

**PERUBAHAN DAYA DUKUNG DAN PENGEMBANGAN TANAH EKSPANSIF
AKIBAT STABILISASI MENGGUNAKAN KAPUR DENGAN *DEEP SOIL MIXING*
BERPOLA *TRIANGULAR* PADA VARIASI JARAK DAN PANJANG KOLOM
BERDIAMETER 4,8 CM**

I Made Adhi Bayu Rasmawan¹⁾, Yulvi Zaika²⁾, As'ad Munawir³⁾

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

ABSTRAK

Kabupaten Bojonegoro merupakan salah satu wilayah di Indonesia dimana sering dijumpai tanah ekspansif. Tanah ekspansif merupakan jenis tanah lempung yang memiliki sifat kembang-susut yang tinggi, hal ini menyebabkan kekuatan dan stabilitas tanah ekspansif sangat bergantung pada kadar air dalam tanah yang dipengaruhi oleh cuaca. Sebagai pendukung konstruksi, terutama konstruksi jalan raya, tanah ekspansif memerlukan penanganan khusus, salah satunya stabilisasi kimia dengan bahan aditif kapur. Dalam penelitian ini, perbaikan tanah ekspansif berupa stabilisasi kimia akan dilakukan pada pemodelan laboratorium dengan metode *deep soil mixing*, pemilihan metode *deep soil mixing* didasarkan atas kondisi tanah ekspansif di Kabupaten Bojonegoro yang memiliki tebal lapisan lebih dari 1,5 m. Stabilisasi tanah ekspansif dilakukan dengan penambahan kapur sebesar 8% dan kolom stabilisasi dibuat pada beberapa variasi jarak dan panjang. Dengan metode *deep soil mixing*, hasil stabilisasi tanah ekspansif menunjukkan bahwa penambahan kapur 8% cukup efektif untuk meningkatkan daya dukung tanah ekspansif hingga 192,56% serta mengurangi pengembangan tanah hingga 96,54%. Pada pola kolom *triangular* dengan diameter 4,8 cm, jarak kolom memiliki pengaruh yang lebih signifikan dibanding panjang kolom, dengan stabilisasi kimia metode *deep soil mixing*, konfigurasi jarak kolom 1D (4,8 cm) dengan panjang kolom 15 cm cukup untuk memenuhi kriteria pengembangan (*heave*) yang diizinkan yaitu 0,8%.

Kata kunci: tanah ekspansif, *deep soil mixing*, daya dukung, pengembangan

ABSTRACT

Bojonegoro Regency is one of the areas in Indonesia where expansive soil is commonly found. Expansive soil is a type of clay soils that have high swell and shrinkage properties, it causes the strength and stability of expansive soil is depend on the water content in the soil that is affected mainly by the weather. As a foundation of construction, specifically highway construction, expansive soils require certain treatment, one of which is chemical stabilization with lime additives. In this research, expansive soil improvement in the form of chemical stabilization will be done on laboratory-scale modeling using deep soil mixing method, the choice of deep soil mixing method is based on expansive soil condition in Bojonegoro regency which has a thickness of more than 1.5 m. Expansive soil stabilization is done by adding lime of 8% and the stabilization column is made on several variations of spacing and length. With deep soil mixing method, the result of expansive soil stabilization showed that the addition of lime 8% was effective enough to increase the expansive soil bearing capacity up to 192,56% and reduce the swell of the soil up to 96,54%. In triangular column pattern with 4,8 cm diameter, column spacing has more significant effect than column length, with chemical stabilization of deep soil mixing method, 1D (4,8 cm) column spacing configuration with a column length of 15 cm is sufficient to meet allowable swell (heave) criteria which is 0,8%.

Keywords: *expansive soil, deep soil mixing, bearing capacity, swell*

PENDAHULUAN

Tanah sebagai pendukung struktur di atasnya harus memiliki kekuatan yang cukup sehingga dapat menghindari terjadinya kegagalan/keruntuhan konstruksi khususnya pada fondasi. Daerah Jawa Timur khususnya Kabupaten Bojonegoro banyak dijumpai jenis tanah lempung ekspansif, dengan kondisi tanah yang mudah mengembang ataupun susut, pengaruh cuaca berperan besar dalam menentukan kondisi dan kekuatan tanah, akibatnya tanah tidak stabil dan kurang cocok untuk mendukung konstruksi dengan beban yang besar, misalnya jalan raya dan bangunan gedung.

Dengan kondisi saat ini dimana ketersediaan lahan sangat terbatas dan permintaan pembangunan infrastruktur yang masif, membangun pada daerah tanah lempung ekspansif tidak dapat dihindari, akibatnya perlu upaya-upaya rekayasa untuk memperbaiki sifat-sifat tanah lempung ekspansif demi menunjang struktur konstruksi di atasnya.

Stabilisasi dengan kapur adalah salah satu metode perbaikan *in-situ* yang sudah cukup banyak diterapkan, menurut Akagi (1990) penambahan kapur dengan kadar 3 sampai 8% sesuai untuk stabilisasi tanah lempung lempung ekspansif yang plastis. Ranggaesa (2016) menyebutkan bahwa persentase penambahan kapur yang optimum untuk meningkatkan nilai CBR tanah lempung ekspansif Bojonegoro dengan lama *curing* 3 hari pada tanah ekspansif Bojonegoro adalah 8%. Kosasih (2016) menyatakan stabilisasi menggunakan metode *deep soil mixing* pola triangular dengan kolom berdiameter 5 cm dan penambahan bahan aditif berupa 10% kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah ekspansif, selain itu potensi pengembangan (*swelling*) dapat dikurangi hingga 0,78%.

Merujuk pada hasil penelitian yang telah disebutkan, maka penambahan kapur terbukti cukup efektif dalam memperbaiki sifat tanah lempung ekspansif, namun perlu diperhatikan bahwa metode stabilisasi menggunakan kapur memiliki beberapa variasi dalam penerapannya di lapangan. Stabilisasi tanah menggunakan kapur terdiri dari stabilisasi dangkal (*shallow stabilization*) dan stabilisasi dalam (*deep stabilization*), stabilisasi dalam adalah metode pencampuran di lapangan (*in-situ mixing*) yang dilakukan dengan membuat kolom-kolom stabilisasi pada kedalaman tertentu, metode konstruksi ini sering disebut dengan *deep soil mixing* (DSM).

Tujuan penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah :

1. Mengidentifikasi pengaruh perubahan daya dukung antara tanah ekspansif tanpa perbaikan dan dengan stabilisasi (perbaikan) penuh.
2. Menganalisis perubahan daya dukung tanah dengan stabilisasi metode DSM berpola

triangular pada variasi jarak dan panjang kolom berdiameter 4,8 cm.

3. Menganalisis perubahan pengembangan tanah ekspansif dengan stabilisasi metode DSM berpola *triangular* pada variasi jarak dan panjang kolom berdiameter 4,8 cm.
4. Menentukan jarak dan kedalaman kolom dengan pola *triangular* yang memberikan nilai daya dukung yang diizinkan untuk konstruksi perkerasan jalan.
5. Menentukan jarak dan kedalaman kolom dengan pola *triangular* yang memberikan nilai pengembangan (*heave*) yang diizinkan untuk konstruksi perkerasan jalan.

TINJAUAN PUSTAKA

Stabilisasi Tanah dengan Kapur

Ketika kapur ditambahkan pada tanah lempung, dua reaksi kimia pozzolanik terjadi yaitu perpindahan kation dan flokulasi-aglomerasi. Reaksi pozzolanik antara tanah dan kapur melibatkan reaksi antara kapur dengan silika dan alumina pada tanah untuk membentuk material sementasi.

Salah satu reaksi yang terjadi antara kapur dan tanah adalah flokulasi dan aglomerasi. Flokulasi dan aglomerasi menyebabkan adanya perubahan tekstur dari tanah lempung. Partikel lempung cenderung akan menggumpal untuk membentuk partikel yang lebih besar, akibatnya (a) menurunkan batas cair, (b) meningkatkan batas plastis, (c) menurunkan indeks plastisitas, (d) meningkatkan batas susut, (e) meningkatkan *workability*, dan (f) meningkatkan kekuatan dan sifat deformasi tanah (Das, 2014).

Deep Soil Mixing (DSM)

Metode stabilisasi DSM dapat dilakukan pada tanah lempung dengan kedalaman zona aktif > 1,5 m, hal ini dikarenakan pada konstruksi jalan raya pekerjaan galian dengan kedalaman >1,5 m memerlukan biaya yang besar, oleh karena itu metode DSM dapat diterapkan.

Madhyannapu & Puppala (2014) menyebutkan secara umum, perbaikan tanah dengan DSM memerlukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Memilih tipe bahan pengikat (*binder*) dan kadar optimum berdasarkan uji laboratorium dan analisis lanjutan.
2. Memilih rasio dari air dan bahan pengikat (*binder*) yang mana menghasilkan performa maksimum yang dapat dicapai oleh kolom DSM.
3. Menentukan parameter geometri (panjang, diameter, dan jarak) dari kolom DSM berdasarkan parameter dan sifat tanah yang didapat dari uji laboratorium, pola konstruksi atau pemasangan (*triangular*, persegi, atau

heksagonal), dan rasio area perbaikan (a_r) yang didefinisikan sebagai area kolom dibagi total area tanah yang diperbaiki.

Daya Dukung Tanah Lempung

Daya dukung (*bearing capacity*) adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh tanah pada dasar fondasi tanpa mengalami keruntuhan. Secara umum daya dukung tanah dinyatakan dengan tegangan yaitu gaya per satuan luas, jika suatu beban (P) dikerjakan pada sebuah fondasi dangkal dengan luas (A) maka tegangan (σ) yang terjadi dapat ditulis:

$$\sigma = P/A \quad (1)$$

Daya dukung tanah ditentukan oleh parameter kuat geser yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ), dengan menggunakan rumus daya dukung Terzaghi (1943) pada fondasi dangkal berbentuk persegi maka:

$$q_u = 1,3 \times c \times N_c + q \times N_q + 0,4 \times \gamma \times N_\gamma \quad (2)$$

Persamaan (1) dalam uji pembebanan adalah tegangan kontak, yaitu tegangan yang terjadi di bawah fondasi. Perbandingan dari daya dukung dan tegangan kontak dapat dinyatakan sebagai angka keamanan (FS), jika nilai $FS > 1$ maka struktur dapat dikatakan aman, sebaliknya jika nilai $FS < 1$ maka beban luar (tegangan kontak) lebih besar daripada daya dukung tanah, akibatnya tanah akan mengalami keruntuhan dan struktur dapat dikatakan tidak aman.

$$FS = q_u / \sigma \quad (3)$$

Dengan mengasumsikan nilai $FS = 1$ (kondisi kritis) pada persamaan (3), maka daya dukung sama dengan tegangan kontak, dengan kondisi tersebut maka nilai daya dukung dapat ditentukan dengan menghitung tegangan kontak maksimum yang terjadi akibat uji pembebanan.

Bearing Capacity Improvement (BCI)

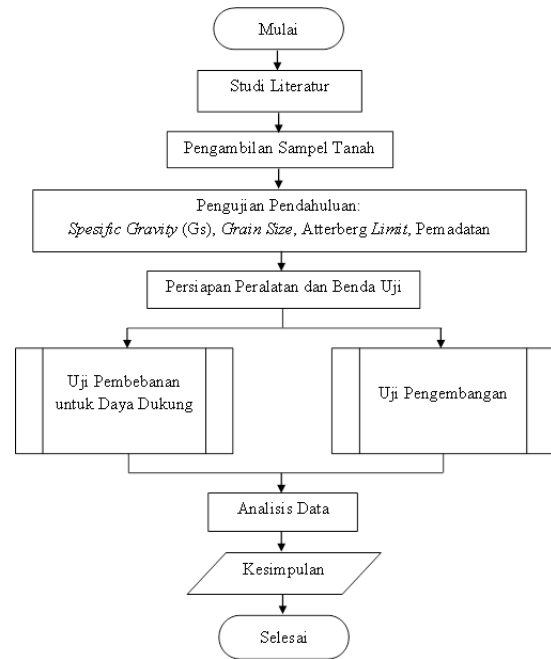
Peningkatan nilai daya dukung akibat adanya perbaikan tanah dapat diketahui dengan analisis BCI (*Bearing Capacity Improvement*). BCI dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$BCI(\%) = q_{UI} / q_U \times 100 \quad (4)$$

METODE PENELITIAN

Pemodelan benda uji *deep soil mixing* (DSM) dilakukan pada boks *fiberglass* berukuran $30 \times 30 \times 30$ cm, susunan lapisan tanah dari bawah ke atas dalam boks adalah sebagai berikut, tanah pasir setebal 3 cm, tanah lempung ekspansif dengan kadar air optimum setebal 20 cm, dan tanah pasir setebal 1 cm.

Variabel pada penelitian ini adalah variasi jarak kolom (L) yaitu $1D$ (4,8 cm), $1,25D$ (6 cm), dan $1,5D$ (7,2 cm), serta variasi panjang kolom yaitu 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Adapun diagram alir penelitian adalah sebagai berikut



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Sifat Fisik Tanah

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk mengidentifikasi sifat-sifat fisik tanah serta klasifikasi tanah lempung Bojonegoro. Sifat fisik tanah Lempung Bojonegoro ditampilkan pada tabel dibawah ini

Tabel 1. Sifat Fisik Tanah

Jenis Pengujian	Satuan	Nilai
Kadar Air (wc)	%	44,96
Berat Isi (γ)	gr/cm ³	1,69
Spesific Gravity (Gs)	-	2,52
Batas Cair (LL)	%	77,03
Batas Plastis (PL)	%	29,84
Indeks Plastisitas (PI)	%	47,2
Batas Susut (SL)	%	8,3

Berdasarkan gradasi butiran dan nilai Atterberg *Limit*, tanah lempung Bojonegoro termasuk tanah CH dalam klasifikasi USCS dan Group A-7-6 dalam Klasifikasi AASHTO.

Hasil Pengujian Pembebanan

Dalam pemodelan benda uji DSM, kondisi lapisan tanah ekspansif adalah memiliki kadar air optimum (OMC) sebesar 21,8%; berat isi (γ) sebesar 1,43 gr/cm³; berat isi kering (γ_d) sebesar 1,17 gr/cm³; dan kepadatan relatif (R_c) = 82%.

Stabilisasi dengan DSM dilakukan pada area 15×15 cm dengan penambahan kapur sebesar 8% dari berat isi kering, kolom stabilisasi memiliki kepadatan yang lebih besar dari lapisan tanah

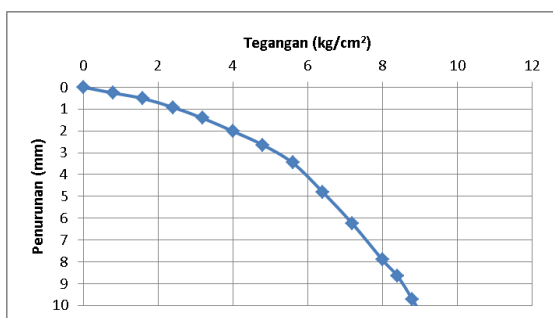
ekspansif, yaitu berat isi kering (γ_d) sebesar 1,43 gr/cm^3 dan kadar air sebesar 21,8%. Hasil uji pembebanan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Pembebanan

Jenis Benda Uji	Variabel		P_u (kg)	q_u (kg/cm^2)
	Jarak Kolom (cm)	Panjang kolom (cm)		
Tanah Asli	-	-	325	13
Tanah Stabilisasi Penuh	-	-	1060	42,4
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	4,8	10	630	25,2
	6	10	550	22
	7,2	10	440	17,6
	4,8	15	700	28
	6	15	600	24
	7,2	15	485	19,4
	4,8	20	820	32,8
	6	20	700	28
	7,2	20	530	21,2

Pada Tabel 2, beban maksimum dari setiap benda uji terjadi pada penurunan (*settlement*) yang cukup besar, bahkan melebihi lebar fondasi yaitu 5 cm. Dalam analisisnya daya dukung pada fondasi harus dibatasi dengan memperhatikan nilai *settlement* izin yaitu 10% dari lebar fondasi, oleh karena itu selanjutnya pembahasan akan ditinjau berdasarkan nilai daya dukung tanah pada *settlement* izin yaitu 5 mm.

Analisis Daya Dukung pada Penurunan Izin

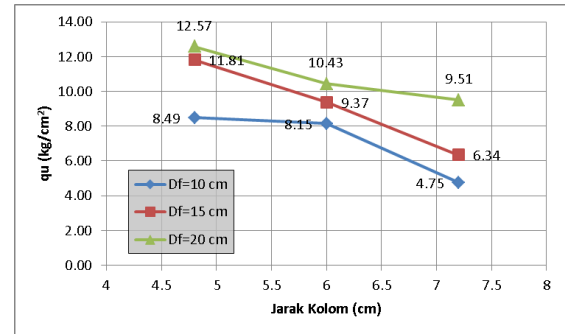


Gambar 2. Hubungan tegangan dan penurunan tanah asli

Pada penurunan 5 mm, didapatkan nilai tegangan maksimum/daya dukung tanah (q_u) sebesar 6,53 kg/cm^2 . Nilai ini akan dibandingkan dengan nilai daya dukung tanah yang mengalami perbaikan untuk mengetahui seberapa besar perubahan daya dukung yang terjadi akibat stabilisasi dengan kapur.

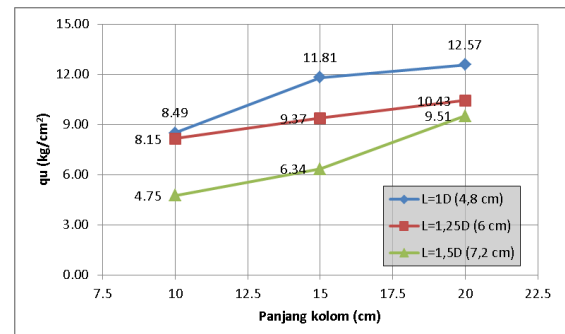
Untuk benda uji dengan stabilisasi metode DSM, nilai daya dukung ditampilkan pada masing-

masing variasi jarak dan panjang kolom. Untuk variasi jarak, nilai daya dukung dari terbesar – terkecil diperoleh pada jarak 1D (4,8 cm), 1,25D (6cm), dan 1,5D (7,2 cm). sedangkan untuk variasi panjang kolom, nilai daya dukung dari terbesar-terkecil diperoleh pada panjang kolom 20 cm, 15 cm, dan 10 cm.



Gambar 3. Hubungan daya dukung dan variasi jarak kolom

Jarak kolom (L) yang semakin dekat akan memberikan nilai daya dukung yang lebih tinggi karena memiliki nilai area rasio (ar) yang lebih besar, area rasio adalah perbandingan luas kolom dengan luas tanah pada daerah yang distabilisasi, hal ini sesuai dengan hipotesis bahwa dengan nilai area rasio yang lebih besar akan menyebabkan peningkatan nilai daya dukung tanah.



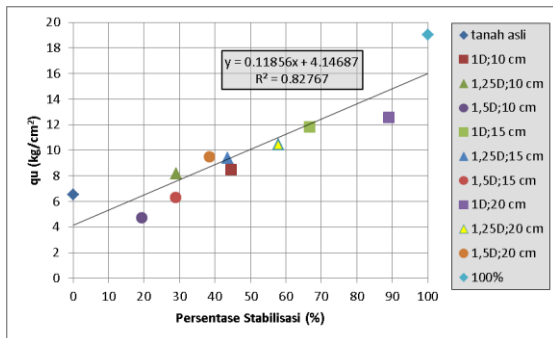
Gambar 4. Hubungan daya dukung dan variasi panjang kolom

Kolom stabilisasi memiliki perilaku yang hampir sama dengan pondasi tiang (*pile*), semakin panjang kolom stabilisasi mengakibatkan semakin besar nilai *friction resistance* kolom karena luas selimut kolom semakin besar, namun pada tanah ekspansif panjang kolom sampai dengan kedalaman zona aktif sudah sesuai untuk mengurangi nilai *heave*.

Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi

Tabel 2. Nilai Daya Dukung dan Persentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel		Persentase Stabilisasi (%)	q _u (kg/cm ²)
	Jarak Kolum (cm)	Panjang kolom (cm)		
Tanah Asli	-	-	0	6,530
Tanah Asli + Stabilisasi 100%	-	-	100	19,001
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM	4,8	10	44,51	8,488
	6	10	29	8,150
	7,2	10	19,25	4,751
	4,8	15	66,76	11,808
	6	15	43,49	9,375
	7,2	15	28,88	6,340
	4,8	20	89,01	12,574
	6	20	57,99	10,432
	7,2	20	38,51	9,512

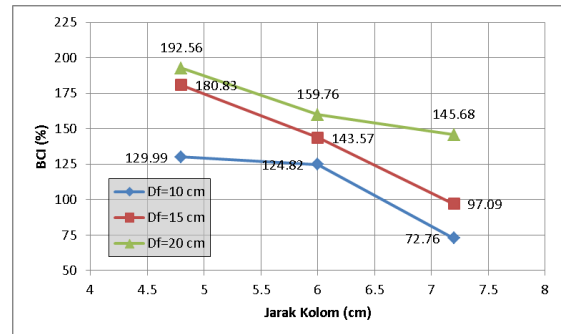


Gambar 5. Hubungan nilai daya dukung terhadap persentase stabilisasi

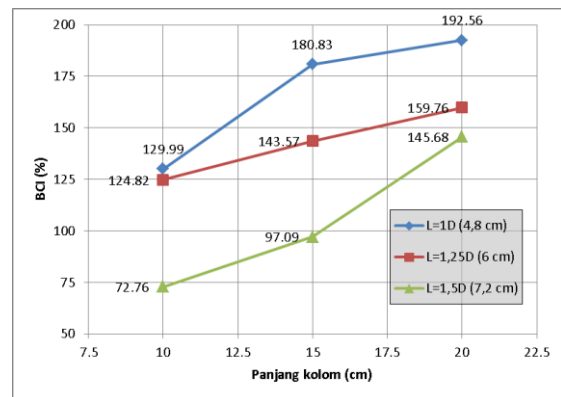
Dari Gambar 5 diperoleh persamaan regresi nilai daya dukung tanah terhadap persentase stabilisasi. Berdasarkan grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai daya dukung tanah cenderung berbanding lurus dengan nilai persentase stabilisasi, walaupun tidak selalu meningkat akibat pengaruh jarak dan panjang kolom.

Analisis Bearing Capacity Improvement (BCI)

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



Gambar 6. Hubungan variasi jarak kolom terhadap nilai BCI

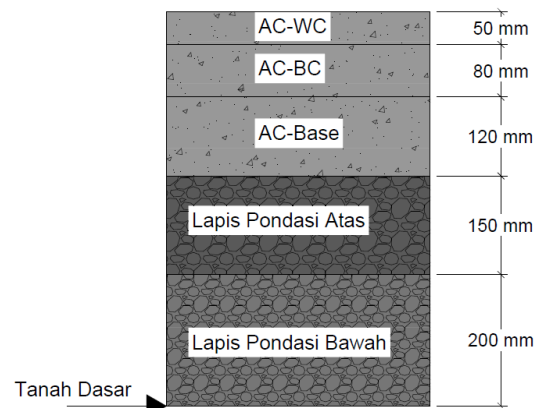


Gambar 7. Hubungan variasi panjang kolom terhadap nilai BCI

Apabila kedua analisis BCI dibandingkan, terlihat bahwa variasi jarak kolom memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada variasi panjang kolom. Pada variasi jarak kolom, rata-rata selisih nilai BCI tertinggi dan terendah adalah 62,62%, sedangkan pada variasi panjang kolom rata-rata selisih nilai BCI tertinggi dan terendah adalah 56,81%

Daya Dukung Izin pada Konstruksi Perkerasan

Diasumsikan desain struktur perkerasan lentur di daerah Bojonegoro adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Struktur perkerasan lentur jalan

Dengan kondisi seperti Gambar 8, tanah dasar (*subgrade*) menerima beban struktur perkerasan dan beban sumbu roda truk sebesar

2,522 kg/cm². Daya dukung izin pada tanah ekspansif Bojonegoro harus lebih besar daripada beban luar yang diterima, jika ditinjau dari benda uji penelitian, dengan menggunakan angka keamanan (FS) 1,4, daya dukung izin ditampilkan pada Tabel 3.

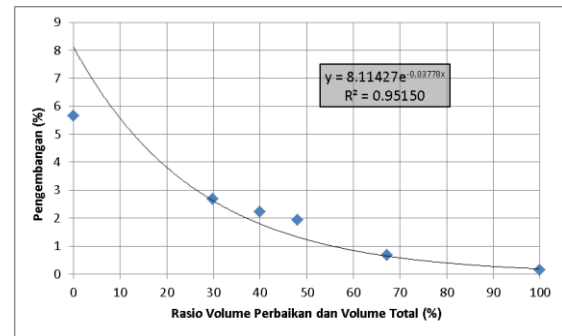
Tabel 3. Daya Dukung Izin pada Benda Uji

Jenis Benda Uji	Variabel		q _{all} (kg/cm ²)
	Jarak Kolom (cm)	Panjang kolom (cm)	
Tanah Asli	-	-	4,66
Tanah Stabilisasi Penuh	-	-	13,57
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	4,8	10	6,06
	6	10	5,82
	7,2	10	3,39
	4,8	15	8,43
	6	15	6,70
	7,2	15	4,53
	4,8	20	8,22
	6	20	7,45
	7,2	20	6,79

Dari Tabel 3, daya dukung izin (q_{all}) dari semua benda uji *deep soil mixing* termasuk tanah tanpa perbaikan mempunyai nilai yang lebih besar daripada beban luar akibat struktur perkerasan dan beban sumbu roda, namun perlu diingat bahwa benda uji penelitian memiliki kadar air yang optimum sedangkan pada kondisi di lapangan nilai kadar air tanah dapat berubah-ubah dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan cuaca.

Analisis Pengembangan (Swelling)

Pada tanah ekspansif, selain nilai daya dukung yang rendah nilai pengembangan tanah juga tinggi, hal ini menyebabkan tanah ekspansif bersifat tidak stabil. Dalam penelitian ini dilakukan stabilisasi pada tanah ekspansif dengan beberapa persentase perbaikan yang berbeda-beda lalu dilakukan uji *swelling*. Besarnya nilai swelling pada masing-masing persentase selanjutnya akan dijadikan acuan untuk menentukan nilai pengembangan benda uji *deep soil mixing* (DSM).



Gambar 9. Hubungan nilai pengembangan terhadap persentase stabilisasi

Berdasarkan Gambar 9, nilai pengembangan tanah (*swelling*) menurun seiring bertambahnya persentase perbaikan dengan nilai pengembangan terendah adalah sebesar 0,136% pada persentase perbaikan 100%. Grafik pada Gambar 9 selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan untuk mengetahui nilai pengembangan masing-masing benda uji *deep soil mixing* (DSM) yang dimodelkan didalam box.

Tabel 4. Nilai Pengembangan Benda Uji

Jenis Benda Uji	Variabel Kolom		Persentase Perbaikan (%)	Swell (%)
	Jarak (cm)	Panjang (cm)		
Tanah Asli	-	-	0	8,114
Tanah Stabilisasi Penuh	-	-	100	0,186
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM	4,8	10	44,51	1,510
	6	10	29,00	2,713
	7,2	10	19,25	3,921
	4,8	15	66,76	0,651
	6	15	43,49	1,569
	7,2	15	28,88	2,725
	4,8	20	89,01	0,281
	6	20	57,99	0,907
	7,2	20	38,51	1,894

Menurut Madhyannapu & Puppala (2014), nilai heave sebesar 25 mm dapat merusak konstruksi perkerasan jalan sehingga perlu dilakukan upaya perbaikan tanah, lebih spesifik disebutkan untuk konstruksi perkerasan lentur nilai heave yang disarankan adalah 12 mm, sedangkan untuk konstruksi perkerasan kaku 18 mm.

Jika diasumsikan rata-rata kedalaman zona aktif di Kabupaten Bojonegoro adalah 1,5 meter, maka persentase pengembangan tanah keatas (*heave*) yang disarankan adalah 0,8% untuk

konstruksi perkerasan lentur dan 1,2% untuk konstruksi perkerasan kaku.

Berdasarkan kriteria tersebut, maka untuk memenuhi nilai *heave* izin konfigurasi deep soil mixing yang sesuai untuk konstruksi perkerasan lentur adalah pada jarak kolom 1D dengan panjang kolom 15 cm (*swelling*=0,651%), sedangkan untuk konstruksi perkerasan kaku konfigurasi yang sesuai adalah pada jarak kolom 1,25D dengan panjang kolom 20 cm (*swelling*=0,907%).

KESIMPULAN

1. Perbaikan tanah berupa stabilisasi kimia dengan kapur dapat meningkatkan daya dukung serta mengurangi pengembangan pada tanah ekspansif Bojonegoro, pada kondisi kadar air optimum tanah tanpa perbaikan memiliki nilai daya dukung sebesar 6,53 kg/cm² dan pengembangan (*swelling*) sebesar 8,114% sedangkan untuk tanah yang telah distabilisasi penuh memiliki nilai daya dukung sebesar 19,001 kg/cm² dan pengembangan sebesar 0,186%.
2. Pada benda uji *deep soil mixing* dengan diameter kolom 4,8 cm dan pola kolom *triangular*, daya dukung tanah ekspansif cenderung meningkat berbanding lurus dengan persentase volume perbaikannya, peningkatan daya dukung tertinggi sebesar 92,56% terdapat pada persentase paling besar yaitu 89,01% (jarak kolom 1D dan panjang kolom 20 cm). pengaruh jarak kolom lebih signifikan dibandingkan panjang kolom, rata-rata selisih nilai BCI pada variasi jarak (L) adalah 62,62% sedangkan untuk variasi panjang kolom (D_r) adalah 56,81%.
3. Pengembangan tanah ekspansif dapat dikurangi dengan stabilisasi kimia menggunakan kapur, pada benda uji *deep soil mixing* besarnya pengembangan menurun seiring peningkatan persentase stabilisasi. Pengembangan tanah ekspansif dapat dikurangi sampai dengan 96,54% pada persentase perbaikan 89,01% (jarak kolom 1D dan kedalaman 20 cm), namun belum jelas keterkaitan antara jarak kolom maupun kedalaman kolom terhadap penurunan pengembangan tanah ekspansif.
4. Untuk konstruksi perkerasan jalan, keseluruhan benda uji memiliki daya dukung izin yang lebih besar dibandingkan beban luar yang diterima, namun benda uji berada dalam kondisi kadar air optimum. Perlu diperhatikan juga benda uji mana yang memenuhi ketentuan ditinjau dari pengembangan keatas (*heave*).
5. Dalam hal pengembangan tanah keatas (*heave*), untuk konstruksi perkerasan lentur benda uji yang memenuhi kriteria adalah pada jarak kolom 4,8 cm (1D) serta kedalaman 15

cm (*swelling*=0,651%), sedangkan untuk konstruksi perkerasan kaku benda uji yang memenuhi kriteria adalah pada jarak kolom 6 cm (1,25D) serta kedalaman 20 cm (*swelling*=0,907%).

SARAN

1. Pemodelan benda uji hendaknya menggunakan material yang lebih kuat, penggunaan boks *fiberglass* rentan terhadap kerusakan jika digunakan berkali-kali. Boks untuk pemodelan disarankan memiliki dimensi yang lebih besar seperti 40×40×40 cm, sehingga area pengaruh beban dapat diamati dengan lebih baik.
2. Perlu dikaji lebih dalam bagaimana perilaku kolom stabilisasi dalam transfer beban, kolom stabilisasi memiliki kekakuan yang lebih besar dibanding tanah sekitarnya, sehingga tanah dibawah pelat pembebanan tidak homogen. Dalam penelitian dimasa mendatang sebaiknya dasar teori perhitungan daya dukung harus lebih relevan sehingga metode penelitian dapat disesuaikan dengan tujuan dan rancangan penelitian.
3. Campuran tanah dengan kapur sulit untuk mencapai kondisi homogen dengan pencampuran manual, untuk penelitian selanjutnya mengenai stabilisasi menggunakan kapur diperlukan pencampur mekanis untuk menghasilkan campuran yang lebih homogen.
4. Diperlukan pengujian tanah dilapangan pada daerah penelitian untuk mengetahui kedalaman zona aktif tanah ekspansif di Bojonegoro sebagai acuan dalam pembuatan model benda uji dan analisis pengembangan keatas (*heave*).
5. Perlu diteliti lebih lanjut bagaimana pengaruh jarak dan panjang kolom stabilisasi terhadap *swelling* dengan membuat variasi jarak dan panjang kolom pada benda uji *swelling*.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 1996. *Standard Methods of Test for Determining Expansive Soils*, T 258-81.
- Akagi, T. 1990. *Improvement of Clay Soil by Addition of Cement or Lime*. Proceedings Konferensi Geoteknik Indonesia IV. Bandung: Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia.
- Bouassida, M. & Porbaha, A. 2004. *Ultimate Bearing Capacity of Soft Clay Reinforced by A Group of Columns – Application to A Deep Mixing Technique*. Soils and Foundations Vol.44. Tokyo: Japanese Geotechnical Society.
- Broms, B. B. 1991. *Stabilization of Soil with Lime Columns*. Foundation Engineering Handbook

- Das, B. M. 1985. *Principles of Geotechnical Engineering, Jilid I*. Terjemahan Noor E M. & Indrasurya, B. M. Surabaya: Fakultas Teknik Sipil Institut Teknologi 10 Nopember.
- Das, B. M. 2008. *Advanced Soil Mechanics Third Edition*. New York: Taylor & Francis.
- Das, B. M. 2014. *Principles of Foundation Engineering Eighth Edition*. Boston: Cengage Learning.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1996. *Spesifikasi Kapur untuk Stabilisasi Tanah*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan – Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2012. *Manual Desain Perkerasan Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum
- Federal Highway Administration. 2000. *An Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Applications*. Virginia: Federal Highway Administration.
- Firdaus, A. M. 2016. Pengaruh Kadar Air dan Persentase Stabilisasi dengan 10% Kapur terhadap Kekuatan Tanah Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Ishibashi, I. & Hazarika H. 2015. *Soil Mechanics Fundamentals and Applications Second Edition*. Florida: CRC Press.
- Kosasih, R. H. 2016. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Deep Soil Mixing (DSM) 10% Kapur Diameter 5 CM Berpola Triangular Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Laras, A. W. 2016. Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan (*Curing*) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (*Swelling*) Tanah Lempung Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Madhyannapu, R. S. & Puppala, A. J. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE.
- McElvaney, J., Supriyono, Nasution, S. 1990. *Laboratory Investigation of An Expansive Clay From East Java*. Proceedings Konferensi Geoteknik Indonesia IV. Bandung: Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia.
- National Lime Association. 2004. *Lime Treated Soil Construction Manual Lime Stabilization & Lime Modification*. Virginia: National Lime Association.
- Pourakbar, S. 2015. Deep Mixing Columns – A Review. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*. Selangor: Universiti Putra Malaysia.
- Ranggaesa, R. A. 2017. Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Kekuatan dan Pengembangan (*Swelling*) Pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Suwarno. 1990. *Alternatif Perbaikan Tanah Mengembang Bojonegoro, Jawa Timur untuk Konstruksi Jalan Raya*. Proceedings Konferensi Geoteknik Indonesia IV. Bandung: Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia.
- Zaika, Y. & Rachmansyah, A. 2016. *Improvement of High Expansive Soils by Deep Soil Mixing Method in The Small Scale Laboratory Experiment*. Proceedings Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment. Bangkok: GEOMATE.