

STABILISASI TANAH EKSPANSIF DENGAN METODE DEEP SOIL MIXING (DSM) BERPOLA PANELS DAN KAPUR DENGAN VARIASI JARAK DAN PANJANG KOLOM DIAMETER 3,2 CM TERHADAP PERUBAHAN DAYA DUKUNG DAN PENGEMBANGAN

(Stabilization of Expansive Soil with Deep Soil Mixing (DSM) Method by using Panels Pattern with lime which Depth and Distance Variation (Diameter 3,2 cm) to changing of Bearing Capacity and Swelling)

Radius Suryajaya Tejokusumo, Eko Andi Suryo, Yulvi Zaika
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia
Email : radius.suryajayat@gmail.com

ABSTRACT

Expansive clay soil can cause some damages to construction in cause of high potential in shrinkage. Another problem can also occur on expansive soil, it happen because of low bearing capacity in high water content. Expansive soil can be found in Ngasem, Bojonegoro. Because of that problem, expansive soil need to stabilize to increase bearing capacity and reduce swell potential. Stabilization of expansive soil improve on characteristic of soil. This research is focused on variety of depth (Df) and space of coloumn with lime as additive material. Usage of lime material can reduce index plasticity of soil. Deep Soil Mixing (DSM) is one of method of soil stabilization. On this research it use DSM method with 8% lime with variety of depth (Df) and space. Some tests need to conducted in laboratory, to determine bearing capacity by do loading test in small scalle model (30x30x30) cm. Sample of soil which used lime will need 3 days of curing process. Variety of space are 1D, 1,25D, 1,5D and variety of depth (Df) are 10 cm, 15 cm, 20 cm. This research is proving that stabilization of soil with DSM by using 8% lime can increase bearing capacity and reduce swell potential. Variety of space and depth (Df) can cause variety number of result, which is percentage of soil stabilization that can affect changes on bearing capacity and swelling potential. Based on result of stabilization with DSM, panels pattern with distance (L) = 3,2 cm and depth (Df) = 20 cm has highest improvement of bearing capacity and smallest swell potential. These pattern can give value of bearing capacity (q_u) = 36,4 kg/cm² and swelling = 0,369%.

Keywords : Expansive Clay Soil, Stabilization, Deep Soil Mixing (DSM), Bearing Capacity, Swelling

PENDAHULUAN

Akibat yang ditimbulkan tanah lempung ekspansif karena memiliki potensi kembang susut yang tinggi menyebabkan berbagai permasalahan konstruksi. Sifat tanah ekspansif seperti daya dukung rendah dan kadar air berubah secara drastis mengakibatkan tanah menjadi retak setelah kering salah satunya di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro. Untuk itu perlu dilakukan perbaikan sifat fisik tanah dengan cara stabilisasi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi nilai pengembangannya.

Stabilisasi dilakukan untuk memperbaiki sifat fisik tanah sehingga mutu tanah akan meningkat. Penelitian difokuskan pada pengaruh variasi jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f) dengan material aditif kapur. Penggunaan material aditif kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi plastisitas tanah. Metode yang digunakan pada penelitian merupakan *deep soil mixing* (DSM)

dengan mencampurkan 8% kapur pada kedalaman rata-rata 1,5 meter dengan variasi kolom, kedalaman dan jarak tertentu. Pengujian dilakukan di Laboratorium, dengan memadatkan model tanah pada *box* berukuran (30x30x30) cm dan kemudian akan dilakukan uji pembebanan (*load test*). Pada model tanah akan dilakukan perawatan (*curing*) selama 3 hari sebelum di uji pembebanan dengan variasi jarak antar kolom (L) 1D, 1,25D, 1,5D dan variasi kedalaman kolom (D_f) 10 cm, 15 cm, 20cm.

TINJAUAN PUSTAKA

Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah dengan tambahan bahan aditif kapur dapat memperbaiki sifat-sifat yang buruk dari tanah seperti potensi *swelling*, daya dukung, sifat teknis dan sensitifitas terhadap tanah akibat efek dari reaksi kapur dengan lempung sehingga upaya ini dapat mempermudah pelaksanaan konstruksi.

Deep Soil Mixing

DSM adalah metode modifikasi tanah untuk meningkatkan kualitas dengan pelaksanaan langsung. Dengan tujuan meningkatkan daya dukung, mereduksi penurunan dan mereduksi *swelling*. (Raja & Anand, 2004)

Pada kolom DSM terdapat berbagai pola, namun yang umum digunakan yaitu *panels*, *square* dan *triangular*.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian Pendahuluan

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui klasifikasi tanah, antara lain:

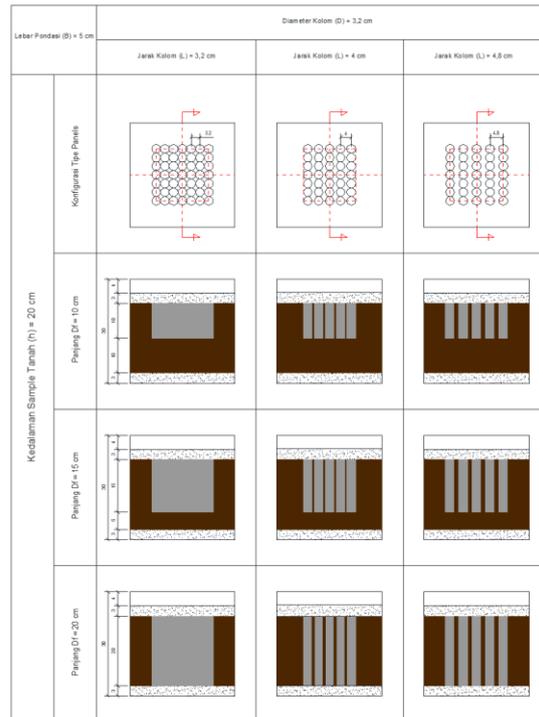
1. Specific Gravity (ASTM 1992 D 854-92)
2. Liquid Limit dan Plastic Limit (ASTM 1984 D 4318-84)
3. Shrinkage Limit (ASTM D 427-04)
4. Klasifikasi Tanah (ASTM 1992 D 2487-92)
5. Pemadatan Standar (ASTM D -698, Metode B)

Uji Pembebanan

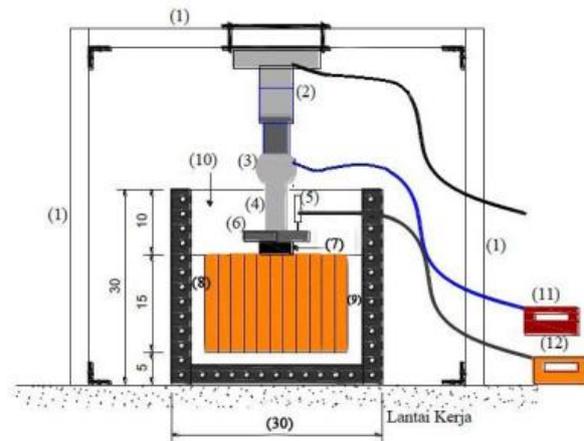
Uji pembebanan dilakukan untuk mengetahui daya dukung dan penurunan. Dengan tahapan sample di keringkan sampai dengan lolos ayakan No.4 yang kemudian diberikan kadar air optimum (OMC) dari hasil uji pemadatan.

Pembuatan model tanah dalam box dilakukan dengan berbagai variasi yaitu tanah asli, tanah dengan 100% stabilisasi, tanah dengan stabilisasi DSM variasi jarak (L) 3,2cm, 4cm, 4,8cm dan dengan variasi kedalaman (D_f) 10cm, 15cm dan 20cm dilakukan pada box dengan ukuran (30x30x30)cm yang kemudian di *curing* 3 hari.

Selanjutnya, untuk mengetahui pembacaan hasil uji pembebanan dengan menggunakan *load cell* untuk membaca beban yang terjadi dan dengan *LVDT* untuk mengetahui penurunan. Berhentinya pembacaan saat beban diberikan sama sebanyak tiga kali berturut-turut akan tetapi penurunan terus bertambah.



Gambar 1. Variasi jarak (L) dan kedalaman (D_f) kolom DSM pola *panels* diameter 3,2 cm



Gambar 2. Simulasi Uji Pembebanan

Tabel 1. Tabel Uji Pembebanan

Pembacaan	Luas Pelat (A)	Beban (P)	Penurunan (S)	Tegangan (σ)
LVDT	cm ²	kg	mm	kg/cm ²
				$\sigma = P/A$
0	25			
50	25			
100	25			
150	25			
200	25			
250	25			
dst	25			

Uji Pengembangan

Uji pengembangan dilakukan guna mengetahui perubahan tinggi model tanah selama perendaman

dari tinggi awal model tanah yang dinyatakan dalam persentase (%).

Uji pengembangan sesuai dengan ASTM D4546-86 dengan berbagai variasi model benda uji yaitu tanah asli, tanah dengan stabilisasi 100%, tanah DSM 7 kolom (D= 3,2cm), tanah DSM 6 kolom (D= 4cm), tanah DSM 5 kolom (D= 4,8cm) dan tanah DSM 7 kolom (D= 4,8cm) variasi ini bertujuan mengetahui pengembangan yang terjadi akibat perbaikan tanah yang dilakukan terhadap tanah sebelum di stabilisasi.

Tabel 2. Tabel Uji Pengembangan

Waktu (menit)	Pembacaan (x0,01 mm)	Pengembangan (%)
5		
10		
15		
Dst.		

Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengetahui pengaruh peningkatan yang terjadi akibat tanah yang di stabilisasi terhadap tanah sebelum di stabilisasi.

Analisis yang dilakukan yaitu analisis metode *tangen intersection*, analisis bearing capacity improvement (BCI_u) berdasarkan daya dukung batas dan pemeriksaan pengembangan.

Tabel 3. Tabel Analisis *tangen intersection*

Jenis Benda Uji	Variabel	q_u kg/cm ²	q (q_u/f_s) kg/cm ²
Tanah Asli	-		
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	-		
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 10 cm		
	L = 4 cm ; Df = 10 cm		
	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm		
	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm		
	L = 4 cm ; Df = 15 cm		
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm		
	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm		
	L = 4 cm ; Df = 20 cm		
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm		

Tabel 4. Tabel Analisis BCI_u

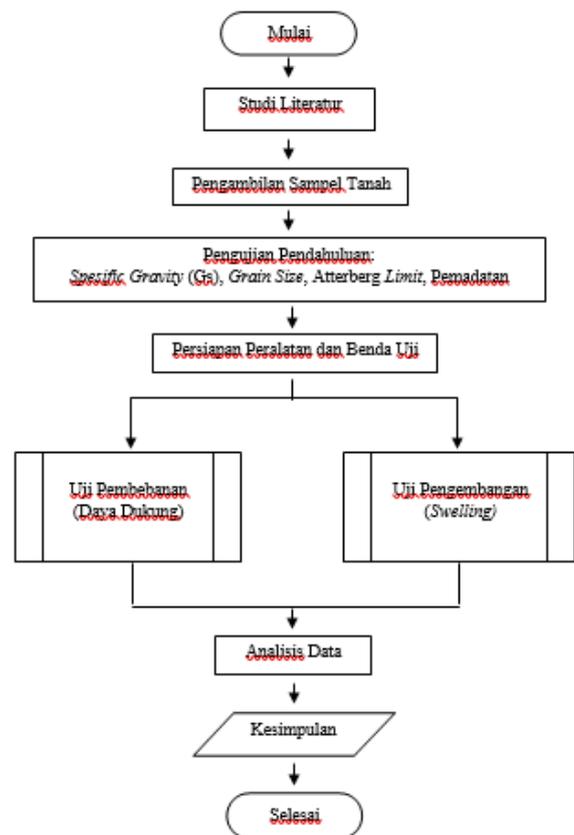
Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (D)	q_{ul}	q_u	BCI
Cm	Cm	kg/cm ²	kg/cm ²	%
1D (3,2 cm)	10 cm			
	15 cm			
	20 cm			
1,25D (4 cm)	10 cm			
	15 cm			
	20 cm			
1,5D (4,8 cm)	10 cm			
	15 cm			
	20 cm			

Tabel 5. Tabel Pemeriksaan Pengembangan

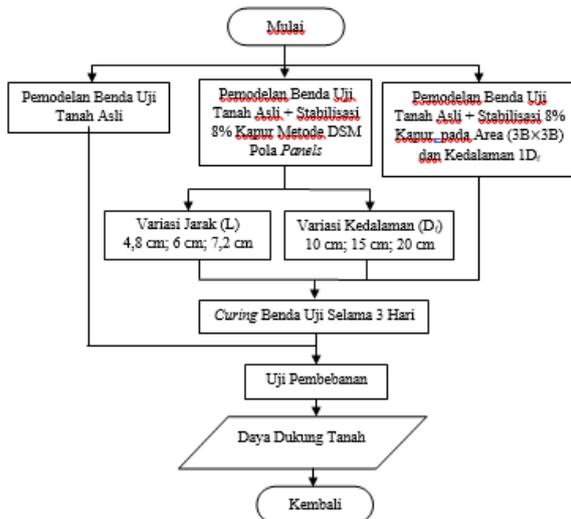
Benda Uji	Volume Benda Uji (V) (cm ³)	Volume DSM (Vi) (cm ³)	Persentase Perbaikan (Vi/V) (%)	Pengembangan (Swelling) (%)
Tanah Asli				
DSM dengan 7 kolom (D=3,2 cm)				
DSM dengan 6 kolom (D=4 cm)				
DSM dengan 5 kolom (D=4,8 cm)				
DSM dengan 7 kolom (D=4,8 cm)				
Tanah Stabilisasi 100%				

Diagram Alir

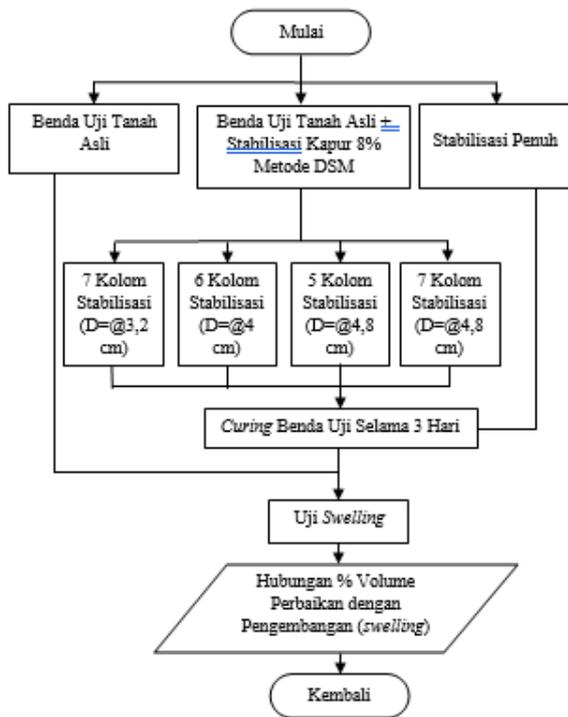
1. Penelitian



2. Uji Pembebanan



3. Uji Pengembangan



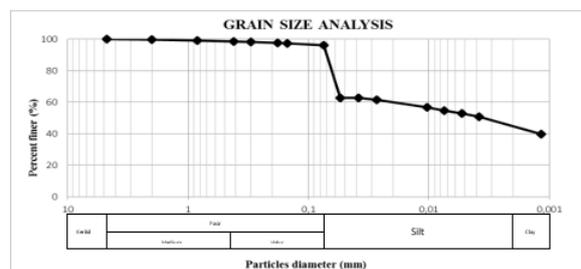
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan dilakukan untuk mengetahui klasifikasi tanah, dengan hasil sebagai berikut :

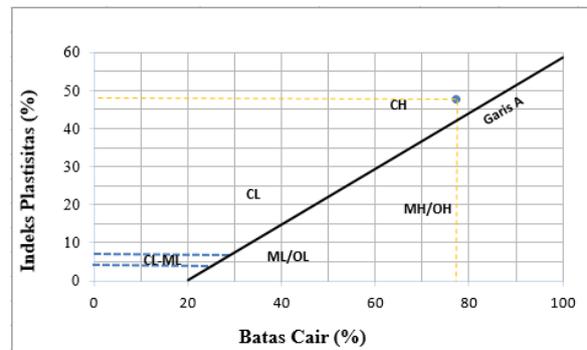
Tabel 6. Hasil Uji Sifat Fisik Tanah

Jenis Percobaan	Satuan	Nilai
Specific Gravity (Gs)		2,524
Berat Volume	gr/cm ³	1,691
Batas Cair (LL)	%	77,06
Batas Plastis (PL)	%	29,84
Batas Susut (SL)	%	8,30
Indeks Plastisitas (PI)	%	47,22
Fraksi Lempung (C)	%	43



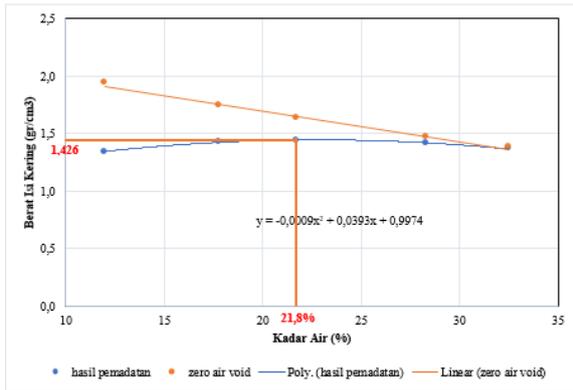
Gambar 3. Analisis Butiran

Diperoleh lolos saringan No. 200 yaitu 96,24% berdasarkan klasifikasi USCS masuk ke dalam tanah butir halus. Dengan nilai LL= 77,06%, PI=47,22% yang diplotkan dalam grafik klasifikasi USCS termasuk ke dalam tanah lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi (CH).



Gambar 4. Klasifikasi USCS

Uji Pemadatan dilakukan untuk mengetahui kadar air optimum (OMC) pada kondisi berat isi maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$). Berdasarkan hasil pengujian diperoleh kadar air optimum sebesar 21,8%



Gambar 5. Hasil Uji Pematatan

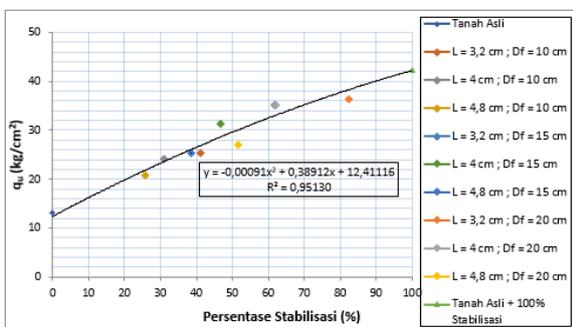
Analisis Daya Dukung Tanah

Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Stabilisasi DSM

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh nilai daya dukung tanah mengalami peningkatan dengan semakin besarnya persentase tanah yang distabilisasi. Ditampilkan sebagai berikut.

Tabel 7. Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi (%)	P_u (kg)	q_u (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	0	325	13
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	-	100	1060	42,4
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi	L = 3,2 cm ; Df = 10 cm	41,12	635	25,4
	L = 4 cm ; Df = 10 cm	31,03	600	24
	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	25,74	520	20,8
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm	61,67	880	35,2
	L = 4 cm ; Df = 15 cm	46,55	780	31,2
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	38,61	630	25,2
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm	82,23	910	36,4
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	62,06	880	35,2
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	51,48	675	27



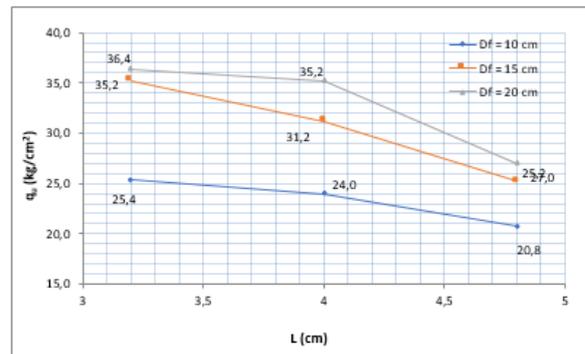
Gambar 6. Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

Nilai Daya Dukung pada Variasi Jarak (L) dan Kedalaman (Df)

Analisis ini untuk mengetahui pengaruh daya dukung dengan variasi jarak (L) terhadap kedalaman (Df) berdasarkan hasil pengujian terlihat nilai q_u terus meningkat dengan semakin rapatnya jarak (L) dan semakin besarnya kedalaman (Df), ditampilkan sebagai berikut.

Tabel 8. Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak (L) terhadap Kedalaman (Df)

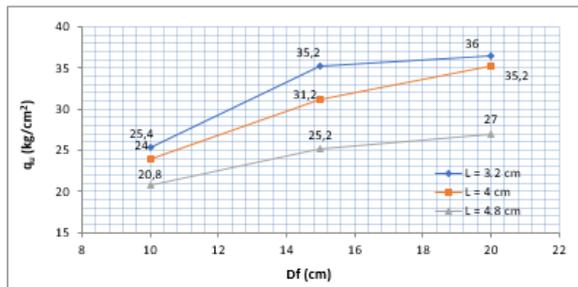
Jenis Beban Uji	Panjang Kolom (Df) (cm)	Jarak Kolom (L) (cm)	P_u (kg)	q_u (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	-	325	13,0
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	20	3,2	635	25,4
		4	600	24,0
		4,8	520	20,8
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	15	3,2	880	35,2
		4	780	31,2
		4,8	630	25,2
	20	3,2	910	36,4
		4	880	35,2
		4,8	675	27,0



Gambar 7. Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak (L) terhadap Kedalaman (Df)

Tabel 9. Nilai Daya Dukung dengan Kedalaman Kolom (Df) terhadap Jarak (L)

Jenis Beban Uji	Jarak Kolom (L) (cm)	Kedalaman Kolom (Df) (cm)	P_u (kg)	q_u (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	-	325	13
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	20	10	635	25,4
		15	880	35,2
		20	910	36
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	4	10	600	24
		15	780	31,2
		20	880	35,2
	4,8	10	520	20,8
		15	630	25,2
		20	675	27



Gambar 8. Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman (D_f) terhadap Jarak (L)

Analisis Metode *Tangen Intersection*

Metode *tangen intersection* digunakan untuk menentukan nilai daya dukung dan penurunan yang terjadi. Cara ini dilakukan untuk menentukan penurunan pondasi menggunakan garis tangensial yang satu ditarik dari atas dan yang lainnya ditarik dari sisi bawah pada grafik sehingga akan diperoleh titik perpotongan yang digunakan sebagai daya dukung dan penurunan. (Yrautmann & Kulhawy, 1998)

Analisis metode *tangen intersection* diperoleh nilai daya dukung (q_s) yang lebih rendah jika dibandingkan daya dukung ultimit (q_u). Terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode ini, sedangkan dengan metode *tangen intersection* dapat diperkirakan penurunan yang terjadi pada perpotongan tangen bila ditarik garis horizontal. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai Daya Dukung metode *tangen intersection*

Jenis Benda Uji	Variabel	q_s kg/cm ²	q (q_u/f_s) kg/cm ²
Tanah Asli	-	5,4	3,9
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	-	22,8	16,3
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 10 cm	6,9	4,9
	L = 4 cm ; Df = 10 cm	6	4,3
	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	5,9	4,2
	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm	9,6	6,9
	L = 4 cm ; Df = 15 cm	8,8	6,3
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	7	5,0
	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm	13,4	9,6
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	10,4	7,4
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	9,8	7,0

Analisis *Bearing Capacity Improvement (BCI_u)*

Analisis BCI_u merupakan analisis yang membandingkan daya dukung batas saat tanah distabilisasi dengan tanah sebelum distabilisasi. Sehingga dapat diketahui peningkatan daya dukung yang terjadi akibat pengaruh stabilisasi.

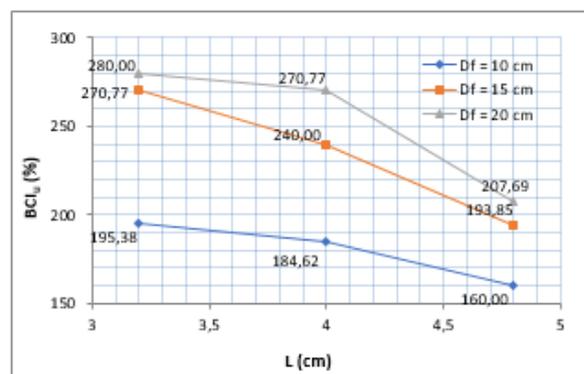
BCI_u dengan Variasi Jarak (L) terhadap Kedalaman (D_f)

Hasil Analisis ditampilkan pada Tabel 11 dan Gambar 9, membuktikan semakin rapat jarak (L) nilai

BCI_u akan semakin besar. Dengan analisis ini diketahui variasi jarak (L) berpengaruh pada nilai Daya Dukung.

Tabel 11. BCI_u pada Variasi Jarak (L)

Df	L	q_u	q_u tanah sebelum distabilisasi	BCI_u	Peningkatan BCI_u
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)
10	3,2	25,4	13	195,38	10,77
	4	24	13	184,62	
	4,8	20,8	13	160,00	
15	3,2	35,2	13	270,77	30,77
	4	31,2	13	240,00	
	4,8	25,2	13	193,85	
20	3,2	36,4	13	280,00	9,23
	4	35,2	13	270,77	
	4,8	27	13	207,69	



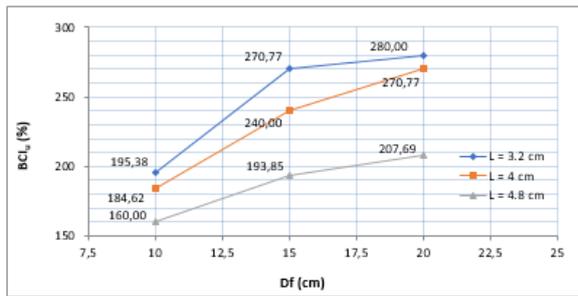
Gambar 9. Pengaruh Variasi Jarak (L) terhadap BCI_u

BCI_u dengan Variasi Kedalaman (D_f) terhadap Jarak (L)

Hasil Analisis ditampilkan pada Tabel 12 dan Gambar 10. Menunjukkan bahwa peningkatan lebih besar terjadi pada variasi kedalaman (D_f) 10cm ke 15cm, jika dibandingkan dengan 15cm ke 20cm. Hal ini terjadi disebabkan karena saat prosedur pelaksanaan upaya yang dilakukan tidak seragam yang mengakibatkan perbedaan peningkatan nilai BCI_u .

Tabel 12. BCI_u pada Variasi Kedalaman (D_f)

L	Df	q_u	q_u tanah sebelum distabilisasi	BCI_u	Peningkatan BCI_u
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)
3,2	10	25,4	13	195,38	75,38
	15	35,2	13	270,77	
	20	36,4	13	280,00	
4	10	24	13	184,62	55,38
	15	31,2	13	240,00	
	20	35,2	13	270,77	
4,8	10	20,8	13	160,00	33,85
	15	25,2	13	193,85	
	20	27	13	207,69	



Gambar 10. Pengaruh Variasi Kedalaman (D_f) terhadap BCI_u

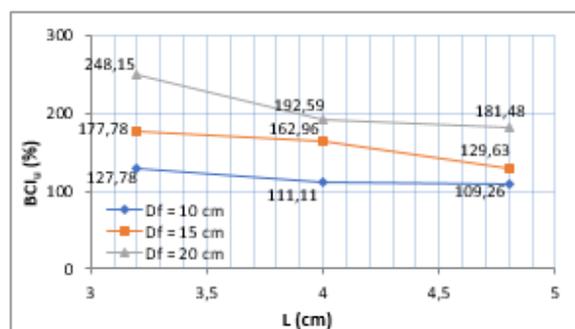
Analisis BCI_s dengan Metode *Tangen Intersection*

Analisis ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi peningkatan BCI_s menggunakan metode *tangen intersection* ditampilkan pada Tabel 13.

Tabel 13. BCI_s dengan Metode *Tangen Intersection*

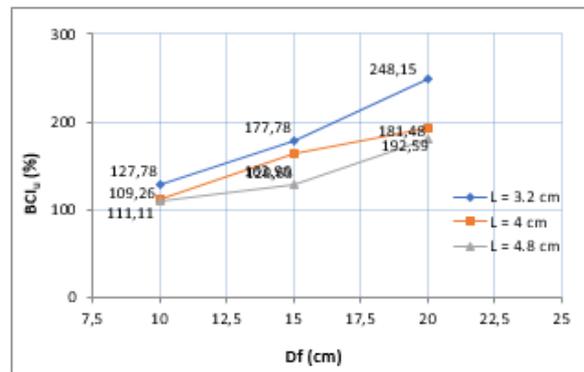
L	Df	q_s	q_u tanah sebelum distabilisasi	BCI
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)
3,2	10	6,9	5,4	127,78
	15	9,6	5,4	177,78
	20	13,4	5,4	248,15
4	10	6	5,4	111,11
	15	8,8	5,4	162,96
	20	10,4	5,4	192,59
4,8	10	5,9	5,4	109,26
	15	7	5,4	129,63
	20	9,8	5,4	181,48

Berdasarkan Gambar 11 hasil analisis menggunakan metode *tangen intersection* terlihat variasi jarak (L) mempengaruhi peningkatan daya dukung tanah, variasi jarak (L) 3,2cm dan kedalaman (D_f) 20cm memiliki daya dukung terbesar yaitu 248,15%



Gambar 11. BCI_s terhadap Variasi Jarak (L)

Berdasarkan Gambar 12 hasil analisis menggunakan metode *tangen inetersection* terlihat variasi kedalaman (D_f) berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah, semakin besar kedalaman (D_f) maka akan menghasilkan nilai daya dukung yang semakin besar.



Gambar 12. BCI_s terhadap Variasi Kedalaman (D_f)

Daya Dukung Izin

Daya dukung izin digunakan untuk mengetahui nilai daya dukung yang diizinkan berdasarkan kebutuhan jalan raya dengan menggunakan pembebanan "T" dan beban lapis perkerasan pada variasi kolom DSM yang ditampilkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Nilai Daya Dukung Tanah Perbaikan

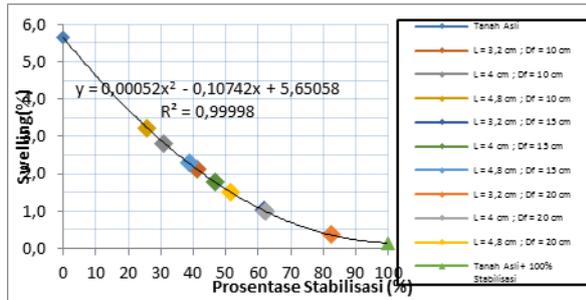
Jenis Benda Uji	Variabel	q_u	q
		kg/cm ²	(qu/fs) kg/cm ²
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 10 cm	25,4	18,1
	L = 4 cm ; Df = 10 cm	24	17,1
	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	20,8	14,9
	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm	35,2	25,1
	L = 4 cm ; Df = 15 cm	31,2	22,3
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	25,2	18,0
Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm	36,4	26,0
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	35,2	25,1
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	27	19,3

Daya dukung akibat beban "T" diperoleh 2,42 kg/cm² berdasarkan beban kendaraan truk dengan beban roda ganda 10 ton, beban lapis perkerasan 0,04 kg/cm² dan beban lapis pondasi 0,0615 kg/cm² sehingga beban luar total sebesar 2,5215 kg/cm². Berdasarkan Tabel 14 semua variasi memenuhi daya dukung yang diizinkan.

Pengembangan (*Swelling*)

Berdasarkan pengujian *swelling* membuktikan semakin besar persentase stabilisasi maka akan semakin kecil pengembangan yang terjadi. Hal ini terjadi karena kapur mengalami flokulasi sehingga menyebabkan butiran halus lempung menjadi lebih padat.

Dari uji *swelling* diperoleh grafik pada Gambar 13 yang kemudian di plotkan persentase stabilisasi model tanah dengan berbagai variasi jarak (L) dan kedalaman (D_f) Ditampilkan pada Tabel 15.



Gambar 13. Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Tabel 15. Nilai Pengembangan terhadap Persentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi %	Swelling %	Penurunan Swelling %
Tanah Asli	-	0	5,659	0
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	-	100	0,136	97,59
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM	L = 3,2 cm ; Df = 10 cm	41,12	2,117	62,59
	L = 4 cm ; Df = 10 cm	31,03	2,814	50,27
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	25,74	3,222	43,06
	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm	61,67	1,024	81,91
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 4 cm ; Df = 15 cm	46,55	1,785	68,45
	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	38,61	2,281	59,70
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm	82,23	0,369	93,47
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	62,06	1,007	82,20
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 8% Kapur	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	51,48	1,511	73,30

Berdasarkan hasil pengujian dengan stabilisasi DSM variasi kedalaman (D_f) 20cm dan jarak (L) 3,2cm merupakan nilai *swelling* terkecil yaitu 0,369% dan mengalami penurunan sebesar 93,47% dari tanah sebelum distabilisasi

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm untuk struktur *rigid pavement*. Tanah lempung ekspansif di lokasi penelitian rata-rata memiliki kedalaman 1,5 meter sehingga persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%. Berdasarkan hasil analisis uji pengembangan terhadap model di laboratorium, pengembangan izin tersebut yang konfigurasi yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang untuk *flexible pavement* merupakan jarak antar kolom (L) = 3,2 cm dengan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm.

Pengembangan tanah untuk struktur *rigid pavement* pada kedalaman rata-rata 1,5 meter dengan persentase mengembang maksimum yang diizinkan sebesar 1,2%. Berdasarkan hasil analisis uji pengembangan konfigurasi yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang merupakan jarak antar kolom (L) = 3,2 cm dengan kedalaman kolom (D_f) = 15 cm, jarak antar kolom (L) = 4 cm dengan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm dan jarak antar kolom (L) = 4,8 cm dan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm.

KESIMPULAN

Pengaruh variasi jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f) pada stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* diameter 3,2 cm terhadap daya dukung dan pengembangan tanah. Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan 8% kapur mampu meningkatkan daya dukung tanah dan mampu menurunkan nilai pengembangan (*swelling*). Semakin tinggi persentase stabilisasi maka nilai daya dukung akan semakin meningkat dan semakin tinggi persentase stabilisasi maka nilai *swelling* akan semakin kecil.
2. Jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm memberikan peningkatan nilai daya dukung (q_u) paling maksimum diantara variasi lainnya yaitu sebesar 36,4 kg/cm² atau meningkat 280,00% dari tanah sebelum distabilisasi. Sedangkan untuk tanah dengan 100% perbaikan memiliki nilai daya dukung (q_u) sebesar 42,4 kg/cm² atau meningkat sebesar 326,15%
3. Stabilisasi kolom DSM dengan 8% kapur mampu menurunkan nilai pengembangan. Semakin besar persentase stabilisasi maka semakin rendah persentase pengembangan tanah. Stabilisasi tanah dengan perbaikan 100% memiliki nilai *swelling* sebesar 0,136% dan mengalami penurunan *swelling* sebesar 97,59%. Variasi jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman 20 cm memiliki nilai *swelling* paling kecil sebesar 0,369% dan mengalami penurunan *swelling* sebesar 93,47% dari tanah sebelum distabilisasi.
4. Berdasarkan pengaruh variasi terhadap nilai pengembangan tanah, jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm mampu memenuhi persentase pengembangan izin untuk struktur *flexible pavement* yaitu sebesar 0,8% pada kedalaman rata-rata 1,5 meter. Sedangkan untuk struktur *rigid pavement* variasi yang memenuhi antara lain L = 3,2 cm ; D_f = 15 cm L = 3,2 cm ; D_f = 20 cm, L = 4 cm ; D_f = 20 cm dan L = 4,8 cm ; D_f = 20 cm.
5. Berdasarkan hasil pengujian, jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm merupakan konfigurasi yang dapat digunakan, Karena mampu memenuhi daya dukung yang diizinkan untuk struktur *flexible pavement* dan *rigid pavement*.

SARAN

Setelah melalui penelitian, perlunya variasi yang lain untuk mengembangkan penelitian sebelumnya antara lain:

1. Perlunya variasi lain pada *density* dan *water content* karena tanah lempung ekspansif sangat dipengaruhi oleh kedua faktor ini.
2. Perlunya metode kerja yang efektif serta alat yang mendukung saat pelaksanaan.
3. Variasi lain yang dapat diberikan berkaitan dengan bahan aditif sehingga dapat dilihat pengaruh yang terjadi pada kondisi yang sama.
4. Untuk menunjang prosedur kerja yang baik diperlukan alat bor dan pencampur tanah sehingga kesalahan saat pelaksanaan dapat di minimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Anshorie, A. A. 2015. *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Single Square Diameter 3 cm Terhadap Daya Dukung Tanah*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. 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.
- Bowles, J. 1984. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta.
- Chen, F. H. 1975. *Foundations on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. 1991, "*Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid I*". Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M., 1995, "*Mekanika Tanah, Jilid I*". Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H, "Overview of unsaturated soil behavior", Proc. Unsaturated soil, 1993, ASCE, pp. 1-31.
- Hakim, A. L. 2015. *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Panels Diameter 2 cm Terhadap Daya Dukung Tanah*. Skripsi. Tidak di publikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ismail, Ahmad. 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*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on The Transition Zone and The Boundary layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Linkoping : Swedish Deep Stabilization Research Center.
- Laras, Ario W. 2016. *Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan (Curing) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Tanah Lempung Ekspansif*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- 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.
- Muntohar, A. S. 2010. Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom di Laboratorium. Jurnal Dinamika Teknik Sipil. 10 (3):202-207. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Ranggaesa, Riota A. 2016. *Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Skempton, A. W. 1953. The Colloidal "Activity" of Clays. Proc. Of The 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering. 1: 57-61. Zurich: Selected Papers on Soil Mechanics.
- Wesley, D. Laurence. 2010. "*Mekanika Tanah Untuk Tanah Endapan dan Residu*" Yogyakarta: Andi
- 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