

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan merupakan pengujian yang bertujuan untuk menentukan jenis tanah dan sifat tanah yang digunakan sebagai benda uji. Pengujian pendahuluan terdiri dari uji *specific gravity*, uji klasifikasi tanah, uji *atteberg limit*, uji batas susut dan uji proktor standar.

4.1.1 Pemeriksaan *Specific Gravity* (Gs)

Specific gravity (Gs) merupakan perbandingan berat butir tanah dengan berat air pada volume yang sama dan pada suhu tertentu. Pemeriksaan *specific gravity* sendiri merupakan pengujian laboratorium yang dilakukan untuk mengetahui berat jenis suatu bahan yang akan digunakan sebagai sampel benda uji.

Tabel 4.1. Hasil Pemeriksaan *Specific Gravity*

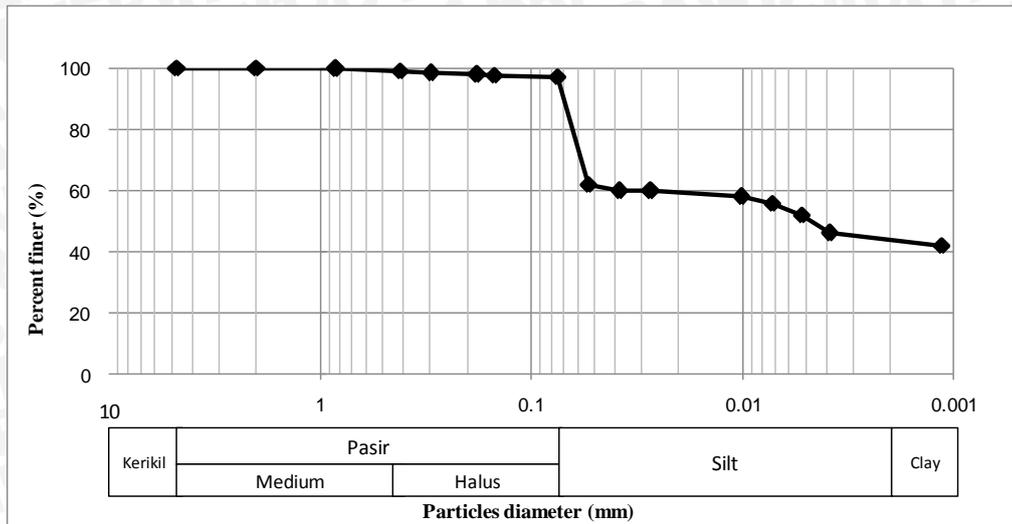
Labu Ukur	1	2
Spesific Gravity (Gs)	2,557	2,554
Rata-rata (Gs)	2,556	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa dalam dua kali pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan yaitu $G_s = 2,556$.

4.1.2 Klasifikasi Tanah

Pada uji klasifikasi tanah dilakukan dua jenis pengujian yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer. Analisis saringan (*mechanical grain size*) untuk menentukan butiran kasar dan butiran halus yang tertahan pada saringan no. 200. Analisis hidrometer digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran untuk tanah yang berada di pan atau lolos saringan no. 200. Hasil analisis yang dilakukan ditampilkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Analisis saringan dan Hidrometer

Dari Gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa tanah dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki persentase lolos saringan no. 200 sebesar 97,03% (di atas 50%) dari total tanah dan menurut sistem klasifikasi tanah analisis saringan dan hidrometer termasuk jenis tanah berbutir halus.

4.1.3 Atterberg Limit

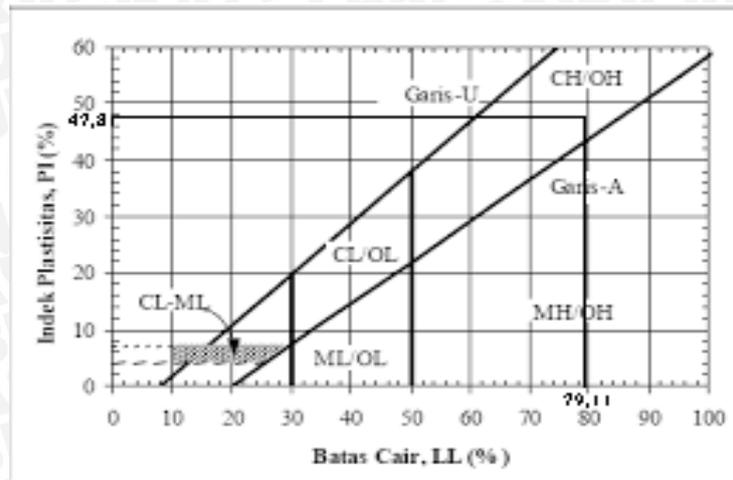
Dari klasifikasi butiran tanah tersebut termasuk jenis tanah berbutir halus, maka penting untuk mengetahui sifat plastisitasnya. Pengujian terdiri dari uji batas cair (LL), uji batas plastis (PL), uji batas susut (SL) dan indeks plastisitas (PI). Pengujian batas susut digunakan untuk mengetahui kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Sedangkan indeks plastisitas digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan jenis tanah yang di uji.

Tabel 4.2 Hasil Pemeriksaan Batas-Batas *Atterberg*

Bahan	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Tanah Asli	79,11	31,30	13,79	47,81

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai batas cair (LL) 79,11%, batas plastis (PL) 31,30%, batas susut (SL) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%.

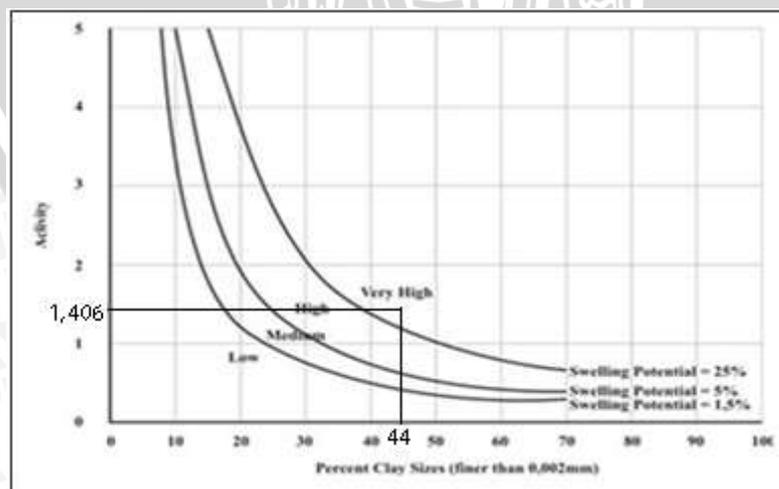


Gambar 4.2. Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

Dari Gambar 4.2 didapatkan klasifikasi tanah lempung berdasarkan sistem USCS dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah CH (lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi).

4.1.4 Sifat Ekspansifitas Tanah

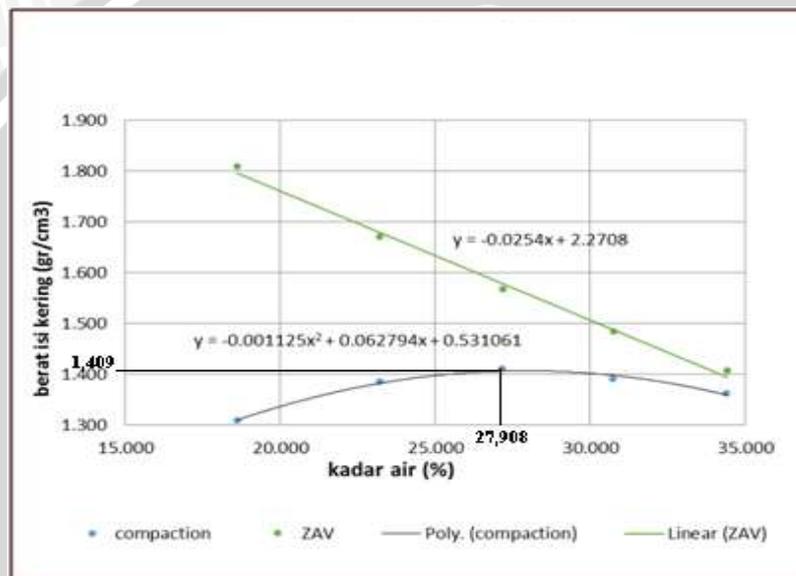
Nilai-nilai dari batas *Atterberg* dapat digunakan untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah lempung. Berdasarkan rumus (2-1) didapatkan nilai aktivitas sebesar 1,406 sehingga tanah tersebut termasuk tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Dari nilai aktifitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan pada Gambar 2.4 maka dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan sangat tinggi seperti yang ditunjukkan Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang
Sumber: Seed (1962)

4.1.5 Penentuan Kadar Air Optimum pada Tanah Asli dan Tanah Perbaikan DSM

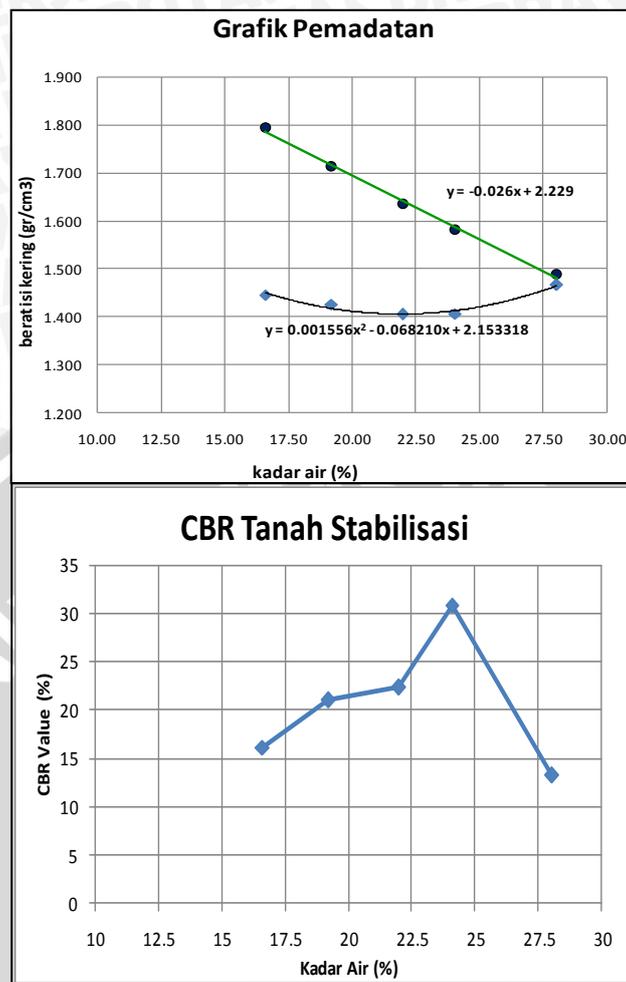
Pemadatan standar digunakan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) ketika tanah memiliki berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sesuai dengan metode **ASTM D-698** Metode B. Penentuan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah asli, didasarkan pada hasil uji pemadatan standar yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015). Pengambilan data tersebut sebagai acuan pemodelan, karena lokasi pengambilan dan jenis tanah yang sama. Grafik hasil pengujian pemadatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini:



Gambar 4.4 Grafik Hasil Pemadatan Tanah Asli
Sumber : Kurniawan (2015)

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa besarnya kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) 1,409 gr/cm³.

Untuk menentukan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah yang distabilisasi kapur 10% dilakukan uji pemadatan. Namun setelah dilakukan 3 kali uji pemadatan tidak didapatkan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah campuran stabilisasi 10% kapur. Hal tersebut disebabkan karena sifat tanah ekspansif yang kurang stabil sehingga sangat sulit didapatkan kepadatan maksimumnya. Selanjutnya penentuan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) tanah stabilisasi 10% kapur ditentukan dari pengujian *California Bearing Ratio* (CBR). Hasil dari uji Pemadatan dan uji CBR pada tanah stabilisasi dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.3.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Pemadatan dan CBR Tanah Stabilisasi

Tabel 4.3 Perbandingan Kadar Air dengan Berat Isi Kering Tanah Stabilisasi

No. Sampel	Kadar air (w) (%)	Berat Isi Kering (γ_d) (gr/cm ³)	CBR Value (0.1'') (%)
1	16.60	1.445	16.12
2	19.20	1.426	20.97
3	21.99	1.406	22.33
4	24.10	1.406	30.87
5	28.03	1.466	13.20

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.3 didapatkan nilai CBR paling besar yaitu 30,87% dengan kadar air sebesar 24,10% dan berat isi kering sebesar 1,406% yang akan digunakan sebagai standarisasi kepadatan pada kolom DSM.

4.2 Analisis Daya Dukung Tanah (Sebelum Perbaikan)

4.2.1 Uji Kepadatan Tanah Asli

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan tanah asli pada *box* karena untuk mencapai kepadatan maksimum seperti yang dilakukan pada pemadatan standar sangatlah sulit untuk mencapai kepadatan rencana ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sebesar $1,409 \text{ gr/cm}^3$. Sehingga untuk pemodelan tanah asli, digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Nilai tersebut didapat dari *trial dan error* pemodelan tanah di dalam *box* yang telah dilakukan oleh Kurniawan (2015).

Agar kepadatan yang direncanakan tercapai, pemadatan tanah dikontrol tiap-tiap lapisan dengan tiap lapisan setinggi 5 cm. Hal tersebut dilakukan agar tercapai keseragaman kepadatan pada seluruh sampel uji. Hasil uji *density* untuk pemodelan tanah asli ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Uji *Density* pada Tanah Model

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

Sumber : Kurniawan (2015)

4.2.2 Uji Pembebanan Tanah Asli

Tanah ekspansif yang diuji memiliki data sebagai berikut:

$$\text{Berat isi kering tanah } (\gamma_d) \text{ rata-rata} = 1,28 \text{ gr/cm}^3$$

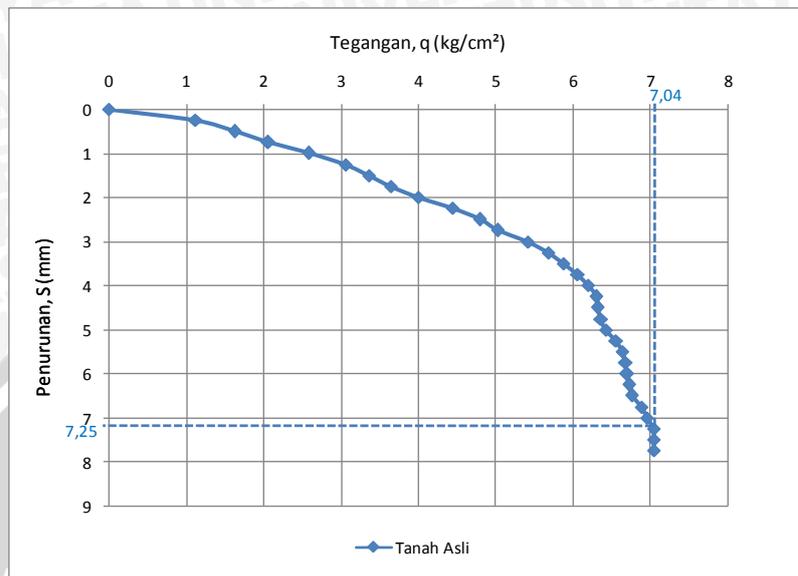
$$\text{Kadar air tanah rata-rata} = 10,49\%$$

$$\text{Luas pelat beban uji} = 25 \text{ cm}^2$$

Dalam pembuatan benda uji dalam *box* tanah dibagi menjadi 4 layer beserta dengan berat tanah yang dimasukkan. Berat tanah yang dimasukkan setiap layer memiliki berat 6,36 kg. Setelah benda uji selesai dipadatkan, pada pengujian tanah asli langsung dilanjutkan pada uji beban vertikal.

Hasil dari uji pembebanan tanah asli didapatkan data penurunan dari pembacaan digital LVDT dan beban dari pembacaan digital *Load Cell*. Beban maksimum yang dapat ditahan tanah (P_u) sebesar 176 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 7,25 mm.

Setelah data dianalisis didapatkan nilai daya dukung tanah. Dengan menggunakan rumus 3.1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate (q_u) sebesar $7,04 \text{ kg/cm}^2$. Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 4.6 berikut ini:



Gambar 4.6. Grafik Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli

4.3 Hasil dan Analisis Tanah dengan Perbaikan DSM

4.3.1 Uji Pembebanan

Dalam penelitian ini volume DSM tergantung pada panjang tanah yang diperbaiki namun memiliki kepadatan tanah yang sama yaitu $1,41 \text{ gr/cm}^3$. Berikut ini berat tanah yang dibutuhkan sebuah kolom DSM sesuai dengan variasi jarak dan panjang dengan berat isi kering $1,41 \text{ gr/cm}^3$.

Tabel 4.5. Berat Kebutuhan Kolom DSM

Berat Tanah+10% kapur (gr)	Panjang (Df)	Jarak DSM (L)		
		1D = 3 cm	1,25D = 3,75 cm	1,5D = 4,5 cm
	2B = 10 cm	99,7 gr	99,7 gr	99,7 gr
	3B = 15 cm	149,56 gr	149,56 gr	149,56 gr
	4B = 20 cm	199,41 gr	199,41 gr	199,41 gr

Sumber : Hasil Perhitungan

Dalam penelitian ini, instalasi kolom dibuat berdasarkan variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df) DSM pola *triangular* yang sudah ditentukan dengan diameter kolom 3 cm. Luas tanah yang distabilisasi yaitu $10 \times 10 \text{ cm}$. Setelah proses instalasi selesai dilanjutkan dengan proses pemadatan. Seperti pada pemadatan pada tanah asli, pemadatan tanah

stabilisasi pada kolom juga dibagi tiap lapisan 5cm. Pemadatan dilakukan dengan alat seberat 2,5 kg dan diameter 2,9 cm. Setelah itu benda uji diratakan, lalu dilanjutkan dengan waktu perawatan selama 3 hari sebelum dilakukan pengujian pembebanan dengan tujuan kapur dapat bereaksi dengan tanah seperti yang ditunjukkan pada penelitian Warsiti (2009) bahwa waktu perawatan kapur dapat meningkatkan kekuatan tanah. Setelah waktu perawatan berlangsung selama 3 hari, dilakukan pembebanan vertikal pada titik tengah dari benda uji menggunakan pelat ukuran $5 \times 5 \text{ cm}^2$ yang ditekan oleh dongkrak hidrolis dengan interval penurunan 50 skala dial LVDT. Setiap penurunan 50 skala LVDT dilakukan pembacaan beban. Beban dihentikan ketika penurunan terus bertambah namun pembacaan beban 3 kali sama berturut-turut.

Tabel 4.6. Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Jarak DSM

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1		1D = 3cm	15,75	459
2	2B = 10cm	1,25D = 3,75cm	13,5	412,5
3		1,5D = 4,5cm	21,5	400
4		1D = 3cm	8,5	468
5	3B = 15cm	1,25D = 3,75cm	11,25	416,5
6		1,5D = 4,5cm	19,75	414,5
7		1D = 3cm	8,25	484,5
8	4B = 20cm	1,25D = 3,75cm	14,5	459,5
9		1,5D = 4,5cm	18,75	452,5

Sumber : Hasil Pengujian

Tabel 4.7. Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Panjang DSM

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Penurunan, S (mm)	Beban Maksimum, Pu (kg)
1		2B = 10cm	15,75	459
2	1D = 3cm	3B = 15cm	8,5	468
3		4B = 20cm	8,25	484,5
4		2B = 10cm	13,5	412,5
5	1,25D = 3,75cm	3B = 15cm	11,25	416,5
6		4B = 20cm	14,5	459,5
7		2B = 10cm	21,5	400
8	1,5D = 4,5cm	3B = 15cm	19,75	414,5
9		4B = 20cm	18,75	452,5

Sumber : Hasil Pengujian

4.3.2 Analisis Daya Dukung Tanah

4.3.2.1. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Jarak (L)

1. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 2B = 10cm

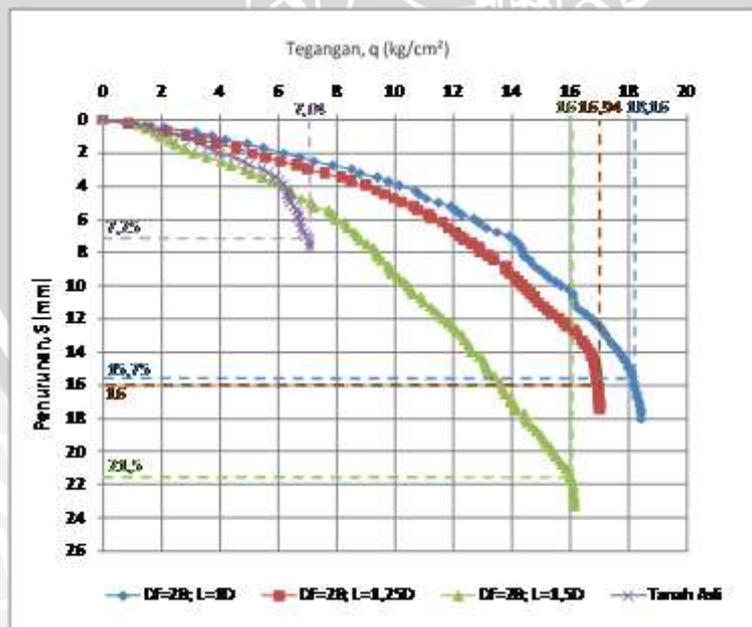
Hasil pengujian pada tanah dengan stabilisasi DSM panjang kolom 2B dengan variasi jarak (L) 1D = 3cm; 1,25D = 3,75cm dan 1,5D = 4,5cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan persamaan (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 2B = 10cm

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pa)	Daya Dukung (qa) (kg/cm ²)
1		1D = 3 cm	25	15.75	454	18.16
2	2B = 10cm	1,25D = 3,75 cm	25	16	423.5	16.94
3		1,5D = 4,5 cm	25	21.5	400	16

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa pada jarak antar kolom DSM paling dekat yaitu 1D memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Selain itu, jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang 2B = 10cm

Dari Gambar 4.7 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang 2B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Pada jarak DSM 1D memiliki daya dukung terbesar yaitu 18,16 kg/cm² dengan penurunan yang terjadi 15,75mm dan jarak DSM 1,5D memiliki daya dukung terkecil yaitu 16 kg/cm² dengan penurunan 21,5mm.

2. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 3B = 15cm

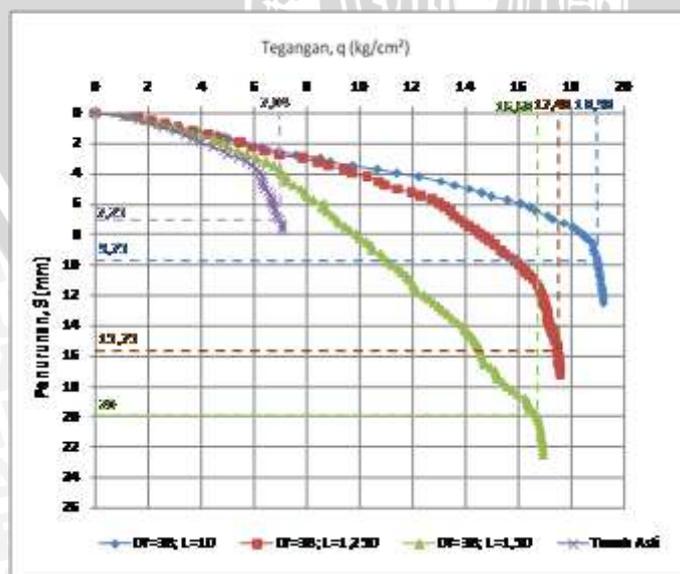
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 3B dengan variasi jarak (L) 1D = 3cm; 1,25D = 3,75 cm dan 1,5D = 4,5cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 3B = 15cm

No	Panjang DSM (D)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm ²)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qn) (kg/cm ²)
1		1D = 3 cm	25	9,75	474,5	18,98
2	3B = 15cm	1,25D = 3,75 cm	25	15,75	437	17,48
3		1,5D = 4,5 cm	25	20	417	16,68

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa pada jarak antar kolom DSM paling dekat yaitu 1D memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang 3B = 15cm

Dari Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $3B = 15\text{cm}$ selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak $1D$ selalu berada di atas variasi jarak $1,25D$ dan diikuti jarak $1,5D$. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang diuji. Pada jarak DSM $1D$ memiliki daya dukung terbesar yaitu $18,98\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,75\text{mm}$ dan jarak DSM $1,5D$ memiliki daya dukung terkecil yaitu $16,68\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan 20mm .

3. Daya dukung tanah dengan panjang DSM $4B = 20\text{cm}$

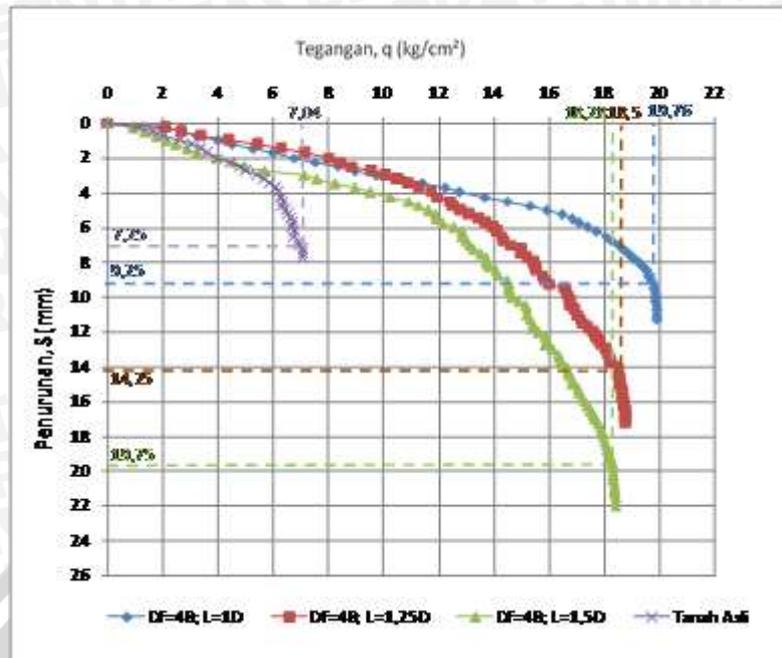
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 20cm dengan variasi jarak (L) $1D = 3\text{cm}$; $1,25D = 3,75\text{cm}$ dan $1,5D = 4,5\text{cm}$; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus (3-1) untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10. Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM $4B = 20\text{cm}$

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1		$1D = 3\text{ cm}$	25	9,25	494	19,76
2	$4B = 20\text{cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$	25	14,25	462,5	18,5
3		$1,5D = 4,5\text{ cm}$	25	19,75	457	18,28

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.10 dapat diketahui bahwa pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada Tabel 4.10 terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang $4B = 20\text{cm}$

Dari Gambar 4.9 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $4B = 20\text{cm}$ selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 1D selalu berada di atas variasi jarak 1,25D dan diikuti 1,5D. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji. Pada jarak DSM 1D memiliki daya dukung terbesar yaitu $19,76\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{mm}$ dan jarak DSM 1,5D memiliki daya dukung terkecil yaitu $18,28\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $19,75\text{mm}$. Dari gambar 4.7 pengaruh dari variasi jarak DSM terlihat sangat jelas, hal tersebut terlihat dari rentang daya dukung antara jarak DSM 1D dengan jarak DSM 1,25D lebih lebar dibanding rentang daya dukung antara jarak DSM 1,25D dengan jarak DSM 1,5D.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh. Pada analisis variasi jarak, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM 1D pada panjang DSM $4B$ yaitu sebesar $19,76\text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{cm}$. Pengaruh jarak DSM 1D dapat terjadi karena DSM dapat mengurangi penyebaran distribusi tegangan pada tanah asli dan ditahan oleh DSM.

4.3.2.2. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Panjang (Df)

1. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

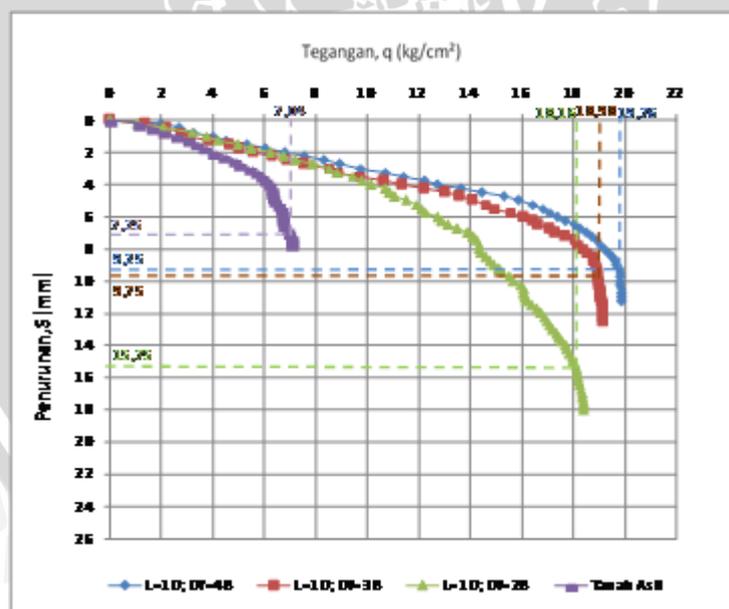
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $1B = 5\text{ cm}$; $2B = 10\text{ cm}$ dan $3B = 15\text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1	1 D = 3 cm	2 B = 10 cm	25	15.75	454	18.16
2		3 B = 15 cm	25	9.75	474.5	18.98
3		4 B = 20 cm	25	9.25	494	19.76

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.11 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $19,76\text{ kg}/\text{cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1D = 3\text{ cm}$

Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan

2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Selain itu, peningkatan signifikan daya dukung tanah terlihat pada variasi panjang 4B yang menghasilkan daya dukung sebesar $19,76 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25 \text{ mm}$.

2. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

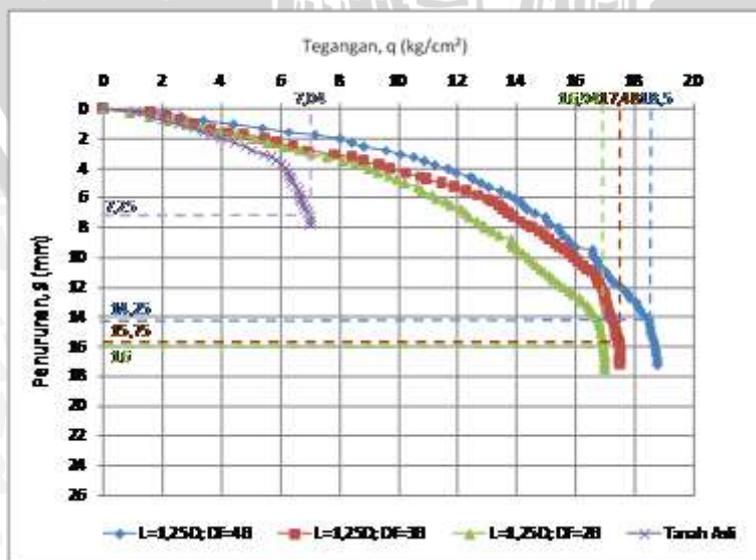
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $2B = 10 \text{ cm}$; $3B = 15 \text{ cm}$ dan $4B = 20 \text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pa)	Daya Dukung (qa) (kg/cm^2)
1		2B = 10 cm	25	16	423,5	16,94
2	1,25D = 3,75 cm	3B = 15 cm	25	15,75	437	17,48
3		4B = 20 cm	25	14,25	462,5	18,5

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $18,78 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $16,25 \text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,25D = 3,75 \text{ cm}$

Dari Gambar 4.11 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B atau 20cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan 2B.

3. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

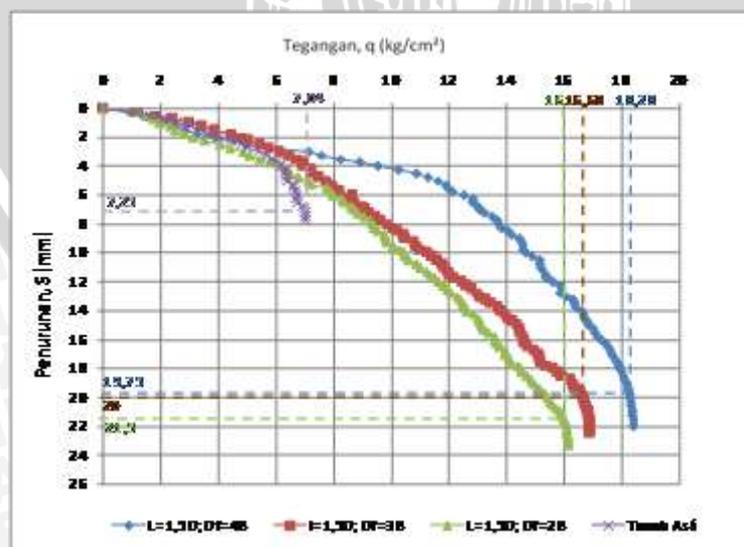
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3cm dengan variasi panjang 2B = 10cm; 3B = 15cm dan 4B = 20cm ; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus (3-1) sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm^2)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (P_u) (kg)	Daya Dukung (q_u) (kg/cm^2)
1		2 B = 10 cm	25	21.5	400	16
2	$1,5D = 4,5\text{ cm}$	3 B = 15 cm	25	20	417	16.68
3		4 B = 20 cm	25	19.75	457	18.28

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.13 terlihat bahwa panjang DSM 4B memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 3B dan yang terakhir panjang DSM 2B. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu $18,28\text{ kg}/\text{cm}^2$ dengan penurunan maksimum $19,75\text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,5D = 4,5\text{cm}$

Dari Gambar 4.12 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 3B dan 2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

Dari ketiga hasil analisis menunjukkan bahwa Panjang kolom DSM (Df) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung pada variasi panjang kolom DSM antara 4B dengan 3B dibanding rentang daya dukung antara variasi panjang DSM 3B dan 2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang kolom DSM (Df) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding panjang kolom DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang kolom DSM 4B dengan jarak DSM 1D yaitu sebesar $19,76 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25\text{mm}$. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang kolom DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli. Selain itu pengaruh panjang DSM juga dapat disebabkan karena distribusi tegangan pada panjang 4B masih besar, seperti yang dijelaskan Beussinesq bahwa tegangan akan turun sesuai dengan panjang yang digambarkan pada garis-garis isobar dalam grafik *Bulb Pressure*.

4.4 Analisis Penurunan Tanah

Berdasarkan dari pengujian pembebanan yang telah dilakukan pada benda uji model akan diperoleh nilai pembacaan tegangan dan penurunan (*settlement*). Sehingga besarnya penurunan dapat langsung didapatkan dari grafik hubungan tegangan dengan penurunan. Seperti halnya analisis daya dukung, pada analisis penurunan tanah juga dianalisis pada masing-masing variasi jarak antar kolom dan panjang kolom dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi tersebut terhadap penurunan tanah.

4.4.1 Penurunan Tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi jarak (L)

Setelah dilakukan uji pembebanan pada benda uji model tanah asli, maka berikutnya uji pembebanan dilakukan pada benda uji yang telah distabilisasi dengan kolom DSM 10% kapur. Untuk mengetahui besarnya penurunan (*settlement*) pada masing-masing variasi, peninjauan dilakukan pada saat terjadi tegangan *ultimate* (q_u). Adapun analisis penurunan pada variasi jarak antar kolom (L) terhadap panjang kolom (Df):

Tabel 4.14 Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Luas Pondasi (A)	q_u	Penurunan
	cm	cm	cm ²	kg/cm ²	mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
	2B = 10cm	1D = 3cm	25	18,16	15,75
		1,25D = 3,75cm	25	16,94	16
		1,5D = 4,5cm	25	16	21,5
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	3B = 15cm	1D = 3cm	25	18,98	9,75
		1,25D = 3,75cm	25	17,48	15,75
		1,5D = 4,5cm	25	16,68	20
	4B = 20cm	1D = 3cm	25	19,76	9,25
		1,25D = 3,75cm	25	18,5	14,25
		1,5D = 4,5cm	25	18,28	19,75

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

**Gambar 4.13** Grafik Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Jarak Kolom

Dari Tabel 4.14 dan Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df) 2B = 10 cm, 3B = 15 cm dan 4B = 20 cm besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, hal ini sesuai hipotesa bahwa besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.

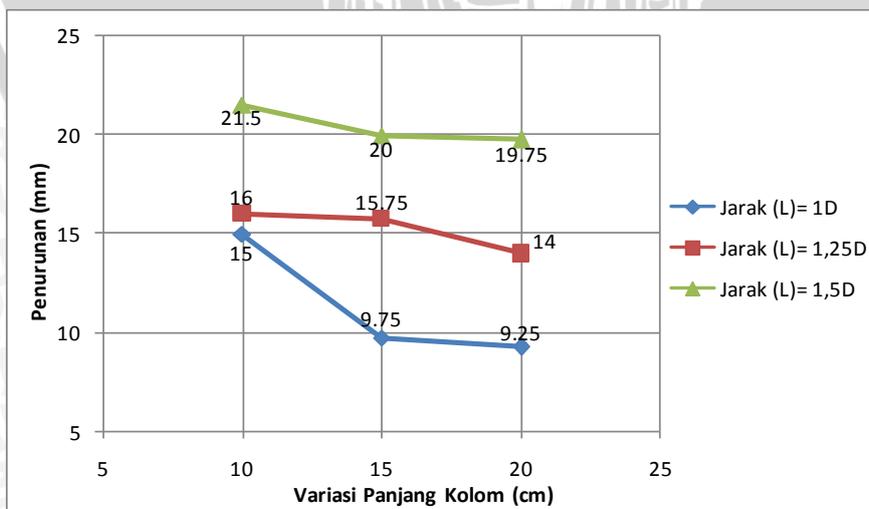
4.4.2. Penurunan tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi panjang (Df)

Analisis penurunan tidak hanya ditinjau dari variasi jarak kolom terhadap panjang kolom saja, melainkan analisis penurunan pada variasi panjang kolom terhadap jarak antar kolom juga dilakukan. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variasi jarak dan panjang kolom DSM terhadap penurunan tanah. Adapun analisis penurunan pada variasi panjang kolom(Df) terhadap jarak antar kolom(L):

Tabel 4.15 Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (Df)

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	Luas Pondasi (A) cm ²	q_u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
		2B = 10cm	25	18,16	15,75
		3B = 15cm	25	18,98	9,75
		4B = 20cm	25	19,76	9,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 3,75cm	2B = 10cm	25	16,94	16
		3B = 15cm	25	17,48	15,75
		4B = 20cm	25	18,5	14,25
	1,5D = 4,5cm	2B = 10cm	25	16	21,5
		3B = 15cm	25	16,68	20
		4B = 20cm	25	18,28	19,75

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Penurunan pada saat q_u terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Tabel 4.15 dan Gambar 4.14, dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) $1D = 3\text{cm}$, $1,25D = 3,75\text{cm}$ dan $1,5D = 4,5\text{cm}$ besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan panjang kolom. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana besarnya *settlement* akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya panjang kolom.

4.5 Analisis *Bearing Capacity Improvement* Berdasarkan Daya Dukung Ultimit

Analisis BCI adalah analisa yang digunakan untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Hasil Analisis BCI juga dapat mengetahui nilai peningkatan daya dukung tanah akibat stabilisasi dengan menggunakan *deep soil mixing* (DSM).

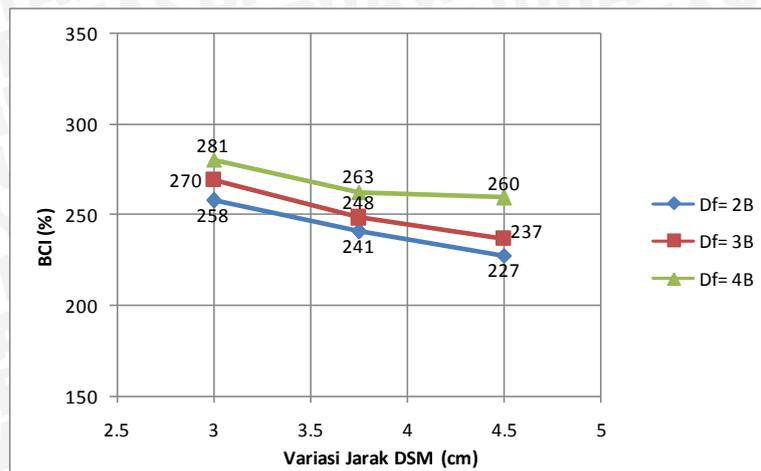
4.5.1 Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Untuk analisis BCI digunakan rumus (3-2). untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi jarak DSM (L). Jarak DSM yang digunakan adalah $1D = 3\text{cm}$; $1,25D = 3,75\text{cm}$; dan $1,5D = 4,5\text{cm}$, D merupakan diameter DSM yaitu 3cm . Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 4.16 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada Gambar 4.15.

Tabel 4.16. Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (D)	Jarak DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)
1		$1D = 3\text{ cm}$		18.16	258
2	$2B = 10\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$		16.94	241
3		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		16	227
4		$1D = 3\text{ cm}$		18.98	270
5	$3B = 15\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$	7.04	17.48	248
6		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		16.68	237
7		$1D = 3\text{ cm}$		19.76	281
8	$4B = 20\text{ cm}$	$1,25D = 3,75\text{ cm}$		18.5	263
9		$1,5D = 4,5\text{ cm}$		18.28	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



Gambar 4.15. Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Dari Tabel 4.14 dan Gambar 4.15 terlihat bahwa terjadi penurunan daya dukung pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Pada jarak DSM yang semakin dekat terjadi nilai nilai BCI semakin meningkat, seperti yang tampak pada panjang DSM (Df) = 4B. Pada jarak 1,5D nilai BCI sebesar 260%, BCI meningkat pada variasi 1,25D sebesar 263%. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi jarak 1D, yaitu sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan dan jarak DSM maksimum untuk meningkatkan nilai BCI terjadi terletak pada jarak DSM 1D, dengan peningkatan nilai BCI terbesar yaitu 281%.

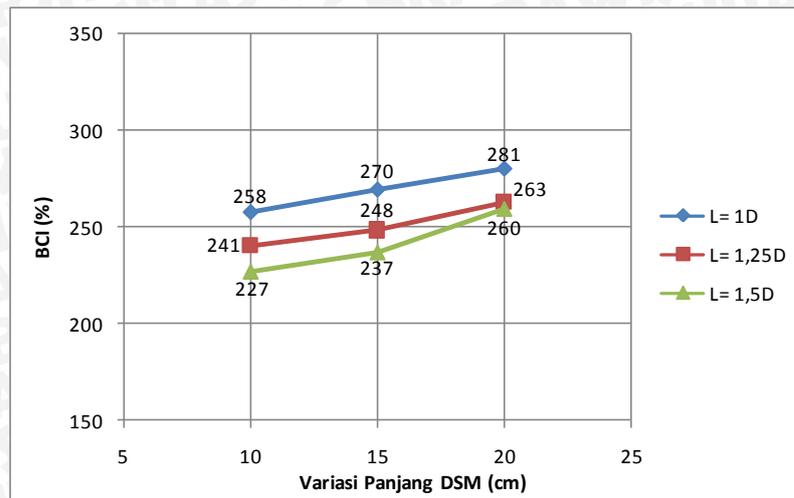
4.5.2 Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Untuk analisis BCI digunakan rumus (3-2). untuk mengetahui nilai BCI akibat variasi Panjang kolom DSM (Df). Jarak DSM yang digunakan adalah 2B = 10cm; 3B = 15cm; dan 4B = 20cm, B lebar pelat uji yaitu 5cm. Hasil analisis dapat dilihat pada tabel 4.17 dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap nilai BCI dapat dilihat pada gambar 4.16.

Tabel 4.17. Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	q _u tanah asli (kg/cm ²)	q _u dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		2 B = 10 cm		18.16	258
2	1 D = 3 cm	3 B = 15 cm		18.98	270
3		4 B = 20 cm		19.76	281
4		2 B = 10 cm		16.94	241
5	1,25 D = 3,75 cm	3 B = 15 cm	7.04	17.48	248
6		4 B = 20 cm		18.5	263
7		2 B = 10 cm		16	227
8	1,5 D = 4,5 cm	3 B = 15 cm		16.68	237
9		4 B = 20 cm		18.28	260

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

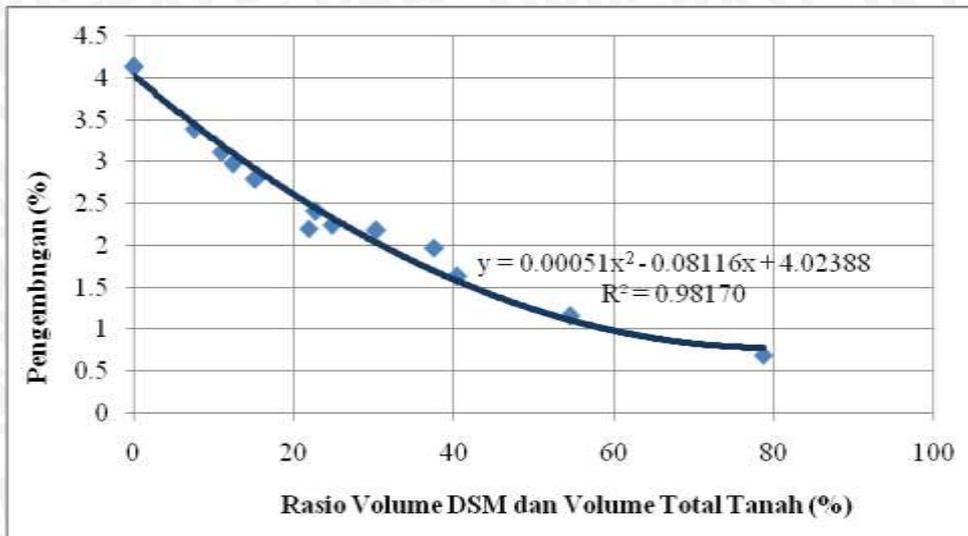


Gambar 4.16. Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Dari Tabel 4.15 dan Gambar 4.16 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai BCI pada tanah ketika DSM semakin panjang. Pada jarak DSM 1D dengan variasi panjang 2B terjadi peningkatan nilai BCI sebesar 258% data tersebut meningkat pada variasi panjang 3B dengan nilai BCI sebesar 270%. Hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 4B, yaitu terjadi peningkatan sebesar 281%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan nilai BCI lebih besar dibanding dengan panjang kolom DSM yang lebih pendek dan panjang DSM maksimum untuk meningkatkan nilai BCI terletak pada panjang 4B dengan peningkatan nilai BCI terbesar yaitu 281%.

4.6 Analisis Pengembangan (*Swelling*)

Pada data hasil penelitian yang dilakukan oleh (Firdaus, 2016) mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi dengan metode *deep soil mixing*(DSM), maka pada penelitian ini pun bisa membandingkan terhadap hasil penelitian tersebut. Di mana penelitian tersebut mengidentifikasi jumlah kolom DSM yang berarti berhubungan dengan persentase tanah stabilisasi yang digunakan akan mempengaruhi nilai pengembangan tanah lempung ekspansif Bojonegoro. Data hasil penelitian mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Perbandingan Hasil *Swelling* terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total Tanah

Sumber : Komunikasi pribadi dengan Firdaus (2016)

Dari Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa semakin besar rasio volume DSM dalam tanah mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*). Hal tersebut dapat terjadi karena kepadatan pada tanah yang memiliki volume DSM lebih besar memiliki kepadatan yang tinggi dan volume kadar kapur juga lebih tinggi sehingga dapat mengurangi potensi pengembangan. Tabel perbandingan persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi	<i>Swelling</i>	Penurunan <i>Swelling</i> dari tanah asli
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4.13	0
	L = 1D ; Df = 2B	45.6	1.36	2.77
	L = 1,25D ; Df = 2B	26.96	2.20	1.93
	L = 1,5D ; Df = 2B	17.42	2.76	1.37
Tanah Asli + Kolom	L = 1D ; Df = 3B	68.4	0.81	3.32
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 1,25D ; Df = 3B	40.44	1.56	2.58
	L = 1,5D ; Df = 3B	26.13	2.24	1.89
	L = 1D ; Df = 4B	91.2	0.78	3.36
	L = 1,25D ; Df = 4B	53.92	1.10	3.03
	L = 1,5D ; Df = 4B	34.84	1.80	2.33

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.18 tersebut dapat diketahui bahwa tanah yang distabilisasi dengan metode DSM untuk variasi panjang kolom 4B dan jarak antar kolom 1D memiliki nilai *swelling* paling kecil yaitu 0,78% dan didapat penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar

3,36 %. Sehingga dapat disimpulkan bahwa seiring dengan peningkatan persentase tanah yang distabilisasi maka pengembangan (*swelling*) akan semakin menurun. Jadi penurunan *swelling* paling besar terjadi pada variasi panjang kolom 4B dan jarak kolom 1D dengan penurunan *swelling* dari tanah asli sebesar 3,36 %.

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm(0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata tanah lempung ekspansif di lokasi penelitian memiliki kedalaman 1,5 meter yang berarti bahwa persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%. Dari analisa uji pengembangan terhadap pemodelan di laboratorium yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang adalah konfigurasi panjang kolom (D_f) = 4B dan jarak antar kolom (L) = 1D.



