

Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom Diameter 3 Cm Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Menggunakan Metode DSM Pola *Triangular* Terhadap Daya Dukung Tanah

Ivan Indra Pradika, Suroso, Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail: ivanpradika@gmail.com

ABSTRAK

Sifat tanah lempung ekspansif yang kurang baik seperti, kekuatan geser yang rendah, plastisitas yang tinggi, perubahan volume yang tinggi, serta potensi swelling yang besar. Berdasar pada penelitian terdahulu jenis tanah lempung ekspansif ada di daerah Ngasem Bojonegoro. Penelitian ini dilakukan perbaikan tanah lempung ekspansif dengan metode DSM tipe *triangular* berdiameter kolom 3 cm variasi jarak antar kolom (*L*) 3 cm; 3.75 cm; 4,5 cm dan variasi panjang kolom (*Df*) 5 cm, 10 cm dan 15 cm. Tanah lempung ekspansif dimasukkan kedalam box untuk selanjutnya di uji tegangan tanahnya. Proses pengujian berupa uji tekan pada plat yang ditaruh diatas tanah uji dan sebagai tekanan beban menggunakan dongkrak hidrolik. Pada penelitian ini didapat hasil daya dukung akan meningkat ketika kedalaman kolom semakin besar dan jarak antar kolom dekat. Peningkatan daya dukung dari tanah asli sebesar 256,36% dan pada prosentase stabilisasi sebesar 30,63% swelling tanah sudah dapat dihentikan.

Kata kunci : Tanah, lempung ekspansif, *Deep Soil Mix*, *fly ash*, kedalaman, jarak, daya dukung, *swelling*

Pendahuluan

Perhatian khusus oleh pemerintah Indonesia mengenai pembangunan infrastruktur, sering terkendala oleh beberapa permasalahan terutama pada jenis tanah yang bervariasi di tiap daerahnya. Ragam jenis tanah sertai variasi masalah yang dibawanya mendorong para *engineer* untuk terus ber-inovasi guna kelancaran *project* yang ada.

Salah satu tanah yang bermasalah dan sering dijumpai di berbagai daerah adalah jenis tanah lempung ekspansif yang memiliki sifat kembang dan susut yang cukup tinggi. Kembang-susut inilah yang menyebabkan tanah tidak stabil dan berdampak pada kerusakan struktur diatasnya.

Stabilisasi tanah lempung ekspansif telah dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, salah satunya menggunakan penambahan aditif di dalamnya. Aditif yang sering digunakan antaranya *fly ash*, kapur dan semen. Benny (2014) telah melakukan penelitian tentang pencampuran tanah lempung ekspansif dengan aditif *fly-ash* yang mampu meningkatkan nilai *California Bearing Ratio* tanah lempung ekspansif hingga 16,948 % untuk *curing* 28 hari.

Penelitian ini juga dilakukan (Ailin Nur, 2011) dengan box berukuran 100 x 60 x 70 cm menggunakan 4 kolom diameter 2,5 cm dan panjang kolom 20 cm yang dicampur semen dan kapur. Pada uji yang dilakukan menghasilkan nilai uji kuat tekan 550 kPa - 1000 kPa dengan waktu curing 28 hari..

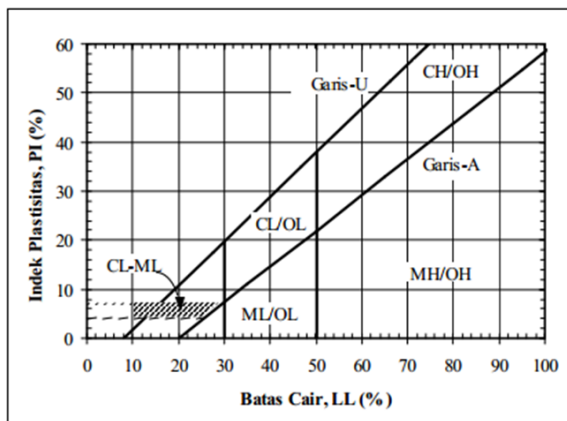
Banyaknya permasalahan tentang hal ini serta kurangnya studi lapangan dan laboratorium maka dirasa perlu untuk melakukan pengembangan terhadap penelitian guna memudahkan penggunaan maupun pengaplikasian metode *Deep Soil Mix* untuk memperbaiki tanah.

Perhatian khusus oleh pemerintah Indonesia mengenai pembangunan infrastruktur, sering terkendala oleh beberapa permasalahan terutama pada jenis tanah yang bervariasi di tiap daerahnya. Ragam jenis tanah sertai variasi masalah yang dibawanya mendorong para *engineer* untuk terus ber-inovasi guna kelancaran *project* yang ada.

Salah satu tanah yang bermasalah dan sering dijumpai di berbagai daerah adalah jenis tanah lempung ekspansif yang memiliki sifat kembang dan susut yang cukup tinggi. Kembang-susut inilah yang menyebabkan tanah tidak stabil dan berdampak pada kerusakan struktur diatasnya.

Tinjauan Pustaka

Tanah merupakan hasil dari proses fisika dan kimia berupa pelapukan. Secara garis besar tanah dapat dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan ukuran partikel yang ada dengan variasi yang besar.



Gambar 1. Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah sistem *Unified*

Tanah lempung adalah jenis tanah yang mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang menyebabkan sifat-sifat plastis pada tanah bila tercampur dengan air (Grim, 1953). Partikel - partikel mineral lempung pada umumnya memiliki ukuran koloid 1 - 2 mikron. Namun, tanah yang memiliki ukuran lebih kecil dari 2 mikron bukan berarti sudah termasuk dalam jenis tanah lempung.

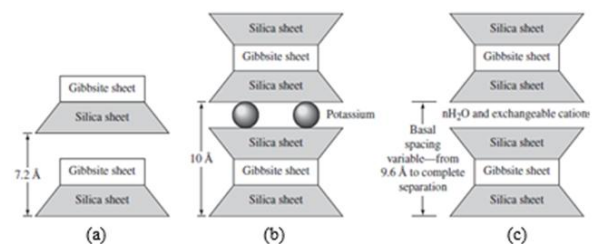
Jenis tanah lempung ekspansif ini adalah jenis lempung yang mempunyai sifat sensitifitas tinggi terhadap adanya perubahan kadar air, hal ini menyebabkan kembang susut (*swelling*) tanah ini juga besar. Saat kandungan air besar, tanah ini mengembang dan dapat berakibat berkurangnya daya dukung. Sebaliknya saat kadar air kurang (kering) maka tanah akan menyusut hingga mengakibatkan tanah mengalami pecah pada permukaan.

Hardiyatmo (1999) menyatakan bahwa sifat tanah lempung umumnya:

1. Ukuran butir halus (kurang dari 0,0002 cm)
2. Permeabilitasnya rendah
3. Kenaikan air kapilernya tinggi
4. Sangat kohesif

5. Kadar kembang susut yang ada tinggi dan proses konsolidasinya lambat

Umumnya terdapat kira - kira 15 macam mineral yang dapat diklasifikasikan mineral lempung (Kerr, 1959). Klasifikasi mineral yang dimaksud dikelompokkan menjadi: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite*. Dari mineral-mineral tersebutlah tanah lempung bias dibagi menjadi dua jenis yaitu tanah lempung ekspansif dan tanah lempung non ekspansif. Adapun tanah lempung ekspansif memiliki susunan mineral lempung yang bersifat kembang dan susut besar jika terjadi perubahan pada kadar air seperti pada kelompok *montmorillonite*. Kelompok *montmorillonite* inilah yang menjadikan tanah lempung menjadi tidak stabil saat kontak dengan air.



Gambar 2. Diagram struktur dari (a)kaolinite (b)illite dan (c)Montmorillonite
Sumber: Das (1995)

Fly-ash merupakan limbah padat yang hasil dari pembakaran batu bara PLTU. Fly ash bisa didapatkan dari pabrik-pabrik yang menggunakan batubara. Fly-ash yang berlimpah sangat memungkinkan untuk diolah dan dimanfaatkan sebagai material konstruksi bangunan maupun sebagai bahan penstabil tanah, khususnya pada tanah lempung ekspansif karena banyak pabrik yang memakai batu bara sebagai bahan bakar.

Stabilisasi adalah salah satu upaya untuk memperbaiki serta meningkatkan kualitas material guna memenuhi standart yang telah ditetapkan. Stabilisasi pada tanah juga dapat dilakukan secara mekanis berupa penumbukan atau pemadatan maupun dengan penggunaan bahan-bahan aditif.

Metode Penelitian

Penelitian ini dibuat dalam dua jenis benda uji, berupa benda uji tanah asli dan benda uji tanah yang distabilisasi dengan 15% *fly Ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing*. Dilakukan pengujian pembebanan tanah asli, kemudian dilakukan uji pada tanah yang telah terstabilisasi. Nilai daya dukung (qu) akan diambil dari tanah non-stabilisasi dan tanah setelah stabilisasi yang sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman kolom *fly-ash*.

Pengujian dilakukan sebanyak jumlah sampel yaitu 9 sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan kedalaman optimum kolom *fly ash* yang menyumbang daya dukung terbesar tanah.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan Model Benda Uji
2. Melakukan pengukuran titik tengah permukaan tanah dengan bantuan penggaris dan tali
3. Melakukan perataan permukaan tanah untuk peletakan pelat pondasi dengan bantuan waterpass sebagai pengontrol kerataan.
4. Meletakkan pelat baja ukuran 5 x 5 cm pada titik tengah permukaan tanah
5. Menyiapkan dan meletakkan satu set alat uji pembebanan Gambar 3.1
6. Melakukan uji pembebanan menggunakan dongkrak hidrolik
7. Pembebanan dilakukan dengan menetapkan keseragaman penurunan 50 digit pada pembacaan LVDT. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan beban pada load cell menunjukkan tiga kali sama berturut-turut pada penurunan yang meningkat.
8. Mencatat penurunan dan beban yang terjadi. Dalam pemodelan benda uji

Data yang telah didapat dari hasil uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah dibuat dengan bantuan software Microsoft excel. Perhitungan daya

dukung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$qu = Pu/A$$

dimana,

qu : daya dukung (Kg/cm^2)

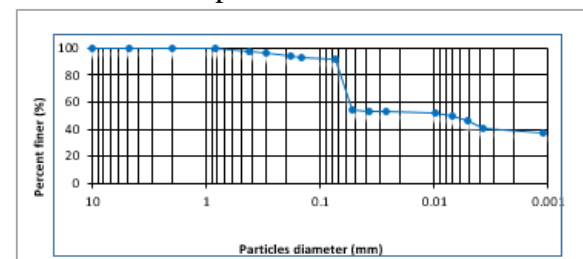
Pu : beban *ultimate* yang diterima (Kg)

A : luas bidang yang menerima gaya ($A=25cm^2$)

Data tersebut kemudian diolah untuk memperoleh besarnya daya dukung beserta penurunan yang terjadi yang kemudian akan dibuat grafik daya dukung tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 15% *fly ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang akan dibandingkan dengan daya dukung tanah asli.

Hasil dan Pembahasan

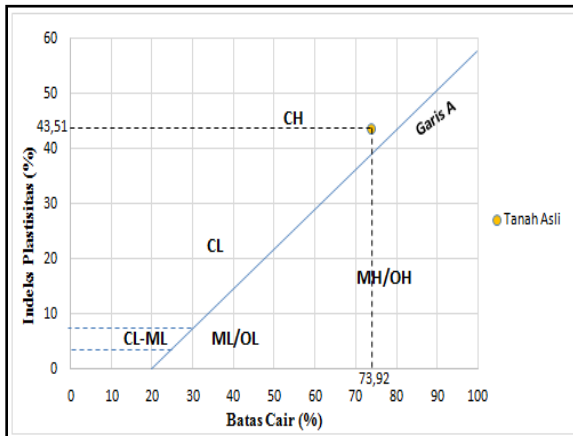
Uji pendahuluan terdiri atas uji *specific gravity*, klasifikasi tanah, Indeks plastisitas, batas susut dan proktor standar.



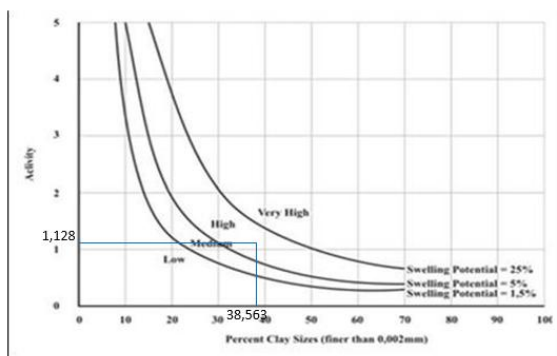
Gambar 3. Gabungan analisa saringan dan hydrometer

Tabel 1. Hasil pemeriksaan batas-batas *atterberg*

Bahan	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Tanah Asli	73,92	30,41	2,8	43,51



Gambar 4. Klasifikasi tanah sistem unified



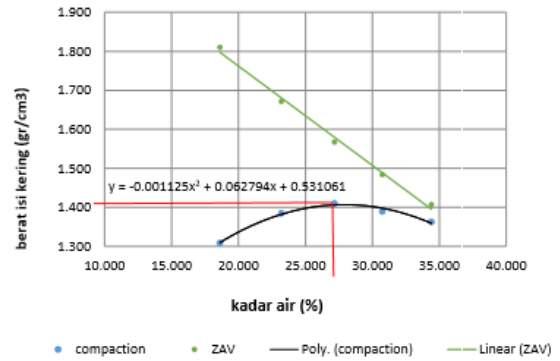
Gambar 5. Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Potensi Mengembang

Tabel 2. Derajat ekspansifitas berdasarkan SL

SL Tanah asli (%)	SL (%)	Degree of Expansion
2,8	> 12	Non Critical
	10 – 12	Marginal
	< 10	Critical

Tabel 3. Derajat ekspansifitas berdasarkan PI

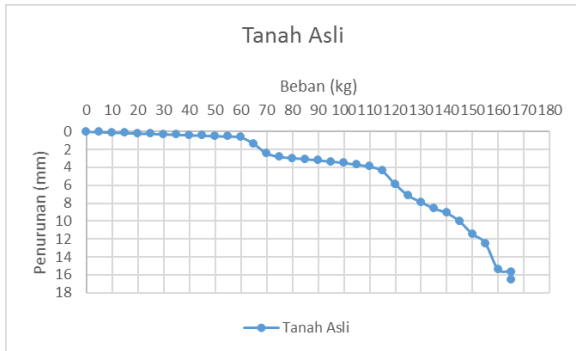
PI Tanah asli (%)	SL (%)	Degree of Expansion
43,51	< 15	Low
	15 – 30	Medium
	23 – 32	High
	> 32	Very High



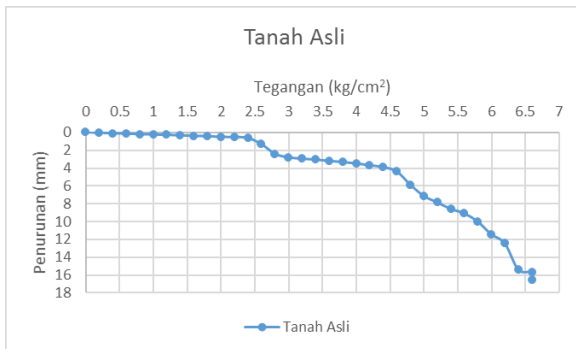
Gambar 6. Pemadatan standar tanah asli

Uji pembebanan dilakukan untuk mengetahui beban yang bekerja beserta penurunan yang terjadi. Pengujian ini dilakukan dengan bantuan seperangkat alat uji beban seperti dongkrak hidrolik yang berguna untuk pemberian tekanan terhadap piston, loadcell sebagai alat pembacaan beban yang diberikan oleh piston, displacement transducer sebagai pembacaan penurunan yang terjadi dan pelat baja ukuran 50 x 50 x 20 mm yang diasumsikan sebagai pondasi yang menyalurkan beban ke tanah. Masing-masing pengujian dilakukan terhadap sampel tanah asli dan sampel tanah yang distabilisasi menggunakan metode DSM dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan.

Pengujian pembebanan ini dilakukan terhadap sampel tanah yang belum dilakukan stabilisasi dengan metode DSM. Pengujian telah dilakukan oleh Ahya (2015) dengan kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908 % dan berat isi kering (γ_d) di boks sebesar 1,28 gr/cm³. Hasil dari uji pembebanan tanah asli didapatkan hubungan beban dengan penurunan yang disajikan pada **Gambar 7**. dan hubungan tegangan dengan penurunan disajikan pada **Gambar 8**.



Gambar 7. Hubungan beban dengan penurunan tanah asli



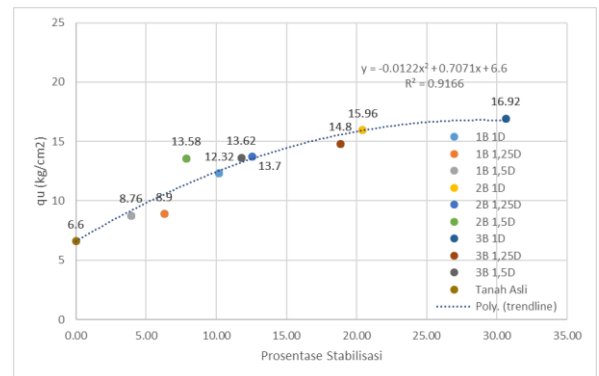
Gambar 8. Hubungan tegangan dengan penurunan tanah asli

Dari **Gambar 7** dapat terlihat bahwa pada saat awal pemberian beban, penurunan yang terjadi sebanding dengan beban yang bekerja. Seiring berlanjutnya beban yang diberikan, maka hubungan beban dan penurunan tidak lagi sebanding di mana beban yang terjadi tidak meningkat secara signifikan dengan penurunan yang terus berlanjut. Hal ini disebabkan karena daya dukung tanah (q_u) sudah berada pada batas beban maksimum yang dapat diterima. Dari hubungan tegangan dengan penurunan pada **Gambar 8**, di dapat bahwa daya dukung tanah asli sebesar $6,6 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan sebesar $16,57 \text{ mm}$.

Prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm^2 dengan kedalaman 20 cm . Hasil pengujian eksperimen daya dukung terhadap prosentase tanah stabilisasi ditampilkan pada **Tabel 4.5** dan **Gambar 4.7** sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi	P_u	q_u	
		%	kg	kg/m ²	kN/m ²
Tanah Asli	-	0	165	66000	660
Tanah Asli + Kolom DSM 15% F _{by} Ash	L = 3 cm ; Df = 5 cm	10.21	308	123200	1232
	L = 3,75 cm ; Df = 5 cm	6.28	222.5	89000	890
	L = 4,5 cm ; Df = 5 cm	3.93	219	87600	876
	L = 3 cm ; Df = 10 cm	20.42	399	159600	1596
	L = 3,75 cm ; Df = 10 cm	12.57	342.5	137000	1370
	L = 4,5 cm ; Df = 10 cm	7.85	339.5	135800	1358
	L = 3 cm ; Df = 15 cm	30.63	423	169200	1692
	L = 3,75 cm ; Df = 15 cm	18.85	370	148000	1480
L = 4,5 cm ; Df = 15 cm	11.78	340.5	136200	1362	

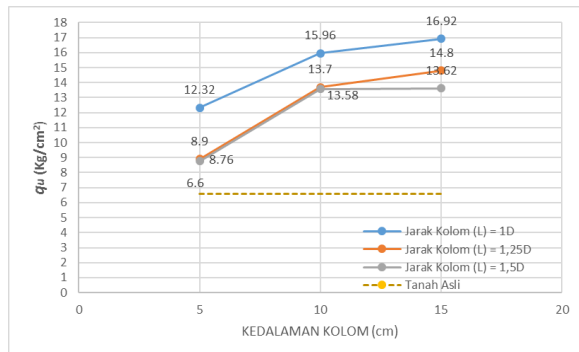


Gambar 9. Perbandingan Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Dari **Gambar 9**, dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung dengan prosentase stabilisasi tanah dengan kolom DSM memiliki hubungan setengah parabola (fungsi kuadrat). Semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan.

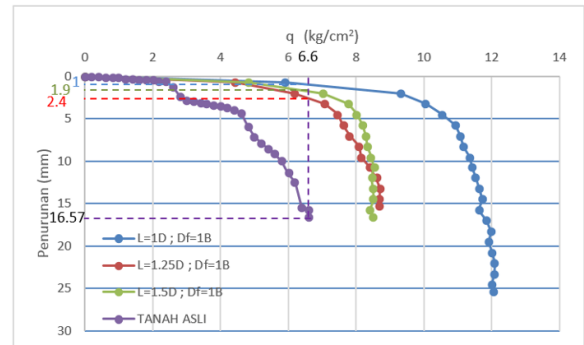
Tabel 5. Nilai Daya Dukung Hasil Uji Beban Dengan Variasi Kedalaman Kolom Terhadap Jarak Antar Kolom

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (Df)	Luas Pondasi (A)	P_u	q_u
	cm	cm	cm ²	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	25	165	6.6
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	3	5	25	308	12.32
		10	25	399	15.96
		15	25	423	16.92
	3.75	5	25	222.5	8.9
		10	25	342.5	13.7
		15	25	370	14.8
	4.5	5	25	219	8.76
		10	25	339.5	13.58
		15	25	340.5	13.62



Gambar 10. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman Kolom (D_f) Terhadap Jarak Antar Kolom (L)

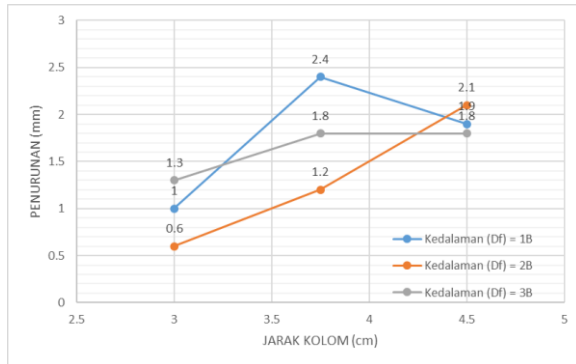
Dari **Gambar 10.**, dapat dilihat bahwa nilai q_u tanah asli adalah 6,6 kg/cm². Setelah tanah distabilisasi dengan kolom DSM, nilai q_u terus mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kedalaman kolom (D_f) pada jarak antar kolom (L) yang sama. Nilai daya dukung tertinggi terdapat pada kedalaman kolom (D_f) 15 cm. hal ini dikarenakan prosentase stabilisasi yang semakin besar akan meningkatkan daya dukung tanah.



Gambar 11. Grafik Hubungan Tegangan dengan Penurunan Terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm

Tabel 6. Penurunan Akibat variasi Jarak antar Kolom

Jenis Sampel	Kedalaman Kolom (D_f)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	q	Penurunan
	Cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm
Tanah Asli	-	-	25	6.6	16.57
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	5	3	25	6.6	1
		3.75	25	6.6	2.4
		4.5	25	6.6	1.9
	10	3	25	6.6	0.6
		3.75	25	6.6	1.2
		4.5	25	6.6	2.1
15	3	25	6.6	1.3	
	3.75	25	6.6	1.8	
	4.5	25	6.6	1.8	

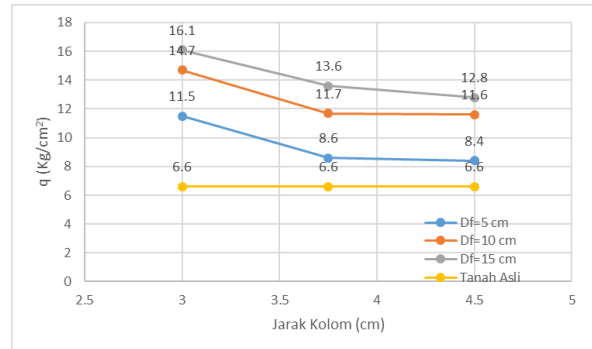


Gambar 12. Grafik Hubungan Penurunan terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari **Tabel 6.** dan **Gambar 12.**, dapat dilihat bahwa pada kedalaman (Df) 10 cm dan 15 cm besarnya penurunan (*settlement*) besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom. Pada kedalaman kolom (Df) 5 cm, besarnya *settlement* naik saat jarak kolom 3,75 cm dan sedikit turun pada jarak 4,5 cm. Pada kedalaman kolom (Df) 5 cm tidak sesuai dengan hipotesa awal, hal ini dimungkinkan karena faktor kesalahan yang terjadi pada saat perataan permukaan tanah.

Tabel 7. Tegangan akibat Variasi Jarak antar Kolom

Jenis Sampel	Kedalaman Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	Penurunan	q
	cm	cm	cm ²	mm	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	25	12	6.6
				5	11.5
				10	14.7
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	5	3	25	12	11.5
		3.75	25	12	8.6
		4.5	25	12	8.4
	10	3	25	12	14.7
		3.75	25	12	11.7
		4.5	25	12	11.6
15	3	25	12	16.1	
	3.75	25	12	13.6	
	4.5	25	12	12.8	



Gambar 13. Grafik Hubungan tegangan terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari **Tabel 7.** dan **Gambar 13.** dapat disimpulkan bahwa tegangan tanah yang terjadi akan menurun seiring semakin bertambahnya jarak antar kolom.

Tabel 8. Prosentase pengembangan terhadap prosentase kolom tanah stabilisasi penelitian DSM

Sampel	Df (cm)	L (cm)	Volume Kolom	Volume Benda Uji	Persentase Stabilisasi	Pengembangan (swelling)	Penurunan Swelling dari tanah Asli
			(cm ³)	(cm ³)	(%)	(%)	(%)
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	5	3	459.46	4500.00	10.21	3.60	0.53
		3.75	282.74		6.28	3.81	0.33
		4.5	176.71		3.93	3.90	0.24
	10	3	918.92		20.42	1.41	2.72
		3.75	565.49		12.57	3.37	0.76
		4.5	353.43		7.85	3.74	0.39
	15	3	1378.37		30.63	0.00	4.13
		3.75	848.23		18.85	2.00	2.14
		4.5	530.14		11.78	3.46	0.67

Dari **Tabel 8.** tersebut dapat diketahui bahwa pada prosentase tanah yang distabilisasi metode DSM untuk variasi kedalaman kolom 5 cm dengan jarak antar kolom 3 cm sebesar 10,21 % didapat pengembangan sebesar 3,83 %. Sedangkan pada variasi kedalaman 15 cm jarak kolom 3 cm dengan prosentase tanah yang distabilisasi sebesar 30,63 % sudah tidak terjadi pengembangan (swelling). Sehingga

dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan volume kolom tanah stabilisasi maka pengembangan yang terjadi semakin menurun.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh variasi jarak dan kedalaman stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode *deep soil mixing* (DSM) tipe *triangular* diameter 3 cm terhadap daya dukung tanah, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Variasi jarak dan kedalaman kolom stabilisasi pada metode DSM konfigurasi *triangular* diameter 3 cm dengan penambahan 15% fly ash sebagai bahan stabilisasi tanah mempengaruhi nilai daya dukung (q_u) terhadap tanah tanpa stabilisasi.
2. Dalam penelitian ini jarak dan kedalaman optimum kolom belum ditemukan, hal ini dikarenakan semakin besar kedalaman dan semakin kecil jarak antar kolom maka daya dukung tanah akan semakin meningkat. Peningkatan daya dukung paling maksimum pada penelitian ini terdapat pada variasi jarak antar kolom (L) =3cm dan kedalaman kolom (D_f) =15cm yang mampu meningkatkan daya dukung tanah hingga 256,36% dari daya dukung tanah asli.
3. Stabilisasi dengan bahan aditif 15% fly ash pada metode DSM berpola *triangular* dapat mengurangi nilai pengembangan (*swelling*) seiring dengan meningkatnya volume tanah yang distabilisasi. Prosentase stabilisasi tanah sebesar 30.63% telah mampu menghentikan pengembangan (*swelling*) tanah asli.

Daftar Pustaka

Anshorie, Ahya Al. 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.

ASTM C 618-03. 2003. *Standar Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States: 100 Barr Harbor Drive.

Bowles, Joseph E. 1991. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.

Chen, F.H. 1975. *Foundations on Expansive Soils*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Das, Braja M. 1991. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

EuroSoilStab. 2002. "Design Guide Soft Soil Stabilization". *Project No. BE 96-3177*, Ministry of Transport Public Works and Management.

Ignat, Razvan, 2015. Two and Three Dimensional Analyses of Excavation Support with Rows of Dry Deep Mixing Columns. *Elsevier*. 66. 16-30.

Luqman, Arif. 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 dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Meisy, Ika. 2015. Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Geser Tanah Ekspansif Bojonegoro Dengan Stabilisasi Menggunakan 15% Fly Ash Dengan Metode Deep Soil Mix. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Muntohar, Agus Setyo. 2010. A Laboratory Test On the Strength and Load-Settlement Characteristic of Improved Soft Soil Using Lime Column. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*. 10. 202-207.

Nur J.O, Ailin., Hafez, M.A., & Norbaya, S. 2011 . Study of Bearing Capacity of Lime-Cement Column with Pulverized Fuel Ash for Soil Stabilization

Using Laboratory Model. *EJGE*. 16. 1596-1605.

Panjaitan, Surta Ria N. 2010. Pengaruh Pemeraman Terhadap Nilai CBR Tanah Mengembang Yang Distabilisasi Dengan Fly Ash. Makalah dalam *Seminar Nasional: Peran Teknologi di Era Globalisasi*. Biro Publikasi Dan Dokumentasi Institut Teknologi Medan. Medan, 27 Februari 2010.

Raja S. Madhyannapu, Ph.D., P.E M.ASCE¹. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 09. 140.

Sherwood, P.T., 1993. *Soil stabilization with cement and lime*. London: H.M.S.O.

Tobing, Benny C. L. Pengaruh Lama Waktu Curing Terhadap Nilai CBR dan Swelling Pada Tanah Lempung Ekspansif Di Bojonegoro Dengan Campuran 15% Fly Ash. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom Diameter 3 Cm Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Menggunakan Metode DSM Pola *Triangular* Terhadap Daya Dukung Tanah

Ivan Indra Pradika, Suroso, Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail: ivanpradika@gmail.com

ABSTRACT

Characteristic of expansive soil that have so many problem like low shear strength, high plasticity, high volume change (swelling). Based on previous research this soils can be found in ngasem Bojonegoro. In this research we use DSM method space of column (3, 3.75, 4.5 cm) and length of column (5, 10, 15 cm). Results in this research increase bearing capacity of expansive soil in the smallest space of column and bigger length of column. Deep soil mix with additive 15 % fly ash will increase bearing capacity of expansive soils 256,36 % and with 30.63 % percentage of soil stabilized, swelling of soil can be stoped.

Keywords: Soil, Expansive Soil, Deep Soil Mix, fly ash, length, space, bearing capacity, swelling

Pendahuluan

Perhatian khusus oleh pemerintah Indonesia mengenai pembangunan infrastruktur, sering terkendala oleh beberapa permasalahan terutama pada jenis tanah yang bervariasi di tiap daerahnya. Ragam jenis tanah disertai variasi masalah yang dibawanya mendorong para *engineer* untuk terus ber-inovasi guna kelancaran *project* yang ada.

Salah satu tanah yang bermasalah dan sering dijumpai di berbagai daerah adalah jenis tanah lempung ekspansif yang memiliki sifat kembang dan susut yang cukup tinggi. Kembang-susut inilah yang menyebabkan tanah tidak stabil dan berdampak pada kerusakan struktur di atasnya.

Stabilisasi tanah lempung ekspansif telah dilakukan dengan menggunakan berbagai metode, salah satunya menggunakan penambahan aditif di dalamnya. Aditif yang sering digunakan antaranya *fly ash*, kapur dan semen. Benny (2014) telah melakukan penelitian tentang pencampuran tanah lempung ekspansif dengan aditif *fly-ash* yang mampu meningkatkan nilai *California Bearing Ratio* tanah lempung ekspansif hingga 16,948 % untuk *curing* 28 hari.

Penelitian ini juga dilakukan (Ailin Nur, 2011) dengan box berukuran 100 x 60 x 70 cm menggunakan 4 kolom diameter 2,5 cm dan panjang kolom 20 cm yang dicampur semen dan kapur. Pada uji yang dilakukan menghasilkan nilai uji kuat tekan 550 kPa - 1000 kPa dengan waktu curing 28 hari..

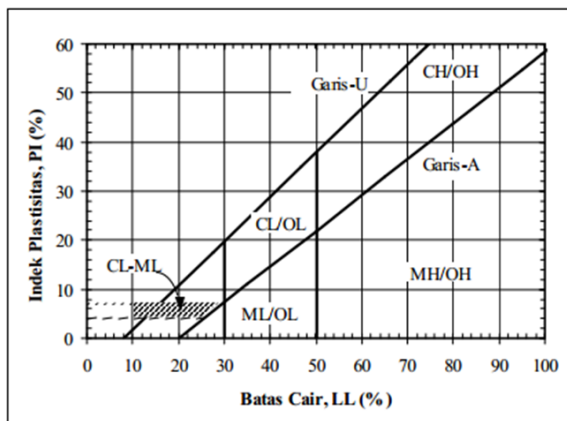
Banyaknya permasalahan tentang hal ini serta kurangnya studi lapangan dan laboratorium maka dirasa perlu untuk melakukan pengembangan terhadap penelitian guna memudahkan penggunaan maupun pengaplikasian metode *Deep Soil Mix* untuk memperbaiki tanah.

Perhatian khusus oleh pemerintah Indonesia mengenai pembangunan infrastruktur, sering terkendala oleh beberapa permasalahan terutama pada jenis tanah yang bervariasi di tiap daerahnya. Ragam jenis tanah disertai variasi masalah yang dibawanya mendorong para *engineer* untuk terus ber-inovasi guna kelancaran *project* yang ada.

Salah satu tanah yang bermasalah dan sering dijumpai di berbagai daerah adalah jenis tanah lempung ekspansif yang memiliki sifat kembang dan susut yang cukup tinggi. Kembang-susut inilah yang menyebabkan tanah tidak stabil dan berdampak pada kerusakan struktur di atasnya.

Tinjauan Pustaka

Tanah merupakan hasil dari proses fisika dan kimia berupa pelapukan. Secara garis besar tanah dapat dibagi menjadi beberapa macam berdasarkan ukuran partikel yang ada dengan variasi yang besar.



Gambar 1. Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah sistem *Unified*

Tanah lempung adalah jenis tanah yang mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang menyebabkan sifat-sifat plastis pada tanah bila tercampur dengan air (Grim, 1953). Partikel - partikel mineral lempung pada umumnya memiliki ukuran koloid 1 - 2 mikron. Namun, tanah yang memiliki ukuran lebih kecil dari 2 mikron bukan berarti sudah termasuk dalam jenis tanah lempung.

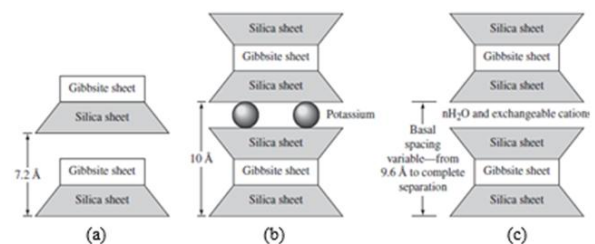
Jenis tanah lempung ekspansif ini adalah jenis lempung yang mempunyai sifat sensitifitas tinggi terhadap adanya perubahan kadar air, hal ini menyebabkan kembang susut (*swelling*) tanah ini juga besar. Saat kandungan air besar, tanah ini mengembang dan dapat berakibat berkurangnya daya dukung. Sebaliknya saat kadar air kurang (kering) maka tanah akan menyusut hingga mengakibatkan tanah mengalami pecah pada permukaan.

Hardiyatmo (1999) menyatakan bahwa sifat tanah lempung umumnya:

6. Ukuran butir halus (kurang dari 0,0002 cm)
7. Permeabilitasnya rendah
8. Kenaikan air kapilernya tinggi
9. Sangat kohesif

10. Kadar kembang susut yang ada tinggi dan proses konsolidasinya lambat

Umumnya terdapat kira - kira 15 macam mineral yang dapat diklasifikasikan mineral lempung (Kerr, 1959). Klasifikasi mineral yang dimaksud dikelompokkan menjadi: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite*. Dari mineral-mineral tersebutlah tanah lempung bias dibagi menjadi dua jenis yaitu tanah lempung ekspansif dan tanah lempung non ekspansif. Adapun tanah lempung ekspansif memiliki susunan mineral lempung yang bersifat kembang dan susut besar jika terjadi perubahan pada kadar air seperti pada kelompok *montmorillonite*. Kelompok *montmorillonite* inilah yang menjadikan tanah lempung menjadi tidak stabil saat kontak dengan air.



Gambar 2. Diagram struktur dari (a)kaolinite (b)illite dan (c)Montmorillonite
Sumber: Das (1995)

Fly-ash merupakan limbah padat yang hasil dari pembakaran batu bara PLTU. Fly ash bisa didapatkan dari pabrik-pabrik yang menggunakan batubara. Fly-ash yang berlimpah sangat memungkinkan untuk diolah dan dimanfaatkan sebagai material konstruksi bangunan maupun sebagai bahan penstabil tanah, khususnya pada tanah lempung ekspansif karena banyak pabrik yang memakai batu bara sebagai bahan bakar.

Stabilisasi adalah salah satu upaya untuk memperbaiki serta meningkatkan kualitas material guna memenuhi standart yang telah ditetapkan. Stabilisasi pada tanah juga dapat dilakukan secara mekanis berupa penumbukan atau pemadatan maupun dengan penggunaan bahan-bahan aditif.

Metode Penelitian

Penelitian ini dibuat dalam dua jenis benda uji, berupa benda uji tanah asli dan benda uji tanah yang distabilisasi dengan 15% *fly Ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing*. Dilakukan pengujian pembebanan tanah asli, kemudian dilakukan uji pada tanah yang telah terstabilisasi. Nilai daya dukung (qu) akan diambil dari tanah non-stabilisasi dan tanah setelah stabilisasi yang sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman kolom *fly-ash*.

Pengujian dilakukan sebanyak jumlah sampel yaitu 9 sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan kedalaman optimum kolom *fly ash* yang menyumbang daya dukung terbesar tanah.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

9. Menyiapkan Model Benda Uji
10. Melakukan pengukuran titik tengah permukaan tanah dengan bantuan penggaris dan tali
11. Melakukan perataan permukaan tanah untuk peletakan pelat pondasi dengan bantuan waterpass sebagai pengontrol kerataan.
12. Meletakkan pelat baja ukuran 5 x 5 cm pada titik tengah permukaan tanah
13. Menyiapkan dan meletakkan satu set alat uji pembebanan Gambar 3.1
14. Melakukan uji pembebanan menggunakan dongkrak hidrolik
15. Pembebanan dilakukan dengan menetapkan keseragaman penurunan 50 digit pada pembacaan LVDT. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan beban pada load cell menunjukkan tiga kali sama berturut-turut pada penurunan yang meningkat.
16. Mencatat penurunan dan beban yang terjadi. Dalam pemodelan benda uji

Data yang telah didapat dari hasil uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah dibuat dengan bantuan software Microsoft excel. Perhitungan daya dukung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$qu = Pu/A$$

dimana,

qu : daya dukung (Kg/cm^2)

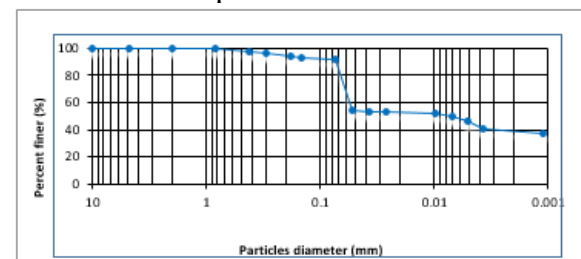
Pu : beban *ultimate* yang diterima (Kg)

A : luas bidang yang menerima gaya ($A=25cm^2$)

Data tersebut kemudian diolah untuk memperoleh besarnya daya dukung beserta penurunan yang terjadi yang kemudian akan dibuat grafik daya dukung tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 15% *fly ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang akan dibandingkan dengan daya dukung tanah asli.

Hasil dan Pembahasan

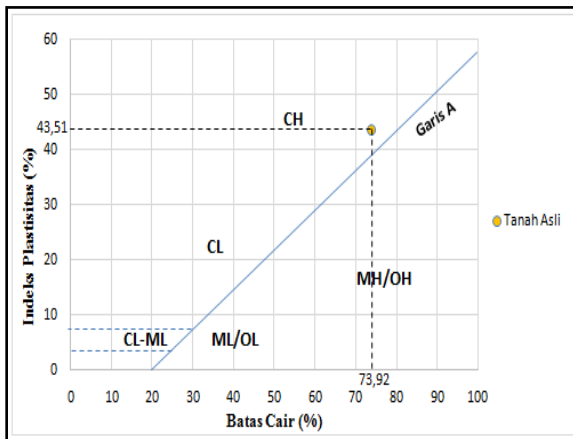
Uji pendahuluan terdiri atas uji *specific gravity*, klasifikasi tanah, Indeks plastisitas, batas susut dan proktor standar.



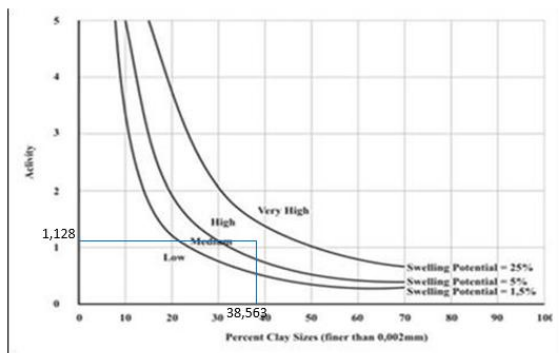
Gambar 3. Gabungan analisa saringan dan hydrometer

Tabel 1. Hasil pemeriksaan batas-batas *atterberg*

Bahan	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Tanah Asli	73,92	30,41	2,8	43,51



Gambar 4. Klasifikasi tanah sistem unified



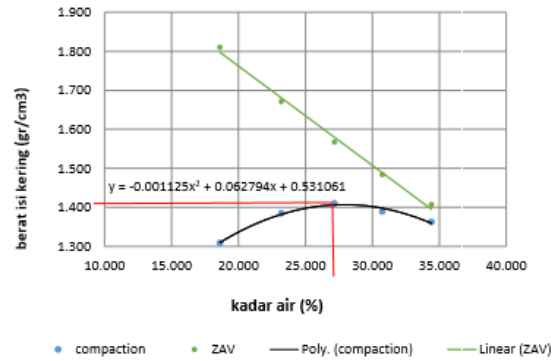
Gambar 5. Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Potensi Mengembang

Tabel 2. Derajat ekspansifitas berdasarkan SL

SL Tanah asli (%)	SL (%)	Degree of Expansion
2,8	> 12	Non Critical
	10 – 12	Marginal
	< 10	Critical

Tabel 3. Derajat ekspansifitas berdasarkan PI

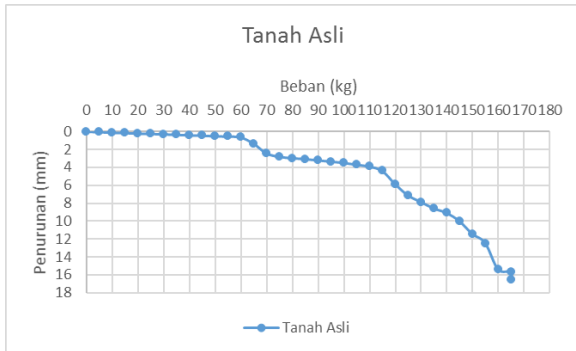
PI Tanah asli (%)	SL (%)	Degree of Expansion
43,51	< 15	Low
	15 – 30	Medium
	23 – 32	High
	> 32	Very High



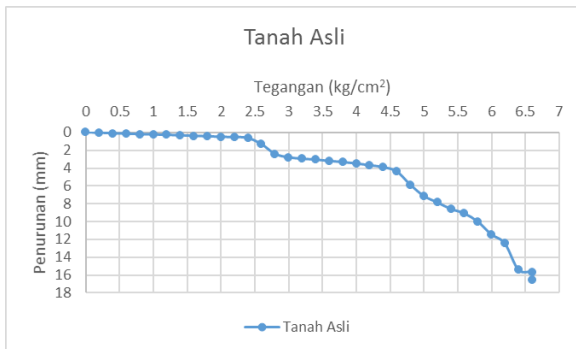
Gambar 6. Pemadatan standar tanah asli

Uji pembebanan dilakukan untuk mengetahui beban yang bekerja beserta penurunan yang terjadi. Pengujian ini dilakukan dengan bantuan seperangkat alat uji beban seperti dongkrak hidrolis yang berguna untuk pemberian tekanan terhadap piston, loadcell sebagai alat pembacaan beban yang diberikan oleh piston, displacement transducer sebagai pembacaan penurunan yang terjadi dan pelat baja ukuran 50 x 50 x 20 mm yang diasumsikan sebagai pondasi yang menyalurkan beban ke tanah. Masing-masing pengujian dilakukan terhadap sampel tanah asli dan sampel tanah yang distabilisasi menggunakan metode DSM dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan.

Pengujian pembebanan ini dilakukan terhadap sampel tanah yang belum dilakukan stabilisasi dengan metode DSM. Pengujian telah dilakukan oleh Ahya (2015) dengan kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908 % dan berat isi kering (γ_d) di boks sebesar 1,28 gr/cm³. Hasil dari uji pembebanan tanah asli didapatkan hubungan beban dengan penurunan yang disajikan pada **Gambar 7**. dan hubungan tegangan dengan penurunan disajikan pada **Gambar 8**.



Gambar 7. Hubungan beban dengan penurunan tanah asli



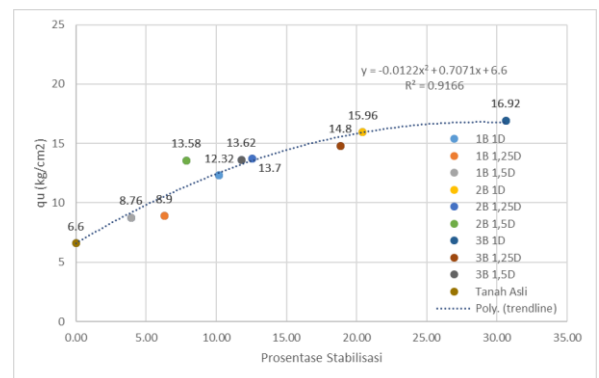
Gambar 8. Hubungan tegangan dengan penurunan tanah asli

Dari **Gambar 7** dapat terlihat bahwa pada saat awal pemberian beban, penurunan yang terjadi sebanding dengan beban yang bekerja. Seiring berlanjutnya beban yang diberikan, maka hubungan beban dan penurunan tidak lagi sebanding di mana beban yang terjadi tidak meningkat secara signifikan dengan penurunan yang terus berlanjut. Hal ini disebabkan karena daya dukung tanah (q_u) sudah berada pada batas beban maksimum yang dapat diterima. Dari hubungan tegangan dengan penurunan pada **Gambar 8**, di dapat bahwa daya dukung tanah asli sebesar $6,6 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan sebesar $16,57 \text{ mm}$.

Prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm^2 dengan kedalaman 20 cm . Hasil pengujian eksperimen daya dukung terhadap prosentase tanah stabilisasi ditampilkan pada **Tabel 4.5** dan **Gambar 4.7** sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi	P_u	q_u	
		%	kg	kg/m ²	kN/m ²
Tanah Asli	-	0	165	66000	660
Tanah Asli + Kolom DSM 15% F _{by} Ash	L = 3 cm ; Df = 5 cm	10.21	308	123200	1232
	L = 3,75 cm ; Df = 5 cm	6.28	222.5	89000	890
	L = 4,5 cm ; Df = 5 cm	3.93	219	87600	876
	L = 3 cm ; Df = 10 cm	20.42	399	159600	1596
	L = 3,75 cm ; Df = 10 cm	12.57	342.5	137000	1370
	L = 4,5 cm ; Df = 10cm	7.85	339.5	135800	1358
	L = 3 cm ; Df = 15 cm	30.63	423	169200	1692
	L = 3,75 cm ; Df = 15 cm	18.85	370	148000	1480
	L = 4,5 cm ; Df = 15 cm	11.78	340.5	136200	1362

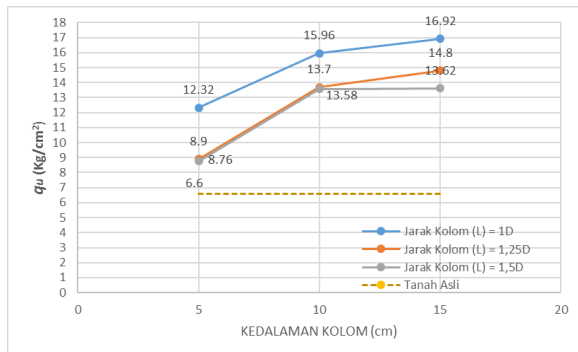


Gambar 9. Perbandingan Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Dari **Gambar 9**, dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung dengan prosentase stabilisasi tanah dengan kolom DSM memiliki hubungan setengah parabola (fungsi kuadrat). Semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan.

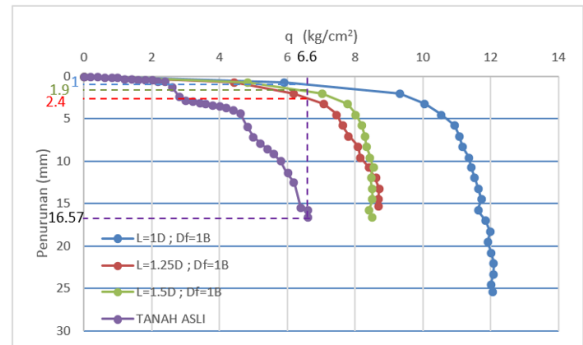
Tabel 5. Nilai Daya Dukung Hasil Uji Beban Dengan Variasi Kedalaman Kolom Terhadap Jarak Antar Kolom

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (Df)	Luas Pondasi (A)	P_u	q_u
	cm	cm	cm ²	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	25	165	6.6
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	3	5	25	308	12.32
		10	25	399	15.96
		15	25	423	16.92
	3.75	5	25	222.5	8.9
		10	25	342.5	13.7
		15	25	370	14.8
	4.5	5	25	219	8.76
		10	25	339.5	13.58
		15	25	340.5	13.62



Gambar 10. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman Kolom (D_f) Terhadap Jarak Antar Kolom (L)

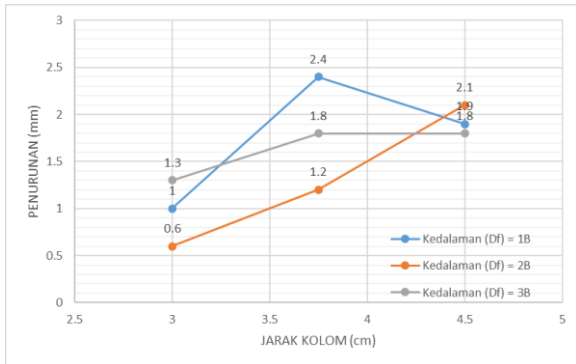
Dari **Gambar 10.**, dapat dilihat bahwa nilai q_u tanah asli adalah 6,6 kg/cm². Setelah tanah distabilisasi dengan kolom DSM, nilai q_u terus mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kedalaman kolom (D_f) pada jarak antar kolom (L) yang sama. Nilai daya dukung tertinggi terdapat pada kedalaman kolom (D_f) 15 cm. hal ini dikarenakan prosentase stabilisasi yang semakin besar akan meningkatkan daya dukung tanah.



Gambar 11. Grafik Hubungan Tegangan dengan Penurunan Terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm

Tabel 6. Penurunan Akibat variasi Jarak antar Kolom

Jenis Sampel	Kedalaman Kolom (D_f)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	q	Penurunan
	Cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm
Tanah Asli	-	-	25	6.6	16.57
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	5	3	25	6.6	1
		3.75	25	6.6	2.4
		4.5	25	6.6	1.9
	10	3	25	6.6	0.6
		3.75	25	6.6	1.2
		4.5	25	6.6	2.1
15	3	25	6.6	1.3	
	3.75	25	6.6	1.8	
	4.5	25	6.6	1.8	

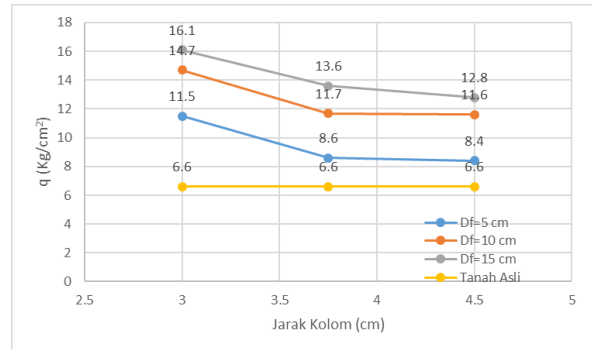


Gambar 12. Grafik Hubungan Penurunan terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari **Tabel 6.** dan **Gambar 12.**, dapat dilihat bahwa pada kedalaman (Df) 10 cm dan 15 cm besarnya penurunan (*settlement*) besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom. Pada kedalaman kolom (Df) 5 cm, besarnya *settlement* naik saat jarak kolom 3,75 cm dan sedikit turun pada jarak 4,5 cm. Pada kedalaman kolom (Df) 5 cm tidak sesuai dengan hipotesa awal, hal ini dimungkinkan karena faktor kesalahan yang terjadi pada saat perataan permukaan tanah.

Tabel 7. Tegangan akibat Variasi Jarak antar Kolom

Jenis Sampel	Kedalaman Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	Penurunan	q
	cm	cm	cm ²	mm	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	25	12	6.6
	5	3	25	12	11.5
		3.75	25	12	8.6
4.5		25	12	8.4	
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	10	3	25	12	14.7
		3.75	25	12	11.7
		4.5	25	12	11.6
	15	3	25	12	16.1
		3.75	25	12	13.6
		4.5	25	12	12.8



Gambar 13. Grafik Hubungan tegangan terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari **Tabel 7.** dan **Gambar 13.** dapat disimpulkan bahwa tegangan tanah yang terjadi akan menurun seiring semakin bertambahnya jarak antar kolom.

Tabel 8. Prosentase pengembangan terhadap prosentase kolom tanah stabilisasi penelitian DSM

Sampel	Df (cm)	L (cm)	Volume Kolom	Volume Benda Uji	Persentase Stabilisasi	Pengembangan (swelling)	Penurunan Swelling dari tanah Asli
			(cm ³)	(cm ³)	(%)	(%)	(%)
Tanah Asli + Kolom DSM 15% Fly Ash	5	3	459.46	4500.00	10.21	3.60	0.53
		3.75	282.74		6.28	3.81	0.33
		4.5	176.71		3.93	3.90	0.24
	10	3	918.92		20.42	1.41	2.72
		3.75	565.49		12.57	3.37	0.76
		4.5	353.43		7.85	3.74	0.39
	15	3	1378.37		30.63	0.00	4.13
		3.75	848.23		18.85	2.00	2.14
		4.5	530.14		11.78	3.46	0.67

Dari **Tabel 8.** tersebut dapat diketahui bahwa pada prosentase tanah yang distabilisasi metode DSM untuk variasi kedalaman kolom 5 cm dengan jarak antar kolom 3 cm sebesar 10,21 % didapat pengembangan sebesar 3,83 %. Sedangkan pada variasi kedalaman 15 cm jarak kolom 3 cm dengan prosentase tanah yang distabilisasi sebesar 30,63 % sudah tidak terjadi pengembangan (swelling). Sehingga

dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan volume kolom tanah stabilisasi maka pengembangan yang terjadi semakin menurun.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh variasi jarak dan kedalaman stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode *deep soil mixing* (DSM) tipe *triangular* diameter 3 cm terhadap daya dukung tanah, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

4. Variasi jarak dan kedalaman kolom stabilisasi pada metode DSM konfigurasi *triangular* diameter 3 cm dengan penambahan 15% fly ash sebagai bahan stabilisasi tanah mempengaruhi nilai daya dukung (q_u) terhadap tanah tanpa stabilisasi.
5. Dalam penelitian ini jarak dan kedalaman optimum kolom belum ditemukan, hal ini dikarenakan semakin besar kedalaman dan semakin kecil jarak antar kolom maka daya dukung tanah akan semakin meningkat. Peningkatan daya dukung paling maksimum pada penelitian ini terdapat pada variasi jarak antar kolom (L) =3cm dan kedalaman kolom (D_f) =15cm yang mampu meningkatkan daya dukung tanah hingga 256,36% dari daya dukung tanah asli.
6. Stabilisasi dengan bahan aditif 15% fly ash pada metode DSM berpola *triangular* dapat mengurangi nilai pengembangan (*swelling*) seiring dengan meningkatnya volume tanah yang distabilisasi. Prosentase stabilisasi tanah sebesar 30.63% telah mampu menghentikan pengembangan (*swelling*) tanah asli.

Daftar Pustaka

Anshorie, Ahya Al. 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.

ASTM C 618-03. 2003. *Standar Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States: 100 Barr Harbor Drive.

Bowles, Joseph E. 1991. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.

Chen, F.H. 1975. *Foundations on Expansive Soils*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Das, Braja M. 1991. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

EuroSoilStab. 2002. "Design Guide Soft Soil Stabilization". *Project No. BE 96-3177*, Ministry of Transport Public Works and Management.

Ignat, Razvan, 2015. Two and Three Dimensional Analyses of Excavation Support with Rows of Dry Deep Mixing Columns. *Elsevier*. 66. 16-30.

Luqman, Arif. 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 dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Meisy, Ika. 2015. Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Geser Tanah Ekspansif Bojonegoro Dengan Stabilisasi Menggunakan 15% Fly Ash Dengan Metode Deep Soil Mix. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Muntohar, Agus Setyo. 2010. A Laboratory Test On the Strength and Load-Settlement Characteristic of Improved Soft Soil Using Lime Column. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*. 10. 202-207.

Nur J.O, Ailin., Hafez, M.A., & Norbaya, S. 2011 . Study of Bearing Capacity of Lime-Cement Column with Pulverized Fuel Ash for Soil Stabilization

Using Laboratory Model. *EJGE*. 16. 1596-1605.

Panjaitan, Surta Ria N. 2010. Pengaruh Pemeraman Terhadap Nilai CBR Tanah Mengembang Yang Distabilisasi Dengan Fly Ash. Makalah dalam *Seminar Nasional: Peran Teknologi di Era Globalisasi*. Biro Publikasi Dan Dokumentasi Institut Teknologi Medan. Medan, 27 Februari 2010.

Raja S. Madhyannapu, Ph.D., P.E M.ASCE¹. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 09. 140.

Sherwood, P.T., 1993. *Soil stabilization with cement and lime*. London: H.M.S.O.

Tobing, Benny C. L. Pengaruh Lama Waktu Curing Terhadap Nilai CBR dan Swelling Pada Tanah Lempung Ekspansif Di Bojonegoro Dengan Campuran 15% Fly Ash. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.