2</sup> dan mampu mengurangi potensi pengembangan dari 5,659% menjadi 0,136% akibat perbaikan dengan stabilisasi penuh. Pada penelitian variasi jarak dan panjang kolom DSM tipe *triangular* berdiameter 4cm, menunjukkan bahwa nilai daya dukung tertinggi diperoleh pada jarak yang dekat dan kolom terpanjang sebesar 38 kg/cm<sup>2</sup>. Sedangkan untuk pengembangan dilakukan percobaan pendekatan dengan rasio perbaikan yang nantinya akan menghasilkan rumus regresi, dari rumus tersebut akan didapatkan potensi pengembangan yang terjadi pada variasi kolom DSM. Dari hasil analisis pada rumus regresi didapatkan semakin dekat jarak kolom dan semakin panjang kolom akan mengurangi potensi pengembangan yang terjadi. Dan untuk konfigurasi paling efisien untuk Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro adalah konfigurasi dengan jarak 1D (4cm) dan panjang kolom (Df)= 15cm dengan potensi pengembangan 0,78%.

**Kata kunci** : Perbaikan Tanah, Stabilisasi, Kapur, *Deep Soil Mixing*, *Swelling*, Daya Dukung.

## ABSTRACT

This research is done to discover the change of bearing capacity value and swelling potential due to stabilization. Beside applying full stabilization, some stabilization variations using triangular type DSM column with 4cm in diameter will also be done. The result of this research showed the increase of soil bearing capacity value from 13 kg/cm<sup>2</sup> to 42.4 kg/cm<sup>2</sup> and it is able to decrease the potential of swelling from 5.659% become 0.136% due to improvement by full stabilization. On the research of distance and length variation of triangular type DSM column with 4cm diameter, the highest bearing capacity found was obtained on short distance and the longest column was 38 kg/cm<sup>2</sup>. On the other hand, an experimental approach by improvement ratio which will result in regression formula for the development was conducted. From the formula, a swelling potential happened to DSM column variation will be obtained. From the analysis on the regression formula, it was found that the shorter the distance of column and the longer the length of column will decrease the swelling potential. The most efficient configuration for Jelu Village in Ngasem District, Bojonegoro Regency was 1D (4cm) distance and column length (Df) = 15cm with swelling potential of 0.78%.

**Keywords** : Soil Improvement, Stabilization, Lime, *Deep Soil Mixing*, *Swelling*, Bearing Capacity.

## PENDAHULUAN

Kemajuan era global menuntut untuk mendapatkan struktur bangunan yang kokoh dan ringan, hal ini dimulai dengan banyaknya inovasi-inovasi baru tentang bangunan yang kokoh dan ringan. Namun, tingkat kekuatan bangunan tidak hanya dipengaruhi oleh kuat struktur atas ataupun struktur bawah, melainkan daya dukung tanah sebagai tumpuan struktur tersebut. Nilai daya dukung menunjukkan batas kemampuan tanah untuk menahan seluruh beban pada struktur yang akan diberikan pada tanah tersebut, hal inilah yang menjadikan daya dukung tanah sangat diperhitungkan dan diperhatikan untuk perencanaan struktur bangunan. Kurangnya nilai daya dukung dapat mengurangi kekuatan struktur yang berada di atasnya, hal ini tentu sangat merugikan karena dapat berdampak pada keruntuhan struktur. Permasalahan ini sering dijumpai pada tanah lempung yang biasanya memiliki nilai daya dukung yang cukup kecil, oleh karena itu perlu dilakukan perkuatan tanah pada tanah lempung untuk meningkatkan nilai daya dukung tanah tersebut.

Selain daya dukung tanah, tanah lempung memiliki kelemahan pada perilaku kembang susut. Perilaku ini akan sangat merugikan struktur karena sangat bergantung pada musim, hal ini dicontohkan apabila pada musim hujan tanah akan menyerap air dan terjadi pengembangan volume pada tanah, dan apabila pada musim kemarau air pada tanah akan menguap dan terjadi susut. Hal ini tentu sangat merugikan pada bangunan atau struktur yang berada di atasnya misalkan terjadi retak pada lantai bangunan ataupun retakan pada konstruksi perkerasan jalan. Bila perilaku ini terjadi pada batas tertentu maka tidak terlalu merugikan atau dapat diabaikan, namun bila terjadi proses kembang susut yang cukup ekstrim maka akan menjadi permasalahan yang menyulitkan pada bidang konstruksi.

Perilaku kembang susut ini disebut dengan *swelling*, nilai *swelling* yang tinggi menunjukkan terjadi perubahan volume yang tinggi, semakin tinggi nilai *swelling* semakin tinggi kemungkinannya terjadi keruntuhan pada struktur yang berada di atas, hal ini yang menjadikan semakin nilai *swelling* yang tinggi semakin menyulitkan pada bidang konstruksi. Perilaku ini dimiliki oleh tanah lempung ekspansif yang memiliki nilai *swelling* yang tinggi namun memiliki nilai daya dukung yang kecil. Hal ini yang menjadi latar belakang penelitian tentang “Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif dengan Kadar Kapur 8% Menggunakan Metode *Deep Soil Mixing* Tipe *Triangular* Berdiameter 4 cm Terhadap Nilai Daya Dukung Tanah”, penelitian ini dimaksudkan sebagai penelitian lanjutan, tentang pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif di daerah Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur dengan campuran zat kapur menggunakan metode *deep soil mixing* tipe *triangular*.

Penelitian ini sebelumnya pernah dilakukan dengan kadar kapur yang berbeda yaitu 10% dengan hasil bahwa kapur dapat mengurangi nilai *swelling* dan meningkatkan daya dukung tanah pada tanah lempung ekspansif di daerah Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Anisa (2016), perlakuan stabilisasi tanah lempung ekspansif di daerah Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur menggunakan metode *deep soil mixing* tipe *triangular* dengan kadar kapur 10% dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah hingga 281% dan mampu menurunkan pengembangan dari tanah asli sebesar 3,36%. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan stabilisasi pada tanah lempung ekspansif dengan campuran kapur mampu meningkatkan nilai daya dukung dan menurunkan nilai *swelling*, namun pada

penelitian Ranggaesa (2016) menjelaskan bahwa, kenaikan nilai CBR *soaked* dan *unsoaked* tertinggi terjadi pada prosentase kapur 8%, dan penelitian tersebut memaparkan bahwa prosentase penambahan kapur yang optimum untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif Bojonegoro adalah 8%. Sehingga penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan penambahan kadar kapur 8% menggunakan metode *deep soil mixing* tipe *triangular*.

Berikut adalah tujuan penelitian yang akan dilakukan :

1. Mengetahui perubahan daya dukung dan perilaku mengembang (*swelling*) antara tanah asli tanpa perbaikan dengan tanah 100% perbaikan.
2. Mengetahui perbandingan nilai daya dukung antara tanah 100% perbaikan dengan tanah yang diperbaiki dengan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *triangular* dengan variasi jarak dan kolom.
3. Mengetahui perubahan perilaku pengembangan (*swelling*) pada tanah yang telah dilakukan stabilisasi dengan metode *deep soil mixing* berpola *triangular* akibat beban perkerasan jalan.
4. Mengetahui jarak dan panjang kolom *deep soil mixing* (DSM) tipe *triangular* yang memberi daya dukung yang diizinkan pada lokasi Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
5. Mengetahui jarak dan panjang kolom yang lebih efisien untuk digunakan sebagai konfigurasi stabilisasi kolom metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *triangular* berdasarkan pengembangan yang diizinkan.

## **METODE PENELITIAN**

Pada penelitian ini dilakukan tiga benda uji yang berbeda. Benda uji yang pertama merupakan benda uji dari tanah asli yang belum distabilisasi atau tanpa distabilisasi. Benda uji yang kedua

merupakan tanah yang telah distabilisasi penuh atau distabilisasi 100%. Dan benda uji yang terakhir merupakan benda uji yang distabilisasi dengan *Deep Soil Mixing*. Ketiga benda uji tersebut digunakan untuk mengetahui perubahan daya dukung dan juga *swelling*.

Metode analisa yang digunakan untuk mendapatkan nilai daya dukung, digunakan rumus tegangan Terzaghi. Selain itu dilakukan analisa *Bearing Capacity Improvement* atau bila disingkat BCI. Metode BCI merupakan metode yang membandingkan nilai daya dukung sebelum dan sesudah perbaikan. Nilai yang dihasilkan pada analisa ini dalam bentuk persen. Dari persen tersebut dapat diketahui apakah terjadi kenaikan daya dukung atau penurunan daya dukung.

Metode analisa yang digunakan untuk *swelling* menggunakan rumus regresi yang didapat dari percobaan *swelling*. Percobaan *swelling* dilakukan dengan berbagai macam variasi kolom DSM untuk mendapatkan beragam ratio perbaikan. Pada ratio perbaikan tersebut akan didapatkan rumus regresi yang nantinya akan digunakan untuk mendapatkan nilai potensi *swelling* pada perbaikan dengan DSM berpola *triangular* dengan diameter 4 cm.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Identifikasi Tanah Asli**

Pada awal penelitian ini dilakukan penelitian pendahuluan yang dimaksudkan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanis tanah asli yang digunakan sebagai benda uji. Rangkaian penelitian yang dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis dan fisik pada tanah sebagai berikut pengujian *specific gravity*, analisis saringan (*grainsize*), uji Atterberg *limit*, dan pemadatan standar.

Dari rangkaian penelitian pendahuluan didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 1. Sifat Fisik Tanah Asli

Jenis Pengujian	Satuan	Hasil
Kadar Air ( <i>Water Content</i> )	%	44,96
Berat Jenis (GS)	-	2,524
Berat Volume	gr/cm <sup>3</sup>	1,69
Batas-Batas Aterberg		
Batas Cair (LL)	%	77,35
Batas Plastis (PL)	%	29,84
Indeks Plastisitas (PI)	%	47,52
Batas Susut (SL)	%	8,30
Fraksi Lempung	%	43

Berdasarkan pengujian *grain size* didapatkan gradasi tanah lolos pada saringan no 200 melebihi dari 50% maka dapat diklasifikasikan tanah tersebut merupakan tanah halus. Setelah itu dilakukan identifikasi lanjut dengan melakukan pengujian *Atterberg Limit*. Dari hasil pengujian didapatkan nilai LL sebesar 77,35% dan nilai PI sebesar 47,52%. Berdasarkan system *unified* tanah asli yang akan dijadikan sebagai benda uji diklasifikasikan tanah lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi.

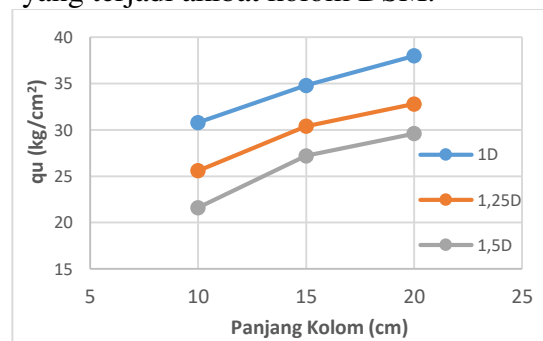
### Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Metode yang digunakan untuk identifikasi tanah lempung ekspansif pada penelitian ini adalah identifikasi secara tidak langsung. Identifikasi ini dilakukan melalui uji laboratorium adalah dengan menggunakan Batas Atterberg dan presentase kandungan fraksi lempung. Berdasarkan penelitian yang dilakukan nilai PI yang didapatkan 47,52% hal ini menunjukkan nilai PI yang didapatkan >35% sehingga dikategorikan tanah dengan tingkat pengembangan yang terjadi sangat tinggi. Sedangkan untuk nilai SL yang didapat dari penelitian sebesar 8,3% yaitu menunjukkan nilai <10%, sehingga potensi mengembang pada tanah lempung ini tergolong kritis. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tanah asli yang diambil dari Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki potensi mengembang yang sangat tinggi.

### Hasil Uji Pembebanan

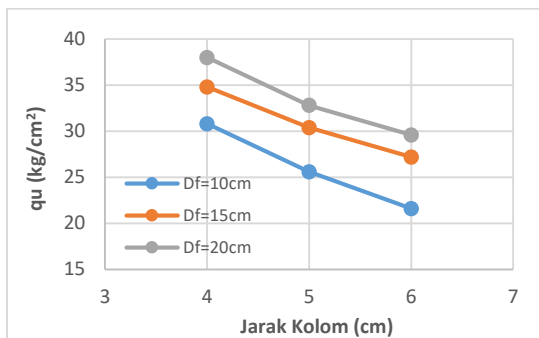
Uji pembebanan dilakukan dengan cara pembebanan pada arah vertikal. Beban yang diberikan berasal dari pompa hidrolik yang disambungkan pada *load cell* untuk mengetahui beban yang sedang terjadi. Dan untuk penurunan dapat dibaca pada LVDT, untuk mengetahui penurunan yang terjadi pada tiap beban yang diberikan.

Dari hasil uji pembebanan terjadi kenaikan nilai daya dukung pada tanah asli dan tanah yang distabilisasi 100%. Hal ini ditunjukkan pada kenaikan nilai dari 13 kg/cm<sup>2</sup> menjadi 42,4 kg/cm<sup>2</sup>. Begitu juga pada benda uji menggunakan kolom DSM. Peningkatan Nilai daya dukung terjadi akibat perbaikan dengan DSM berpola *triangular*. Semakin besar ratio perbaikan semakin besar nilai daya dukung yang diberikan. Apabila ditinjau dari variasi jarak dan panjang kolom, akan diketahui perubahan daya dukung yang terjadi akibat kolom DSM.



Gambar 1. Hubungan daya dukung dan variasi panjang kolom

Dari Gambar 1 dapat dilihat kenaikan nilai daya dukung pada variasi panjang kolom. Semakin panjang kolom DSM, semakin besar nilai daya dukung yang diberikan. Hal ini berlaku pada tiap variasi jarak. Nilai daya dukung terbesar didapatkan pada panjang kolom (Df) 20 cm, diikuti panjang Df 15 cm, dan nilai daya dukung terendah didapatkan pada panjang Df 10cm.



Gambar 2. Hubungan daya dukung dan variasi jarak kolom

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin kecil jarak maka semakin besar daya dukung yang diberikan. Hal ini ditunjukkan pada jarak 4 cm (1D) memberikan nilai daya dukung lebih tinggi dibandingkan jarak 5 cm (1,25D) dan 6 cm (1,5D). Dengan kata lain semakin dekat jarak kolom DSM maka semakin besar nilai daya dukung, dan semakin jauh jarak kolom maka semakin kecil daya dukung yang diberikan.

### Hasil Uji Pembebanan Tanah yang Distabilisasi dengan DSM Menggunakan Tangen Intersection Method (TIM)

*Tangen Intersection Method* adalah salah satu metode yang digunakan untuk menentukan daya dukung. Pada metode ini juga dapat diketahui penurunan yang terjadi. Metode ini dilakukan dengan cara mempertemukan garis tangensial atas dan garis tangensial bawah. Perpotongan dari kedua garis tersebut merupakan *Tangen Intersection*, pada perpotongan dapat dilihat nilai daya dukung dan penurunan yang terjadi.

Tabel 2. Nilai daya dukung menggunakan *Tangen Intersection Method*

Jenis Benda Uji	Variabel		q <sub>u</sub> (kg)	q <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
	Jarak Kolom (cm)	Panjang Kolom (cm)		
Tanah Asli	-	-	13	5,4
Tanah Asli + Stabilisasi 100%	-	-	42,4	22,8
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	1D = 4	10	30,8	8,9
		15	34,8	21,3
		20	38	22,3
	1,25D = 5	10	25,6	7,3
		15	30,4	8,5
		20	32,8	21,2
1,5D = 6	10	21,6	7,1	
	15	27,2	7,4	
	20	29,6	8,3	

Hasil dari TIM menunjukkan nilai daya dukung yang lebih rendah dibandingkan nilai daya dukung batas (q<sub>u</sub>). Hal ini dikarenakan daya dukung TIM (q<sub>s</sub>) diambil pada kedalaman tertentu (tergantung perpotongan tangen). Pada nilai daya dukung TIM (q<sub>s</sub>) didapatkan sebesar 5,4 kg/cm<sup>2</sup> sedangkan untuk tanah yang distabilisasi 100% sebesar 22,8 kg/cm<sup>2</sup>. Peningkatan pada variasi jarak dan panjang kolom menunjukkan hasil yang sedikit berbeda bila dibandingkan dengan nilai daya dukung batas.

### Daya Dukung Izin

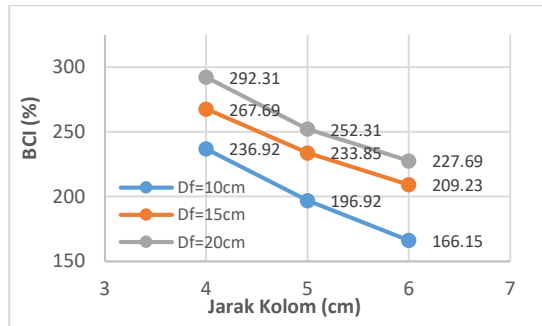
Daya dukung izin merupakan daya dukung yang harus dipenuhi agar dapat sesuai dengan perencanaan. Daya dukung izin juga sebagai acuan pada perncanan. Pada analisis perhitungan tegangan pada konstruksi jalan raya kelas 1, didapatkan tegangan yang terjadi sebesar 2,5215 kg/cm<sup>2</sup>. Tegangan ini menjadi acuan daya dukung minimal yang harus diberikan setelah diperhitungkan dengan faktor keselamatan (FS). Berdasarkan Pedoman Konstruksi dan Bangunan untuk Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan, digunakan angka 1,4 untuk FS.

Dari hasil penelitian, nilai daya dukung dibagi dengan angka keamanan. Apabila ditinjau pada daya dukung tanah asli sebagai nilai daya dukung minimal dan telah dibagi dengan FS. Nilai daya dukung yang diberikan masih lebih besar dari tegangan yang terjadi. Dengan kata lain seluruh benda uji dikatakan aman pada konstruksi perkerasan jalan dengan kelas 1.

### Analisis *Bearing Capacity Improvement (BCI<sub>u</sub>)* pada Daya Dukung (q<sub>u</sub>)

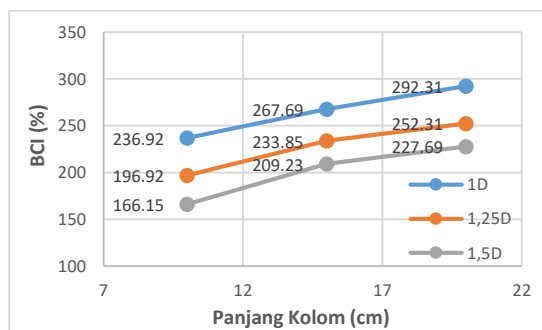
Analisis BCI adalah analisis untuk membandingkan peningkatan daya dukung pada tanah sebelum dan setelah perbaikan. Nilai daya dukung tanah asli menjadi patokan besar peningkatan nilai daya dukung akibat stabilisasi dengan DSM berpola *triangular*. Pada analisis ini dilakukan untuk mengetahui perubahan

daya dukung akibat variasi jarak dan panjang kolom DSM berpola *triangular*.



Gambar 3. Hubungan variasi jarak kolom terhadap nilai  $BCI_u$

Dari Gambar 3 terlihat sama dengan Gambar 2, dimana jarak terdekat memberikan persentase BCI lebih besar. Hal ini dapat dikatakan peningkatan yang terjadi pada jarak terdekat memberikan peningkatan daya dukung lebih besar dibandingkan dengan jarak yang lebih jauh. Nilai terbesar ditunjukkan pada jarak 4cm (1D) diikuti jarak 5cm (1,25D) dan yang terakhir jarak 6cm (1,5D).



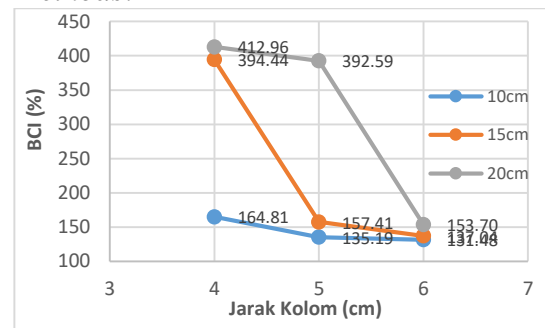
Gambar 4. Hubungan variasi panjang kolom terhadap nilai  $BCI_u$

Dari Gambar 4 kenaikan daya dukung dipengaruhi oleh panjang kolom. Semakin panjang kolom DSM maka semakin besar kenaikan nilai daya dukung yang terjadi. Peningkatan nilai daya dukung paling besar berada pada panjang kolom 20 cm, diikuti dengan panjang kolom 15 cm dan yang terakhir 10 cm.

### Analisis Bearing Capacity Improvement (BCI<sub>s</sub>) pada Daya Dukung TIM (q<sub>s</sub>)

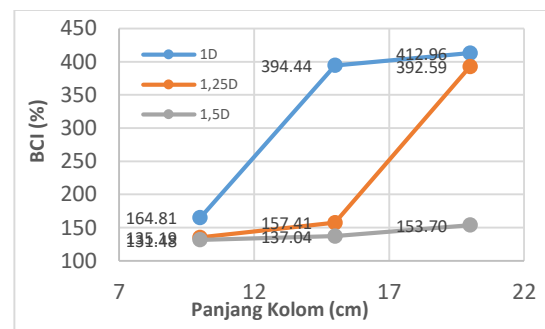
Pada analisis ini digunakan daya dukung TIM (q<sub>s</sub>). Perbandingan yang dilakukan dari daya dukung tanah asli

yang didapatkan dari *Tangen Intersection Methods*.



Gambar 4. Hubungan variasi jarak kolom terhadap  $BCI_s$

Peningkatan yang terjadi pada  $BCI_s$  tidak seperti peningkatan pada  $BCI_u$ . Terjadi loncatan peningkatan yang tidak merata. Hal ini dapat dikarenakan kepadatan yang kurang merata pada tiap variasi panjang ataupun jarak kolom. Namun nilai peningkatan  $BCI_s$  tertinggi masih pada jarak terdekat yaitu 4cm (1D).



Gambar 5. Hubungan variasi panjang kolom terhadap  $BCI_s$

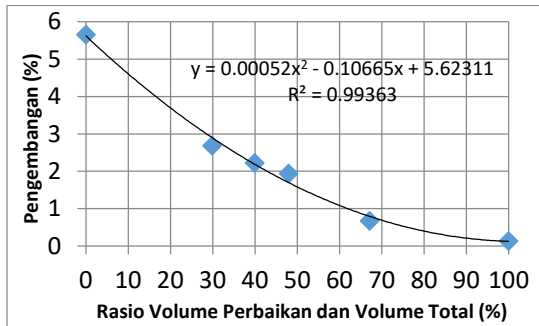
Pada variasi panjang kolom, juga terjadi loncatan peningkatan daya dukung. Kepadatan yang kurang merata dapat menjadi salah satu faktor terjadinya loncatan tersebut. Namun Peningkatan  $BCI_s$  tertinggi terjadi pada kolom yang terpanjang yaitu 20cm, diikuti panjang kolom 15cm, dan yang terakhir 10cm.

### Pemeriksaan Swelling

Pemeriksaan *swelling* dimaksudkan untuk mengetahui potensi mengembang pada benda uji. Untuk mempermudah penelitian, dilakukan pemeriksaan *swelling* dengan beberapa konfigurasi kolom DSM untuk mendapatkan nilai potensi untuk bermacam ratio perbaikan.



Ratio perbaikan dicari hingga dapat mewakili pada interval yang dibutuhkan.



Gambar 6. Nilai pengembangan terhadap persentase stabilisasi

Dari hasil penelitian maka didapatkan grafik seperti yang tertera pada Gambar 6. Hasil dari penelitian ini merupakan rumus regresi yang akan digunakan untuk mengetahui potensi pengembangan pada konfigurasi kolom DSM berpola *triangular*. Sehingga didapatkan nilai potensial yang nanti akan dibandingkan dengan pengembangan izin pada konstruksi perkerasan jalan.

### Pengembangan Izin pada Konstruksi Perkerasan Jalan

Pada konstruksi perkerasan jalan lentur pengembangan yang disarankan sebesar 12 mm. Jika diasumsikan rata-rata panjang zona aktif di Kabupaten Bojonegoro adalah 1,5m, maka persentase pengembangan yang disarankan adalah 0,8%. Bila ditinjau dari hasil analisis rumus regresi, maka perbaikan minimum yang diperlukan untuk mendapatkan pengembangan ijin sebesar 67,32%.

Konfigurasi yang memiliki potensi pengembangan kurang dari pengembangan ijin adalah D=4cm; Df=15 cm dengan potensi pengembangan 0,78%. Konfigurasi lain yang memiliki potensi pengembangan kurang dari pengembangan ijin adalah D=4cm; Df=20cm dengan potensi pengembangan 0,23%. Namun konfigurasi D=4cm; Df=20cm dirasa kurang efisien karna terlalu besar ratio perbaikan yang dilakukan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

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

1. Perubahan daya dukung dan pengembangan yang terjadi akibat perbaikan stabilisasi penuh sangat besar. Pada perubahan daya dukung terjadi peningkatan nilai daya dukung yang diberikan pada tanah asli sebesar  $13 \text{ kg/cm}^2$  dan untuk setelah stabilisasi penuh  $42,4 \text{ kg/cm}^2$ . Dan untuk pengembangan terjadi penurunan potensi pengembangan dari 5,659% menjadi 0,136%.
2. Perubahan nilai daya dukung akibat stabilisasi kolom DSM tipe *triangular* dengan diameter 4cm menunjukkan nilai yang meningkat. Semakin dekat jarak kolom DSM maka semakin besar daya dukung yang diberikan, begitu juga dengan panjang kolom. Semakin panjang kolom perbaikan semakin besar daya dukung yang diberikan.
3. Perubahan potensi pengembangan yang terjadi akibat stabilisasi kolom DSM tipe *triangular* dengan diameter 4cm memberikan hasil penurunan persentase potensi pengembangan. Semakin dekat kolom DSM maka semakin kecil potensi pengembangan, serta semakin panjang kolom DSM maka semakin kecil potensi pengembangan. Hal ini dikarenakan persentase perbaikan pada tanah ekspansif.
4. Nilai daya dukung yang diberikan pada seluruh variasi jarak dan panjang kolom DSM melebihi dari tegangan yang dizinkan di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
5. Variasi jarak dan panjang kolom DSM tipe *triangular* yang paling efisien untuk pengembangan izin

di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro adalah konfigurasi dengan jarak 1D (4cm) dan panjang kolom (Df)=15cm dengan potensi pengembangan 0,78%.

Adapun beberapa saran untuk pengembangan penelitian perbaikan DSM dengan kapur, sebagai berikut :

1. Perlu penambahan benda uji dengan konfigurasi yang sama guna mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Perlu dilakukan penelitian untuk zona aktif atau batas pengaruh yang terkena tegangan, untuk mendapatkan hasil yang lebih memuaskan.
3. Perlu dilakukan metode baru yang lebih mendekati pada pelaksanaan dilapangan.
4. Perlu dilakukan variasi bahan untuk campuran (bahan pencampur stabilisasi) untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan masing-masing bahan.
5. Perlu adanya sarana dan prasarana yang lebih menunjang untuk menghindari kesalahan atau kegagalan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allo, A. G. 2016. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Deep Soil Mixing (DSM) 10% Kapur Diameter 4cm Berpola Triangular terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro.
- Ardiyansari, A. O. 2016. Pengaruh Jarak dan Panjang Deep Soil Mixing Berpola Triangular Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif. *Naskah Terpublikasi Teknik Sipil FT-UB*. Malang: Universitas Brawijaya.
- 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.
- Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ismail, A. 2016. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Kapur Metode Deep Soil Mixing tipe Panels Berdiameter 4,5 cm Terhadap Nilai Daya Dukung Tanah. *Naskah Terpublikasi Teknik Sipil FT-UB*. Malang: Universitas Brawijaya.
- 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.
- Madhyannapu, R. S. dan Puppala, A. J. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical*.
- Ranggaesa, R.A. 2014. Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Kekuatan dan Pengembangan (swelling) pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro. *Naskah Terpublikasi Teknik Sipil FT-UB*. Malang: Universitas Brawijaya.S