

**PENGARUH JARAK DAN PANJANG KOLOM *DEEP SOIL MIXING*
(DSM) TIPE PANELS DENGAN CAMPURAN 10% KAPUR TERHADAP
DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh
gelar Sarjana Teknik



GALIH KARNO PUTRO
NIM. 125060102111001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2016



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH JARAK DAN PANJANG KOLOM *DEEP SOIL MIXING* (DSM) TIPE PANELS
DENGAN CAMPURAN 10% KAPUR TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh
gelar Sarjana Teknik



GALIH KARNO PUTRO
NIM. 125060102111001

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 8 Agustus 2016.

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Arief Rachmansyah

NIP. 19660420 199303 1 002

Dr. Eng. Yulvi Zaika, M.T.

NIP. 19680707 199403 2 002

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr.Eng. Indradi W, ST., M.Eng (Prac)

NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI

Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) Tipe *Panels* dengan Campuran 10 % Kapur terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif.

Nama Mahasiswa : Galih Karno Putro

NIM : 125060102111001

Program Studi : Teknik Sipil

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Arief Rachmansyah

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Yulvi Zaika, M.T.

Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Harimurti, M.T.

Tanggal Ujian : 3 Agustus 2016

SK Penguji : 924 / UN 10.6/SK/2016

LEMBAR ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi terbukti bahwa terdapat unsur-unsur plagiasi, saya sanggup menerima hukuman / sanksi apapun, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Agustus 2016

Mahasiswa,

Galih Karno Putro

NIM. 125060102111001



RIWAYAT HIDUP

Galih Karno Putro lahir di Trenggalek, 26 Febuari 1994 anak ke-1 dari ayah Karliono dan Ibu Pujiati. Menjalani pendidikan SD (Sekolah Dasar) di SD Islam Sabilillah Malang pada tahun 2000. Setelah itu SMP (Sekolah Menengah Pertama) di SMP Islam Sabilillah Malang lulus tahun 2009. Melanjutkan pendidikan SMA (Sekolah Menengah Atas) “Islam” Malang lulus tahun 2012.

Kemudian, melanjutkan sekolah di Perguruan Tinggi di Universitas Brawijaya Malang, lulus Program Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016. Pada saat sedang menjalani kehidupan kampus, ikut berpartisipasi sebagai Kadiv. Sapra HMS periode 2011/2012, Kadiv. Marketing HMS periode 2012/2013, asisten Laboratorium Transportasi dan Penginderaan Jauh pada semester 5.

Pernah tercatat sebagai Finalis Lomba Rancang Bendungan Nasional yang diadakan oleh HMS FT- UNRAM. Serta ikut aktif dalam kegiatan-kegiatan Himpunan sebagai panitia dalam acara-acara yang dibuat oleh Himpunan maupun BEM Fakultas Teknik.

Malang, Agustus 2016

Penulis

LEMBAR PERUNTUKAN

Pertama-tama saya panjatkan puji dan syukur kehadirat Allah SWT karena atas berkat dan rahmatnya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Saya ucapkan terima kasih kepada Ayah, Bunda, Tika, dan Ibu Wiwik Widodo yang memberi dukungan moral dan material dalam proses penyelesaian skripsi ini. Saya ucapkan terima kasih juga untuk Pak Taufik, Pak Suroso, Pak Sugeng, Pak Hendro Suseno dan Ibu Yulvi Zaika yang selalu menjadi motivasi saya selama menjalani perkuliahan. Tidak lupa ucapan terima kasih untuk Amalia Faticha, Adelina M. Firdaus, Ahmad Ismail, Vicky Dwi A. sebagai teman seperjuangan skripsi. Dan juga untuk HMJoss saudara saudaraku yang selalu ada disaat senang maupun susah.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan izin untuk melaksanakan penelitian skripsi ini. Kepada Ibu Yulvi dan Pak Arief yang telah memberikan waktu, ide, masukan dalam skripsi ini sehingga menjadikannya lebih baik. Kepada semua elemen mahasiswa sipil, khususnya teman-teman angkatan 2012 yang telah menemani saya dalam perkuliahan dan memberikan rasa cinta dan rasa kekeluargaan di Jurusan Teknik Sipil.

Skripsi ini saya persembahkan untuk semua pihak yang berada di bidang sipil maupun non-sipil. Saya berharap skripsi ini dapat bermanfaat sebagai pengetahuan maupun referensi dalam penulisan, walaupun kenyataannya mungkin masih banyak kesalahan.

Akhir kata, saya ucapkan mohon maaf yang sebesar-besarnya atas kesalahan yang terjadi selama proses penyusunan skripsi ini maupun selama perkuliahan di Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Semoga Teknik Sipil Universitas Brawijaya terus maju, terus berprestasi dan terus dapat mengharumkan nama bangsa Indonesia. 1...2...3...TEKNIK !!! TANAH AIR JALAN SIPIL, BAJA BETON JIWA SIPIL.

Malang, Agustus 2016

Galih Karno Putro

KATA PENGANTAR

Puji Syukur selalu kita panjatkan kepada Allah SWT, yang senantiasa memberikan berkat, rahmat, hidayah dan kekuatan kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ” **Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) Tipe *Panels* dengan Campuran 10% Kapur terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif**”.

Skripsi yang disusun guna memenuhi persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya pengembangan akademisi maupun praktisi dalam bidang Mekanika Tanah dan Geoteknik. Selain itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT dan Dr. Ir. Arif Rachmansyah , sebagai dosen pembimbing, terima kasih atas segala arahan, masukan dan bimbingan yang telah diberikan pada skripsi ini.
2. Segenap dosen Mekanika Tanah dan Geoteknik yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
3. Ir. Sugeng P. Budio, MS. dan Ir. Siti Nurlina, MT. selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang membantu kelancaran skripsi ini.
4. Dr. Eng. Indradi Wijatmiko ST. M. Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil yang membantu dalam kelancaran skripsi ini.
5. Ir. M. Taufik Hidayat, MT , sebagai Orang Tua ke dua saya di Kampus tercinta ini, yang telah memberi motivasi dan support kepada saya selama perkuliahan.
5. Bapak Ibu Dosen Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan positif pada skripsi ini.
6. Pak Ketut sebagai Teknisi Mekanika Tanah yang telah membantu pada penelitian ini.
7. Mbak Indah dan Mbak Asmi sebagai Admin Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberi bantuan untuk kelancaran penelitian.
8. Bapak Karliono ,S.Sos, M.Si dan Ibu Pujiati , SE. ayah dan bundaku yang sangat aku cintai dan banggakan dan segenap keluarga mbah Glundung dan mbah Djamin yang telah memberikan do'a dan dukungannya.

9. VAIGT *team* (Viki, Adel, Ismail, dan Tika) dan BHINEKA TUNGGAL IKA *team* (Sapu, Annisa, Angel, Frangky, Rendy) yang merupakan teman seperjuangan, teman penderitaan, teman spenanggungan yang selalu memberikan *support*, bantuan, dukungan atas kesedihan, kejengkelan dan keceriaan yang telah bekerja keras, berkeringat dan berotot dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 10.HMJ (Himpunan Mahasiswa Joss) yang merupakan para sahabat yang selalu memberikan bantuannya disaat saya butuh, menemani saya disaat saya sedih dan senang, selalu memberikan motivasi dan saling mengajarkan hal hal baru yang positif. diantara kita .
- 11.Amalia Faticha partner terbaik yang selalu ada dalam hal apapun ,menemani disaat sedih maupun senang ,selalu memberi motivasi serta membantu dalam kelancaran penyelesaian skripsi ini.
- 12.Teman-teman Karang Taruna HIRASEDU yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini.
- 13.Dan teman-teman sipil angkatan 2012 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan, tentunya skripsi ini masih sangat jauh dari kata sempurna. Maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua kalangan.

Malang, Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
RINGKASAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tanah Ekspansif.....	6
2.1.1 Pengertian Tanah Ekspansif.....	6
2.1.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan United Classifications System(USCS).....	6
2.1.3 Mineral pada Tanah Lempung Ekspansif.....	7
2.1.4 Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif.....	10
2.1.5 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif.....	11
2.2 Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan.....	13
2.3 Daya Dukung Tanah.....	17
2.4 Stabilisasi Tanah.....	21
2.4.1 Stabilisasi dengan Kapur.....	23
2.4.2 Stabilisasi tanah dalam dengan Metode Deep Soil Mixing (DSM).....	25
2.4.3 Uji Laboratorium Metode Deep Soil Mixing (DSM).....	28

2.5	Uji Pembebanan (Load Test)	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		31
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2	Bahan Penelitian	32
3.3	Peralatan Penelitian	32
3.4	Rancangan Penelitian	33
3.5	Variabel Penelitian	33
3.6	Metode Penelitian	34
3.6.1	Persiapan Benda Uji	34
3.6.2	Uji Pembebanan	37
3.7	Metode Analisa Data	39
3.8	Diagram Alir Penelitian	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Pemeriksaan Specific Gravity	41
4.2	Pemeriksaan Klasifikasi Tanah	41
4.2.1	Analisis Mekanis Tanah	41
4.2.2	Pemeriksaan Batas – Batas Atterberg (Atterberg Limit)	42
4.2.3	Sistem Klasifikasi Tanah Unified	43
4.2.4	Kriteria Tanah Lempung Ekspansif	43
4.3	Pemeriksaan Pemadatan Tanah	45
4.3.1	Penentuan Kadar Air Untuk Campuran DSM	49
4.3.2	Kepadatan Tanah Model	47
4.4	Uji Beban (LoadTest) pada Model Benda Uji	48
4.5	Hasil Uji Beban (LoadTest) pada Model Benda Uji	49
4.5.1	Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli	49
4.5.2	Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli Stabilisasi DSM	50
4.5.2.1	Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (Df) = 2B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda	50

4.5.2.2 Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (Df) = 3B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda.....	51
4.5.2.3 Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (Df) = 4B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda	53
4.5.2.4 Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = 1D dengan Variasi Panjang (Df) Berbeda.....	55
4.5.2.5 Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = 1,25D Konstan dengan Variasi Panjang (Df) Berbeda.....	56
4.5.2.6 Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = 1,5D Konstan dengan Variasi Panjang (Df) Berbeda.....	57
4.5.3 Nilai daya dukung tanah terhadap prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM	58
4.6 Analisis Pengaruh Variasi Jarak Dan Panjang Kolom DSM 10 % Kapur Berdasarkan BCI	60
4.6.1 Bearing Capacity Improvement Ultimate (BCIu).....	60
4.6.2 Bearing Capacity Improvement Settlement (BCIs).....	62
4.7 Pemeriksaan Potensi Mengembang (Swelling).....	68
BAB V PENUTUP	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	

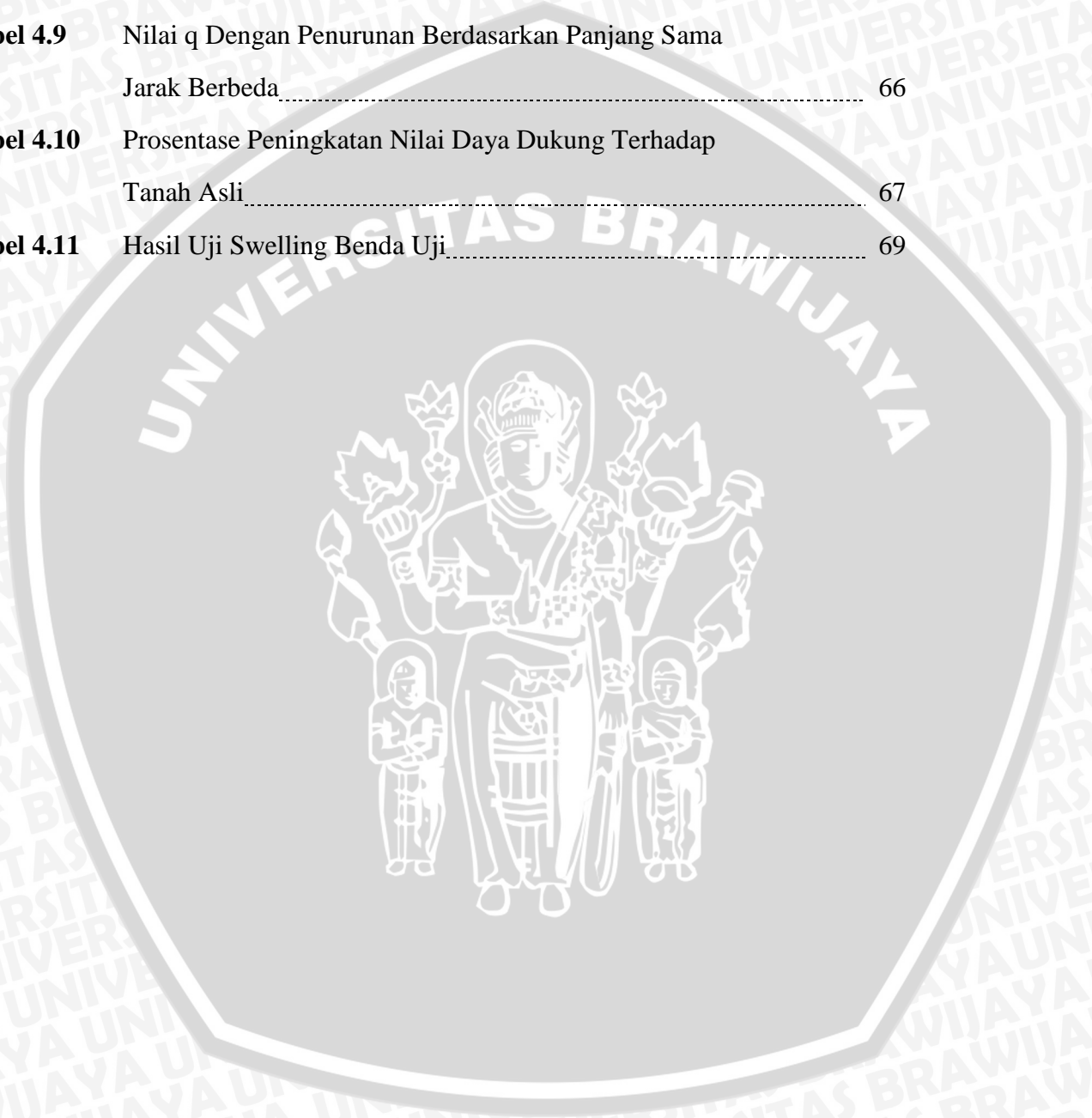




DAFTAR TABEL

Nomor	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Simbol Untuk Klasifikasi USCS	7
Tabel 2.2	Hubungan Antara Mineral Tanah Dengan Aktivitas	10
Tabel 2.3	Hubungan Potensial Mengembang Dengan Nilai Indeks Plastisitas	12
Tabel 2.4	Klasifikasi Potensi Mengembang Didasarkan Pada <i>Atterberg Limit</i>	12
Tabel 2.5	Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Kadar Colloid	13
Tabel 2.6	Kapasitas Daya Dukung Tanah berbagai Jenis Pondasi Menurut Terzaghi	18
Tabel 2.7	Macam-Macam Tanah Dan Metode Stabilisasi Yang Cocok Untuk Stabilitas Dan Keawetan Tanah Dasar	22
Tabel 2.8	Hal Hal Yang Perlu Dipertimbangkan Dalam Pemilihan Metode Kontruksi Stabilisasi Dengan Kapur	23
Tabel 2.9	Hasil Pengujian Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur	24
Tabel 2.10	Penjelasan Standart Laboratorium Yang Ada Untuk Persiapan Sampel Dan Simulasi Pengujian Metode Deep Soil Mixing	29
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian Dengan Variasi Jarak Dan Kedalaman Kolom	33
Tabel 3.2	Variasi Jarak Dan Panjang Tipe Panels Berdiameter 3cm	36
Tabel 3.3	Pembacaan Dan Penurunan Uji Beban (Load Test)	38
Tabel 3.4	BCI Dan Prosentase Peningkatan Daya Dukung	40
Tabel 4.1	Hasil Pengujian specific Gravity Tanah Asli	41
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Batas –Batas <i>Atterberg</i>	42
Tabel 4.3	Perbandingan nilai Kadar Air dengan Berat Isi Kering Tanah Stabilisasi	46
Tabel 4.4	Uji Density Pada Tanah Model	47
Tabel 4.5	Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah	59
Tabel 4.6	Nilai q_u Dengan Penurunan Berdasarkan Jarak Sama	

	Penjang Berbeda.....	60
Tabel 4.7	Nilai q_u Dengan Penurunan Berdasarkan Panjang Sama	
	Jarak Berbeda.....	61
Tabel 4.8	Nilai q Dengan Penurunan Berdasarkan Jarak Sama	
	Panjang Berbeda.....	65
Tabel 4.9	Nilai q Dengan Penurunan Berdasarkan Panjang Sama	
	Jarak Berbeda.....	66
Tabel 4.10	Prosentase Peningkatan Nilai Daya Dukung Terhadap Tanah Asli.....	67
Tabel 4.11	Hasil Uji Swelling Benda Uji.....	69



DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Grafik Plastisitas Untuk Klasifikasi Tanah USCS	7
Gambar 2.2	(a)Struktur Kaolinite (b)Struktur Atom Kaolinite.....	8
Gambar 2.3	Struktur Mineral Illite	8
Gambar 2.4	(a)Struktur Mineral Montmorillonite (b)Struktur Atom Montmorillonite.....	9
Gambar 2.5	Diagram Struktur Dari (a)Kaolinite (b)Illite (c)Montmorillonite.....	10
Gambar 2.6	Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang.....	12
Gambar 2.7	Pengaruh Pemadatan Pada Struktur Tanah Lempung.....	14
Gambar 2.8	Perubahan Permeabilitas Dengan Kadar Air Yang Diberikan...	15
Gambar 2.9	Pengaruh Pemadatan Pada Daya Rembes Tanah Lempung.....	16
Gambar 2.10	Pengaruh Pemadatan Pada Kekuatan Tanah Lempung.....	16
Gambar 2.11	Daya Dukung Batas Tanah (a)Model Pondasi (b)Grafik Hubungan Beban Dan Penurunan.....	17
Gambar 2.12	Macam-Macam Keruntuhan Pondasi (a)Keruntuhan Geser Umum (b)Keruntuhan Geser Local (c)Keruntuhan Penetrasi.....	20
Gambar 2.13	Isobar Tegangan Vertikal dibawah Luasan Berbentuk Bujur Sangkr Yang Menerima Beban Merata.....	20
Gambar 2.14	Macam-Macam Alat Stabilisasi Mekanis.....	21
Gambar 2.15	Grafik Hubungan Persentase Kapur dengan CBR dan Swelling.....	24
Gambar 2.16	Proses Deep Soil Mixing (DSM) Dan Hasil Kolom DSM.....	25
Gambar 2.17	Konfigurasi Kolom DSM.....	26

Gambar 2.18 Variasi Konfigurasi Dan Jarak Kolom DSM.....	26
Gambar 2.19 Contoh Penempatan Kolom.....	27
Gambar 2.20 (a) Skema Uji Pembebanan	
(b) Grafik Beban dan Penurunan Tanah.....	28
Gambar 2.21 Hubungan daya dukung dengan regangan.....	30
Gambar 2.22 Skema Uji Pembebanan di Laboratorium.....	31
Gambar 2.23 Hubungan Beban Dengan Penurunan.....	31
Gambar 3.1 Skema Uji Pembebanan Sampel.....	37
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	40
Gambar 4.1 Grafik Hasil Analisis Saringan Dan Hydrometer.....	42
Gambar 4.2 Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem <i>Unified</i>	43
Gambar 4.3 Grafik Klasifikasi Berdasarkan Potensi Mengembang.....	44
Gambar 4.4 Pemadatan Standart Tanah Asli.....	45
Gambar 4.5 Grafik Hasil Pemadatan dan Uji CBR Tanah Stabiliasi.....	46
Gambar 4.6 Hubungan Beban Dengan Penurunan Tanah Asli.....	49
Gambar 4.7 Hubungan Daya Dukung Dengan Penurunan Tanah Asli.....	49
Gambar 4.8 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df=2B.....	50
Gambar 4.9 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df=3B.....	52
Gambar 4.10 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df=4B.....	53
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L=1D.....	55
Gambar 4.12 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L=1,25D.....	56
Gambar 4.13 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L=1, 5D.....	57
Gambar 4.14 Perbandinga Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah.....	59

Gambar 4.15 Perbandingan Pengaruh Variasi Panjang (Df) Terhadap Nilai BC _{Iu}	61
Gambar 4.16 Perbandingan Pengaruh Variasi Jarak (L) Terhadap Nilai BC _{Iu}	62
Gambar 4.17 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df = 2B.....	62
Gambar 4.18 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df = 3B.....	63
Gambar 4.19 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Jarak Terhadap Df = 4B.....	63
Gambar 4.20 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L = 1D.....	64
Gambar 4.21 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L = 1,25D.....	64
Gambar 4.22 Perbandingan Nilai q Dan Penurunan Dengan Variasi Panjang Terhadap L = 1,5D.....	65
Gambar 4.23 Perbandingan Pengaruh Variasi Panjang (Df) Terhadap Nilai BC _{Is}	66
Gambar 4.24 Perbandingan Pengaruh Variasi Jarak (L) Terhadap Nilai BC _{Is}	67
Gambar 4.25 Grafik Prosentase Stabilisasi Terhadap Nilai Swelling.....	68



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Pengujian Kada Air Tanah Asli
- Lampiran 2** Pengujian berat Isi Tanah
- Lampiran 3** Pengujian Berat Jenis Tanah Asli
- Lampiran 4** Analisa Saringan dan Hydrometer
- Lampiran 5** Pengujian Batas –Batas Atterberg
- Lampiran 6** Pemeriksaan Pemadatan Standart Laboratorium Tanah Asli
- Lampiran 7** Pemeriksaan Pemadatan Standart Tanah Stabilisasi Kapur
- Lampiran 8** Pemeriksaan California Bearing Ratio (CBR) Tanah Stabilisasi Kapur
- Lampiran 9** Hasil Uji Density pada Tanah Model (Tanah Dasar)
- Lampiran 10** Hasil Uji Pembebanan (Load Test)



RINGKASAN

Galih Karno Putro, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2016, Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) Tipe *Panels* dengan Campuran 10% Kapur terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif, Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Arief Rachmansyah dan Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT

Di dalam merancang atau membangun suatu konstruksi, ada beberapa faktor yang harus diperhatikan. Salah satunya adalah tanah, dimana tanah merupakan bagian terpenting dalam suatu konstruksi, fungsi utama tanah adalah sebagai pijakan dari suatu konstruksi yang menerima beban dari konstruksi di atasnya. Salah satu jenisnya adalah tanah lempung ekspansif yang memiliki kembang susut tinggi dan daya dukung rendah. Tanah yang berasal dari daerah Bojonegoro, Jawa Timur, Kec. Ngasem menjadi sampel bahan uji penelitian. Hasil pengujian tanah ini teridentifikasi ke dalam jenis tanah lempung ekspansif, di mana nilai PI dari tanah ini sebesar 47,56 % yang berarti termasuk ke dalam kriteria derajat ekspansifitas sangat tinggi. Sehingga perbaikan tanah dengan stabilisasi bahan aditif banyak dilakukan untuk meningkatkan daya dukung.

Pada penelitian ini, tanah lempung ekspansif dari daerah Bojonegoro akan distabilisasi menggunakan metode DSM dengan diameter kolom 3 cm dan konfigurasi kolom berpola *panels*. Bahan aditif yang ditambahkan yaitu 10% *kapur*. Variasi jarak dan panjang kolom dilakukan untuk mengetahui pengaruh terhadap nilai daya dukung tanah ekspansif. Benda uji terdiri dari dua jenis, yaitu tanah asli sebelum distabilisasi dan tanah yang telah distabilisasi dengan kolom DSM. Pengujian untuk mendapatkan daya dukung dilakukan dengan pengujian beban (*load test*).

Sampel penelitian ini dilakukan di dalam box ukuran 30 x 30 x 30 cm dengan tinggi tanah sampel 20 cm. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, stabilisasi dengan metode DSM menggunakan bahan aditif 10% *kapur* dengan variasi jarak dan panjang kolom dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Peningkatan nilai daya dukung memberikan hasil yang berbeda-beda. Hal ini terjadi karena pengaruh variasi jarak dan panjang kolom, dimana semakin besar panjang kolom dan semakin kecil jarak antar kolom, nilai daya dukung semakin besar. Namun, variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh lebih besar terhadap peningkatan nilai daya dukung. Selain itu, meningkatnya prosentase tanah yang distabilisasi akan meningkatkan nilai daya dukung dan menurunkan nilai *swelling* tanah. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai daya dukung maksimum sebesar 19,94 kg/cm² yang meningkat 200,301% dari tanah sebelum distabilisasi. Nilai ini terletak pada kolom dengan jarak antar kolom terkecil (L) = 3 cm (antar kolom bersinggungan) dengan panjang kolom terbesar (D_f) = 20 cm.

Kata Kunci : lempung ekspansif, *kapur*, *Deep Soil Mix*, jarak dan panjang kolom, daya dukung

SUMMARY

Galih Karno Putro, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, August 2016, The Effect of Spacing and Length of Deep Soil Mixing (DSM) Coloumn with 10 % Lime on The Bearing Capacity of Expansive Soil, Academic Supervisor : Dr. Ir. Arief Rachmansyah and Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT

In design or build a construction, there are several factors that must be considered. One of these was the soils, the soil is the most important part in a construction, the primary function of the soil is of a footing as a construction the load of construction it. One kind is the expansive soils have a high shrink swell and low support. The land that comes from the region of Jelu village, Ngasem, Bojonegoro, East Java, being the sample test materials research. The test results of this unidentified land into the kind of expansive clay soils, where the value of PI from this land of 47.56% which means included in the criteria of very high degrees of expansiveness. So the improvement of soil with stabilization material additives much done to bearing capacity support.

In this research, expansive soil from Bojonegoro will stabilized using DSM column methods with diameter of coloumn 3 cm and with Panels Arrangement. Additive materials added 10% lime. A variation of spacing and length of the column is done to find out the effect on the value soil support expansive power. The test objects consist of two types: the origin soil and stabilized soil with DSM Coloumn. Test for support is done by load test

The sample of this research was done in the box with size 30 x 30 x 30 cm and for high of soil samples is 20 cm. Based on test that has been done, the stabilization method using DSM additives 10% lime with a variation of the spacing and the length of the column can increased value of bearing capacity. The effect in the value of the resource support provides with different results. This is occur due to the increased of the variation of the spacing and the length of the column, where the greater the length of the columns and the smaller the distance between the columns, the values that sustain the greater power. However, variations in the space between the columns give greater effect to increased value of bearing capacity. In addition, the percentage of stabilized soil will increase the value of the bearing capacity lowering the value of swelling soil. From the test results, the maximum power value obtained support of 19.94 kg/cm² which increased 200.301% from the origin soil. This value is located in the column with the smallest column spacing (L) = 3 cm (between columns intersect) with the largest column length (Df) = 20cm.

Key words: expansive soil, lime, Deep Soil Mixing, spacing and length column, Bearing Capacity

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di dalam merancang atau membangun suatu konstruksi, ada beberapa faktor yang harus diperhatikan. Salah satunya adalah tanah, dimana tanah merupakan bagian terpenting dalam suatu konstruksi, fungsi utama tanah adalah sebagai pijakan dari suatu konstruksi yang menerima beban dari konstruksi di atasnya. Apabila tanah dasar baik, maka akan menghasilkan suatu konstruksi yang kokoh dan kuat. Namun jenis tanah tidak selalu baik, salah satunya adalah tanah lempung ekspansif. Dimana tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki daya dukung rendah dan juga memiliki kembang-susut sangat besar karena kandungan air pada tanah lempung ekspansif dapat berubah-ubah, sehingga memiliki dampak buruk pada konstruksi di atasnya. Kerusakan sering terjadi akibat pergeseran tanah sehingga timbul retakan pada dinding bangunan, gelombang pada permukaan jalan yang dapat membahayakan pengguna jalan, terangkatnya pondasi pada suatu konstruksi bangunan. Oleh karena itu, untuk dapat mengatasi masalah tersebut, maka diperlukan suatu metode perbaikan tanah dan stabilisasi pada tanah lempung ekspansif, sehingga tanah tersebut menjadi lebih stabil dan dapat meningkatkan daya dukung terhadap konstruksi di atas tanah tersebut.

Stabilisasi tanah dalam arti luas adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu, guna memperbaiki sifat-sifat teknis tanah seperti kapasitas dukung tanah, kompresibilitas, permeabilitas, kemudahan dikerjakan, potensi pengembangan, dan sensitifitas terhadap potensi kadar air. Salah satu upaya stabilisasi tanah adalah dengan menambahkan bahan aditif pada tanah,. Bahan aditif yang digunakan untuk proses stabilisasi disebut *stabilizing agent*, karena setelah terjadi percampuran menyebabkan tanah menjadi lebih stabil. Bahan aditif yang digunakan antara lain kapur, abu batu bara (*fly ash*), semen Portland, sodium, abu sekam dan lain-lain. Stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan aditif, sering dilakukan untuk stabilisasi lapisan dangkal dengan pencampuran *in situ* dan pemadatan. Stabilisasi ini banyak diterapkan untuk tanah ekspansif dengan zona aktif yang tidak terlalu dalam.



Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menstabilisasi tanah lempung lapisan dangkal dengan menggunakan bahan aditif dan telah terbukti dapat memperbaiki sifat-sifat tanah dan meningkatkan kekuatannya. Wasrsiti (2009) meneliti sampel tanah dasar (*subgrade*) dari jalan di daerah Sendang Mulyo. Jalan pada daerah ini sering mengalami kerusakan meskipun sering dilakukan perbaikan pada permukaan (*lap surface*). Stabilisasi dengan kapur terhadap nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dan *swelling* (kembang susut). Dari hasil penelitian yang pernah dilakukan, tanah di daerah Sendang Mulyo termasuk jenis tanah lempung dan mempunyai (γ_d) maksimum 1,483964 t/m³, pada presentase kapur optimum = 10, 80769% dengan kadar air = 19% (Warsiti, 1998). Dari pengujian sifat fisik tanah asli didapatkan hasil bahwa sampel tanah tergolong tanah dengan plastisitas tinggi dengan nilai LL = 57,95% PI = 33,47%, PL = 24,48%, SL = 18,52%. Berdasarkan pengujian mekanis metode standar tanah asli memiliki data sebagai berikut: kadar air optimum (OMC) = 24%, kepadatan kering max (γ_d) = 1,485 t/m³, CBR *unsoked* = 11,8%, CBR *soked* = 2,45%, dan *swelling* = 5,127%. Tanah asli dicampur dengan kapur dengan berbagai presentase (5%, 8%, 10%, 12%). Lama pemeraman 3 hari dengan metode *standard proctor*. Dari hasil pengujian didapatkan kesimpulan bahwa presentase optimum kapur sebesar 10% yang dapat meningkatkan sifat tanah paling baik dengan hasil sebagai berikut: CBR *unsoked* (tidak terendam) naik dari 11,8% menjadi 22,1% dan CBR *soked* (terendam) naik dari 2,45% menjadi 7,6%.

Namun pada beberapa kasus ditemukan adanya lapisan tanah ekspansif yang dalam, sehingga jika menggunakan metode stabilisasi lapisan dangkal, tidak bisa mencapai hasil maksimal. Selain membutuhkan bahan lebih banyak, biaya tinggi, serta membutuhkan waktu pelaksanaan yang lebih lama. Maka diperlukan metode stabilisasi untuk lapisan yang lebih dalam agar hasilnya dapat tercapai dengan maksimal sehingga lebih efisien untuk bahan, biaya, dan waktu pelaksanaannya.

Salah satu metode stabilisasi tanah lapisan dalam dengan menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang mana bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dengan dicampur dengan cara mekanik atau dengan alat pencampur seperti mesin bor atau auger. Metode ini berguna untuk mengurangi penurunan dan meningkatkan stabilitas tanah. Penelitian laboratorium tentang stabilisasi tanah lempung lapisan dalam dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Agus Setyo M. (2009) pernah melakukan sebuah penelitian laboratorium tentang stabilisasi tanah lempung lapisan dalam dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Dalam penelitiannya menjelaskan bahwa dengan perkuatan kolom kapur berdiameter 30 mm dan panjang 20 cm pada tanah lempung di daerah Bantul-Yogyakarta dapat meningkatkan

kekuatan tanah dari 0,23 Kn menjadi 5,2 kN baik pada arah radial maupun vertikal. Penelitian yang lain juga dilakukan oleh Arif Luqman Hakim (2015) dengan melakukan penelitian tentang pengaruh jarak dan panjang kolom DSM tipe *panels* diameter 2 cm berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah. Semakin besar jarak antar kolom, daya dukung tanah semakin menurun. Sedangkan, semakin besar panjang kolom, nilai daya dukung semakin meningkat. Variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh lebih besar terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah dari pada variasi panjang kolom. Daya dukung maksimum didapatkan pada jarak kolom terkecil dan panjang kolom terbesar. Dan stabilisasi dengan metode DSM dengan campuran *fly ash* terbukti dapat menurunkan nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian kali ini akan dilakukan untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif di daerah Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan menambahkan kapur 10% sebagai bahan aditif. Kapur yang digunakan pada penelitian ini merupakan kapur tohor yang mudah didapatkan di toko-toko bangunan. Selain itu, dari beberapa variasi stabilisasi yang dilakukan di laboratorium akan diperoleh variasi dengan nilai daya dukung terbaik yang bisa dijadikan sebagai acuan untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif yang berasal dari daerah Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

1.2 Identifikasi Masalah

Tanah lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut sangat besar dikarenakan adanya perubahan kadar air di dalam tanah. Hal ini terjadi karena terdapat mineral-mineral yang dapat menyerap air secara ekstrem dan dapat menyusut drastis ketika musim kemarau. Jika kadar airnya besar maka tanah akan mengembang sehingga timbul tekanan pengembangan. Demikian juga sebaliknya, jika kadar airnya berkurang maka tanah akan menyusut dan menimbulkan pecah-pecah pada permukaan tanah. Ketika terjadi peningkatan kadar air, tanah lempung ekspansif memiliki daya dukung yang sangat rendah. Hal ini menyebabkan terjadinya kerusakan struktur bangunan di atasnya.

Untuk menstabilisasi tanah tersebut dilakukan suatu upaya sehingga diperoleh sifat tanah yang lebih baik dan stabil. Salah satu cara dalam menstabilisasi tanah lempung ekspansif adalah dengan memberikan bahan aditif seperti kapur. Di Indonesia umumnya stabilisasi dengan bahan aditif dilakukan di lapisan tanah permukaan, namun belum banyak dilakukan untuk lapisan tanah dalam. Salah satu metode stabilisasi lapisan dalam dengan bahan aditif adalah metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Dengan memberikan campuran kapur

dan variasi jarak serta panjang kolom tipe panels dengan diameter 3 cm menggunakan metode DSM diharapkan dapat memberikan pengaruh positif terhadap nilai daya dukung pada sampel tanah dengan campuran bahan aditif tersebut.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak dan panjang kolom tipe panels dengan diameter 3 cm terhadap nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan campuran 10% kapur?
2. Berapa jarak dan panjang kolom yang maksimum untuk meningkatkan nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan pencampuran 10% kapur?
3. Bagaimana pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan bahan aditif 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah?

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup dari penelitian ini, maka pembatasan masalah dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Perubahan terhadap karakteristik tanah akibat adanya pencampuran tidak akan dianalisis.
2. Kadar kapur yang digunakan yaitu 10% dari berat kering tanah.
3. Kadar air (OMC) tanah dasar yang digunakan yaitu 27,908% dengan kepadatan (γ_d) = 1,28 g/cm³.
4. Metode stabilisasi yang digunakan adalah metode *Deep Soil Mixing* (DSM) menggunakan konfigurasi *Panels Couolumn* dengan diameter (D) = 3 cm. Variasi jarak kolom adalah 1 x D, 1,25 x D dan 1,5 x D. Sedangkan untuk variasi panjang kolom adalah 2 x B, 3 x B, dan 4 x B, dimana B adalah lebar pelat beban dengan B = 5cm.
5. Tanah dasar yang distabilisasi hanya mencakup pada area yang terpengaruh tegangan vertikal dibawah luasan pelat yang menerima beban merata, yaitu hingga jarak 2 x B arah horizontal dan 3 x B arah vertikal dari titik pusat beban bekerja.
6. Metode pencampuran yang digunakan adalah *dry mixing* dan pemodelan dilakukan di dalam *box* ukuran (30 x 30 x 30) cm.

7. Volume tanah dasar dalam *box* yaitu (30 x 30 x 20) cm.
8. Waktu perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah selama 3 hari.
9. Pencampuran sampel tanah dengan kapur dianggap homogen dan dilakukan di luar *box*.
10. Alat pemadat untuk tanah dasar berbentuk persegi (12,5 x 12,5) cm dengan berat 9,56 kg, Sedangkan alat pemadat untuk kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) berbentuk silinder.
11. Pengujian laboratorium yang dilakukan adalah uji beban hidrolik (*loading test*). Pada uji pembebanan ini digunakan pelat baja berukuran (5x 5 x2) cm sebagai penyalur beban yang merupakan pemodelan dari beban pondasi. Pembebanan dihentikan pada saat mencapai batas runtuh tanah, yaitu ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali beban yang sama.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom tipe *Panels* dengan diameter 3 cm terhadap nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan pencampuran 10% kapur.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang kolom maksimum yang digunakan untuk meningkatkan nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan pencampuran 10% kapur.
3. Untuk mengetahui pengaruh stabilisasi tanah ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan bahan aditif 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai sumber informasi dalam dunia konstruksi, khususnya mengenai stabilisasi tanah lempung ekaspansif dengan bahan aditif kapur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk meninglatkan daya dukung tanah.
2. Menjadi sumber informasi dan referensi yang dapat digunakan untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) di dalam skala lapangan.
3. Sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah Ekspansif

2.1.1. Pengertian Tanah Ekspansif

Sifat khusus yang dimiliki oleh tanah lempung ekspansif adalah kandungan mineralnya memiliki kapasitas pertukaran ion yang sangat tinggi, sehingga mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut tinggi apabila terjadi perubahan kadar air. Pada peningkatan kadar air, tanah ekspansif akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan kembang. Bila kadar airnya berkurang sampai batas susutnya, maka akan terjadi penyusutan. Sifat kembang susut seperti inilah yang dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan di atasnya. (Hardiyatmo, 2006)

Komponen yang terkandung di dalam tanah lempung (*clays*), sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang tidak dapat dilihat dengan jelas jika hanya menggunakan mikroskop biasa dengan ukuran partikel kurang dari 0,002 mm (2 mikron). Apabila dilihat dari segi mineral, tanah lempung memiliki peratikel-partikel mineral tertentu seperti “menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air” (Grim, 1953). Namun, terdapat juga tanah yang dapat disebut sebagai tanah bukan lempung (*non-clay soil*) meskipun terdiri dari partikel-partikel yang sangat kecil seperti partikel-partikel quartz, feldspar, dan mika yang berukuran submikroskopis, tetapi umumnya mereka tidak dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis pada tanah. (Das, 1995:9)

2.1.2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan United Classification System (USCS)

Metode klasifikasi tanah dengan menggunakan USCS (united Soil Classification System) merupakan metode klasifikasi tanah yang cukup banyak digunakan dalam bidang geoteknik. Klasifikasi ini diusulkan oleh A. Cassagrande pada tahun 1942 dan direvisi pada tahun 1952 oleh The Corps Of Engineers And The US Bureau Of Reclamation.

Dalam sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama yaitu:

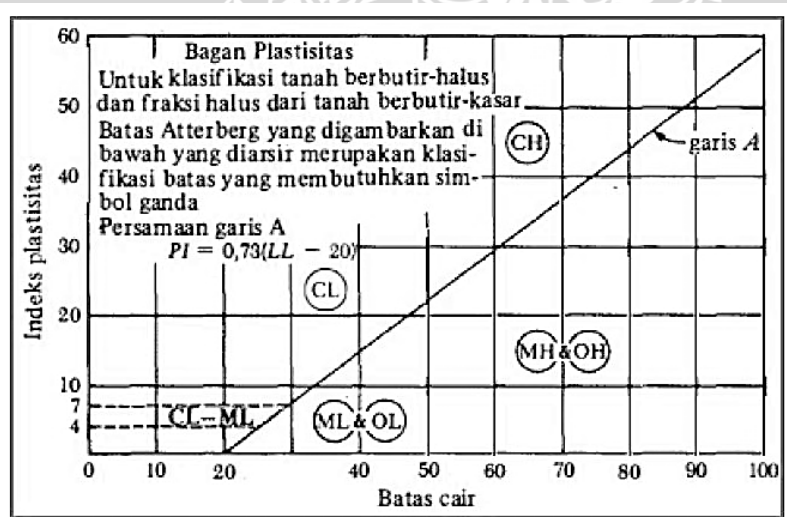
1. Tanah berbutir kasar (*coarse – grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$).
2. Tanah berbutir halus (*fine – grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$).

Selanjutnya untuk klasifikasi yang lebih detail lagi, dapat menggunakan table USCS berikut ini. Beberapa symbol berikut ini sering digunakan dalam klasifikasi metode USCS.

Tabel 2.1. Symbol untuk klasifikasi USCS

Simbol	Keterangan
G	Kerikil (<i>gravel</i>)
S	Pasir (<i>sand</i>)
M	Lanau Inorganik (<i>inorganic silt</i>)
C	Lempung Inorganik (<i>inorganic clay</i>)
O	Lanau dan Lempung Organik
Pt	Gambut (<i>peat</i>)
W	Gradasi baik (<i>well graded</i>)
P	Gradasi buruk (<i>poorly graded</i>)
L	Plastisitas rendah (<i>low plasticity</i>)
H	Plastisitas tinggi (<i>high plasticity</i>)

Sumber : DAS (1995: 72)



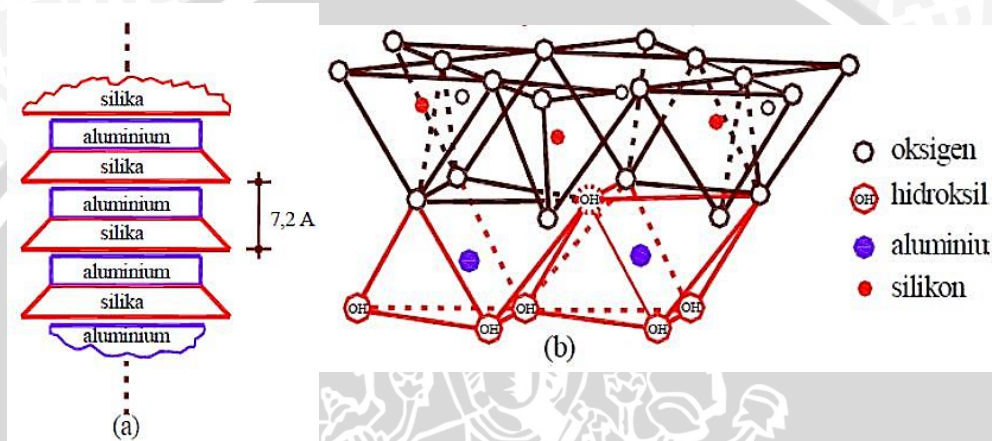
Gambar 2.1. Grafis Plastisitas Untuk Klasifikasi Tanah USCS
Sumber : DAS (1995: 72)

2.1.3. Mineral pada tanah lempung ekspansif

Chen (1975), mengatakan bahwa mineral lempung terdiri dari tiga komponen penting yaitu *montmorillonite*, *illite*, dan *kaolinite*. Mineral *montmorillonite* mempunyai luas permukaan lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah banyak bila

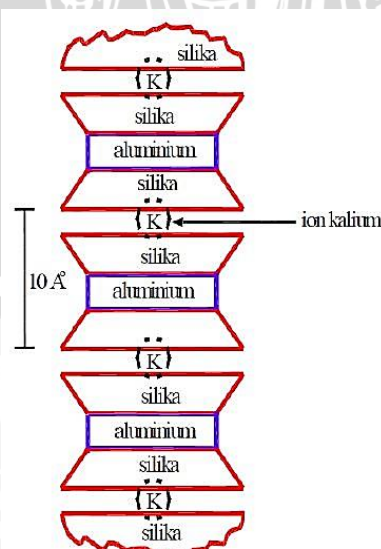
dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga tanah yang mempunyai kepekaan terhadap pengaruh air ini sangat mudah mengembang.

Struktur *kaolinite* terdiri dari unit lapisan *silica* dan *aluminium* yang diikat oleh ion hidrogen. *Kaolinite* membentuk tanah yang stabil karena strukturnya saling terikat kuat, sehingga mampu menahan molekul-molekul air agar tidak masuk ke dalamnya. Hal ini terjadi karena *Kaolinite* terdiri dari susunan satu lembar silika tetrahedra dan satu lembar aluminium oktahedra yang membentuk satu unit dasar (**Gambar 2.2a**). Sehingga susunan silika dan aluminium keduanya terikat oleh ikatan hidrogen (**Gambar 2.2b**).



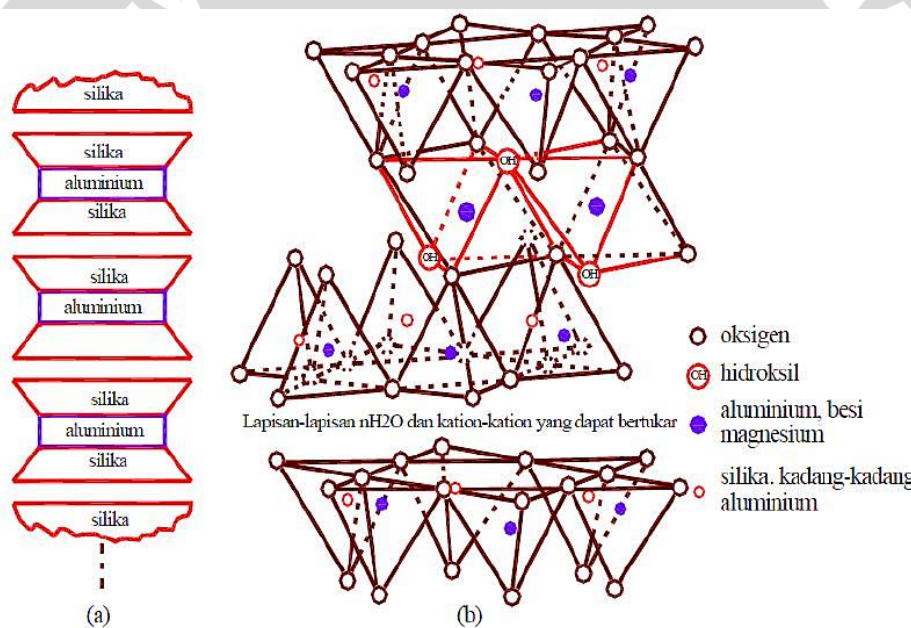
Gambar 2.2 (a) Struktur *Kaolinite* (Lambe, 1953)
(b) Struktur atom *Kaolinite* (Grim, 1959)

Struktur *illite* terdiri dari lapisan-lapisan unit *silica-aluminium-silica* yang dipisahkan oleh ion K^+ , dimana ion K^+ ini memiliki sifat mengembang. Hal ini dikarenakan susunan dasar dari *illite* yang terdiri dari sebuah lembaran aluminium oktahedra yang terikat di antara dua lembaran silika tetrahedra seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur Mineral *Illite* (Lambe, 1953)

Sifat dari struktur *montmorillonite* menyerupai dengan dengan struktur *illite*, tetapi ion pemisahannya berupa H₂O yang sangat mudah lepas. Hal ini dikarenakan satuan susunan kristalnya terbentuk dari susunan dua lempeng silika tetrahedral yang mengapit satu lempeng alumina oktahedral ditengahnya (Gambar 2.4a) (Das, Braja M. (1985)) . Hubungan antar satuan unit diikat oleh gaya Van der Waals yang lemah, sehingga air (H₂O) dan kation padat bertukar dan mudah menyusup dan dapat memperlemah ikatan, sehingga akan terpisah (Gambar 2.4b). Mineral ini bisa dikatakan sangat tidak stabil apabila terdapat di kondisi tergenang oleh air, karena air dapat dengan mudah masuk ke dalam sela/pori antar lapisan ini sehingga mineral menjadi mengembang. Pada saat mengering, air yang berada di antar lapisan juga mengering sehingga mineral menyusut. Karena sifat-sifat tersebut, *montmorillonite* tidak jarang menimbulkan masalah kerusakan padasuatu kontruksi bangunan. (Hardiyatmo, 1992:16-17)



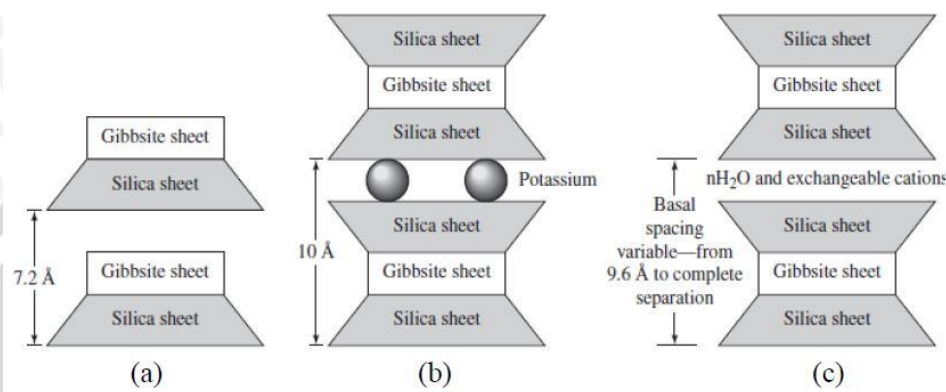
Gambar 2.4 (a) Struktur mineral *montmorillonite* (Lambe, 1953)
(b) Struktur atom *montmorillonite* (Grim, 1959)

Maka dari itu, perilaku dan sifat tanah ekspansif sangat dipengaruhi oleh kadar air dan mineraloginya. Pada musim kemarau volume tanah ini akan banyak menyusut, sedangkan pada saat musim penghujan volume tanah akan mengembang. Sehingga untuk kandungan mineral dalam tanah lempung dapat ditampilkan pada Tabel 2.2. berikut ini .

Tabel 2.2. Hubungan Antara Mineral Tanah Dengan Aktivitas

Mineral	Aktivitas
<i>Kaolinite</i>	0,33 -0,46
<i>Illite</i>	0,9
<i>Montmorillonite (Ca)</i>	1,5
<i>Montmorillonite (Na)</i>	7,2

Sumber : Chen (1975)

**Gambar 2.5** Diagram Struktur dari (a) *Kaolinite*; (b) *Illite*; (c) *Montmorillonite*

Sumber: Das (1995:13)

2.1.4. Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif memiliki karakteristik yang berbeda dari jenis tanah pada umumnya, yaitu sebagai berikut:

1. Mineral lempung

Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume umumnya mengandung *montmorillonite* atau *vermiculite*, sedangkan *illite* dan *kaolinite* dapat bersifat ekspansif bila ukuran partikelnya sangat halus.

2. Kimia tanah

Peningkatan konsentrasi kation dan bertambahnya tinggi valensi kation dapat menghambat pengembangan tanah. Sebagai contoh kation Mg^{++} akan memberikan pengembangan yang lebih kecil dibandingkan dengan Na^{+} .

3. Plastisitas

Tanah dengan indeks plastisitas dan batas cair yang tinggi mempunyai potensi untuk mengembang yang lebih besar.

4. Struktur tanah

Tanah lempung yang berflokulasi cenderung bersifat lebih ekspansif dibandingkan dengan terdispersi.

5. Berat isi kering

Tanah yang mempunyai berat isi kering yang tinggi menunjukkan jarak antar partikel yang kecil, hal ini berarti gaya tolak yang besar dan potensi pengembangan yang tinggi. (Pd T-10-2005-B, 2005:3)

2.1.5. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Chen (1975) menyatakan bahwa ada tiga cara yang dapat dilakukan untuk mengidentifikasi potensi yang dimiliki oleh tanah lempung ekspansif, yaitu dengan identifikasi mineralogi, cara tidak langsung (*single index method*), dan cara langsung.

a. Identifikasi Mineralogi

Identifikasi mineralogi dilakukan untuk mengidentifikasi potensi kembang-susut yang terjadi pada tanah lempung. Identifikasi dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- ❖ Difraksi Sinar-X (*X-Ray Diffraction*),
- ❖ Penurunan Panas (*Differential Thermal Analysis*),
- ❖ Penyerapan Terbilas (*Dye Absorption*),
- ❖ Analisa Kimia (*Chemical Analysis*), dan
- ❖ *Electron Microscope Resolution*.

b. Cara pengukuran tidak langsung

Hasil pengujian sejumlah indeks dasar tanah bisa digunakan untuk evaluasi dalam menyatakan berpotensi ekspansif atau tidaknya pada suatu contoh tanah. Uji indeks dasar tanah meliputi uji batas-batas *Atterberg*, *linear shrinkage test* (uji susut linier), *free swell test* (uji mengembang bebas), dan *colloid content test* (uji kandungan koloid).

Menurut Holtz (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji *Atterberg*. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitasnya, seperti yang ada pada tabel berikut ini :

Tabel 2.3. Hubungan Potensial Mengembang Dengan Nilai Indeks Plastisitas (IP)

Potensi Mengembang	Indeks Plastisitas
Rendah	0 - 15
Sedang	10 - 35
Tinggi	20 - 55
Sangat Tinggi	55<

Sumber : Chen (1975)

Altmeyer (1955) dalam Chen (1975), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai persentase susut linier dan persentase batas susut *Atterberg (SI)* , seperti yang ditunjukkan tabel dibawah ini :

Tabel 2.4. Klasifikasi Potensi Mengembang Didasarkan Pada *Atterberg* Limit

Batas susut Atterberg %	Susut Linear %	Derajat Mengembang
<10	<8	Kritis
10-12	5-8	Sedang
>12	0-8	Tidak Kritis

Sumber : Altemeyer (1955)

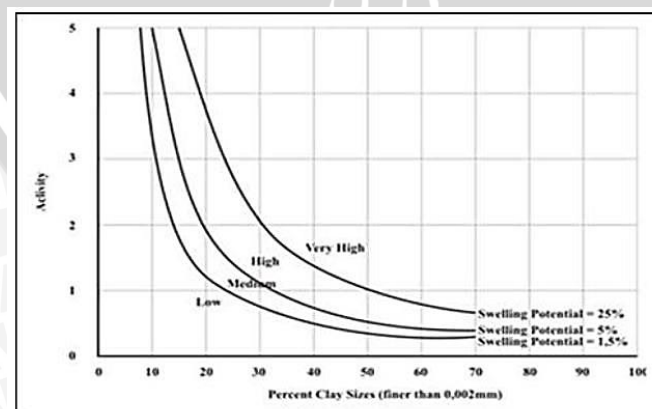
Skempton (1953) mengidentifikasi aktivitas sebagai perbandingan antara indeks plastisitas dengan persentase fraksi ukuran lempung (yaitu persentase dari berat butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm atau 2 μ m) , atau dinyatakan dalam persamaan :

$$A = \frac{PI}{C} \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

Dimana : A = aktivitas

PI= Indeks Plastisitas (%)

C = Presentase Lempung < 0,002 mm

**Gambar 2.6** Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

Sumber : Seed at al. (1962)

Colloid Content merupakan salah satu indikator atau ukuran yang menunjukkan proses mengembang yang terjadi pada tanah lempung ekspansif. Berikut ini adalah tabel klasifikasi tanah ekspansif berdasarkan kadar koloidnya :

Tabel 2.5 Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Kadar Colloid

Data Indeks Properties				
Colloid (<0,00 mm)	Liquid Limit (%)	Standart Penetration	% Total Volume Change	Degree of expansion
>28	>35	<11	>30	Very High
20-13	25-41	7-12	20-30	High
13-23	15-28	10-16	10-20	Medium
<15	<28	>15	<10	Low

Sumber : Holtz dan Gibbs (1956)

c. Cara pengukuran langsung

Metode paling baik untuk menentukan besar potensial mengembang dan tekanan mengembang pada lempung ekspansif ialah dengan metode pengukuran langsung. Metode pengukuran ini bisa dilakukan dengan menggunakan alat konsolidometer satu dimensi. Sampel tanah berbentuk silinder tipis diletakkan ke dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan pori pada sisi atas dan sisi bawah, kemudian diberi beban sesuai dengan yang diinginkan. Besarnya pengembangan contoh tanah dibaca beberapa saat setelah dibasahi dengan air. Besarnya pengembangan yang terjadi dapat diketahui dengan cara pengembangan tanah dibagi dengan tebal awal contoh tanah. Adapun cara pengukuran tekanan mengembang tanah ekspansif ada dua cara, yaitu:

1. Pengukuran dengan beban tetap (stabil) sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi, kemudian contoh tanah diberikan tekanan agar dapat kembali ke tebal semula,
2. Contoh tanah direndam dalam air agar dapat mempertahankan volume atau mencegah terjadinya pengembangan pada tanah dengan cara menambah beban di atasnya setiap saat. Metode ini disebut *constan volume method*.

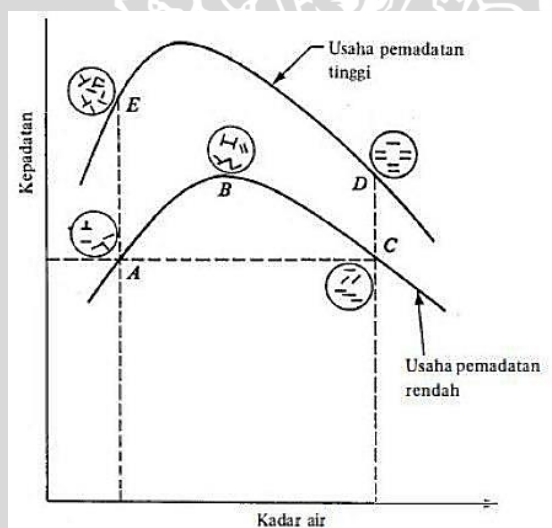
2.2. Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan

Sifat sifat teknis tanah lempung setelah pemadatan bergantung pada cara atau usaha pemadatannya, macam tanah, dan kadar airnya. Sudah dipelajari juga pada usaha pemadatan yang lebih besar diperoleh kepadatan yang lebih tinggi. Biasanya kadar air tanah yang dipadatkan, didasarkan pada posisi-posisi kadar air sisi kering optimum (dry size of optimum), dekat optimum atau optimum, dan sisi basah optimum (wet size of optimum). Kadar air kering optimum didefinisikan sebagai kadar air yang kurang daripada kadar air optimumnya. Kadar air basah optimum didefinisikan sebagai kadar air yang lebih banyak

dari kadar air optimumnya. Demikian juga dengan dekat optimum atau optimum yang berarti kadar air kurang lebih mendekati optimumnya.

Penyelidikan pada tanah lempung yang dipadatkan memperlihatkan bahwa lempung yang dipadatkan pada keadaan kering optimum, susunan tanah tidak bergantung pada macam pemadatannya (Seed dan Chan dalam Das, 1995). Pemadatan tanah dengan kadar air pada keadaan basah optimum akan mempengaruhi, kuat geser, serta sifat kemampuan tanahnya. Pada usaha pemadatan yang sama, dengan penambahan kadar air, penyesuaian susunan butiran menjadi bertambah.

Pada kering optimum, tanah selalu terflokulasi. Sebaliknya pada basah optimum susunan tanah menjadi terdispersi beraturan. Dalam gambar 2.7. susunan tanah pada titik C lebih teratur daripada titik A. Jika usaha pemadatan ditambah lagi, maka susunan tanah cenderung untuk lebih beraturan penyesuaiannya, bahkan berlaku juga pada kondisi kering optimum. Dengan melihat Gambar 2.7. contoh dalam titik E lebih teratur daripada titik A. Sedangkan pada kondisi basah optimum, susunan pada titik D akan lebih teratur daripada titik C.

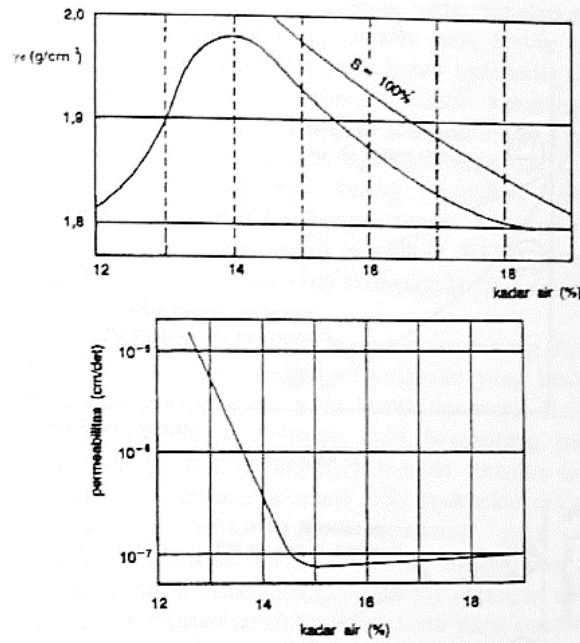


Gambar 2.7. Pengaruh Pemadatan Pada Struktur Tanah Lempung

Sumber : Lambe dalam DAS (1995:244)

Permeabilitas tanah akan berkurang dengan penambahan kadar airnya pada usaha pemadatan yang sama dan mencapai titik minimum pada kadar air optimumnya. Apabila usaha pemadatan ditambah, maka koefisien permeabilitas akan menurun, hal ini dikarenakan angka pori berkurang. Perubahan permeabilitas ini, bersama sama dengan pembentukan kadar air, ditunjukkan pada Gambar 2.8 . Pada gambar tersebut terlihat bahwa permeabilitas

tanah kira kira lebih tinggi bila tanah dipadatkan pada kering optimum daripada tanah dipadatkan pada keadaan basah optimum.

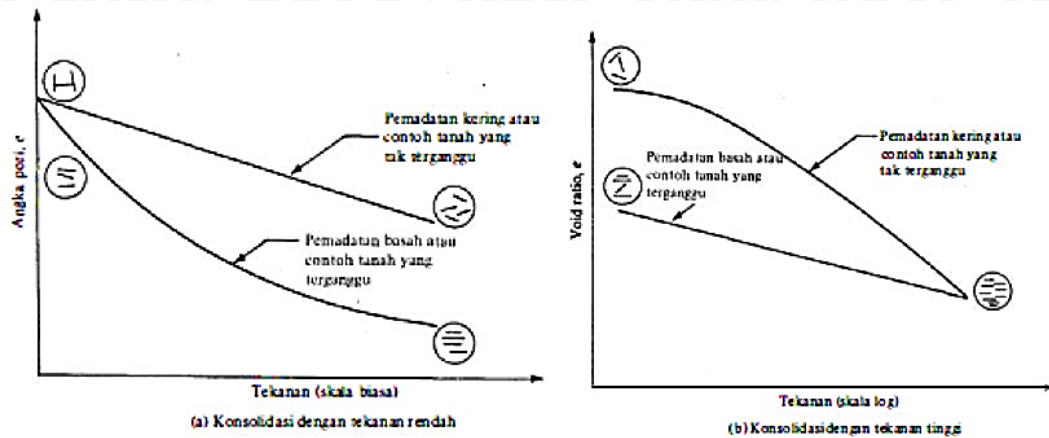


Gambar 2.8. Perubahan Permeabilitas dengan kadar air yang diberikan

Sumber : Lambe dalam Das (1995 :246)

Pemadatan menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah yang berkohesi. Perubahan-perubahan tersebut meliputi, perubahan pada daya rembes (*permeability*), kemampuan (*compressibility*), dan kekuatan dari tanah. Contoh tanah dalam pemadatan dipadatkan pada berbagai kadar air dengan usaha pemadatan yang sama. Harga dari koefisien rembesan yang menunjukkan ukuran mudah-sulitnya air merembes melewati suatu tanah, akan berkurang dengan bertambahnya kadar air. Harga koefisien rembesan tersebut mencapai minimum pada kadar air optimum. Sesudah kadar air optimum, koefisien rembesan akan sedikit bertambah. Jika usaha pemadatan ditambah, koefisien permeabilitas akan berkurang, sebab angka pori berkurang.

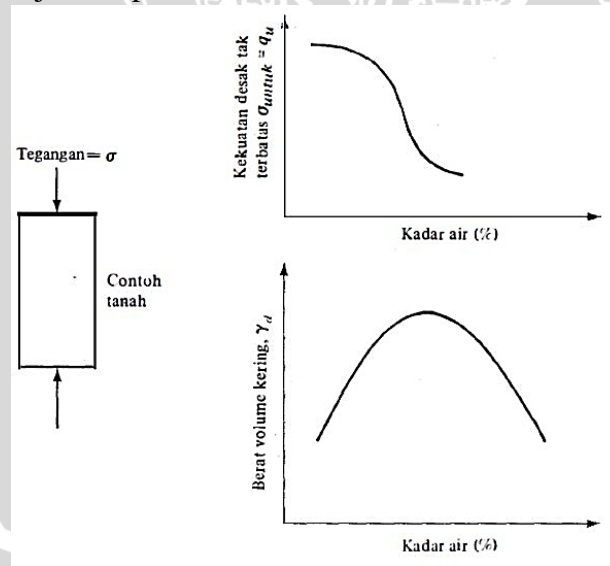
Pada tekanan rendah, suatu tanah yang dipadatkan pada sisi basah dari kadar air optimum akan lebih mudah memampat dibanding tanah yang dipadatkan pada kondisi kadar air minimum. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut ini.



Gambar 2.9 Pengaruh Pemadatan Pada Daya Rembes Tanah Lempung

Sumber : Lambe dalam DAS (1995:248)

Dengan bertambahnya kadar air, maka kekuatan tanah lempung yang dipadatkan pada umumnya akan mengalami penurunan. Hal ini dapat diperhatikan bahwa pada kadar air optimum, terjadi penurunan kekuatan tanah yang besar. Hal ini membuktikan bahwa pada dua contoh tanah yang dipadatkan pada berat volume kering yang sama, contoh pertama dipadatkan pada sisi kering dan contoh lainnya dipadatkan pada sisi basah dari kadar air optimum (yang memiliki struktur terfokulasi), maka akan memiliki kekuatan yang lebih besar seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.10** berikut ini :



Gambar 2.10 Pengaruh Pemadatan Pada Kekuatan Tanah Lempung

Sumber : Das (1995:294)

2.3. Daya Dukung Tanah

Hardiyatmo (2011) menyatakan bahwa daya dukung tanah (bearing capacity) adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban pondasi dari struktur yang terletak di atasnya. Selain itu juga, kapasitas dukung menyatakan besar tahanan geser tanah untuk melawan penurunan akibat beban yang bekerja, yaitu tahanan geser yang dapat dikerahkan oleh tanah sepanjang bidang-bidang gesernya.

Konsep daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilakukan dengan menggunakan pemodelan pondasi bentuk persegi memanjang dengan lebar B yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat atau tanah yang kaku seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11a. Apabila beban terbagi rata q persatuan luas bekerja di atas model pondasi, maka pondasi akan mengalami penurunan. Apabila beban tersebut ditambah, penurunan pondasi yang terjadi pun akan semakin besar. Bila besar $q = q_u$ tercapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi ketika pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q . Dalam kondisi ini, q_u didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah tersebut.

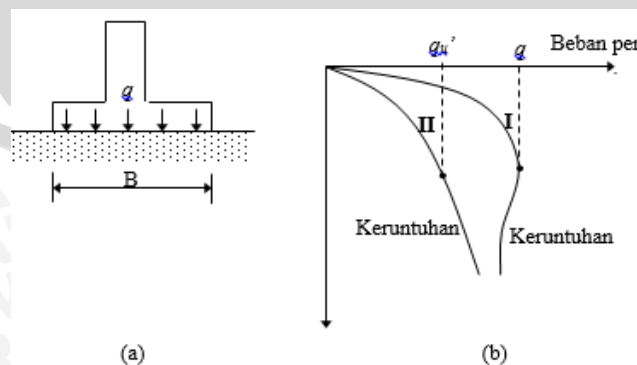
Sehingga dari keadaan tersebut dapat diperoleh grafik hubungan antara beban dan penurunan seperti pada Gambar 2.11b (Das, 1993:117). Sedangkan Hardiyatmo (2011) menyatakan bahwa kapasitas dukung ultimit (*ultimit bearing capacity*) (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka:

$$q_u = \frac{Pu}{A} \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

dimana : q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m^2)

Pu = beban ultimit (kN)

A = luas pondasi (m^2)



Gambar 2.11 Daya dukung batas tanah ; (a) Model Pondasi (b) Grafik hubungan beban dan penurunan

Sumber : Das (1993:117)

Daya dukung batas suatu tanah yang berada di bawah beban pondasi akan bergantung kepada kekuatan geser (*shear strength*). Nilai daya dukung tanah ijin untuk suatu rancangan pondasi ikut melibatkan faktor karakteristik kekuatan dan deformasi. Daya dukung ijin tergantung pada nilai Faktor Keamanan (SF) yang dipilih. Pada umumnya nilai SF yang dipilih adalah 3, sehingga nilai daya dukung yang diijinkan adalah sebagai berikut:

$$q_a = \frac{q_{ult}}{SF} \dots\dots\dots (2-3)$$

Dimana : q_u = daya dukung batas

SF = faktor keamanan (nilai sekitar 2 sampai 5)

Menurut Terzaghi (1943), kapasitas daya dukung tanah dibagi menurut beberapa jenis pondasi seperti terlihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kapasitas Daya Dukung Tanah berbagai Jenis Pondasi Menurut Terzaghi

Jenis Pondasi	Kapasitas Daya Dukung
Menerus	$q_u = c. N_c + q. N_q + \frac{1}{2}. \gamma. B. N_\gamma$
Segi Empat	$q_u = 1,3.c. N_c + q. N_q + 0,4. \gamma. B. N_\gamma$
Lingkar	$q_u = 1,3. c. N_c + q. N_q + 0,3. \gamma. B. N_\gamma$

Keterangan : q_u = daya dukung batas

c = kohesi tanah

B = lebar pondasi (= diameter untuk pondasi lingkaran)

γ = berat isi tanah

$N_c; N_q; N_\gamma$ = faktor daya dukung yang bergantung pada sudut geser dalam tanah (ϕ)

Menurut Bowles (1986), daya dukung tanah untuk pondasi dangkal bergantung dari kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Apabila kadar air tanah (w) meningkat maka nilai kohesi tanah (c) dan sudut geser dalam (ϕ) akan menurun. Dengan demikian kekuatan tanah juga akan menurun. Nilai kohesi dan sudut geser dalam akan meningkat apabila dalam kondisi kering atau kondisi kadar air tanah tidak berpengaruh pada pondasi.

Hubungan kuat geser dengan variasi kadar air dan persentase stabilisasi telah dijelaskan Firdaus (2016) kadar air pada tanah lempung ekspansif dengan campuran 10% kapur berpengaruh terhadap kuat geser tanah. Semakin kecil kadar air grafik tegangan-regangan tanah akan semakin kaku dan kohesi (c_u) semakin besar. Sedangkan semakin besar rasio volume stabilisasi, nilai kohesi akan semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah kondisi asli dan remolded (tanpa perbaikan).

Berdasarkan hasil pemodelan, Vesic (1963) sebagaimana yang dikutip Hardiyatmo (2011) menyatakan bahwa, pembagian mekanisme keruntuhan pondasi terbagi menjadi 3 jenis, yaitu :

1. Keruntuhan geser umum (*general shear failure*),

Keruntuhan geser umum terjadi sesuai dengan bidang runtuh dimana dapat diidentifikasi dengan jelas yaitu terjadi pengembangan tanah di sekitar pondasi. Bidang runtuh yang terbentuk dapat berupa lengkung dan garis lurus yang berkembang hingga permukaan tanah. Saat keruntuhan, terjadi gerakan massa tanah ke arah luar dan ke atas. Keruntuhan ini terjadi dalam waktu relatif mendadak dan diikuti dengan penggulingan pondasi (Gambar 2.12a).

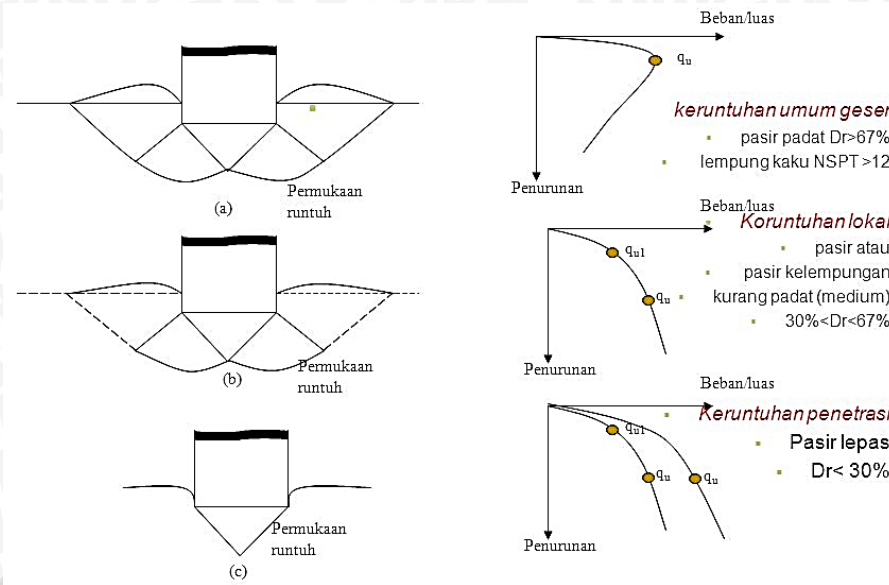
2. Keruntuhan geser lokal (*local shear failure*)

Keruntuhan geser lokal hampir sama dengan keruntuhan geser umum, namun bidang runtuh yang terbentuk tidak sampai ke permukaan tanah. Seiring dengan penambahan beban yang diberikan, pondasi akan tenggelam pada kedalaman relatif dalam, yang menyebabkan tanah di dekatnya mampat. Tetapi kemampuan tanah tidak sampai mengakibatkan kedudukan kritis keruntuhan tanah, sehingga zona plastis tidak berkembang seperti yang terjadi pada keruntuhan geser umum. Hal yang nampak dari keruntuhan ini terjadi sedikit pengembangan tanah di sekitar pondasi, namun tidak sampai terjadi penggulingan pondasi (Gambar 2.12b).

3. Keruntuhan penetrasi (*penetration failure atau punching shear failure*).

Keruntuhan penetrasi dapat dikatakan keruntuhan geser tanah tidak terjadi. Akibat beban yang bekerja hanya pada tanah lunak, pondasi hanya menembus dan menekan tanah ke samping yang menyebabkan pemampatan tanah di dekat pondasi. Penurunan pondasi bertambah hampir secara linier dengan penambahan beban, namun tidak mengakibatkan gerakan arah lateral yang menuju kedudukan kritis keruntuhan tanah, sehingga kuat geser ultimit tanah tidak dapat berkembang. Dan pada saat terjadi keruntuhan, bidang runtuh tidak terlihat sama sekali (Gambar 2.12c).

Apabila tanah tidak mudah mampat dan memiliki kuat geser tinggi, maka keruntuhan geser umum akan terjadi. Tipe keruntuhan penetrasi biasanya terjadi pada jenis tanah yang mudah mampat, seperti pasir tidak padat dan lempung lunak, dan juga banyak terjadi jika kedalaman pondasi (D_f) sangat besar bila dibandingkan dengan lebarnya (B). Namun, model keruntuhan pondasi hanya akan terjadi pada tipe pondasi tertentu tergantung dari banyak faktor yang mempengaruhi.

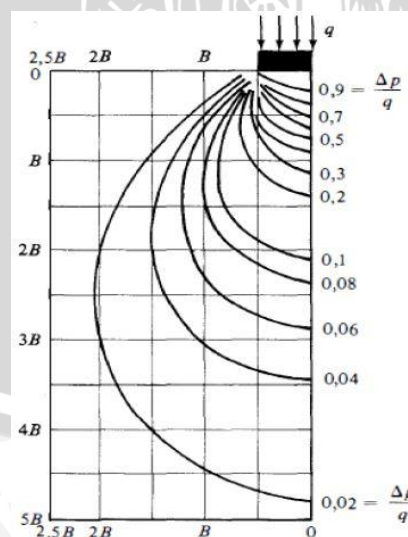


Gambar 2.12. Macam keruntuhan Pondasi;

(a) Keruntuhan Geser Umum; (b) Keruntuhan Geser Local; (c) Keruntuhan Penetrasi

Sumber : Vesic (1963) dalam Hardiyatmo (2011)

Kenaikan tegangan pada umumnya terjadi pada tanah yang mendukung pondasi dengan berbagai bentuk. Kenaikan tegangan pada tanah tersebut tergantung pada beban persatuan luas dimana pondasi berada, kedalaman tanah dibawah pondasi dimana tegangan tersebut ditinjau, dan factor-faktor lainnya. Bussinesq (1883) telah memecahkan masalah bagaimana cara untuk menghitung penambahan tegangan vertical tanah dibawah beban lentur berbentuk bujur sangkar, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Isobar tegangan Vertikal dibawah luasan berbentuk bujur sangkar yang menerima beban merata ,

Sumber : Das (1995:165)

2.4. Stabilisasi Tanah

Sifat masing masing tanah dilapangan tidak selalu sesuai dengan harapan didalam merencanakan suatu kontruksi. Maka dari itu , apabila menjumpai tanah yang sifat sifatnya sangat jelek, tanah tersebut harus distabilisasi sehingga nantinya akan dapat memenuhi syarat-syarat teknis yang diperlukan dalam merencanakan suatu kontruksi. Dalam pengertian yang luas pengertian mengenai stabilisasi tanah adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu, guna memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, atau stabilisasi tanah juga dapat diartikan sebagai usaha untuk merubah atau memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar dapat memenuhi syarat teknis tertentu .

Stabilisasi tanah dapat berupa menambah kepadatan tanah, menambah material yang tidak aktif sehingga mempertinggi kohesi atau tahanan geser yang timbul, menambah material agar dapat terjadi perubahan-perubahan alami dan kimiawi material tanah, merendahkan permukaan air tanah (*drainase*), dan mengganti tanah-tanah yang buruk. (Soedarmono & Purnomo, 1993:101)

Stabilisasi tanah dapat terdiri dari salah satu atau gabungan pekerjaan-pekerjaan sebagai berikut:

1. Stabilisasi Mekanis

Stabilisasi mekanis ini dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai macam peralatan mekanis, seperti:

- a. Mesin gilas (*roller*)
- b. Benda-benda berat yang dijatuhkan (*pounder*)
- c. Peledakan dengan alat peledak (*eksplosive*)
- d. Tekanan statis



Gambar 2.14 Macam-Macam Alat Stabilisasi Mekanis
Sumber : www.cat.com/en_US/products/.../equipment.html

2. Bahan pencampur/tambahan (*additive*)

Bahan bahan tambah (*additive*) adalah bahan hasil olahan pabrik yang apabila ditambahkan ke dalam tanah dengan perbandingan yang tepat, akan menghasilkan perbaikan pada sifat sifat teknis tanah tersebut, seperti menambah kekuatan,tekstur,kemudahan dalam pengerjaan(*workability*), dan plastisitas. Stabilisasi ini dapat dilakukan dengan cara-cara berikut :

- a. Kerikil untuk kohesif (lempung)
- b. Lempung untuk tanah berbutir kasar
- c. Pencampur kimiawi

Pada penelitian kali ini, stabilisasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan zat aditif kapur dimana zat aditif tersebut diharapkan mampu meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif di daerah Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

Tabel 2.7. Macam- macam tanah dan metode stabilisasi yang cocok untuk stabilitas dan keawetan tanah dasar (*subgrade*)

Item	Macam Tanah	Metode Stabilisasi
Untuk tanah berlanau dan berlempung. Termasuk reduksi <i>resilient</i> tanah elastis pada tanah antara lanau dan lempung (juga tanah micaceous). Pencegahan erosi tanah terkait masalah <i>pumping</i> (pemompaan) pada perkerasan beton.	Tanah sangat berlanau	Pemadatan tanah-semen, semen memodifikasi tanah, stabilitas mekanis dengan atau tanpa emen, tanah-kapur jika reaksinya seperti yang dikehndaki
	Tanah berlempung pastisitas rendah. Lempung plastisitas Tinggi	Pemadatan tanah-kapur, dan kapur memodifikasi tanah atau kombinasi semen dan kapur. Pembungkus aspal
Kontrol perubahan volume (termasuk kembang-susut; juga pemadatan akibat beban lalu lintas)	Tanah - tanah berlempung plastisitas rendah	Mengontrol kadar air dan kepadatan agar menghasilkan sedikit perubahan volume dari kondisi awal sampai akhir masa layanan. Dengan menggunakan tanah-semen, semenmemodifikasi tanah , taah - kapur , kapur memodifikasi tanah, atau campuran yang melibatkan keduanya. Perantara penahan air, jika efektif.
	Lempung plastisitas tinggi	Mengontrol kadar air dan kepadatan dalam porsi lebih rendah dari tanah-dasar ditambahi tanah-kapur atau kapur-memodifikasi tanah dengan tebal secukupnya; perlindungan dengan selimut aspal secukupnya.
Perbaikan Stabilitas	Granuler Kasar	Pemadatan tanah-aspal, tanah-semen, <i>cement-treated base</i> , semen memodifikasi tanah, stabilitas mekanis. Tanah-kapur atau kapur memodifikasi tanah, jika tanah mengandung bahan reaktif.
	Granuler halus	Pemadatan tanah-aspal, tanah -semen, semen memodifikasi tanah, stabilisasi mekanis, tanah-kapur atau kapur memodifikasi tanah jika tanah mengandung bahan halus yang reaktif , atau jika ditambakna <i>pozzolan</i> (misal abu terbang)

Sumber : Jhonson, 1965

2.4.1. Stabilisasi dengan kapur

Kapur adalah kalsium oksida (CaO) yang dibuat dari batuan karbonat yang dipanaskan pada suhu sangat tinggi. Kapur tersebut umumnya berasal dari batu kapur (limestone) atau dolomite (Hary Christady, 2010 : 84). Pencampuran tanah sampel dengan kapur (CaO) dilakukan untuk mengetahui peningkatan variable tanah dan perkuatan daya dukung tanah pada kondisi tanah yang sudah diperbaiki.

Bahan ini mudah didapat dipasaran dan diproduksi secara besar-besaran. Stabilisasi tanah dengan campuran kapur mampu merubah susunan/struktur tanah yaitu dengan membentuk butiran agregat yang berukuran lebih besar sehingga memberi pengaruh lebih baik. Kapur dapat menimbulkan pertukaran ion lemah sodium oleh kalsium yang berada pada permukaan tanah lempung, sehingga presentase partikel halus cenderung menjadi partikel yang lebih kasar (Pd T-10-2005-B).

Pada prinsipnya metode yang digunakan adalah dengan cara mencampur tanah lempung dengan kapur di lapangan menggunakan peralatan seperti disc harrow atau small ripper. Banyaknya bahan kapur yang digunakan untuk keperluan stabilisasi tanah ekspansif berkisar antara 2 – 10 % dari berat kering tanah lempung. Tata cara perencanaan sesuai SNI 03-3437 dan SNI 03-3439.

Ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan metode kontruksi dengan kapur sebagai stabilisator. Untuk lebih jelasnya akan disebutkan pada tabel berikut :

Tabel 2.8. Hal Hal Yang Perlu Dipertimbangkan Dalam Pemilihan Metode Kontruksi

Stabilisasi Dengan Kapur

Metode Kontruksi	Hal - Hal yang perlu dipertimbangkan
Stabilisasi Dengan Kapur	Presentasi kapur yang diberikan sebesar 2- 10% umumnya dapat digunakan
	Harus dilakukan pengujian awal terhadap tanah yang akan distabilisasi untuk menentukan reaksi kapur dan presentase kapur yang dibutuhkan
	Kedalam pencampuran terbatas antara 30-45 cm, tergantung pada peralatan pencampurnya.
	Kapur dapat digunakan dalam bentuk kering maupun encer (<i>slurry</i>), tetapi penambahan air harus tetap dilakukan
	Pengawasan kualitas sangat penting dilakukan selama pengemburan, pencampuran, dan pemadatan.
	Stabilisasi dengan kapur harus dilindungi dari air permukaan dan air tanah, karena air tersebut dapat mengeluarkan kapur dari dalam campuran sehingga tanah akan kehilangan kekuatan akibat jenuh air.

Sumber : Pd T-10-2005-B

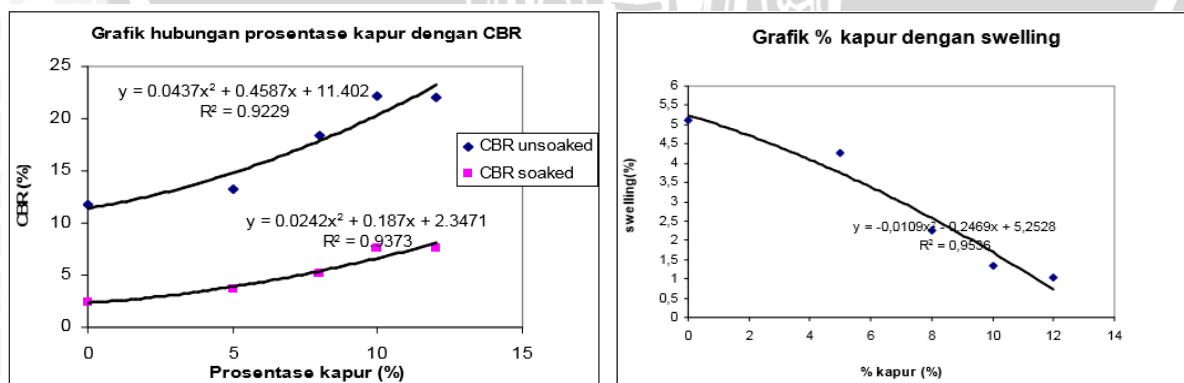
Penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah didasarkan pada sumber-sumber penelitian yang sudah dilakukan diantara lain:

1. Warsiti (2009) dengan judul “Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur”. Pada Penelitian tersebut digunakan kadar kapur sebesar 5%, 8%, 10%, dan 12% dengan waktu *curing* 3 hari. Hasil penelitian Warsiti menunjukkan bahwa penambahan kapur 10% dengan waktu *curing* 3 hari dapat meningkatkan CBR. Dalam kondisi *unsoaked* akan mengalami perbaikan dari 11,88% menjadi 22,1% pada persentase kapur 10%. Begitu pula hasil CBR dalam kondisi *soaked* mengalami peningkatan yang cukup besar, yaitu dari 2,45% menjadi 7,6% pada persentase kapur 10%. Hasil pengujian *swelling* menghasilkan penurunan dengan bertambahnya persentase kapur dengan kata lain semakin banyak persentase kapur semakin kecil *swelling* yang terjadi.

Tabel 2.9. Hasil Pengujian Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur

Jenis penelitian Kd air opt(%)	Prosentase kapur				
	0 %	5 %	8 %	10 %	12 %
Kpdt kering mak	24.0	21.6	19.8	17.10	19.2
CBR unsoaked (%)	1,49	1,580	1,62	1,65	1,64
CBR soaked (%)	11,8	13.3	18.4	22.1	22
Kd air opt (%)	2,45	3.6	5.1	7.6	7.58
Swell potensial (%)	5,13	4,25	2,25	1,331	1,025

Sumber: Warsiti (2009)



Gambar 2.15. Grafik Hubungan Persentase Kapur dengan CBR dan Swelling

Sumber: Warsiti (2009)

2.4.2. Stabilisasi tanah dalam dengan Metode Deep Soil Mixing (DSM)

Deep Soil Mixing (DSM) berguna untuk stabilisasi tanah pada lapisan dalam dan merupakan stabilisasi *in-situ* dimana pengikat basah atau kering dimasukkan ke dalam tanah dan dicampur dengan tanah lunak (lempung, gambut atau tanah organik) dengan cara mekanik atau dengan alat pencampur berupa bor atau *auger*. Pengikat tersebut bisa berupa bahan aditif seperti semen, kapur, campuran semen-kapur dan/atau bahan aditif lainnya. Limbah industri termasuk *slag* dan *ash* juga dapat digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan sifat-sifat tanah (Gregory, 2012; Porbaha et al, 2005; EuroSoilStab, 2002).

Mirja (2004) menyatakan, metode ini berguna untuk memperkecil penurunan dan/atau meningkatkan stabilitas dari tanah. Selain itu, DSM dapat berperan seperti *vertical drain* dan mempercepat proses penurunan (*settlement*). Untuk lebih jelas tentang bagaimana proses dari DSM dan hasil kolomnya dilapangan maka akan ditunjukkan pada Gambar 2.15



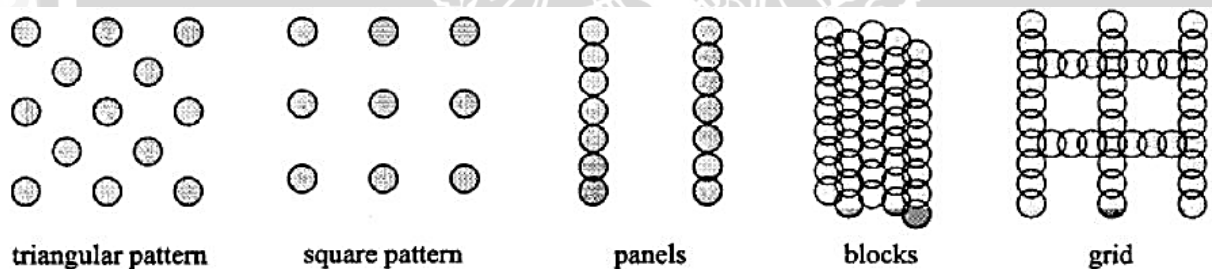
Gambar 2.16. Proses Deep Soil Mixing (DSM) dan hasil kolom DSM

Sumber : <http://blogs.gerbongartwork.com/Deep-Soil-Mixing>

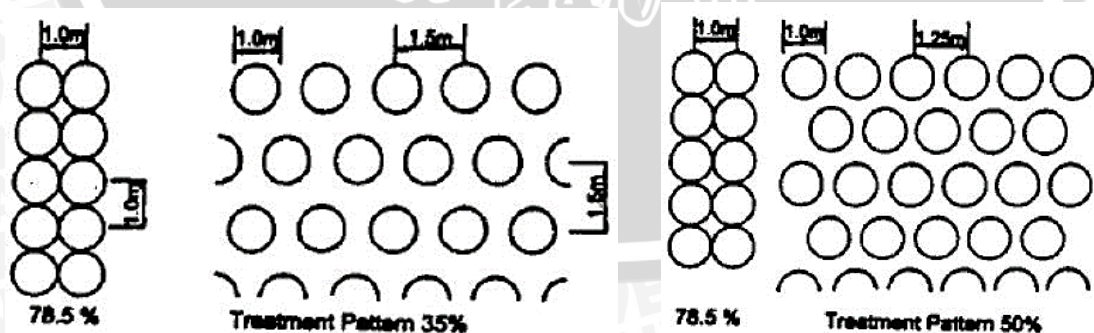
Annad et al, (2008) mengatakan bahwa, proses stabilisasi dapat dilakukan dengan 3 cara mekanis, yaitu *dry mixing*, *wet mixing*, atau *grouting*. *Dry mixing* digunakan untuk lokasi proyek dimana muka air tanah tinggi dan dekat dengan permukaan tanah. *Dry mixing* ini

dilakukan dengan cara memasukkan bahan additive ke dalam tanah dalam bentuk kering. *Wet mixing* digunakan untuk lingkungan yang kering dan gersang atau lokasi dengan muka air tanah yang dalam. *Wet mixing* ini dilakukan dengan cara memasukkan bahan aditif ke dalam tanah dalam bentuk cair (*slurry*) dimana sebelumnya bahan aditif dicampur terlebih dahulu dengan air. *Grouting* dengan atau tanpa jet hidrolis tekanan tinggi telah digunakan untuk memperkuat tanah, membantu proses penggalian, dan mengontrol muka air tanah dalam kegiatan konstruksi.

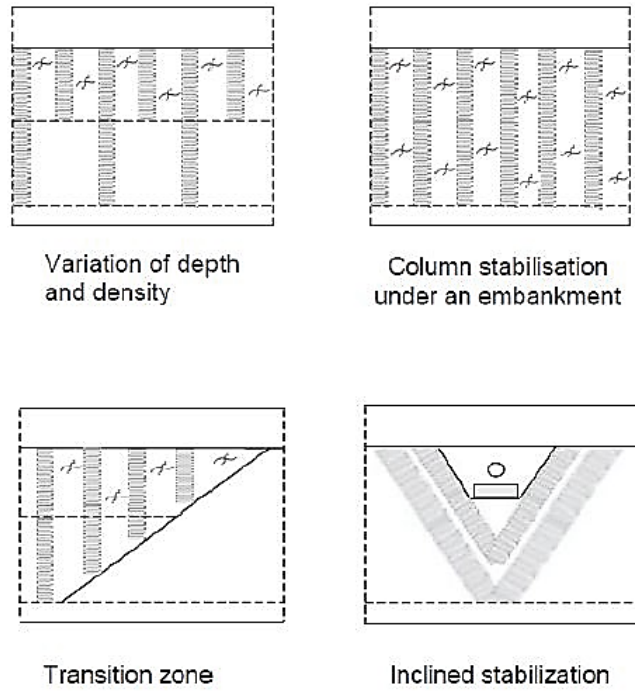
Dalam metode pelaksanaan Deep Soil Mixing (DSM) terdapat beberapa pola yang sering diterapkan. Pola pola tersebut diantaranya *pola triangular pattern*, *pola square*, *pola pattern*, *pola panels*, *pola blocks*, dan *pola grid*. Konfigurasi single column dengan pola persegi, digunakan untuk mengurangi penurunan dibawah timbunan. Sedangkan konfigurasi panels, grids, atau blocks biasanya digunakan untuk banunan dengan dimensi yang besar, seperti lereng, galian, dam/bendungan, dinding penahan tanah, dan dan dibawah timbunan. Untuk gambar macam macam pola deep soil mix ini dapat dilihat pada Gambar 2.17, Gambar 2.18, dan Gambar 2.19 dibawah ini :



Gambar 2.17 Konfigurasi Kolom DSM
Sumber: Mirja (2004:12)



Gambar 2.18 Variasi konfigurasi dan jarak kolom DSM
Sumber : Bruce (2009)



Gambar 2.19 Contoh Penempatan Kolom
Sumber : EuroSoilTab (2002 : 10)

Adapaun tujuan dari metode Deep Soil Mixing (DSM) sebagai alternative stabilisasi adalah sebagai berikut :

- ❖ Meningkatkan daya dukung tanah lunak
- ❖ Mengurangi penurunan tanah
- ❖ Mencegah kegagalan geser pada lereng dan timbunan
- ❖ Melindungi struktur di sekitar lokasi penggalian
- ❖ Mencegah deformasi geser
- ❖ Memperbaiki tanah yang tercemar

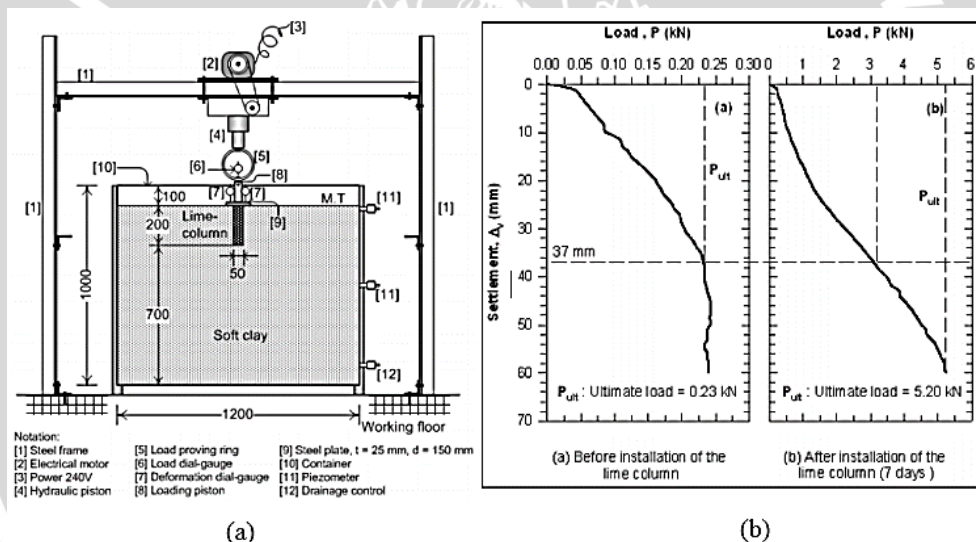
Menurut EuroSoilStab (2002:11) metode Deep Soil Mixing (DSM) ini memiliki keuntungan dibandingkan dengan metode stabilisasi tanah lainnya, yaitu

- ❖ Ekonomis
- ❖ Fleksibilitas
- ❖ Menghemat bahan dan energi
- ❖ Cepat dalam pelaksanaan
- ❖ Dapat dengan mudah terhubung dengan struktur lainnya dan di sekitarnya (tidak ada perbedaan penurunan yang merugikan)
- ❖ Meningkatkan sifat mekanis tanah.

Ada beberapa penelitian *Deep Soil Mixing* (DSM) yang pernah dilakukan sebelumnya, diantaranya:

1. Pada tahun 2010 Agus Setyo M. telah melakukan penelitian mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak Bantul-Yogyakarta di laboratorium menggunakan *load test*. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Dalam penelitian Setyo M. (2010) kolom kapur yang digunakan merupakan kolom tunggal dengan diameter 50 mm dengan kedalaman 200 mm dan diletakkan dalam kotak baja berukuran 1,2 m x 1,2 m dan tinggi 1 m.

Hasil dari penelitian tersebut yaitu seiring dengan penambahan kadar kapur, daya dukung tanah meningkat sebesar 0,23 kN tanpa menggunakan kolom kapur menjadi 5,2 kN dengan kolom kapur. Berikut ini adalah gambar skema pengujian dengan *load test* dan grafik beban-penurunan tanah:



Gambar 2.20.(a) Skema Uji Pembebanan dan (b) Grafik Beban dan Penurunan Tanah
Sumber: Muntohar (2010)

2.4.3. Uji Laboratorium Metode Deep Soil Mixing (DSM)

Ada beberapa faktor yang dinilai dapat mempengaruhi kinerja dari kolom DSM itu sendiri. Annad et al. (2008) mengatakan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi tersebut, diantaranya : karakteristik dan kondisi tanah, karakteristik zat aditif, cara pencampuran, dan waktu *curing*.

Pada penelitian akhir-akhir ini, pengaruh dari beberapa faktor, termasuk tipe dan kadar zat aditif yang digunakan, rasio campuran air serta lamanya *curing* dalam stabilisasi tanah lempung ekspansif sudah mulai dilakukan di dalam laboratorium dan disimulasikan seperti

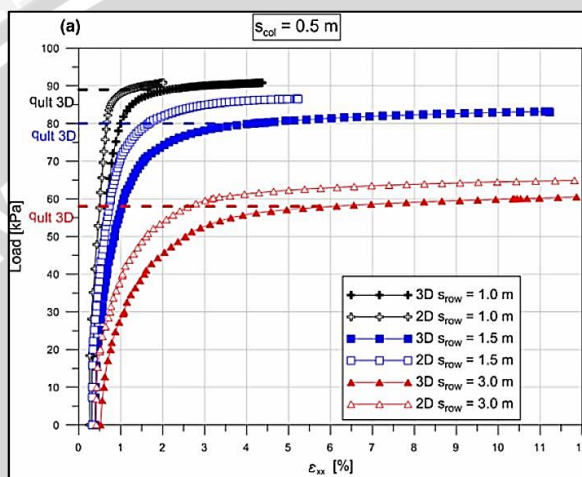
di lapangan. Bahkan sudah ada beberapa instansi melakukan penelitian mengenai metode ini dalam skala laboratorium. Ada beberapa metode untuk mempersiapkan benda uji pada metode DSM. Tidak ada prosedur standar yang harus dilakukan pada pengujian laboratorium. Namun, beberapa penelitian yang pernah dilakukan sehingga diharapkan dapat menjadi referensi dalam menyiapkan benda uji DSM, diantaranya adalah seperti yang dijelaskan oleh (Annand J. Puppala, Ph.D, P.E, dkk, 2007) pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10. Penjelasan Standart Laboratorium Yang Ada Untuk Persiapan Smapel dan Simulasi Pengujian Metode Deep Soil Mixing

Preparation standards	Field sampling and storage	Sample preparation molds	Type of soil mixer	Sample preparation procedure	Curing conditions
Japanese Geotechnical Society, JGS 0821-2000, Section 7.2	Thin walled sampling, store the specimens at original water content	The standard size of the mold is defined to create a specimen with a 5 cm diameter and 10 cm height.	Domestic dough mixer with 5,000 to 30,000 cm ³ mixing bowl and hook type paddle, capable of 120 to 300 rpm planetary motion (Fig. 2.11)	Mixing duration: 10 minutes with occasional hand mixing, compacted in 3 lifts with poking using a 5 mm metal rod and light tamping to exclude air voids	The sample ends are properly sealed with specified sealant and stored at 20±3°C for the specified time at 95% relative humidity
EuroSoilStab, CT97.0351, (Project No. BE 96-3177)	Tube, piston or Delft samplers, stored at in situ conditions	Plastic tubes or plastic coated cardboard, 5 cm diameter and 10 cm height coated with oil or wax on the inner side	Dough mixer or kitchen mixer with sufficient capacity and rpm for all soil types	Mixing duration: 5 minutes and is a variable depending on the soil type. Circular steel stamp 10 mm thick and 45 mm diameter, attached to a 30 mm long rod. Static load of 100 kPa may be used for 2 seconds on each layer	No mention of humidity, store samples at a constant temperature of 18-22 °C in properly sealed conditions
Al-Tabba et al. (1999) and Shen et al. (2003)	N/A	50, 100 and 150 mm diameter soil mixed columns are prepared in test pits with same principle as the DSM column installing machine in field	Sensor controlled speed and rpm of the augers. The equipment mainly consists of shury injection part, a mixing device and a controlling panel pressure control (Fig. 2.12)	Control panel operated and is dependant on soil type. Injection pressure can be adjusted from several kPa to several hundred kPa. Consolidation pressure can be simulated through air pressure	Cured at room temperature for a specific curing period
Jacobson et al (2002), Virginia Tech and VDOT, United States	Bulk samples with minimized exposure to air and stored at 100% Relative humidity at 20°C	50 mm diameter and 100 mm tall one time use plastic molds which can be easily tearable during sample extraction.	Kitchen Aid dough mixer with dough hook. Outer spindle rotating at 155 rpm and inner spindle at 68 rpm to mix sufficient sample to form a batch of eight samples	Mixing duration of 5 minutes with intermittent hand mixing, 25 mm (1 inch) thick lifts in molds, poking with 5 mm brass rods evenly 25 times. 100 LPa pressure for 5-10 seconds using a 45 mm aluminum piston.	Cured at 100% relative humidity and 20±3 °C for 7, 14, 28 and 56 days

Sumber : Annand et al (2008:32-33)

Studi laboratorium mengenai metode ini tidak hanya berbentuk kolom tunggal saja. Razvan Ignat (2015) telah melakukan studi pada bentuk konfigurasi kolom dengan menggunakan variasi jarak sebagai pembandingnya, dalam penelitiannya mengenai analisis dua dimensi dan tiga dimensi dengan variasi jarak kolom stabilisasi pada konfigurasi *wall*, Razvan mendapatkan hasil bahwa pada analisis dua dimensi maupun tiga dimensi dapat memberikan pengaruh yang sama terhadap peningkatan daya dukung tanah untuk variasi jarak (S_{row}) yang paling rapat. Untuk lebih jelasnya, bisa dilihat pada grafik Gambar 2.21. berikut :

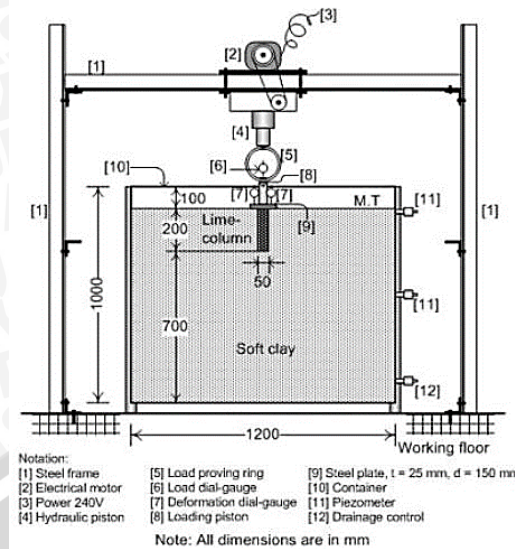


Gambar 2.21 Hubungan daya dukung dengan regangan (Razvan ,2015)

2.5. Uji Pembebanan (Load Test)

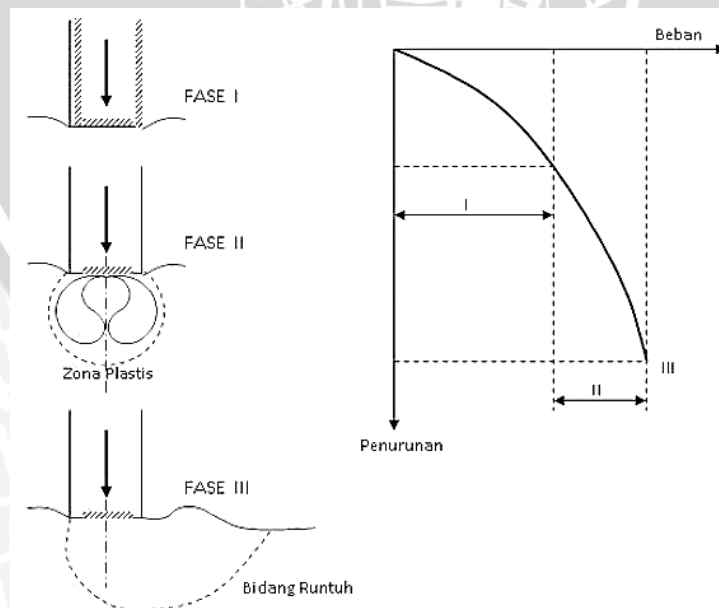
Uji pembebanan dilakukan untuk mengetahui atau menyelidiki sifat dan perilaku dari suatu benda uji. Pada dasarnya metode uji pembebanan harus dilakukan sedemikian rupa sehingga pembebanan yang dilakukan setara dengan pembebanan yang ada di lapangan. Namun tidak semua permasalahan di lapangan bisa dilakukan di laboratorium. Maka dari itu uji pembebanan dilakukan dengan melihat secara khusus faktor utama parameter perilaku benda uji yang akan diselidiki.

Pemodelan dengan menggunakan beban pondasi kaku memberikan kemudahan tersendiri dalam pelaksanaan uji pembebanan di laboratorium. Dalam penelitian terdahulu (Muntohar, 2009) menggunakan beban pelat pondasi pada simulasi pembebanan untuk studi laboratorium terhadap stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan pencampur (additive) berupa kapur pada metode kolom kapur. Berikut adalah gambaran penggunaan pondasi pada uji pembebanan ini yang dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 Skema Uji Pembebanan di Laboratorium (Muntohar, 2009)

Dari uji pembebanan ini menghasilkan suatu gambar grafik hubungan antara beban dengan penurunan. Pada awal pembebanan, penurunan yang terjadi sebanding dengan beban yang diberikan. Jika digambarkan, maka kondisi itu akan membentuk garis linier antara beban dengan penurunan. Apabila beban terus bertambah maka menyebabkan penurunan plastis pada tanah dan daya dukung terus berkembang. Jika beban terus ditambah maka kondisi penurunan plastis tidak akan kembali pada keadaan elastis sehingga akan menyebabkan penurunan di mana kondisi ini menyebabkan keruntuhan pada tanah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Skema gambar hubungan antara beban dengan penurunan ini disajikan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Hubungan Beban Dengan Penurunan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini mulai dilaksanakan dari bulan Februari – Juni 2016. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Universitas Brawijaya.

3.2 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut :

1. Tanah lempung ekspansif yang berasal dari Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Kapur yang diperoleh dari toko bangunan di Malang.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Kotak (*box*) berbentuk kubus yang terbuat dari *fiberglass* dengan dimensi (30x30x30) cm dan ketebalan 5 mm. *Box* dibuat cukup kaku supaya dapat menahan regangan bidang dan bila perlu diperkuat menggunakan profil siku 30.30.3 pada ujung-ujung sisinya. Penggunaan *fiberglass* dipilih agar perilaku benda uji dapat diamati saat pelaksanaan.
2. Pipa besi berdiameter 3 cm yang digunakan untuk kolom DSM.
3. Bak pencampur
4. Saringan No. 4
5. *Ring Density*
6. Gelas ukur
7. Timbangan digital
8. Mold dan Proctor sesuai metode B ASTM D-698; AASHTO T-99
9. Alat pemadat untuk sampel tanah dasar yang berbentuk persegi (12,5 x 12,5) cm dengan berat 9,56 kg
10. Alat pemadat untuk kolom *Deep Soil Mixing* berbentuk silinder pejal diameter 3 cm.
11. Palu
12. Penggaris

13. Waterpass
14. Plastik kresek
15. Karung goni
16. Satu set alat uji beban yang terdiri dari fame pembebanan, dongkrak hidrolik, *load cell*, *dial lvdt*, piston, pelat baja ukuran 5 cm x 5 cm dan tebal 2 cm.

3.4. Rancangan Penelitian

Dua jenis benda uji digunakan dalam penelitian ini, yaitu benda uji berupa tanah asli dan tanah yang telah distabilisasi menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan campuran 10% kapur. Tanah asli yang telah melalui tahap pemadatan akan dilakukan uji pembebanan terlebih dahulu kemudian uji pembebanan pada tanah yang telah distabilisasi. Dari uji yang dilakukan, diperoleh nilai daya dukung tanah (q_u) sebelum dan sesudah pencampuran kapur dengan variasi jarak dan panjang kolom. Rancangan penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian dengan Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (D_f)	P_u	q_u
	cm	cm	kg	kN/m ²
Tanah Asli	-	-	x	y
	L = 1 x D	Df = 2 x B	x	y
		Df = 3 x B	x	y
		Df = 4 x B	x	y
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	L = 1,25 x D	Df = 2 x B	x	y
		Df = 3 x B	x	y
		Df = 4 x B	x	y
	L = 1,5 x D	Df = 2 x B	x	y
Df = 3x B		x	y	
Df = 4 x B		x	y	

3.5. Variabel Penelitian

Terdapat dua variabel dalam penelitian ini, antara lain :

1. Variabel Bebas
 - Konfigurasi
 - Diameter
 - Kedalaman

- Jarak
- 2. Variabel Terikat
 - Tegangan
 - Penurunan/regangan.

3.6. Metode Penelitian

3.6.1. Persiapan Benda Uji

Berikut adalah tahapan persiapan benda uji. Adapun persiapan benda uji meliputi kegiatan sebagai berikut:

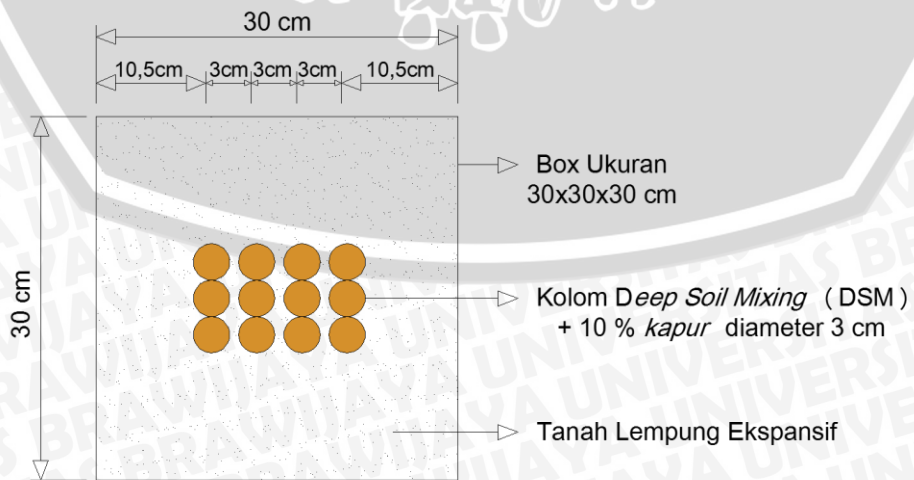
1. Sampel tanah dijemur atau dioven hingga sampel tanah cukup kering.
2. Sampel tanah diayak lolos saringan No. 4.
3. Sampel tanah yang lolos saringan No. 4, kemudian ditambahkan air dengan kadar air optimum (OMC) 27,908% yang digunakan sebagai tanah dasar atau asli. Pencampuran dilakukan hingga merata pada seluruh bagian kemudian sampel dijenuhkan di dalam kresek selama sehari sehingga homogen.
4. Pembuatan benda uji dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi dan tanah yang distabilisasi menggunakan kapur 10% dengan metode *Deep Soil Mixing*.
5. Tanah dasar atau asli dicetak di dalam *box* yang telah ditentukan hingga volumenya mencapai 18000 cm^3 atau $(30 \times 30 \times 20) \text{ cm}$. Sampel dibagi menjadi 4 lapisan, dimana setiap lapisan harus mencapai kepadatan kering (γ_d) $1,288 \text{ gr/cm}^3$ dengan OMC 27,9%. Agar tercapai kepadatan yang diharapkan, setiap lapis harus dikontrol dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
6. Setelah pembuatan benda uji tanah asli selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan.
7. Selanjutnya, langkah 5 diulangi yang kemudian dilakukan pembuatan lubang kolom *Deep Soil Mixing* sesuai dengan variasi jarak dan panjang kolom yang telah ditentukan dengan bantuan pipa besi. Variasi jarak dan panjang kolom ini ditentukan berdasarkan pada daerah tanah yang terkena pengaruh tegangan vertikal di bawah suatu luasan berbentuk bujur sangkar yang menerima beban merata.

8. Tanah dicampur dengan kadar kapur 10% dari berat kering tanah yang distabilisasi. Kemudian dicampur dengan kadar air optimum (OMC) 25,824%. Pencampuran dilakukan di luar *box* hingga rata (homogen).
9. Sampel tanah yang sudah dicampur 10% kapur, dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan jarak dan panjangnya (lihat Tabel 3.1). Proses instalasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :
 - a. Pipa besi dikeluarkan dari tanah sehingga diperoleh lubang kolom.
 - b. Tanah campuran kapur dimasukkan ke dalam lubang dengan membagi beberapa lapisan, dimana untuk panjang kolom (D_f) 5 cm dibagi menjadi 3 lapisan, (D_f) 10 cm dibagi menjadi 5 lapisan, dan (D_f) 15 cm dibagi menjadi 8 lapisan.
 - c. Tiap lapisan dipadatkan dengan kepadatan kering (γ_d) 1,488 gr/cm³ dengan OMC 25,824%. Agar tercapai kepadatan yang diinginkan, setiap lapis harus dikontrol dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
10. Kemudian benda uji dieramkan selama 3 hari.
11. Setelah pemeraman selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan panjang pada konfigurasi kolom DSM yang digunakan (Tabel 3.2). Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap perilaku daya dukung (q_u) tanah. Konfigurasi kolom DSM yang digunakan yaitu tipe *panels* berdiameter (D) 3 cm.

Tabel 3.2 Variasi Jarak dan Panjang Tipe *Panels* Berdiameter 3 cm

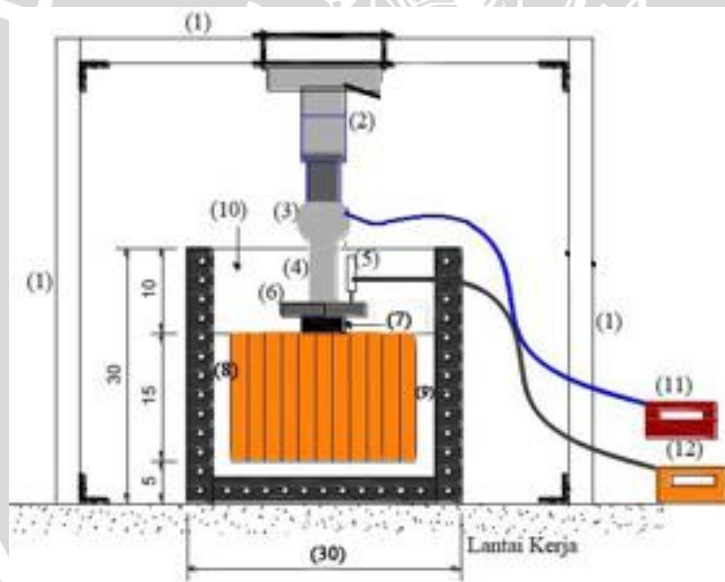
Lebar Pondasi (B) = 5 cm	Diameter Kolom (D) = 3 cm			
	Jarak Kolom (L) 1D = 3 cm	Jarak Kolom (L) 1D = 3,75 cm	Jarak Kolom (L) 1D = 4,5 cm	
Kedalaman sampel tanah (h) = 20cm	Konfigurasi Tipe Panels			
	Panjang (Df) = 2B			
	Panjang (Df) = 3B			
	Panjang (Df) = 4B			



3.6.2. Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan dongkrak hidrolis. Sebagai pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton dan dapat langsung dibaca besarnya beban yang terjadi. Digunakan alat *LVDT* untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi.

Dongkrak hidrolis dihubungkan ke piston yang terhubung dengan batang portal (*frame*) yang terbuat dari baja profil. Secara manual dongkrak hidrolis dilakukan pemompaan yang memberikan tekanan pada piston yang kemudian tekanan dari piston disalurkan melalui *load cell* agar terbaca beban yang diberikan. Kemudian *load cell* dihubungkan ke piston bantuan yang akan menekan ke pelat pondasi. Pelat baja tersebut berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari piston dongkrak hidrolis menjadi beban merata. Letak piston bantuan diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat simetris di atas permukaan benda uji. Skema uji pembebanan disajikan pada Gambar 3.1.



Keterangan :

- | | | |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. Portal baja | 5. Lvdt | 9. Tanah dasar/asli |
| 2. Piston hidrolis | 6. Pelat silinder | 10. Box ukuran 50x50x30 cm |
| 3. <i>Load cell</i> | 7. Pelat baja (5x5x2) cm | 11. Alat pembaca <i>load cell</i> |
| 4. Piston besi | 8. Kolom stabilisasi DSM | 12. Alat pembaca lvdt |

Gambar 3.1 Skema uji pembebanan sampel

Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli yang belum distabilisasi menggunakan kapur. Hal ini dilakukan guna untuk mengetahui daya dukung tanah asli yang nantinya akan dibandingkan dengan tanah yang telah distabilisasi dengan metode DSM. Pengujian pembeban selanjutnya dilakukan terhadap 9 sampel yang berbeda yaitu sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini, diharapkan akan memberikan perilaku daya dukung tanah dari seluruh benda uji. Sehingga diperoleh jarak dan panjang optimum kolom stabilisasi kapur yang menyumbangkan daya dukung terbesar.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan model benda uji.
2. Melakukan pengukuran terhadap titik tengah permukaan tanah dengan bantuan penggaris dan tali.
3. Melakukan perataan permukaan tanah untuk peletakan pelat pondasi dengan bantuan *waterpass* sebagai pengontrol kerataan permukaan tanah.
4. Meletakkan pelat baja ukuran 5 x 5 cm pada titik tengah permukaan tanah.
5. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan seperti pada Gambar 3.1.
6. Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolik.
7. Pembebanan dilakukan dengan menetapkan keseragaman penurunan 50 digit pada pembacaan LVDT. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan beban pada *load cell* menunjukkan beban tiga kali sama berturut-turut pada penurunan yang terus berlanjut.
8. Mencatat beban dan penurunan yang terjadi (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Pembacaan Beban dan Penurunan Uji Beban (*Load Test*)

Pembacaan LVDT	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) m ²	Daya Dukung (q) kN/m
A	$S = A \times 0,005$	P	A	$Q = P/A$
0	-	-	0,0025	-
50	-	-	0,0025	-
100	-	-	0,0025	-
150	-	-	0,0025	-
200	-	-	0,0025	-
250	-	-	0,0025	-

3.7. Metode Analisa Data

Data yang telah dicatat dari hasil pembacaan uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah dibuat dengan bantuan *Software Microsoft Excel*.

Perhitungan daya dukung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$qu = Pu/A \dots\dots\dots (3-1)$$

- dimana, qu : daya dukung (kg/cm²)
- Pu : Beban *ultimit* yang diterima (kg)
- A : luas bidang yang menerima gaya ($A = 25 \text{ cm}^2$)

Data tersebut akan diolah untuk memperoleh besarnya daya dukung beserta penurunan yang terjadi yang kemudian akan dibuat grafik daya dukung untuk tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 10% kapur menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang dibandingkan dengan daya dukung tanah asli.

Pengolahan data selanjutnya adalah menganalisis perbandingan daya dukung tanah asli dengan tanah yang sudah distabilisasi dengan analisis BCI (*Bearing Capacity Improvement*). Perhitungan BCI dilakukan dengan rumus sebagai berikut :

$$BCI = qu / q \dots\dots\dots (3-2)$$

- Dengan : BCI = rasio daya dukung tanah yang distabilisasi terhadap daya dukung tanah tanpa stabilisasi
- qu = daya dukung tanah yang distabilisasi (kg/cm²)
- q = daya dukung tanah tanpa stabilisasi (kg/cm²)

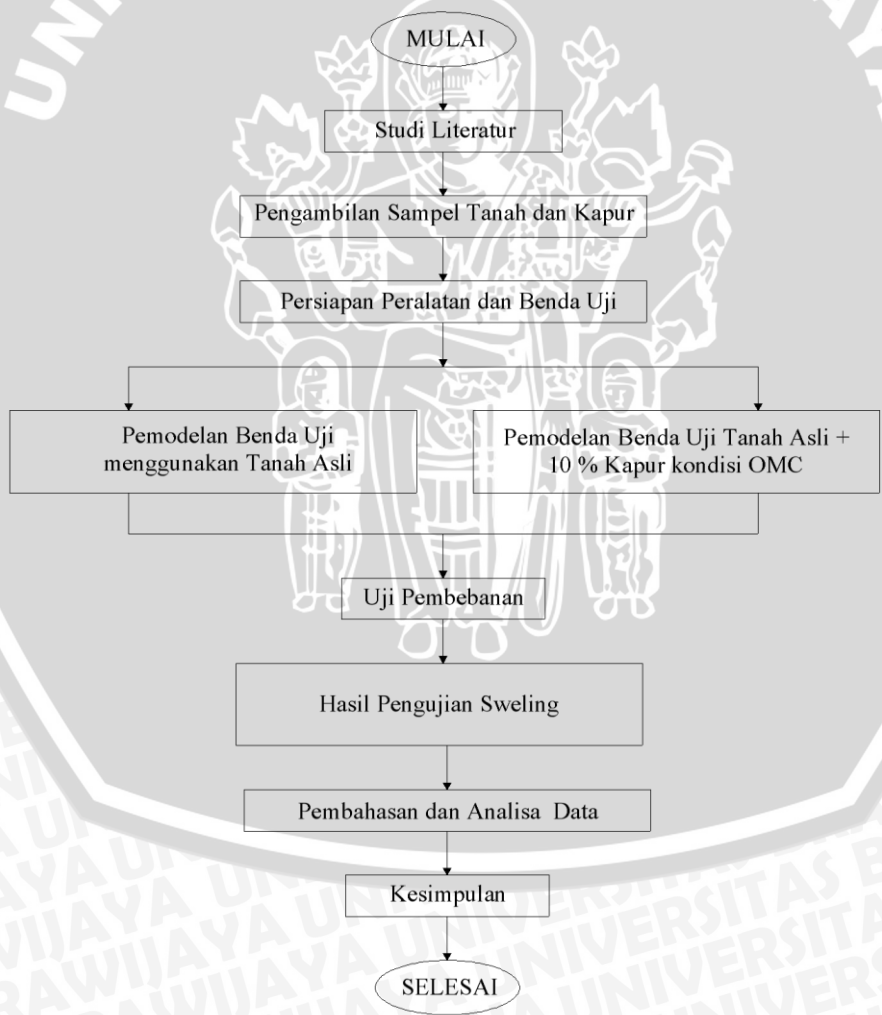
Dari perhitungan BCI maka akan diketahui prosentase peningkatan daya dukung yang terjadi pada tanah tanpa stabilisasi terhadap tanah dengan stabilisasi seperti yang disajikan pada Tabel 3.4. Dari perhitungan ini pula dapat diketahui pengaruh variasi yang memberikan perubahan nilai daya dukung secara signifikan terhadap tanah asli.

Tabel 3.4 BCI dan Prosentase Peningkatan Daya Dukung

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	P_u kg	q_u kg/cm ²	Penurunan mm
Tanah Asli	-	2B			
		3B			
		4B			
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % kapur	1,25D	2B			
		3B			
		4B			
	1,5D	2B			
		3B			
		4B			

3.8. Diagram Alir Penelitian

Di bawah ini adalah gambaran alur penelitian yang dilakukan di Laboratorium.



Gambar 3.2. Diagram Alur penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemeriksaan Specific Gravity

Harga berat spesifik dari butiran tanah (bagian padat) sering dibutuhkan dalam bermacam-macam keperluan perhitungan dalam mekanika tanah. Harga-harga itu dapat ditentukan secara akurat di laboratorium. Pemeriksaan *specific gravity* (G_s) dilakukan dengan tujuan untuk menentukan berat spesifik dari butiran tanah. *Specific gravity* merupakan perbandingan berat butiran tanah dengan berat air dengan *volume* yang sama pada suhu tertentu.

Bahan yang digunakan sebagai benda uji di dalam penelitian ini adalah tanah asli tanpa campuran 10% kapur. Benda uji dibuat sebanyak 2 benda uji dan masing-masing dilakukan pengujian *specific gravity* yang hasilnya akan dirata-rata. Hasil pengujian *specific gravity* dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Specific Gravity Tanah Asli

Labu ukur	1	2
<i>Specific Gravity</i> (G_s)	2,557	2,554
Rata-rata (G_s)	2,556	

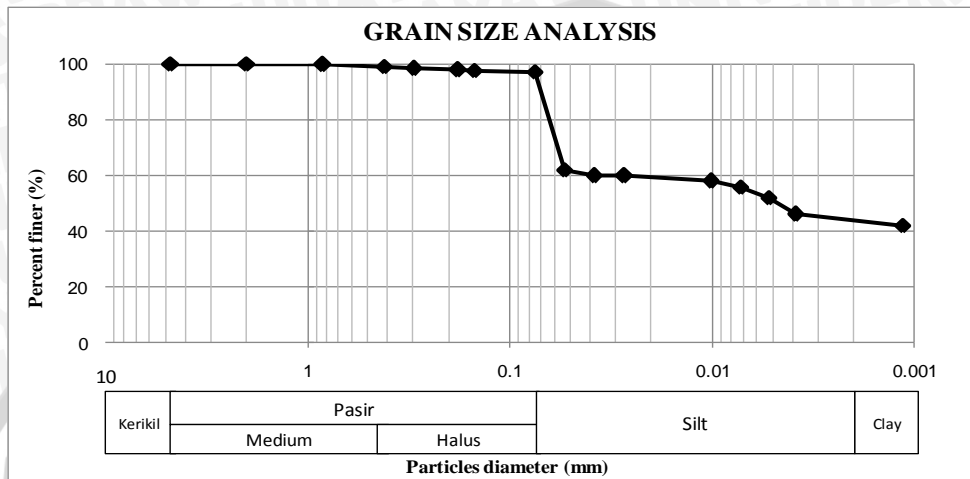
Dari Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa dari dua benda uji tanah asli, diperoleh nilai G_s yang relatif sama, sehingga nilai G_s rata-rata tanah asli adalah sebesar 2,556. Dengan besar nilai G_s tersebut, maka tanah di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro tergolong dalam klasifikasi tanah lempung anorganik dengan kandungan dominan mineral yaitu *montmorillonite*.

4.2. Pemeriksaan Klasifikasi Tanah

4.2.1. Analisis Mekanis Tanah

Analisis mekanis dari tanah adalah penentuan variasi ukuran partikel-partikel yang ada pada tanah. Variasi tersebut dinyatakan dalam presentase dari berat kering total. Ada dua macam cara yang umum digunakan untuk mendapatkan distribusi ukuran partikel tanah, yaitu analisis ayakan dan analisis hydrometer.

Analisis ayakan digunakan untuk ukuran butiran tanah berdiameter lebih besar dari 0,075 mm (tertahan saringan no.200). Sedangkan analisis hidrometer dilakukan untuk ukuran butiran tanah berdiameter lebih kecil dari 0,075 mm (lolos saringan no.200). Hasil analisis ayakan dan hidrometer ditampilkan pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Grafik Hasil Analisis Saringan Dan Hidrometer

Berdasarkan Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa tanah yang terdapat di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki prosentase lolos saringan no.200 sebesar 97,03 % dan menurut sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) termasuk jenis tanah berbutir halus.

4.2.2. Pemeriksaan Batas-batas Atterberg (*Atterberg Limit*)

Pengujian batas-batas *atterberg* memiliki tujuan untuk mengetahui keadaan konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang berbeda-beda selain itu pengujian batas *atterberg* ini juga bertujuan untuk menentukan jenis tanah. Pengujian ini terdiri dari pengujian batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas susut (*shrinkage limit*). Benda uji yang digunakan adalah tanah asli tanpa campuran kapur. Hasil dari pengujian batas Atterberg ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Batas-batas *Atterberg*

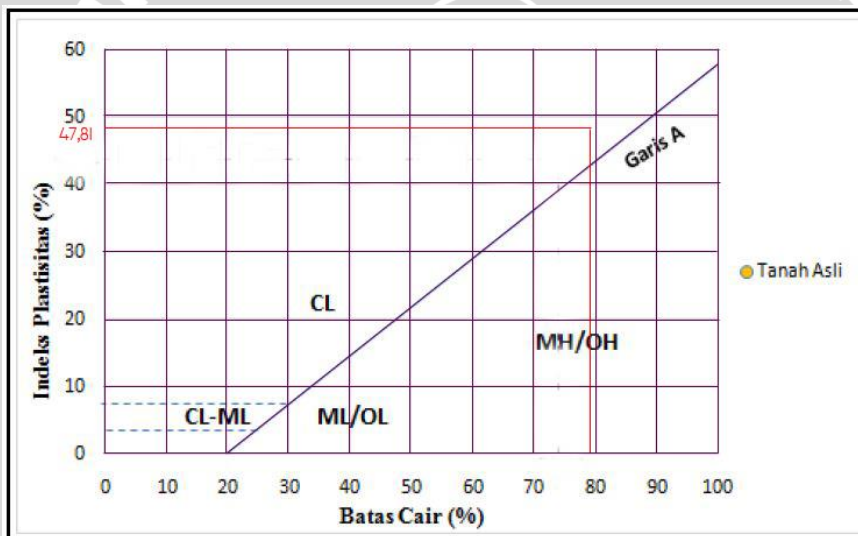
Bahan	LL (%)	PL(%)	SL(%)	PI(%)
Tanah Asli	79,11	31,3	3,04	47,81

Dari Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa batas-batas *atterberg* tanah asli yaitu batas cair (LL) sebesar 79,11 %, batas plastis (PL) sebesar 31,3 %, batas susut (SL) sebesar 3,04%,

dan indeks plastisitas (PI) sebesar 47,81%. Dari hasil pengujian ini, melihat jumlah butiran yang lolos saringan no.200 lebih dari 50%, maka tanah dapat digolongkan sebagai tanah berbutir halus, sehingga dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitasnya.

4.2.3. Sistem Klasifikasi Tanah *Unified*

Berdasarkan klasifikasi tanah sistem *unified*, dari hasil analisis butiran diketahui bahwa prosentase distribusi yang lolos saringan no.200 adalah sebesar 97,03%, sehingga tanah tersebut dapat digolongkan sebagai tanah berbutir halus. Sedangkan dari batas-batas *atterberg* dengan nilai batas cair (LL) sebesar 79,11%, batas plastis (PL) sebesar 31,3%, batas susut (SL) sebesar 3,04%, dan indeks plastisitas (PI) sebesar 47,81%, dimana nilai batas cair (LL) tanah lebih besar dari 50%, maka tanah di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro dapat digolongkan sebagai tanah CH (lempung anorganik dengan plastisitas tinggi).



Gambar 4.2 Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

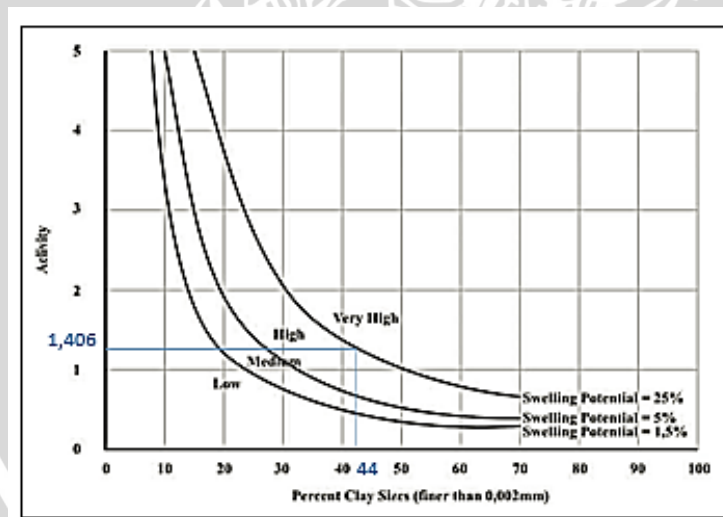
4.2.4. Kriteria Tanah Lempung Ekspansif

Untuk mengetahui suatu tanah berpotensi ekspansif atau tidak, maka dapat dilakukan dengan cara tidak langsung (*single index method*) yaitu dengan menggunakan nilai-nilai batas *atterberg*. Pengujian ini dilakukan untuk mendapat nilai-nilai dari batas cair (LL), batas susut (SL) dan batas plastisitas (PL) suatu tanah. Selain untuk mengetahui nilai LL, SL, dan PL, dari data tersebut juga dapat diketahui nilai indeks plastisitas (PI). Sehingga dari data pengujian tersebut dapat dijadikan salah satu parameter identifikasi tanah lempung ekspansif.

Dari hasil pengujian batas-batas *atterberg*, untuk dapat menentukan parameter tanah lempung ekspansif diantaranya dapat menggunakan prosentase SL dan PI . Pada penelitian ini didapatkan nilai batas susut (SL) sebesar 3,04 %, sehingga dapat disimpulkan berdasarkan Tabel 2.3 tanah tersebut tergolong Kritis , karena besar derajat Ekspansifitasnya <10% .

Sedangkan untuk nilai Indeks Plastisitas (PI) didapatkan sebesar 47,81 %, sehingga dapat disimpulkan berdasarkan Tabel 2.4 tanah tersebut tergolong tanah yang memiliki potensi mengembang sangat tinggi , karena memiliki nilai derajat ekspansifitas >35% .

Sehingga apabila ditinjau dari Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 dapat ditarik kesimpulan bahwa sampel tanah asli yang diambil dari daerah Kec. Ngasem Kab. Bojonegoro, Jawa Timur tersebut tergolong ke dalam tanah lempung ekspansif tinggi. Selain itu, tingkat ekspansifitas juga dapat dilihat dari nilai aktivitasnya. Aktivitas adalah perbandingan dari indeks plastisitas (PI) dengan prosentase tanah < 0,002 mm. Diketahui nilai PI sebesar 47,81 % dan prosentase tanah dengan ukuran 0,002 mm sekitar 44 %. Sehingga akan diperoleh nilai aktivitas tanah asli sebesar 1,406. Kemudian hasil perhitungan nilai aktivitas dan prosentase ukuran tanah < 0,002 mm diplotkan ke dalam grafik potensi pengembangan terlihat pada (Gambar 4.3).



Gambar 4.3 Grafik Klasifikasi Berdasarkan Potensi Mengembang

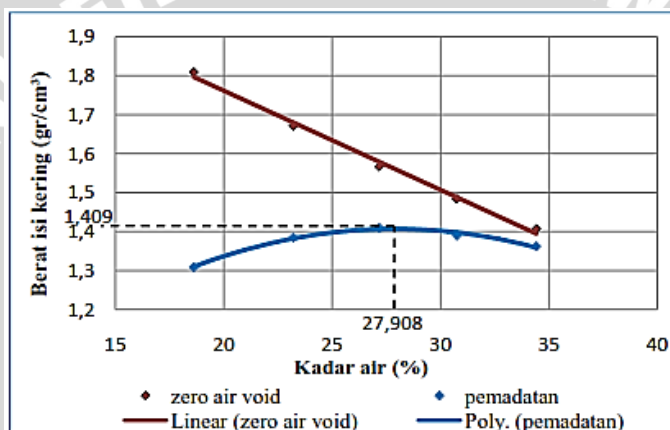
Sehingga dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa tanah daerah Kec. Ngasem Kab. Bojonegoro, Jawa Timur tersebut tergolong ke dalam tanah lempung ekspansif tinggi.

4.3. Pemeriksaan Pemadatan Tanah (*Compaction*)

4.3.1. Penentuan Kadar Air Untuk Campuran DSM

Uji pemadatan standar merupakan usaha untuk mengeluarkan udara dari pori-pori dalam tanah yang dilakukan dengan cara mekanis (ditumbuk). Kepadatan yang dicapai dipengaruhi oleh banyaknya kandungan air yang ada di dalam tanah tersebut. Sehingga pemeriksaan pemadatan ini bertujuan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (γ_d) dari sampel tanah tersebut.

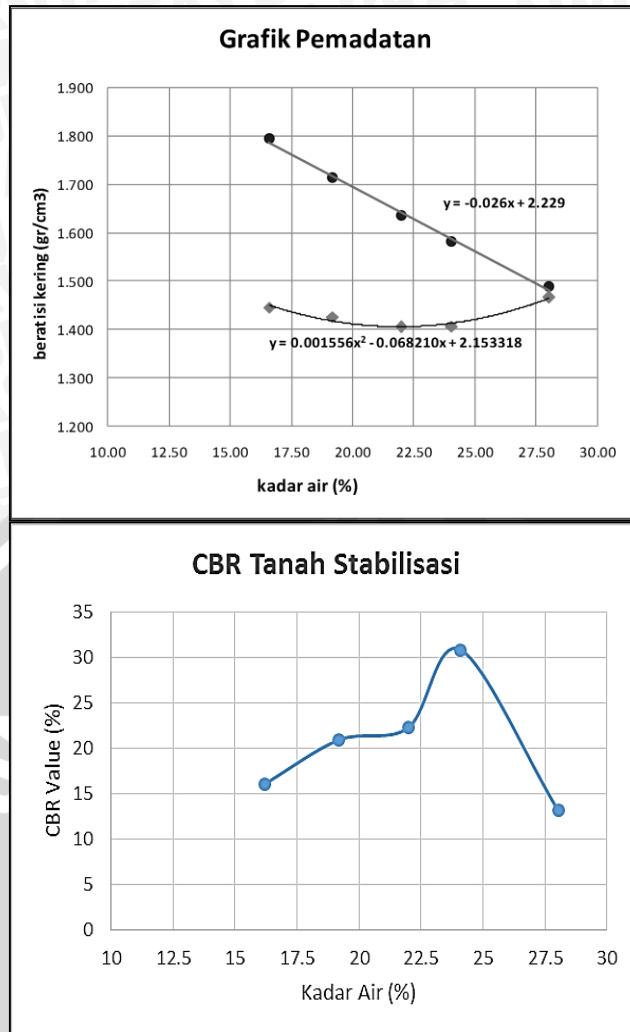
Pada pemeriksaan pemadatan standar ini hanya dilakukan untuk mendapatkan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering (γ_d) maksimum pada tanah asli. Sedangkan untuk OMC dan berat isi kering (γ_d) maksimum untuk tanah stabilisasi didapat dari uji pemadatan standar. Besarnya OMC dan γ_d didapatkan dari garfik pada Gambar 4.4 berikut ini



Gambar 4.4 Pemadatan Standar Tanah Asli

Dari Gambar 4.4 maka besarnya kadar air optimum (OMC) untuk tanah asli adalah 27,908 % dengan berat isi kering maksimum (γ_d) sebesar 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 terhadap tanah yang distabilisasi dengan kapur. Namun Setelah 3 kali uji pemadatan tidak didapatkan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering ($\gamma_{d \text{ maks}}$) pada tanah stabilisasi dengan campuran 10 % kapur tersebut. Hal tersebut terjadi dikarenakan ketidakstabilan sifat yang dimiliki oleh tanah ekspansif, sehingga untuk mendapatkan kepadatan maksimumnya sangat sulit.

Untuk menentukan nilai Kadar Air Optimum (OMC) dan berat isi kering max. ($\gamma_{d \text{ maks}}$) pada tanah stabilisasi 10 % kapur, dapat 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 Uji CBR Tanah Stabilisasi

Tabel 4.3 Perbandingan nilai 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 dengan kadar air optimum (OMC) sebesar 24,10% dan berat isi kering maksimum (γ_{dmaks}) sebesar 1,406% yang akan digunakan sebagai standarisasi kepadatan pada kolom DSM.

4.3.2. Keapatan Tanah Model

Sama halnya dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Hakim (2015), istilah keapatan model juga digunakan dalam penelitian ini. Istilah keapatan model muncul dikarenakan pada saat pemodelan sampel uji ke dalam *box* mengalami kesulitan saat pengerjaannya. Selain cukup sulit untuk mencapai keapatan rencana ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sebesar 1,409 gr/cm^3 , kondisi *box* juga tidak akan mampu menahan beban tanah ketika keapatan tanah tersebut terus dimaksimalkan. Sehingga didalam penelitian ini untuk pemodelan tanah asli, digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm^3 . Nilai tersebut didapat dari *trial dan error* pemodelan tanah di dalam *box* yang telah dilakukan oleh Hakim, dkk. (2015).

Pemodelan tanah asli dengan kadar air dan keapatan tersebut, distandarisasi pada seluruh sampel uji. Dengan diketahuinya berat isi kering dan kadar air serta volume tanah, maka dapat dihitung pula kebutuhan jumlah sampel tanah dan air untuk pemodelan benda uji. Agar keapatan yang direncanakan tercapai, pemadatan tanah dikontrol tiap-tiap lapisan. Hal tersebut dilakukan agar tercapai keseragaman keapatan pada seluruh sampel uji. Mengenai metode pemadatan telah dijelaskan pada metode penelitian. 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			

Sedangkan pemodelan kolom DSM stabilisasi kapur 10%, digunakan kadar air 24,10% dan berat isi kering maksimum 1,406 gr/cm^3 . Pemodelan dibuat dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan sebelumnya. Seperti halnya pemodelan tanah asli, pemodelan kolom DSM stabilisasi tersebut juga dikontrol keapatannya tiap-tiap lapisan setinggi 5 cm. Tiap lapisan dipadatkan dengan keapatan yang sudah ditentukan tersebut, yaitu dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis. Semua perlakuan distandarisasi, sehingga diharapkan seluruh sampel uji memiliki keapatan yang sama.

4.4. Uji Beban (*Load Test*) pada Model Benda Uji

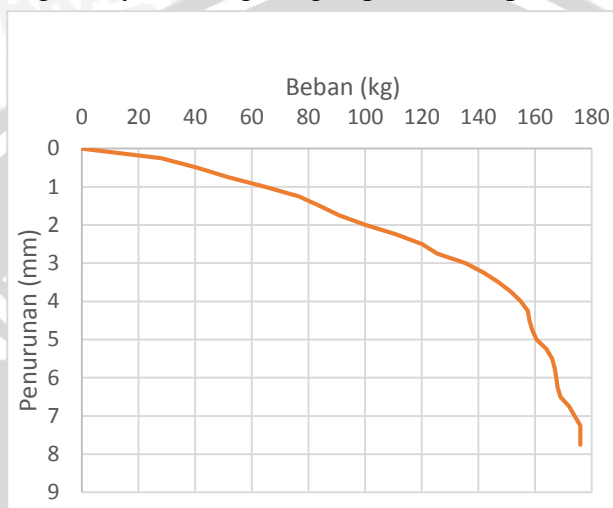
Uji beban (load test) perlu dilakukan untuk dapat mengetahui nilai daya dukung batas (*ultimite bearing capacity*)(q_u) pada pondasi yang bersangkutan. Uji beban ini dilakukan dengan meletakkan *Bearing plate* ukuran (5×5×2) cm diletakkan di atas 2 jenis benda uji, yaitu benda uji tanah asli/dasar dan benda uji tanah yang telah distabilisasi dengan kolom DSM dengan bahan aditif berupa 10% kapur yang diberi variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df). *Bearing plat* memiliki fungsi untuk mendistribusikan beban yang diterima dari piston hidrolik. Kemudian uji pembebanan dilakukan dengan memberikan beban di atas *bearing plate* secara bertahap hingga benda uji mengalami keruntuhan. Pembacaan beban dilakukan pada setiap kelipatan angka 50 pada pembacaan alat *lvdt*. Pemberian atau penetrasi beban dilakukan menggunakan alat dongkrak hidrolik (*hydraulic jack*) dengan percepatan penetrasi yang konstan dan diperlakukan sama pada semua benda uji. Setiap variasi benda uji dilakukan uji beban untuk mengetahui nilai daya dukung yang optimum. Uji beban dilakukan sebanyak 10 kali pengujian yang terdiri 1 benda uji tanah asli dan 9 benda uji yang telah distabilisasi dengan kolom DSM sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Hasil dari uji beban akan diperoleh grafik hubungan antara beban dan penurunan sehingga akan diperoleh nilai daya dukung batas (q_u).

Jenis tanah yang digunakan dalam pengujian ini adalah tanah lempung ekspansif yang mana tanah tersebut tergolong jenis tanah lunak dan mudah mampat. Sehingga keruntuhan daya dukung yang terjadi adalah keruntuhan penetrasi, dimana pada saat beban bekerja, pondasi hanya menembus dan menekan tanah ke samping sehingga menyebabkan tanah di sekitar pondasi mengalami pemampatan. Penurunan pondasi terus bertambah hampir secara linier seiring dengan penambahan beban yang diberikan. Penurunan yang terjadi tidak mengakibatkan gerakan arah lateral menuju zona kritis keruntuhan tanah, sehingga tanah tidak mengalamai pengembangan ke atas di sekitar pondasi. Maka dari itu, pola keruntuhan yang terjadi pada pengujian ini tidak dapat terlihat dengan jelas. Keruntuhan terjadi saat pondasi terus mengalami penurunan tanpa adanya penambahan beban.

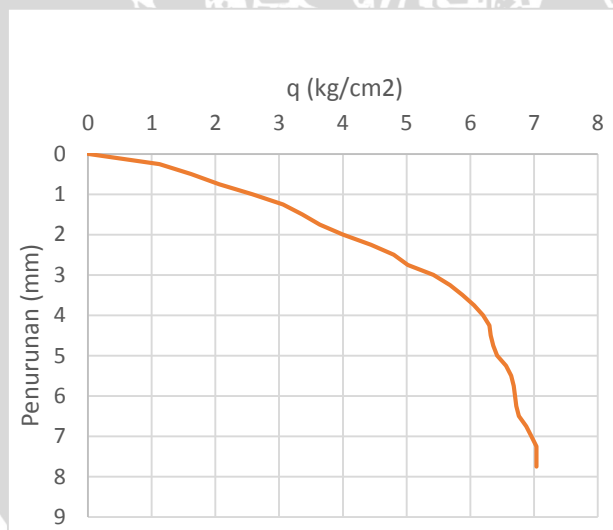
4.5. Hasil Uji Beban (*Load Test*) pada Model Benda Uji

4.5.1. Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli

Pengujian pembebanan dilakukan terhadap sampel tanah yang belum distabilisasi dengan metode DSM. Sampel ini menggunakan kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908 % dan kepadatan relatif (γ_d) di box sebesar 1,28 gr/cm³. Dari uji pembebanan tanah asli didapatkan hasil berupa grafik hubungan beban dengan penurunan yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan hubungan daya dukung dengan penurunan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Hubungan beban dengan penurunan tanah asli



Gambar 4.7 Hubungan daya dukung dengan penurunan tanah asli

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa pada saat awal pemberian beban, penurunan yang terjadi sebanding dengan beban yang sedang bekerja. Seiring dengan beban lanjutan yang diberikan, maka hubungan beban dan penurunan tidak lagi sebanding seperti pada awal pemberian beban, di mana beban yang terjadi tidak meningkat secara signifikan dengan penurunan yang terus berlanjut. Penyebab hal ini terjadi karena daya dukung tanah (q_u)

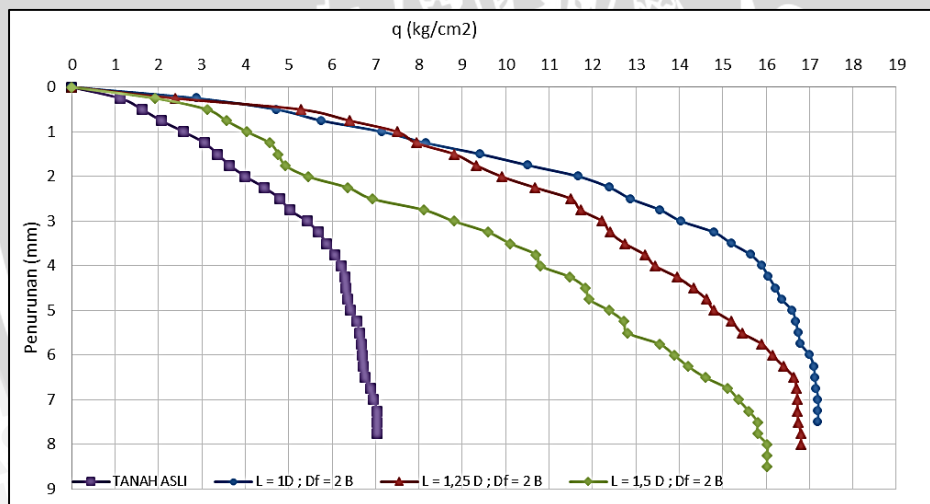
sudah berada pada batas beban maksimum yang dapat diterima. Dari grafik hubungan daya dukung dengan penurunan pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa daya dukung tanah asli sebesar 7,04 kg/cm² dengan penurunan sebesar 7,75 mm.

Selain yang terjadi pada tanah asli, maka tanah stabilisasi dengan metode DSM pun didapatkan hal yang serupa namun memiliki perbedaan nilai beban dan hasil pembebanan pada tanah stabilisasi. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan pada grafik gabungan.

4.5.2. Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Stabilisasi DSM

4.5.2.1. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (D_f) = 2B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa kapur untuk variasi $L=1D$, $L=1,25D$, $L=1,5D$ dengan panjang konstan $D_f=2B$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap $D_f = 2B$

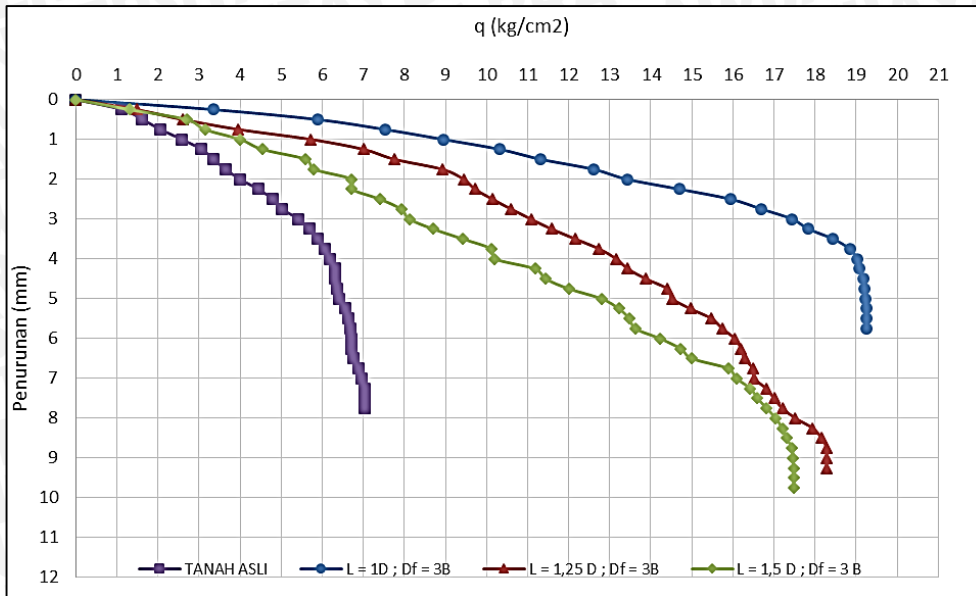
Dari **Gambar 4.8** dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar 7,04 kg/cm² dengan penurunan 7,75mm. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D$; $D_f=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 17,2 kg/cm² dengan penurunan 7,5 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,25D$; $D_f=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 16,8 kg/cm² dengan penurunan 8,25 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,5D$; $D_f=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 16,02 kg/cm² dengan penurunan 8,5 mm.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi jarak yang berbeda dengan panjang stabilisasi yang sama pada $D_f=2B$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk jarak $1D$ nilai daya dukungnya meningkat cukup signifikan sebesar 152,108 % dari tanah asli sedangkan untuk jarak $1,25D$ nilai daya dukung meningkat sebesar 132,530 % dan jarak $1,5D$ meningkat hanya 92,771 % dari tanah asli. Perbedaan jarak tersebut cukup berpengaruh terhadap perubahan daya dukungnya. Di mana pada jarak paling rapat daya dukung lebih tinggi dibandingkan jarak antar kolom yang diregangkan, sehingga daya dukung menurun. Hal ini terjadi karena pada jarak yang lebih rapat penyebaran tegangan yang dihasilkan beban lebih terkekang oleh tanah stabilisasi DSM. Sedangkan ketika jarak diregangkan maka distribusi tegangan menjadi terbagi, ada yang mengenai tanah asli dan juga ada yang mengenai tanah stabilisasi tersebut, sehingga itu yang menyebabkan nilai daya dukungnya menurun.

Pada grafik di atas terlihat bahwa pada saat penurunan antara $L=1D$ dengan $L=1,25D$; $D_f=2B$ terjadi perpotongan. Hal ini terjadi dikarenakan faktor pelaksanaan yang mana tidak selalu berjalan dengan sempurna. Dalam pelaksanaan, ketika suatu sampel akan dilakukan pembebanan hal yang pertama dilakukan adalah mempersiapkan instalasi pembebanan yang salah satunya meliputi proses perataan permukaan tanah. Hal ini dilakukan bertujuan agar peletakan pelat pondasi bisa rata ,dengan harapan posisi piston pembebanan tidak mengakibatkan eksentrisitas. Dari hal ini dapat ditarik kesimpulan penyebab terjadinya perpotongan grafik tersebut dikarenakan perataan permukaan tanah yang tidak rata , sehingga menyebabkan grafik tersebut mengalami perpotongan.

4.5.2.2. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (D_f) = 3B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa kapur untuk variasi $L=1D$, $L=1,25D$, $L=1,5D$ dengan panjang konstan $D_f=3B$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap $D_f = 3B$

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar $7,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $7,75 \text{ mm}$. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D ; D_f=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar $19,24 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $5,75 \text{ mm}$. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,25D ; D_f=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar $18,28 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,25 \text{ mm}$. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,5D ; D_f=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar $17,48 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $9,75 \text{ mm}$.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi jarak yang berbeda dengan panjang stabilisasi yang sama pada $D_f=3B$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk jarak $1D$ nilai daya dukungnya meningkat cukup signifikan sebesar $189,759 \%$ dari tanah asli sedangkan untuk jarak $1,25D$ nilai daya dukung meningkat sebesar $133,133 \%$ dan jarak $1,5D$ meningkat hanya $103,012 \%$ dari tanah asli.

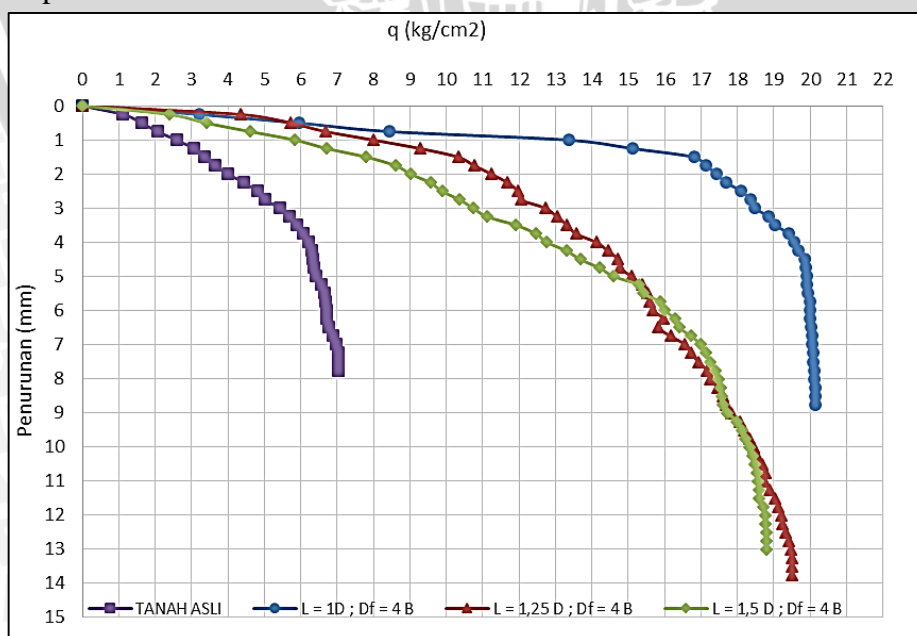
Perbedaan jarak tersebut cukup berpengaruh terhadap perubahan daya dukungnya. Di mana pada jarak paling rapat daya dukung lebih tinggi dibandingkan jarak antar kolom yang diregangkan, sehingga daya dukung menurun. Hal ini terjadi karena pada jarak yang lebih rapat penyebaran tegangan yang dihasilkan beban lebih terkekang oleh tanah stabilisasi DSM. Sedangkan ketika jarak diregangkan maka distribusi tegangan menjadi terbagi, ada yang mengenai tanah asli dan juga ada yang mengenai tanah stabilisasi tersebut, sehingga itu yang menyebabkan nilai daya dukungnya menurun.

Pada Gambar di atas terlihat bahwa perbedaan penurunan yang jauh terhadap variasi $L=1 D ; D_f=3B$ dibandingkan dengan variasi lain. Di mana pada penurunan yang relatif

kecil namun daya dukung yang dihasilkan sudah cukup besar. Hal ini diidentifikasi karena perbedaan volume kapur pada kolom DSM dan sifat sementasi kapur itu sendiri. Dimana sifat sementasi kapur adalah suatu reaksi kimia yang terjadi antara kapur dengan mineral lempung yang terjadi dengan lambat. Kapur jika bereaksi dengan air maka akan terjadi reaksi kimia berupa reaksi sementasi antara kapur dan tanah lempung air, yang menyebabkan tanah lempung akan membentuk partikel yang berukuran lebih besar yang berakibat lempung dan akhirnya menjadi bersifat kaku. Sehingga meskipun kapur sangat baik dalam meningkatkan daya dukung tanah namun apabila tanah telah mencapai keruntuhan atau mencapai daya dukung batas (q_u) maka tanah akan mengalami brittle/patah, dikarenakan tanah tidak mampu menahan beban yang bekerja. Pada grafik $L=1D$; $D_f=3B$ juga dapat dikatakan mengalami fase elasto plastic, dimana dapat dilihat pada grafik tanah yang distabilisasi pada saat penurunan awal masih mencapai batas elastis namun pada saat penurunan tertentu tanah tersebut langsung mengalami batas plastis / sudah dikatakan mencapai keruntuhan.

4.5.2.3. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Panjang (D_f) = 4B Konstan dengan Variasi Jarak (L) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa kapur untuk variasi $L=1D$, $L=1,25D$, $L=1,5D$ dengan panjang konstan $D_f=3B$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap $D_f = 4B$

Dari **Gambar 4.10** dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar 7,04 kg/cm² dengan penurunan 7,75mm. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D$; $D_f=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 20,14 kg/cm² dengan penurunan 8,75 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,25D$; $D_f=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 19,5 kg/cm² dengan penurunan 13,75 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,5D$; $D_f=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 18,8 kg/cm² dengan penurunan 13 mm.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi jarak yang berbeda dengan panjang stabilisasi yang sama pada $D_f=3B$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk jarak 1D nilai daya dukungnya meningkat cukup signifikan sebesar 200,301 % dari tanah asli sedangkan untuk jarak 1,25D nilai daya dukung meningkat sebesar 133,735 % dan jarak 1,5D meningkat hanya 132,229 % dari tanah asli.

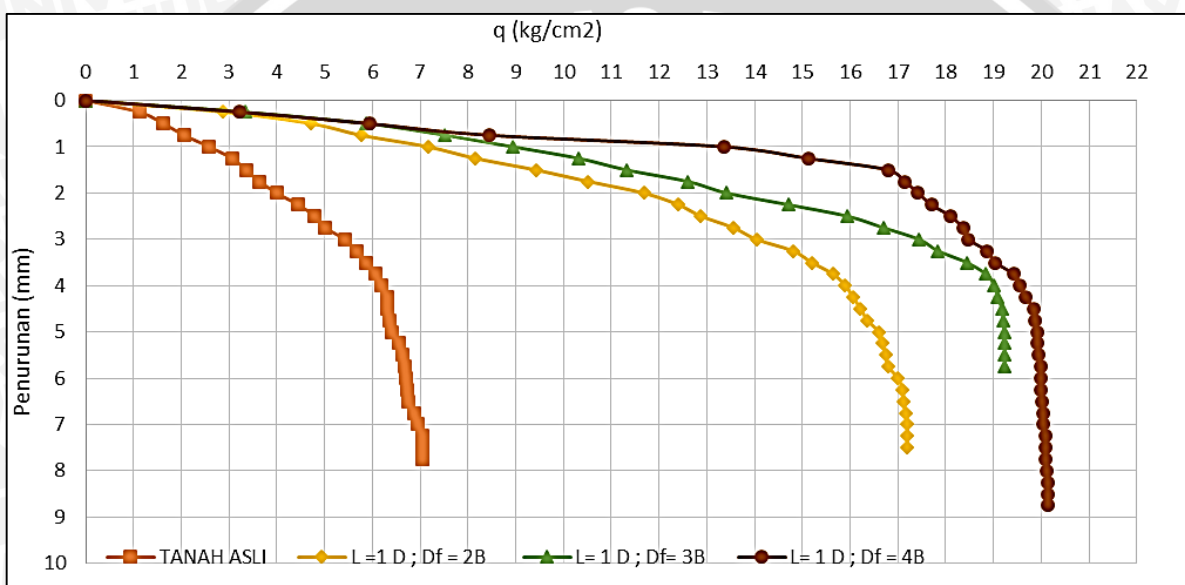
Perbedaan jarak tersebut cukup berpengaruh terhadap perubahan daya dukungnya. Di mana pada jarak paling rapat daya dukung lebih tinggi dibandingkan jarak antar kolom yang diregangkan, sehingga daya dukung menurun. Hal ini terjadi karena pada jarak yang lebih rapat penyebaran tegangan yang dihasilkan beban lebih terkekang oleh tanah stabilisasi DSM. Sedangkan ketika jarak diregangkan maka distribusi tegangan menjadi terbagi, ada yang mengenai tanah asli dan juga ada yang mengenai tanah stabilisasi tersebut, sehingga itu yang menyebabkan nilai daya dukungnya menurun.

Pada Gambar di atas terlihat bahwa perbedaan penurunan yang jauh terhadap variasi $L=1 D$; $D_f=4B$ dibandingkan dengan variasi lain. Di mana pada penurunan yang relatif kecil namun daya dukung yang dihasilkan sudah cukup besar. Hal ini diidentifikasi karena perbedaan volume kapur pada kolom DSM dan sifat sementasi kapur itu sendiri. Dimana sifat sementasi kapur adalah suatu reaksi kimia yang terjadi antara kapur dengan mineral lempung yang terjadi dengan lambat. Kapur jika bereaksi dengan air maka akan terjadi reaksi kimia berupa reaksi sementasi antara kapur dan tanah lempung air, yang menyebabkan tanah lempung akan membentuk partikel yang berukuran lebih besar yang berakibat lempung dan akhirnya menjadi bersifat kaku. Sehingga meskipun kapur sangat baik dalam meningkatkan daya dukung tanah namun apabila tanah telah mencapai keruntuhan atau mencapai daya dukung batas(q_u) maka tanah akan mengalami brittle/patah, dikarenakan tanah tidak mampu menahan beban yang bekerja. Pada grafik $L=1D$; $D_f=4B$ juga dapat dikatakan mengalami fase elasto plastic, dimana dapat dilihat pada grafik tanah yang distabilisasi pada saat penurunan awal masih mencapai batas elastis namun pada

saat penurunan tertentu tanah tersebut langsung mengalami batas plastis / sudah dikatakan mencapai keruntuhan.

4.5.2.4. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = 1D dengan Variasi Panjang (D_f) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa *kapur* untuk variasi $D_f=2B$, $D_f=3B$, $D_f=4B$ dengan jarak konstan $L=1D$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada **Gambar 4.11**



Gambar 4.11 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi panjang terhadap $L=1D$

Dari **Gambar 4.11** dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan *kapur* dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar 7,04 kg/cm² dengan penurunan 7,75mm. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D$; $D_f=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 17,2 kg/cm² dengan penurunan 7,5 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D$; $D_f=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 19,24 kg/cm² dengan penurunan 5,75 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1D$; $D_f=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 20,14 kg/cm² dengan penurunan 8,75 mm.

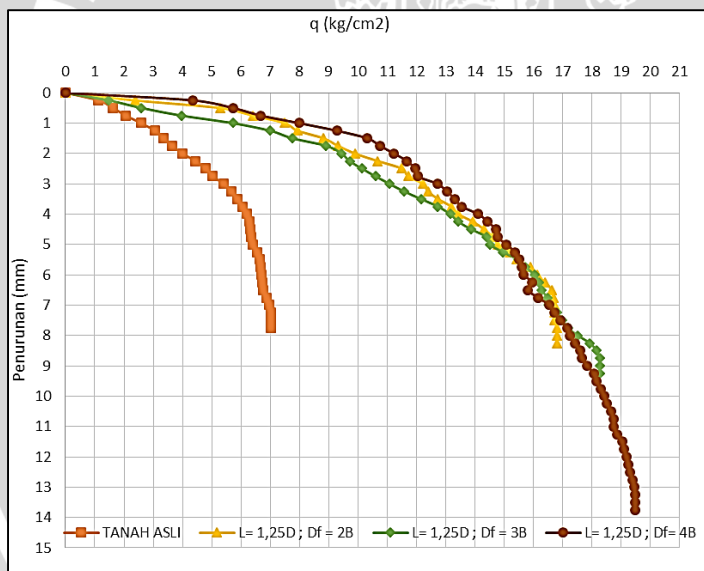
Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi jarak yang berbeda dengan jarak stabilisasi yang sama pada $L=1D$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk panjang 2B nilai daya dukungnya meningkat sebesar

152,108 % dari tanah asli sedangkan untuk jarak 3B nilai daya dukung meningkat sebesar 189,759 % dan jarak 4B meningkat sangat signifikan sebesar 200,301 % dari tanah asli.

Dari hasil tersebut, maka dapat diketahui bahwa nilai daya dukung meningkat seiring bertambahnya panjang kolom stabilisasi. Hal ini terjadi karena penambahan panjang pada kolom stabilisasi, sehingga jumlah prosentase tanah yang distabilisasi pun semakin besar dan menghasilkan daya dukung yang semakin meningkat.

4.5.2.5. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = 1,25D Konstan dengan Variasi Panjang (D_f) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa kapur untuk variasi $D_f=2B$, $D_f=3B$, $D_f=4B$ dengan jarak konstan $L=1,25D$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada **Gambar 4.12**.



Gambar 4.12. Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi Panjang terhadap $L= 1,25D$

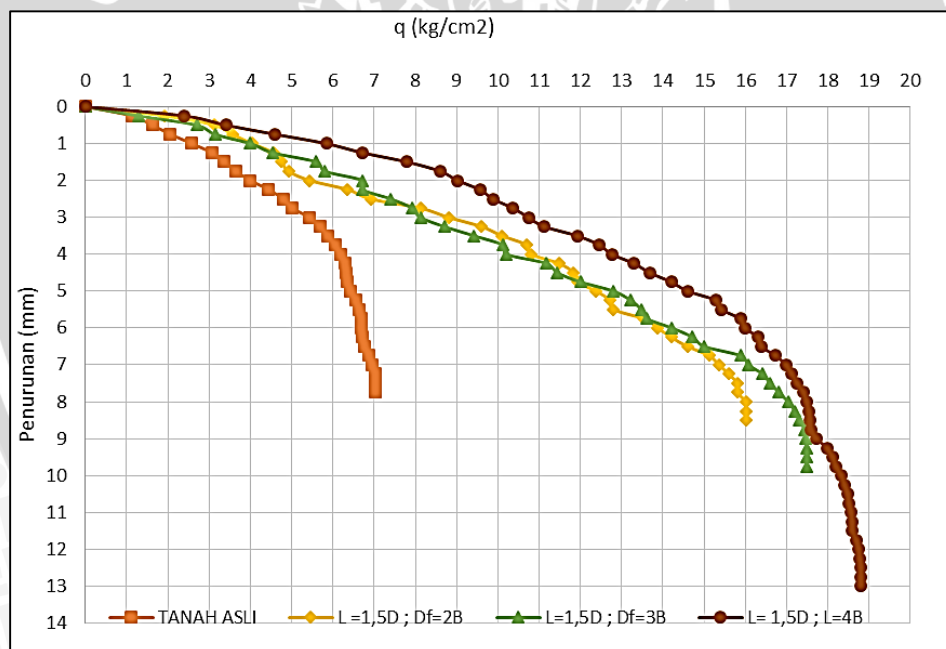
Dari **Gambar 4.12** dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar 7,04 kg/cm² dengan penurunan 7,75mm. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,25D$; $D_f=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 16,8 kg/cm² dengan penurunan 8,25 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,25D$; $D_f=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 18,28 kg/cm² dengan penurunan 9,25 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan

variasi $L=1,25D$; $Df=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar $19,5 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $13,75 \text{ mm}$.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi jarak yang berbeda dengan jarak stabilisasi yang sama pada $L=1,25D$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk panjang $2B$ nilai daya dukungnya meningkat cukup signifikan sebesar $132,530 \%$ dari tanah asli sedangkan untuk panjang $3B$ nilai daya dukung meningkat sebesar $133,735 \%$ dan panjang $4B$ meningkat $132,530 \%$ dari tanah asli.

4.5.2.6. Perbandingan Hasil Uji Pembebanan Sampel Tanah Asli dengan Sampel Tanah Stabilisasi Variasi Jarak (L) = $1,5D$ Konstan dengan Variasi Panjang (Df) Berbeda

Setelah melakukan penelitian pada sampel tanah asli dan sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan zat aditif berupa *kapur* untuk variasi $Df=2B$, $Df=3B$, $Df=4B$ dengan jarak konstan $L=1,5D$, maka didapatkan perbandingan antara daya dukung dengan penurunan diantara keempat sampel. Untuk perbandingan hasil pengujian tersebut ditampilkan pada **Gambar 4.13**.



Gambar 4.13 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi panjang terhadap $L=1,5D$

Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa sampel tanah stabilisasi dengan metode DSM menggunakan *kapur* dapat meningkatkan daya dukung tanah terhadap tanah asli. Pada sampel tanah asli didapatkan nilai daya dukung sebesar $7,04 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $7,75 \text{ mm}$. Sedangkan untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1,5D$; $Df=2B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar $16,02 \text{ kg/cm}^2$ dengan penurunan $8,5 \text{ mm}$. Untuk

sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1, 5D$; $Df=3B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 17,48 kg/cm² dengan penurunan 9,75 mm. Untuk sampel tanah stabilisasi dengan variasi $L=1, 5D$; $Df=4B$ didapatkan nilai daya dukung sebesar 18,8 kg/cm² dengan penurunan 13 mm.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa variasi panjang yang berbeda dengan jarak stabilisasi yang sama pada $L=1,5D$ dapat berpengaruh terhadap nilai daya dukung tanah. Dari data tersebut didapat bahwa untuk panjang 2B nilai daya dukungnya meningkat sebesar 92,771 % dari tanah asli sedangkan untuk jarak 3B nilai daya dukung meningkat sebesar 103,012 % dan jarak 4B meningkat sangat signifikan yaitu 132,229 % dari tanah asli.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa nilai daya dukung akan meningkat seiring dengan semakin rapatnya jarak dan semakin panjangnya kolom tanah stabilisasi. Namun hasil dari penelitian ini bukan merupakan hasil yang sempurna dalam pelaksanaannya. Dapat diperhatikan pada Pada Gambar 4.8, 4.10, 4.12 dan 4.13 terlihat adanya perpotongan antara dua grafik dengan variasi yang berbeda. Hal ini dikarenakan faktor pelaksanaan uji pembebanan, di mana pada pengujian ini menggunakan dongkrak hidrolik manual yang menyebabkan kecepatan pemompaan dongkrak tidak seragam secara konstan. Sehingga saat pemompaan dongkrak hidrolik yang terlalu cepat, mengakibatkan pembacaan beban meningkat lebih cepat dengan penurunan yang terjadi kecil sehingga terjadi perpotongan antar grafik.

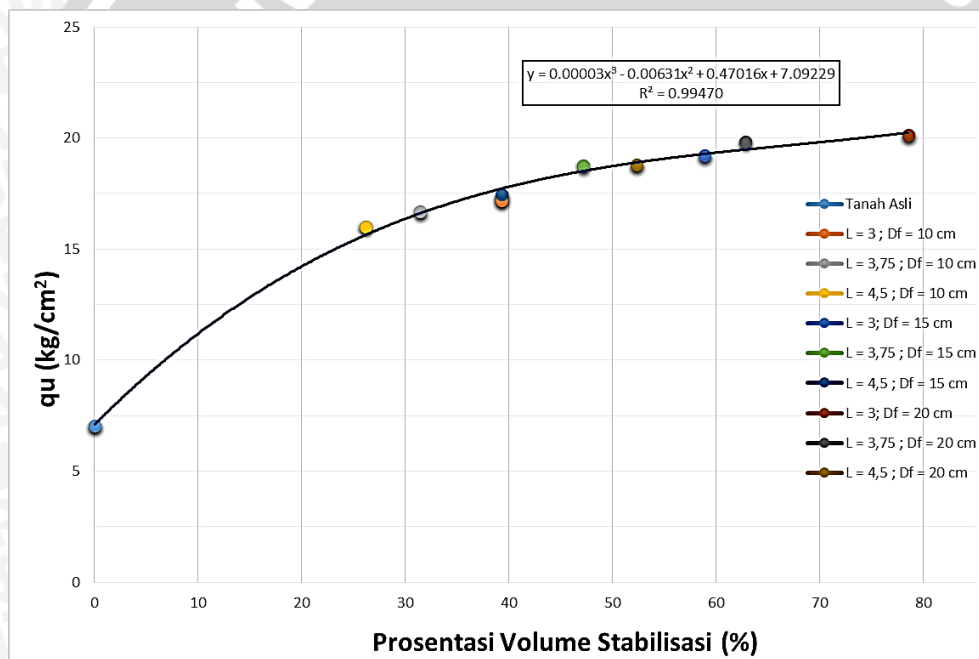
Namun alasan ini bukan merupakan satu satunya faktor mutlak yang menjadi kesimpulan atas ketidaksempurnaan grafik hasil penelitian diatas, namun faktor-faktor lain yang belum bisa dijelaskan pada penelitian ini, mengenai faktor apa saja yang dapat mempengaruhi terjadinya perpotongan / persilangan grafik pembebanan tersebut.

4.5.3. Nilai daya dukung tanah terhadap prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM

Prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm² dengan kedalaman 20 cm. Hasil pengujian eksperimen daya dukung terhadap prosentase tanah stabilisasi ditampilkan pada Tabel 4.5 dan Gambar 4.14 sebagai berikut .

Tabel 4.5 Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Volume Stabilisasi	P_u	q_u
		%	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	0	176	7.04
Tanah Asli + Kolom	L = 3 ; Df = 10 cm	39.27	430	17.2
	L = 3,75 ; Df = 10 cm	31.42	417.5	16.7
	L = 4,5 ; Df = 10 cm	26.18	400.5	16.02
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 3; Df = 15 cm	58.90	481	19.24
	L = 3,75 ; Df = 15 cm	47.12	469	18.76
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 4,5 ; Df = 15 cm	39.27	437	17.48
	L = 3; Df = 20 cm	78.54	503.5	20.14
	L = 3,75 ; Df = 20 cm	62.83	495.5	19.82
	L = 4,5 ; Df = 20 cm	52.36	470	18.8

**Gambar 4.14** Perbandingan Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Dari Gambar 4.14, dapat diketahui bahwa hubungan peningkatan nilai daya dukung sebanding dengan peningkatan prosentase stabilisasi tanah dengan kolom DSM. Semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan.

4.6. Analisis Pengaruh Variasi Jarak Dan Panjang Kolom DSM 10 % Kapur Berdasarkan BCI

Bearing Capacity Improvement (BCI) adalah merupakan analisis rasio atau perbandingan antara daya dukung tanah yang diperkuat terhadap daya dukung tanah tanpa perkuatan. Pada penelitian kali ini, untuk nilai BCI digolongkan menjadi dua sub bab, yaitu BCIu (*Bearing Capacity Improvement Ultimate*) dan BCIs (*Bearing Capacity Improvement Settlement*). Sehingga untuk keseluruhan nilai daya dukung dan penurunan hasil uji pembebanan dari semua sampel dengan variasi jarak dan variasi panjang akan lebih di jelaskan pada sub bab tersebut.

4.6.1. Bearing Capacity Improvement Ultimate (BCIu)

Bearing Capacity Improvement Ultimate (BCIu) adalah merupakan perbandingan antara daya dukung tanah yang diperkuat terhadap daya dukung tanah tanpa perkuatan dengan penurunan ultimate atau maksimum. Secara keseluruhan nilai daya dukung dan penurunan hasil uji pembebanan dari semua sampel ditampilkan pada Tabel 4.6 untuk peninjauan pengaruh variabel panjang yang berbeda pada kondisi jarak yang sama. Dan Tabel 4.7 untuk peninjauan pengaruh variabel variasi jarak yang berbeda pada kondisi panjang yang sama.

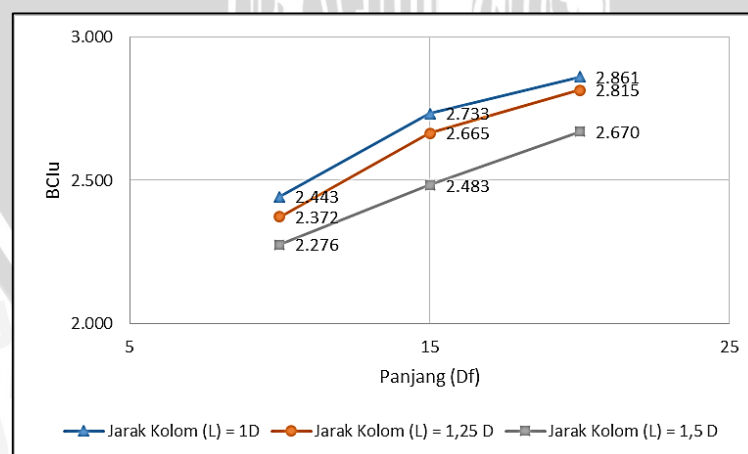
Tabel 4.6 Nilai q_u dengan penurunan berdasarkan jarak sama panjang berbeda

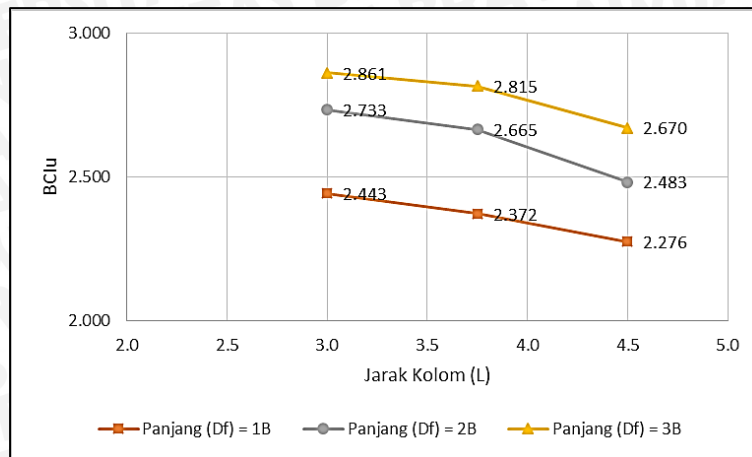
Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	P_u kg	q_u kg/cm ²	Penurunan mm	BCIu
Tanah Asli			176	7.04	7.75	1
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	1D	2B	430	17.2	7.5	2.443
		3B	481	19.24	9.75	2.733
		4B	503.5	20.14	10.25	2.861
	1,25 D	2B	417.5	16.7	8.25	2.372
		3B	469	18.76	10.75	2.665
		4B	495.5	19.82	15	2.815
1,5 D	2B	400.5	16.02	8.5	2.276	
	3B	437	17.48	9.75	2.483	
	4B	470	18.8	13	2.670	

Tabel 4.7 Nilai *qu* dengan penurunan berdasarkan panjang sama jarak berbeda

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	<i>Pu</i>	<i>qu</i>	Penurunan	BCIu
	cm	cm	kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli			176	7.04	7.75	1
	4B	1,5 D	470	18.8	13	2.670
		1 D	503.5	20.14	10.25	2.861
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	3B	1,5 D	437	17.48	9.75	2.483
		1,25 D	469	18.76	10.75	2.665
	1 D	481	19.24	9.75	2.733	
	2B	1,5 D	400.5	16.02	8.5	2.276
		1,25 D	417.5	16.7	8.25	2.372
		1 D	430	17.2	7.5	2.443

Dari Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa prosentase peningkatan daya dukung akibat stabilisasi kapur dengan metode DSM terhadap tanah asli dapat dilihat dari nilai BCIu yang lebih besar dari 1 dan juga dapat dilihat besar prosentase peningkatan daya dukung antar variasi dengan penurunan yang berbeda. Dari tabel tersebut dapat juga dikatakan bahwa perubahan panjang kolom stabilisasi (Df) berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung (*qu*) yang digambarkan oleh nilai BCIu seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.15, di mana peningkatan *qu* bertambah seiring bertambahnya panjang (Df) kolom. Di samping panjang (Df), variasi jarak kolom (L) juga mempengaruhi nilai daya dukung (*qu*) yang digambarkan oleh nilai BCIu seperti yang disajikan pada Gambar 4.16, di mana dapat diketahui bersama, semakin rapatnya jarak antar kolom stabilisasi maka nilai *qu* juga akan semakin meningkat.

**Gambar 4.15** Perbandingan pengaruh variasi panjang (Df) terhadap nilai BCIu

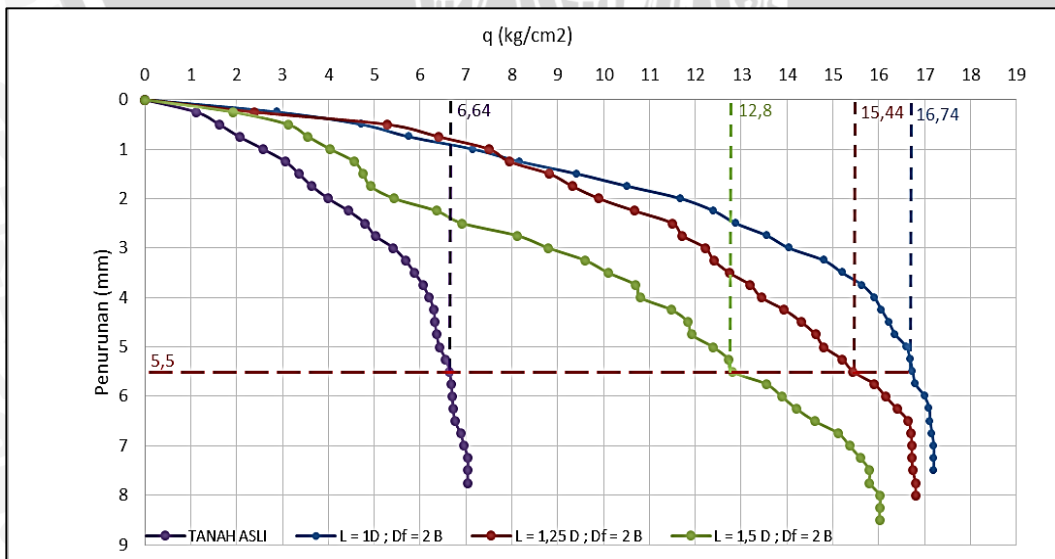


Gambar 4.16 Perbandingan pengaruh variasi jarak (L) terhadap nilai BCIu

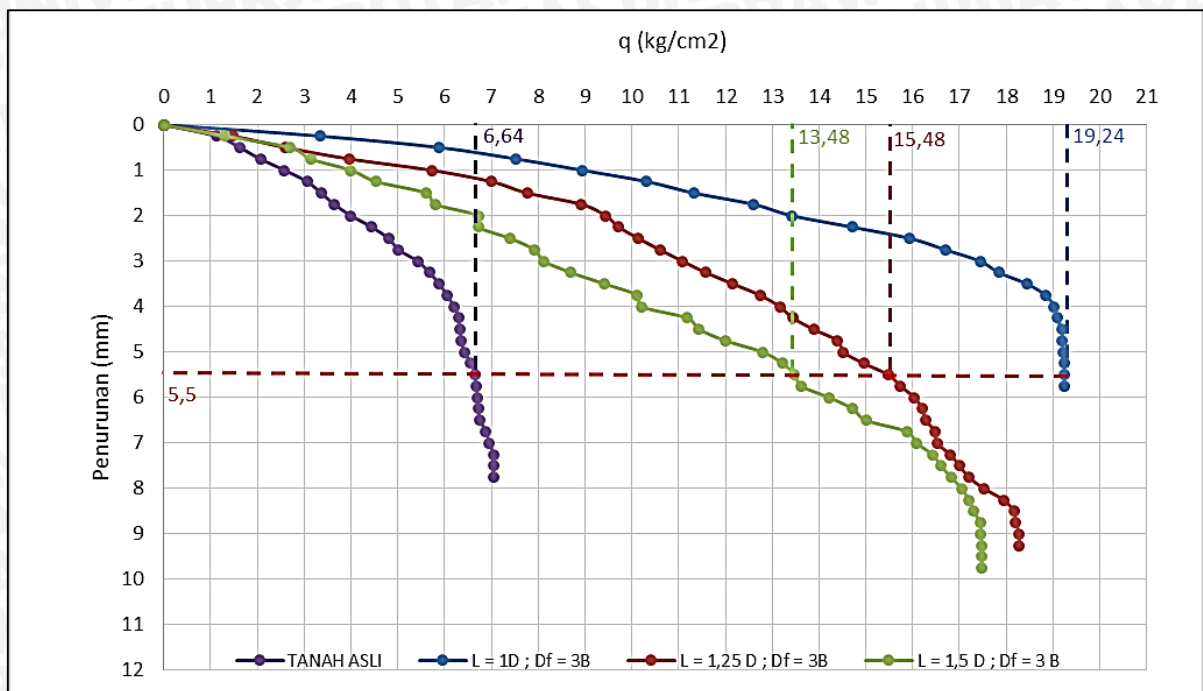
Dari Gambar 4.15 dapat terlihat bahwa peningkatan daya dukung (q_u) yang diakibatkan oleh variasi panjang (Df) mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada masing masing jarak (L) yang berbeda. Sedangkan pada **Gambar 4.16** terlihat bahwa peningkatan daya dukung (q_u) yang diakibatkan oleh pengaruh jarak (L) tergambar naik secara signifikan pada panjang kolom (Df) berbeda. Sehingga dari hal ini dapat dikatakan bahwa peningkatan nilai daya dukung lebih dominan dipengaruhi oleh pengaruh jarak (L) kolom tanah stabilisasi daripada pengaruh panjang (Df) kolom tanah stabilisasi.

4.6.2. Bearing Capacity Improvement Settlement (BCIs)

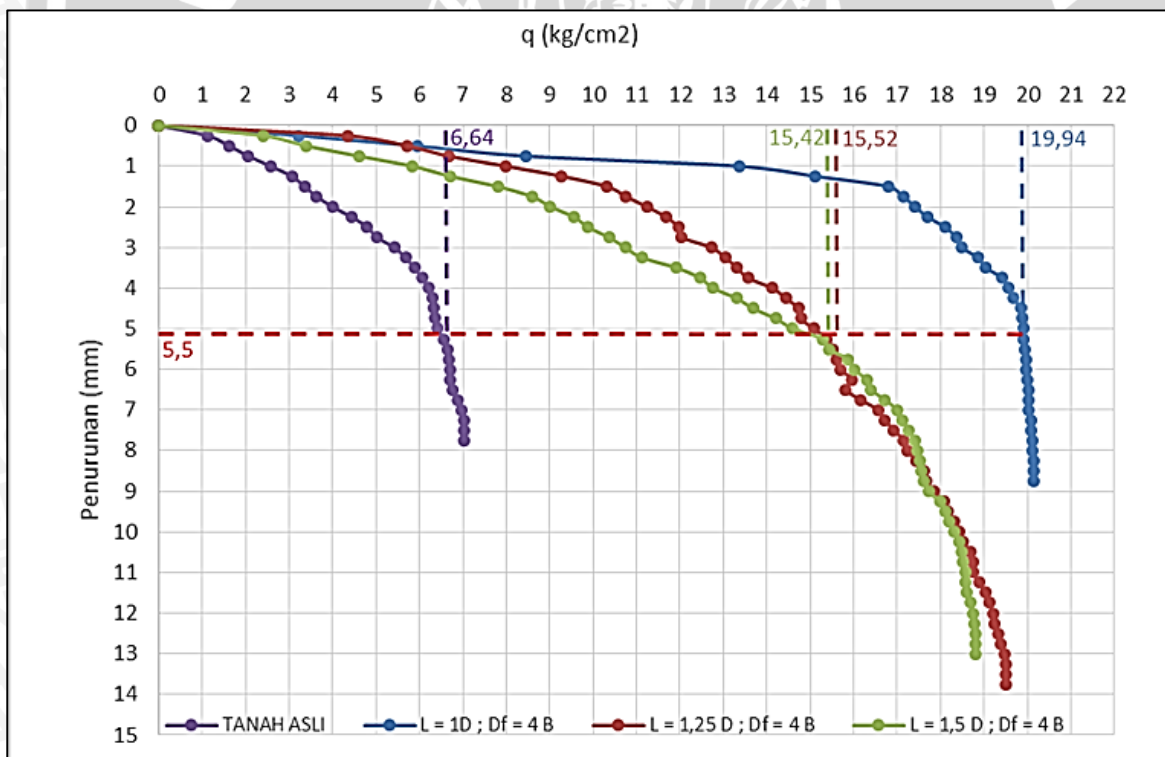
Bearing Capacity Improvement Settlement (BCIs) adalah perbandingan antara daya dukung tanah yang diperkuat terhadap daya dukung tanah tanpa perkuatan namun dengan menggunakan penurunan yang sama pada setiap sampel tanah dengan variasi jarak dan panjang yang berbeda. Untuk lebih jelasnya akan diperlihatkan pada gambar grafik berikut ini.



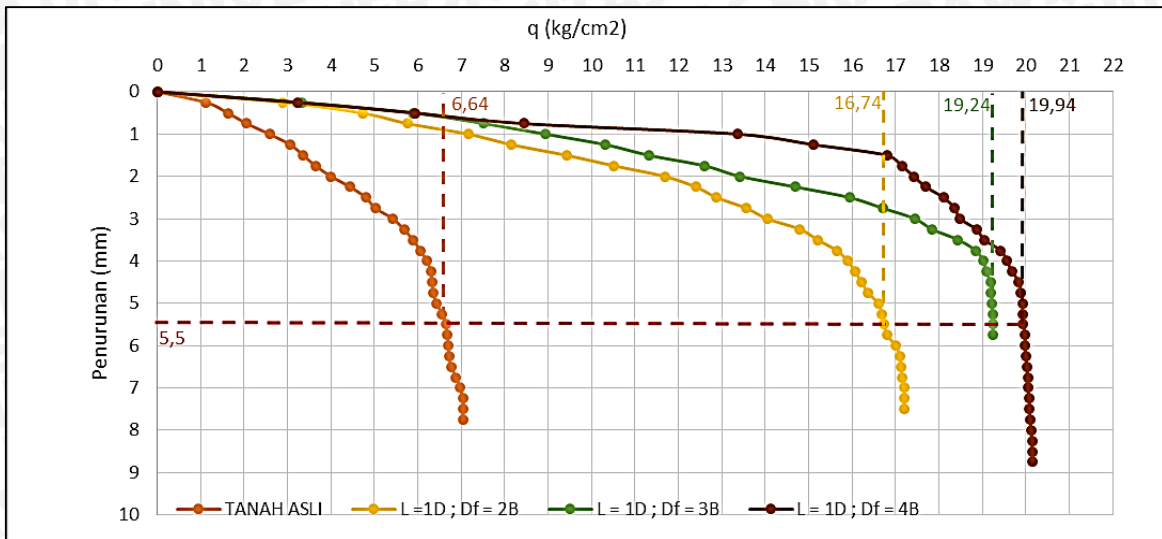
Gambar 4.17. Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap Df = 2B



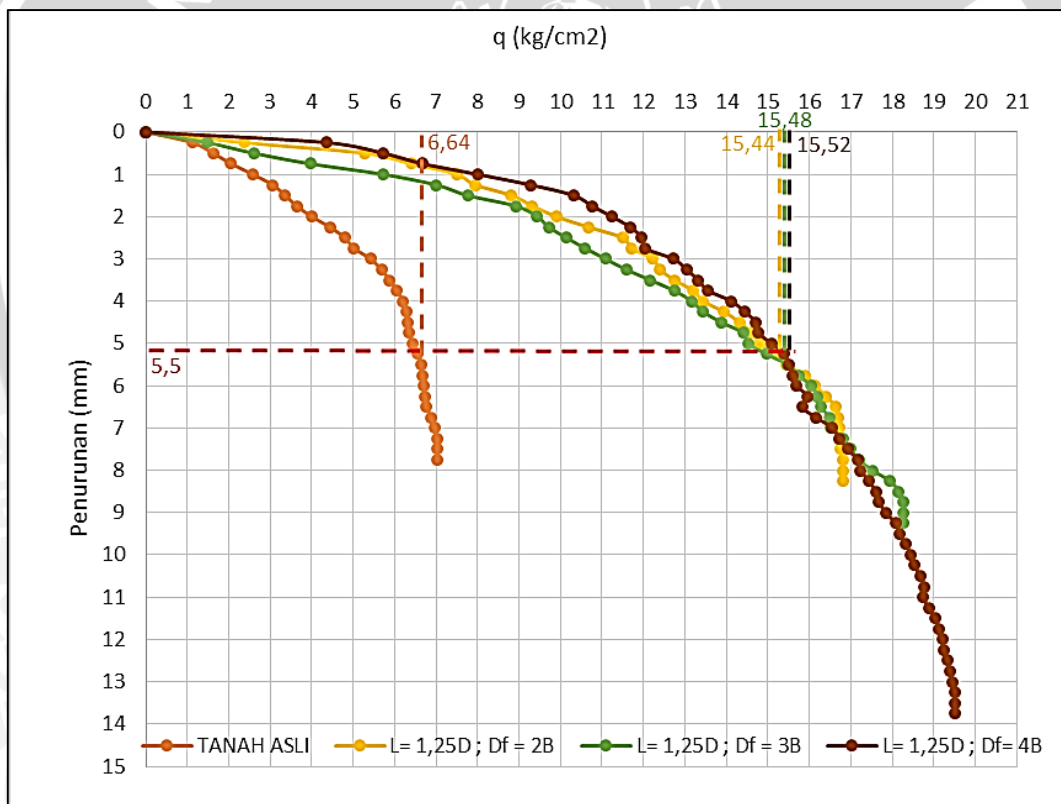
Gambar 4.18. Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap $D_f = 3B$



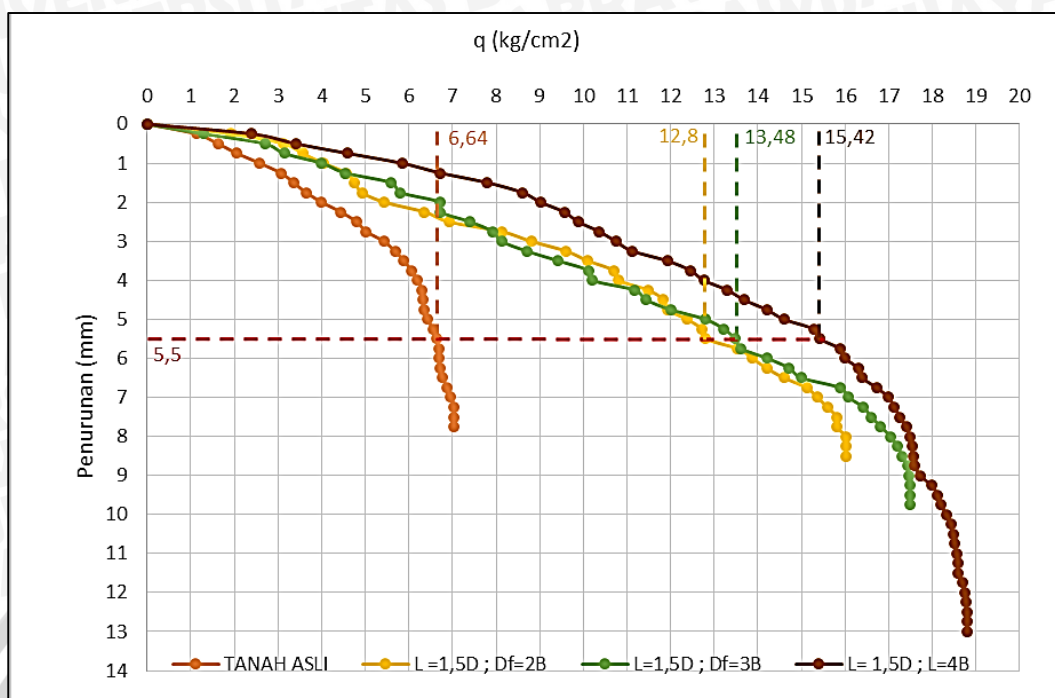
Gambar 4.19 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi jarak terhadap $D_f = 4B$



Gambar 4.20 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi panjang terhadap L= 1D



Gambar 4.21 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi panjang terhadap L=1,25D



Gambar 4.22 Perbandingan nilai q dan penurunan dengan variasi panjang terhadap $L=1,5D$

Dilihat dari grafik perbandingan daya dukung dengan penurunan yang sama pada masing-masing sampel, maka secara keseluruhan nilai daya dukung dan penurunan hasil uji pembebanan dari semua sampel akan ditampilkan pada tabel dibawah. Tabel 4.8 untuk peninjauan pengaruh variabel variasi jarak yang berbeda pada kondisi panjang yang sama dan Tabel 4.9 untuk peninjauan pengaruh variabel panjang yang berbeda pada kondisi jarak yang sama.

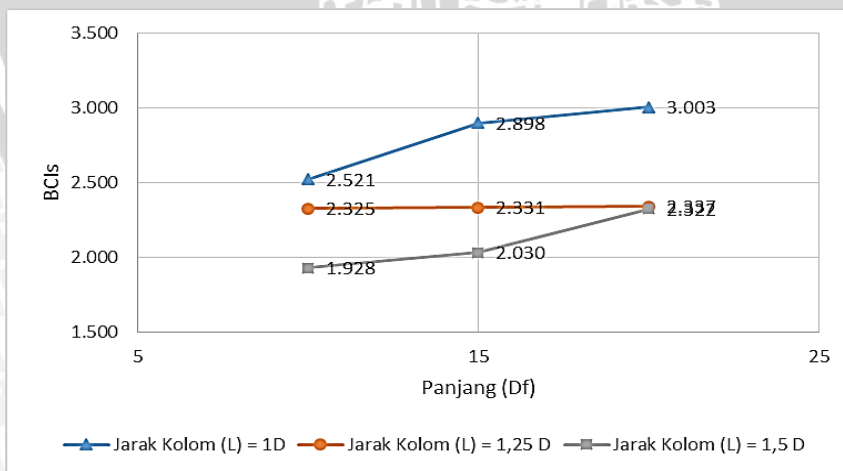
Tabel 4.8 Nilai q dengan penurunan berdasarkan jarak sama panjang berbeda

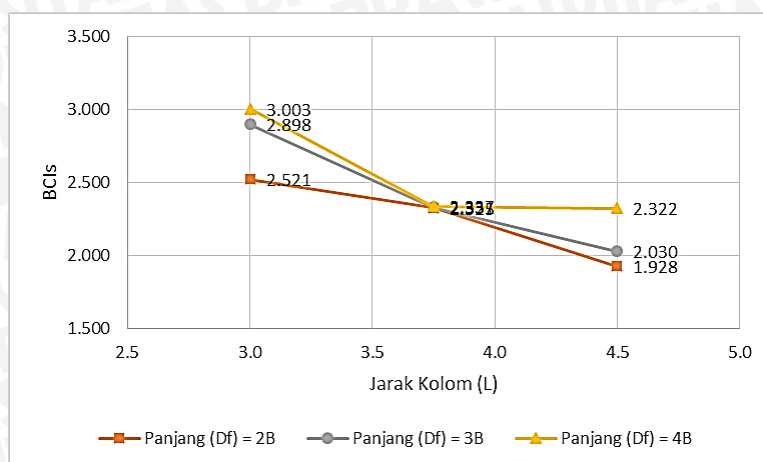
Jenis Sampel	Jarak Kolom (L) cm	Panjang Kolom (Df) cm	P_u	q_u	Penurunan	BCIs
			kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli	1D		166	6.64	5.5	1
		2B	418.5	16.74	5.5	2.521
		3B	481	19.24	5.5	2.898
Tanah Asli + Kapur	1,25 D	4B	498.5	19.94	5.5	3.003
		2B	386	15.44	5.5	2.325
		3B	387	15.48	5.5	2.331
	1,5 D	4B	388	15.52	5.5	2.337
		2B	320	12.8	5.5	1.928
		3B	337	13.48	5.5	2.030
		4B	385.5	15.42	5.5	2.322

Tabel 4.9 Nilai q dengan penurunan berdasarkan panjang sama jarak berbeda

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	P_u	q_u	Penurunan	BCIs
	cm	cm	kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli			166	6.64	5.5	1
	4B	1,5 D	385.5	15.42	5.5	2.322
		1,25 D	388	15.52	5.5	2.337
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	3B	1 D	498.5	19.94	5.5	3.003
		1,5 D	337	13.48	5.5	2.030
	2B	1,25 D	387	15.48	5.5	2.331
		1 D	481	19.24	5.5	2.898
	2B	1,5 D	320	12.8	5.5	1.928
		1,25 D	386	15.44	5.5	2.325
	1 D	418.5	16.74	5.5	2.521	

Dari Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa prosentase peningkatan daya dukung akibat stabilisasi kapur dengan metode DSM terhadap tanah asli dilihat dari nilai BCIs yang lebih besar dari 1 dan terlihat pula prosentase peningkatan daya dukung antar variasi dengan penurunan yang berbeda. Dari tabel tersebut dapat pula dikatakan bahwa perubahan panjang kolom stabilisasi (Df) berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung (q_u) yang digambarkan oleh nilai BCIs seperti yang disajikan Gambar 4.22, di mana peningkatan q_u bertambah seiring bertambahnya panjang (Df). Di samping panjang (Df), variasi jarak kolom (L) juga mempengaruhi nilai daya dukung (q_u) yang digambarkan oleh nilai BCI seperti yang disajikan pada Gambar 4.23, di mana semakin rapatnya jarak antar kolom stabilisasi maka nilai q_u semakin meningkat.

**Gambar 4.23** Perbandingan pengaruh variasi panjang (Df) terhadap nilai BCIs



Gambar 4.24 Perbandingan pengaruh variasi jarak (L) terhadap nilai BCIs

Dari Gambar 4.23 dapat terlihat bahwa peningkatan daya dukung (q_u) yang diakibatkan oleh variasi panjang (Df) tergambar tidak terlalu signifikan besar seperti pada Gambar 4.24. Hal itu dikarenakan penurunan yang dibandingkan pada kali ini sama, sehingga dapat dikatakan belum pada penurunan ultimate tanah stabilisasi tersebut. Sedangkan pada Gambar 4.24 peningkatan daya dukung (q_u) yang diakibatkan oleh pengaruh jarak (L) tergambar kenaikan daya dukung yang dihasilkan cukup signifikan, dimana terlihat kenaikan daya dukung seperti pada Gambar 4.24.

Sehingga secara keseluruhan peningkatan daya dukung akibat pengaruh variasi jarak maupun panjang terhadap tanah tanpa stabilisasi pada saat penurunan yang sama dapat ditampilkan pada Tabel 4.10.

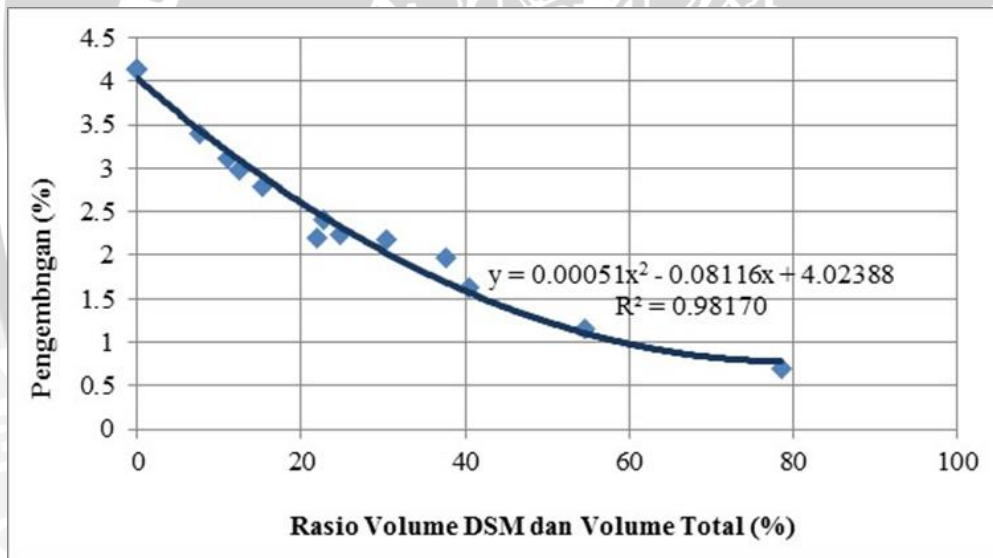
Tabel 4.10 Prosentase peningkatan nilai daya dukung terhadap tanah asli

Perbandingan Pengaruh Variasi Jarak (L) dan Panjang (Df)					
Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (Df)	Prosentase Peningkatan Daya Dukung Terhadap Tanah Asli (%)	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	Prosentase Peningkatan Daya Dukung Terhadap Tanah Asli (%)
	2B	92.771		1,5 D	92.771
1,5 D	3B	103.012	2B	1,25 D	132.530
	4B	132.229		1 D	152.108
1,25 D	2B	132.530		1,5 D	103.012
	3B	133.133	3B	1,25 D	133.133
	4B	133.735		1 D	189.759
1D	2B	152.108		1,5 D	132.229
	3B	189.759	4B	1,25 D	133.735
	4B	200.301		1 D	200.301

Dari Tabel 4.10 terlihat bahwa tanah yang distabilisasi dengan zat aditif *kapur* pada metode DSM terbukti dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah terhadap tanah asli dengan prosentase peningkatan yang berbeda-beda yang diakibatkan karena pengelompokan pengaruh variasi jarak dan panjang. Namun untuk peningkatan nilai daya dukung yang paling signifikan atau yang terbesar pada penelitian ini adalah ketika tanah distabilisasi dengan jarak paling rapat yaitu 1D dan panjang paling dalam yaitu 4B dengan peningkatan sebesar 200,301 %.

4.7. Pemeriksaan Potensi Mengembang (Swelling)

Pengembangan (*swelling*) adalah perbandingan perubahan tinggi selama perendaman terhadap tinggi sampel semula sebelum dilakukan perendaman yang dinyatakan dalam persentase (%). Uji pengembangan (*swelling*) ini dilakukan dengan kadar air optimum (OMC) dengan memberikan variasi jumlah kolom DSM dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh prosentase tanah yang distabilisasi terhadap nilai *swelling*. Hasil uji *swelling* ditampilkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Grafik Prosentase Stabilisasi Terhadap Nilai *Swelling*

Sumber: Komunikasi pribadi dengan Firdaus (2016)

Dari Gambar 4.25, dapat diketahui bahwa nilai *swelling* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya prosentase tanah yang distabilisasi kolom DSM. Hal ini terjadi karena adanya reaksi *hidrasi* yang ditimbulkan oleh *kapur* yang semakin memperkuat ikatan antar butiran tanah sehingga penyerapan air yang terjadi menjadi lebih sedikit. Oleh karena itu, nilai *swelling* tanah menjadi semakin kecil seiring dengan bertambahnya prosentase tanah yang distabilisasi kolom DSM.

Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai *swelling* berbanding terbalik dengan prosentase tanah yang distabilisasi. Dengan demikian, nilai *swelling* pada benda uji yang dimodelkan di dalam *box* dapat pula diketahui, yakni besarnya prosentase stabilisasi dalam *box* diplotkan pada Gambar 4.25 atau dapat dihitung menggunakan persamaan pada gambar tersebut. Besarnya nilai *swelling* benda uji model dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil Uji Swelling Benda Uji

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi	Penurunan (<i>Swelling</i>)	Pengembangan <i>Swelling</i> dari tanah asli
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4.133	
Tanah Asli + Kolom	L = 3 ; Df = 10 cm	39.27	1.623	60.723
	L = 3,75 ; Df = 10 cm	31.42	1.977	52.155
	L = 4,5 ; Df = 10 cm	26.18	2.249	45.589
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 3 ; Df = 15 cm	58.90	1.013	75.492
	L = 3,75 ; Df = 15 cm	47.12	1.332	67.770
	L = 4,5 ; Df = 15 cm	39.27	1.623	60.723
	L = 3 ; Df = 20 cm	78.54	0.796	80.751
	L = 3,75 ; Df = 20 cm	62.83	0.938	77.306
	L = 4,5 ; Df = 20 cm	52.36	1.173	71.628

Dari Tabel 4.11. tersebut, tanah yang distabilisasi kolom DSM dengan panjang 20 cm memberikan nilai *swelling* yang paling kecil yaitu sebesar 0,796% dan menurun sebesar 80,751% dari tanah sebelum distabilisasi. Dalam jurnal yang berjudul “*Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils*” telah disebutkan bahwa toleransi penurunan maksimum ijin untuk *flexible and rigid pavement structure* adalah sebesar 12 mm . Besar nilai *swelling* pada tanah asli adalah sebesar 4,133%, sedangkan untuk rata-rata tinggi tanah ekspansif di lapangan yaitu 1,5 m. Sehingga Tanah asli mengalami kenaikan sebesar 61,95 mm. Oleh karena itu nilai *swelling* maksimum yang diijinkan untuk memenuhi perbaikan sebesar 12 mm adalah sebesar 0,8%. Dengan demikian perbaikan yang memenuhi adalah Deep Soil Mixing (DSM) dengan ukuran L = 3 ; Df = 20 cm yaitu sebesar 0,796% memiliki kenaikan tanah swelling terhadap tanah asli sebesar 80,751%.

Dengan demikian dapat dikatakan, bahwa panjang kolom yang paling besar dan jarak kolom paling kecil dapat memberikan pengaruh paling besar terhadap penurunan nilai *swelling*. Sehingga dapat dikatakan bahwa stabilisasi menggunakan kolom DSM tipe *Panels* memberikan pengaruh besar terhadap penurunan nilai *swelling* tanah lempung ekspansif di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan paa peneltian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode deep soil mixing (DSM) tipe panels diameter 3 cm terhadap daya dukung tanah, maka dapat ditarik kesimpulan sebebgai berikut :

1. Variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi menggunakan metode DSM dengan konfigurasi panels diameter 3 cm dengan penambahan zat aditif 10% kapur sebagai bahan stabilisasi tanah dapat mempengaruhi peningkatan nilai daya dukung (q_u) terhadap tanah tanpa stabilisasi.
2. Semakin besar jarak antar kolom DSM, maka nilai daya dukung semakin menurun . Sedangkan semakin besar panjang kolom DSM, nilai daya dukung yang dihasilkan semakin meningkat.
3. Jarak dan panjang kolom yang dapat menghasilkan nilai daya dukung maksimum yaitu jarak antar kolom terkecil dengan panjang kolom terbesar. Yaitu pada jarak $L=1D$ dan panjang $D_f = 4B$.
4. Stabilisasi dengan bahan aditif *kapur* pada metode DSM dapat mengurangi nilai pengembangan (*swelling*) seiring dengan meningkatnya volume tanah yang distabilisasi.

5.2. Saran

Dari analisis dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka muncul saran-saran yang berfungsi sebagai pengembangan penelitian tentang stabilisasi tanah dengan metode *Deep Soil Mix* lebih lanjut. Adapun saran-saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Perlu dilakukan variasi mengenai lama waktu pemeraman (*curing*) benda uji untuk mendapatkan waktu yang diperlukan tanah agar mendapatkan nilai daya dukung paling optimum.

2. Perlu dilakukan penambahan variasi jarak dan panjang kolom untuk mengetahui jarak dan panjang yang optimum dimana nilai daya dukung tanah tidak mengalami peningkatan lagi.
3. Pemodelan benda uji sebaiknya dilakukan di dalam *box* yang lebih besar dan *rigid* agar ketika dipadatkan atau diberikan beban, luasan dan *volume* tanah dapat dipertahankan sesuai dengan yang direncanakan.



DAFTAR PUSTAKA

- AustStab. 2008. *Lime Stabilisation Practice. AustStab Technical Note No.1F*. Australian Stabilisation Industry Association. Chatswood, NSW
- Badan Standardisasi Nasional.(2008). *SNI 6424:2008. Cara uji potensi pengembangan atau penurunan satu dimensi tanah kohesif*. Jakarta : Badan Standardisasi Nasional
- Bouassida, M & Porbaha, A. 2004. Ultimate Bearing Capacity of Soft Clays reinforced by a Group of Columns-Application to a Deep Mixing Technique. *Soil and Foundations*.44.(3):91-101
- Bowles, Joseph. 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Terjemahan Johan K Hainim Jakarta : Erlangga
- Chen, F. H. 1975. *Foundaion on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B.M. 1985. *Mekanika Tanah*. Erlangga: Jakarta.
- Das, B.M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Erlangga: Jakarta
- Das, B.M. 2006. *Principles of Geotechnical Engineering (Sixth Edition)*. Thomson: Kanada
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif Untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- 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 dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H.C. 1992. *Mekanika Tanah 1*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama
- Hardiyatmo, HC. 2006. *Mekanika Tanah 1 (Edisi Keempat)*. Gajah Mada University Press: Yogyakarta.
- J. Puppala, Annad et al. 2008. *Deep Soil Mixing Technology for Mitigation of Pavement Roughness*. Texas: The University of Texas at Arlington.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on the Transition Zone and the Boundary Layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Msc Thesis Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm.
- Madhyannapu, Raja.S and Puppala, Anand J.2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*140. (04014051):1-15
- Muntohar, Agus Setyo. 2009. Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban-Penurunan dengan Perkuatan Kolom Kapur di Laboratorium. *Dinamika Teknik Sipil*.
- Soedarmo, G. D. Dan Purnomo, S. J. E. 1997. *Mekanika Tanah 1*. Jogjakarta: Kanisius
- Warsiti, 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Wahana Teknik Sipil*. 14 (1):38-45

LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengujian Kadar Air Tanah Asli (*Undisturbed Sample*)

Container no. (cup)		1	2	3
Mass of cup + wet soil	gram	21.6	23.56	21.93
Mass of cup + dry soil	gram	16.8	18.1	16.9
Mass of cup	gram	5.48	6.05	5.95
Mass of dry soil, Ms	gram	11.28	12.1	11.0
Mass of water, Mw	gram	4.84	5.4	5.0
Water content, w %	%	42.91	44.83	45.94
WC Average, %	%	44.56		

Lampiran 2. Pengujian Berat Isi Tanah (*Undisturbed Sample*)

Ring No.		I	II
Mass of wet soil + ring	gram	36.20	36.60
Mass of ring	gram	18.5	18.5
Diameter ring	cm	2.3	2.3
Height of ring	cm	2.6	2.6
Volume of ring	cm ³	10.81	10.81
Mass of soil	gram	17.70	18.10
Soil unit weight (γ_t)	gr/cm ³	1.638	1.675
Water content	%	44.56	44.56
Dry density of soil, (γ_d)	gr/cm ³	1.133	1.159
Average soil unit weight	gr/cm ³	1.656	
Average Dry density of soil	gr/cm ³	1.146	

Lampiran 3. Pengujian Berar Jenis Tanah Asli (*Specific Gravity*)
SNI 1964 : 2008 (ASTM D 854 – 58)

Nomor contoh dan kedalaman			-	
Nomor piknometer			A 6	A 10
Berat piknometer + tanah	W_2	(gram)	69.78	70.36
Berat piknometer	W_1	(gram)	49.66	50.35
Berat tanah	$W_t = W_2 - W_1$	(gram)	20.12	20.01
Temperatur °C			27	
Berat piknometer + air + tanah pada temperatur 27 °C	W_3	(gram)	160.91	161.52
Berat piknometer + air	W_4		149.18	149.87
Faktor Kalibrasi			0.9965	
Berat piknometer + air pada 27 °C	W_5	(gram)	148.66	149.35
$W_6 = W_t + W_5$		(gram)	168.78	169.36
Berat jenis (G_s)	$\frac{W_t}{W_6 - W_3}$		2.557	2.554
Rata - rata (G_s)			2.556	

Tabel Hubungan antara Kerapatan Relatif Air dan Faktor Konversi K dalam Temperatur

No.	Temperatur, derajat Celcius	Hubungan kerapatan relatif air	Faktor koreksi K
1.	18	0,9986244	1,0004
2.	19	0,9984347	1,0002
3.	20	0,9982343	1,0000
4.	21	0,9980233	0,9998
5.	22	0,9978019	0,9996
6.	23	0,9975702	0,9993
7.	24	0,9973286	0,9991
8.	25	0,9970770	0,9989
9.	26	0,9968156	0,9986
10.	27	0,9965451	0,9983
11.	28	0,9962652	0,9980
12.	29	0,9939761	0,9977
13.	30	0,9956780	0,9974

Sumber: SNI 1964 (2008:4)

Lampiran 4. Analisa Saringan dan Hydrometer

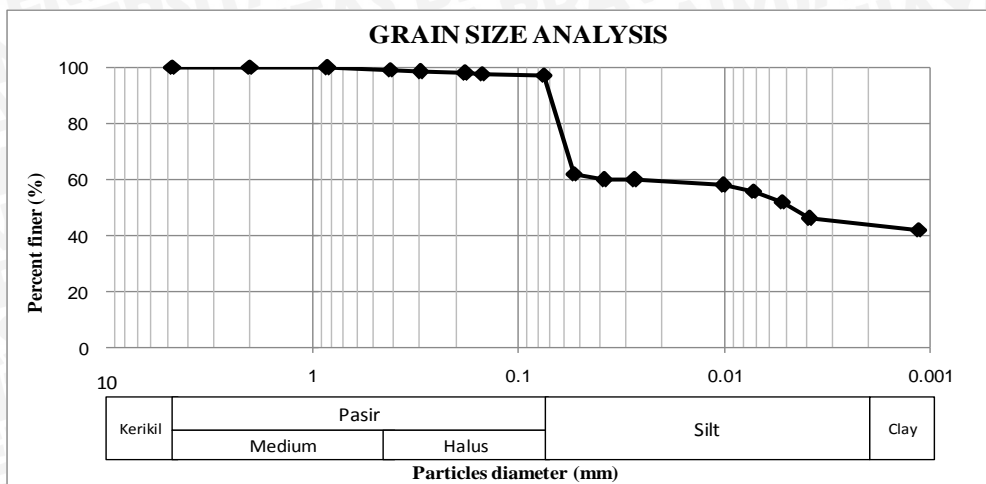
Analisa Saringan (*Grain Size*)

Sieve		Indiv. WT Retained	Acc. WT Retained	Retained (%)	Finer (%)
Sieve No.	Diameter (mm)	(gram)	(gram)		
4	4.75	0	0	0.0	100
10	2	0.03	0.03	0.02	99.99
20	0.84	0.61	0.64	0.32	99.68
40	0.42	1.27	1.91	0.96	99.05
50	0.3	1.47	3.38	1.69	98.31
80	0.18	1.02	4.40	2.20	97.80
100	0.15	0.53	4.93	2.47	97.54
200	0.075	1.02	5.95	2.98	97.03
Pan		194.05	200.00	100	0.00

Analisa Hydrometer

Tipe hydrometer : 151 H Gs : 2.556
 Berat contoh tanah : 50 gr Ct 26 : 0.00165
 Koreksi meniscus : 0.001 a : 1.023
 Koreksi nol hydrometer : -0.0005

Elapsed time	Temp.	Actual Hyd. Reading (Ra)	Hyd. Correction Reading (Rc)	Finer	Meniscus Correction (R)	Effective Depth (L)	V = L/t	K From table	Diameter (D)	Acc. Finer
(min)	(°C)			(%)		(cm)			(mm)	(%)
0	26	1.029	1.0312	63.72	1.030	8.4	-	-	-	61.82
0.5	26	1.029	1.0312	63.72	1.030	8.4	16.8	0.0131	0.0537	61.82
1	26	1.028	1.0302	61.67	1.029	8.6	8.6	0.0131	0.0384	59.84
2	26	1.028	1.0302	61.67	1.029	8.6	4.3	0.0131	0.0272	59.84
15	26	1.027	1.0292	59.63	1.028	8.9	0.5933	0.0131	0.0101	57.86
30	26	1.026	1.0282	57.58	1.027	9.2	0.3067	0.0131	0.0073	55.87
60	26	1.024	1.0262	53.49	1.025	9.7	0.1617	0.0131	0.0053	51.90
120	26	1.021	1.0232	47.36	1.022	10.5	0.0875	0.0131	0.0039	45.95
1440	26	1.019	1.0212	43.26	1.020	11	0.0076	0.0131	0.0011	41.98

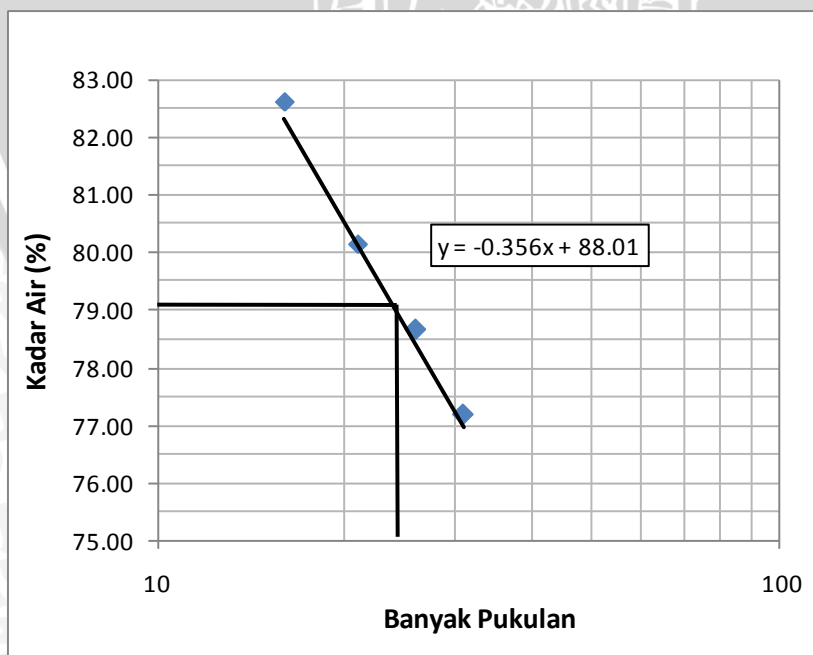


Gambar. Distribusi Butiran Hasil Uji Analisa Saringan dan Hydrometer

Lampiran 5. Pengujian Batas-batas Atterberg

Pengujian Batas Cair Tanah

Nomor cawan		I	II	III	IV
Berat cawan + tanah basah	(gram)	20.37	20.76	23.75	19.71
Berat cawan + tanah kering	(gram)	13.72	14.02	15.94	13.76
Berat cawan	(gram)	5.67	5.61	6.01	6.05
Berat tanah kering	(gram)	8.05	8.41	9.93	7.71
Berat air	(gram)	6.65	6.74	7.81	5.95
Kadar air, w %		82.61	80.14	78.65	77.17
Banyak pukulan		16	21	26	31



Gambar. Pengujian Batas Cair

Nilai batas cair (LL) = 79.11 %

Pengujian Batas Plastis Tanah

Nomor cawan		I	II	III
Berat cawan + tanah basah	(gram)	10.96	12.44	11.94
Berat cawan + tanah kering	(gram)	9.68	10.95	10.51
Berat cawan	(gram)	5.49	6.22	6.02
Berat tanah kering	(gram)	4.19	4.73	4.49
Berat air	(gram)	1.28	1.49	1.43
Kadar air, w %		30.55	31.50	31.85
Kadar air rata-rata		31.30		

Nilai batas plastis (PL) = **31.30 %**

Nilai indeks plastisitas tanah (PI) = LL – PL

$$= 79.11 - 31.30 = \mathbf{47.81 \%}$$

Pengujian Batas Susut Tanah

Nomor Cawan		1
Berat Cetakan	gr	19.17
Berat Cawan + Tanah Basah	gr	56.82
Berat Cawan + Tanah Kering	gr	42.59
Berat Tanah Basah (m ₁)	gr	37.65
Berat Air	gr	14.23
Berat Tanah Kering (m ₂)	gr	23.42
Volume Tanah Basah (V)	ml	25
Volume Tanah Kering (V _s)	ml	14
Kadar Air (w)	%	60.76
SL = $(w - ((V - V_s) / m_2)) * 100\%$	%	13.79

Nilai batas susut (SL) = **13.79 %**

Rekapitulasi Batas-batas *Atterberg* :

LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
79.11	31.30	13.79	47.81

Lampiran 6. Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli

Diketahui:

Berat cetakan = 4600 gram

Diameter cetakan = 15,5 cm

Tinggi cetakan = 11 cm

Kadar air:

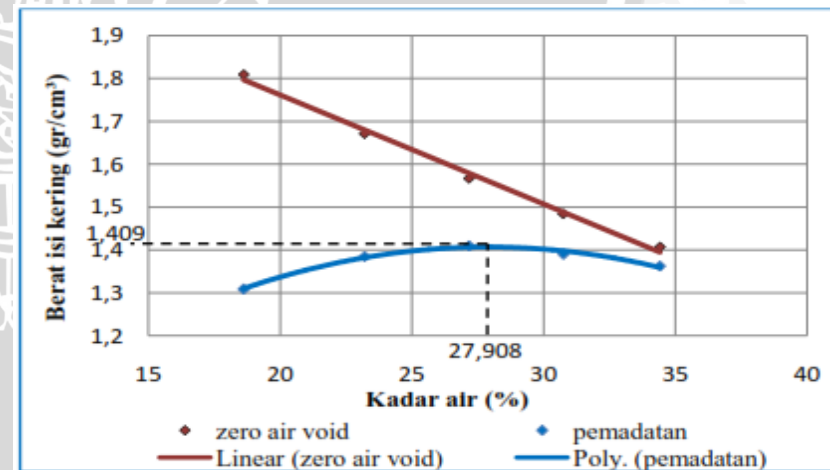
Penambahan Air	ml	400			550			700			850			1000		
		Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah
berat cawan	gr	4,00	4,00	4,00	3,90	4,00	4,00	4,00	4,10	8,20	4,00	7,80	4,00	3,90	4,10	8,10
berat tanah basah + cawan	gr	18,10	14,70	18,10	21,30	26,90	20,70	30,60	36,30	37,00	48,90	42,60	28,50	34,90	34,70	37,10
berat tanah kering + cawan	gr	15,90	13,00	15,90	18,10	22,70	17,40	24,80	29,50	30,90	38,30	34,50	22,70	27,00	26,80	29,70
berat air (Ww)	gr	2,2	1,7	2,2	3,2	4,2	3,3	5,8	6,8	6,1	10,6	8,1	5,8	7,9	7,9	7,4
berat tanah kering (Ws)	gr	11,9	9	11,9	14,2	18,7	13,4	20,8	25,4	22,7	34,3	26,7	18,7	23,1	22,7	21,6
kadar air	%	18,487	18,889	18,487	22,535	22,460	24,627	27,885	26,772	26,872	30,904	30,337	31,016	34,199	34,802	34,259
kadar air rata-rata	%	18,621			23,207			27,176			30,752			34,420		

Berat isi:

Penambahan Air	ml	400	550	700	850	1000
berat cetakan	gr	2580	2580	2580	2580	2580
berat tanah basah + cetakan	gr	5800	6120	6300	6350	6380
berat tanah basah	gr	3220	3540	3720	3770	3800
isi cetakan	cm ³	2074,559	2074,5588	2074,5588	2074,559	2074,559
berat isi basah (yw)	gr/cm ³	1,552	1,706	1,793	1,817	1,832
berat isi kering (yd)	gr/cm ³	1,308	1,385	1,410	1,390	1,363

Zero Air Void:

Penambahan Air	ml	400	550	700	850	1000
kadar air (w)	%	18,621	23,207	27,176	30,752	34,420
GS	gr/cm ³	2,730	2,730	2,730	2,730	2,730
berat jenis air (yw)		1	1	1	1	1
berat jenis zero air void (γ _{zav})		1,810	1,671	1,567	1,484	1,407



Perhitungan berat isi kering maksimum:

$$y = -0,001125x^2 + 0,062794x + 0,531061$$

$$\frac{dy}{dx} = -0,00225x + 0,06279 = 0$$

$$x = 27,908$$

Sehingga,

$$y = -0,001125.(27,908)^2 + 0,06279.(27,908) + 0,531061$$

$$y = 1,4073$$

Maka diperoleh kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum (γ_d) sebesar 1,407 gr/cm³.

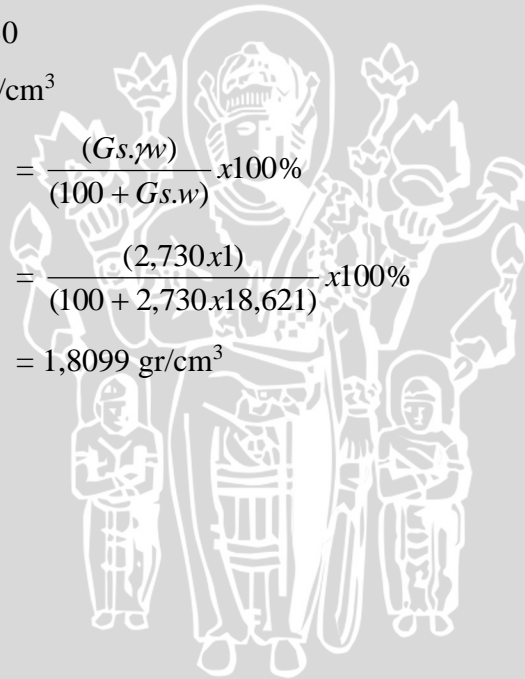
Perhitungan zero air void:

$$\text{Kadar air (w)} = 18,621\%$$

$$\text{Berat jenis (Gs)} = 2,730$$

$$\text{Berat jenis air } (\gamma_w) = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Kepadatan kering } \gamma_{zav} &= \frac{(Gs \cdot w)}{(100 + Gs \cdot w)} \times 100\% \\ &= \frac{(2,730 \times 1)}{(100 + 2,730 \times 18,621)} \times 100\% \\ &= 1,8099 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$



Lampiran 7. Pemeriksaan Pemadatan Standar Tanah Stabilisasi Kapur (Metode B)

Blows/ Layer	=	56 x	
No. of Layers	=	3	
Wt. of Hammer	=	2.5	kg
Berat Mold	=	6060	gram
Diameter Mold	=	15.4	cm
Tinggi cetakan	=	10.9	cm

Kadar air :

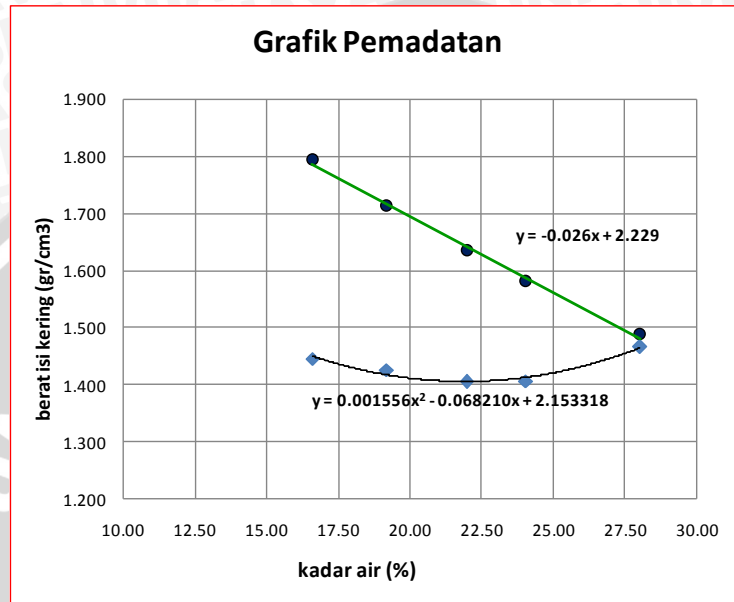
Penambahan Air	ml	400			500			600			700			900		
		Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah
berat cawan	gr	5.47	5.72	6.22	5.55	5.45	5.56	4.20	5.94	5.70	5.87	6.07	4.22	4.04	4.14	4.16
berat tanah basah + cawan	gr	26.54	33.37	27.83	31.58	24.61	33.55	33.25	27.68	26.84	33.33	24.48	41.26	32.00	44.20	42.85
berat tanah kering + cawan	gr	23.57	29.40	24.75	27.42	21.54	28.98	28.00	23.78	23.02	28.01	20.92	34.02	26.00	35.34	34.30
berat air (Ww)	gr	2.97	3.97	3.08	4.16	3.07	4.57	5.25	3.9	3.82	5.32	3.56	7.24	6	8.86	8.55
berat tanah kering (Ws)	gr	18.10	23.68	18.53	21.87	16.09	23.42	23.8	17.84	17.32	22.14	14.85	29.8	21.96	31.2	30.14
kadar air	%	16.409	16.765	16.622	19.021	19.080	19.513	22.059	21.861	22.055	24.029	23.973	24.295	27.322	28.397	28.368
kadar air rata-rata	%	16.60			19.20			21.99			24.10			28.03		

Berat isi :

Penambahan Air	ml	400	500	600	700	900
berat cetakan	gr	6060	6060	6060	6060	6060
berat tanah basah + cetakan	gr	9480	9510	9540	9600	9870
berat tanah basah	gr	3420	3450	3480	3540	3810
isi cetakan	cm ³	2029.26	2029.260	2029.2595	2029.2595	2029.2595
berat isi basah (yw)	gr/cm ³	1.685	1.700	1.715	1.744	1.878
berat isi kering (yd)	gr/cm ³	1.445	1.426	1.406	1.406	1.466

Zero air void :

Penambahan Air	ml	400	500	600	700	900
kadar air (w)	%	16.60	19.20	21.99	24.10	28.03
GS		2.556	2.556	2.556	2.556	2.556
berat jenis air (γ_w)	gr/cm ³	1	1	1	1	1
berat jenis zero air void (γ_{zav})	gr/cm ³	1.795	1.714	1.636	1.582	1.489

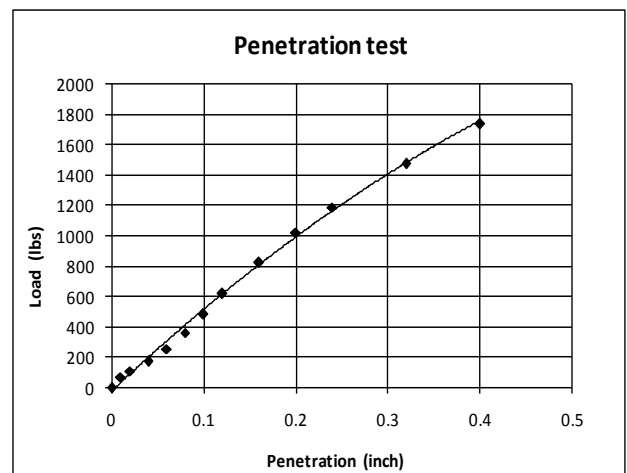


Lampiran 8. Pemeriksaan California Bearing Ratio (CBR) Tanah Stabilisasi Kapur

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur
 Penambahan air = 400 ml
 Kadar air = 16,60 %
 Kepadatan isi kering = 1,445 gr/cm³

Penetration test

Penetration Dial (mm)	Penetration Dial (inch)	Dial Reading	Load (lbs)
0	0	0.0	0
0.25	0.01	6.0	70
0.5	0.02	9.5	111
1	0.04	15.0	175
1.5	0.06	22.0	256
2	0.08	31.0	361
2.5	0.1	41.5	483
3	0.12	53.0	617
4	0.16	71.0	827
5	0.2	88.0	1025
6	0.24	102.0	1188
8	0.32	127	1480
10	0.4	149.5	1742



CBR Value

Penetration Dial	Load (lbs)	CBR Value (%)
0.1"	483.48	16.116
0.2"	1025.20	22.782

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur

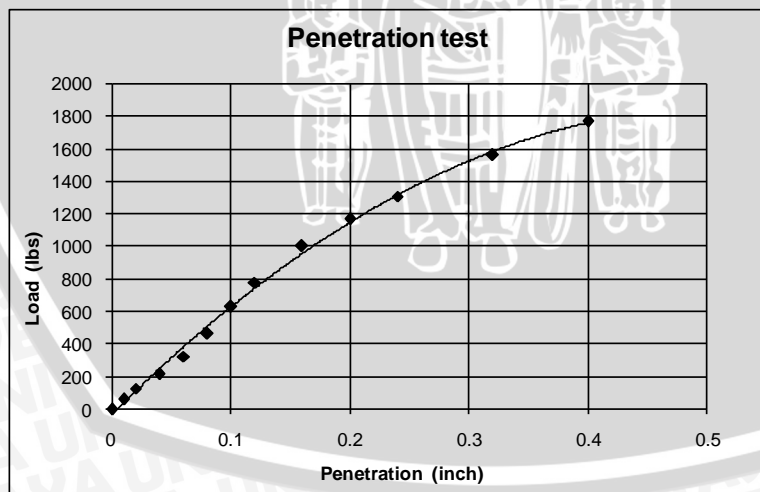
Penambahan air = 500 ml

Kadar air = 19,20 %

Kepadatan isi kering = 1,426 gr/cm³

Penetration test

Penetration Dial (mm)	Penetration Dial (inch)	Dial Reading	Load (lbs)
0	0	0	0
0.25	0.01	5.0	58
0.5	0.02	11.0	128
1	0.04	18.5	216
1.5	0.06	28.0	326
2	0.08	40.0	466
2.5	0.1	54.0	629
3	0.12	67.0	781
4	0.16	86.0	1002
5	0.2	100.5	1171
6	0.24	112.5	1311
8	0.32	134	1561
10	0.4	152	1771



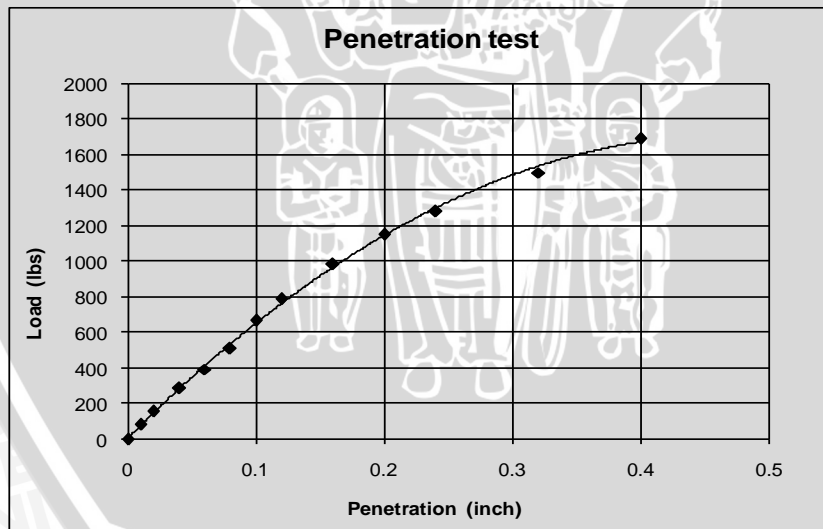
CBR Value

Penetration Dial	Load (lbs)	CBR Value (%)
0.1"	629.10	20.970
0.2"	1170.83	26.018

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur
 Penambahan air = 600 ml
 Kadar air = 21,99 %
 Kepadatan isi kering = 1,406 gr/cm³

Penetration test

Penetration Dial (mm)	Penetration Dial (inch)	Dial Reading	Load (lbs)
0	0	0.0	0
0.25	0.01	7.0	82
0.5	0.02	13.5	157
1	0.04	25.0	291
1.5	0.06	34.0	396
2	0.08	44.0	513
2.5	0.1	57.5	670
3	0.12	68.0	792
4	0.16	85.0	990
5	0.2	99.0	1153
6	0.24	110.5	1287
8	0.32	129	1503
10	0.4	145.5	1695



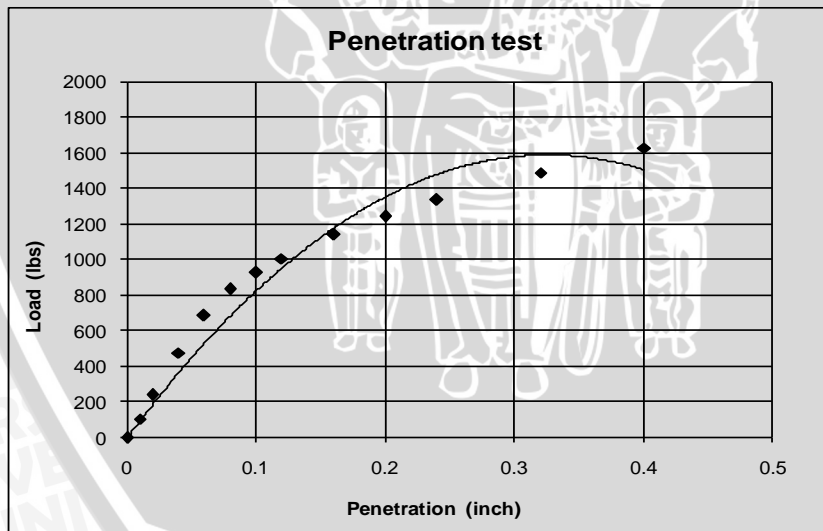
CBR Value

Penetration Dial	Load (lbs)	CBR Value (%)
0.1"	669.88	22.329
0.2"	1153.35	25.630

- Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur
- Penambahan air = 700 ml
- Kadar air = 24,10 %
- Kepadatan isi kering = 1,406 gr/cm³

Penetration test

Penetration Dial (mm)	Penetration Dial (inch)	Dial Reading	Load (lbs)
0	0	0.0	0
0.25	0.01	9.0	105
0.5	0.02	20.5	239
1	0.04	41.0	478
1.5	0.06	59.0	687
2	0.08	71.5	833
2.5	0.1	79.5	926
3	0.12	86.5	1008
4	0.16	98.0	1142
5	0.2	107.0	1247
6	0.24	115.0	1340
8	0.32	128	1491
10	0.4	140	1631



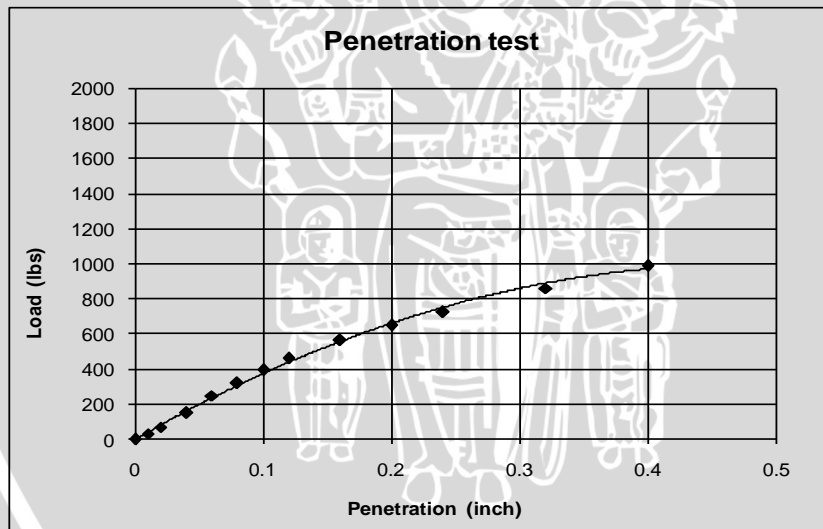
CBR Value

Penetration Dial	Load (lbs)	CBR Value (%)
0.1"	926.18	30.873
0.2"	1246.55	27.701

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur
 Penambahan air = 900 ml
 Kadar air = 28,03 %
 Kepadatan isi kering = 1,466 gr/cm³

Penetration test

Penetration Dial (mm)	Penetration Dial (inch)	Dial Reading	Load (lbs)
0	0	0.0	0
0.25	0.01	3.0	35
0.5	0.02	6.0	70
1	0.04	13.0	151
1.5	0.06	21.5	250
2	0.08	27.5	320
2.5	0.1	34.0	396
3	0.12	39.5	460
4	0.16	48.5	565
5	0.2	56.0	652
6	0.24	62.5	728
8	0.32	74	862
10	0.4	85	990



CBR Value

Penetration Dial	Load (lbs)	CBR Value (%)
0.1"	396.10	13.203
0.2"	652.40	14.498

Tabel Rekapitulasi Nilai CBR 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

Lampiran 9. Hasil Uji *Density* pada Tanah Model (Tanah Dasar)

Ring No.		I	II	III	IV
Mass of wet soil + ring	gram	35.95	35.34	35.87	35.18
Mass of dry soil + ring	gram	32.05	31.62	31.98	31.35
Mass of ring	gram	18.06	18.06	18.06	17.84
Diameter ring	cm	2.3	2.3	2.3	2.3
Height of ring	cm	2.60	2.60	2.60	2.55
Volume of ring	cm ³	10.80	10.80	10.80	10.59
Mass of wet soil	gram	17.89	17.28	17.81	17.34
Mass of dry soil	gram	13.99	13.56	13.92	13.51
Mass of water	gram	3.90	3.72	3.89	3.83
Water content	%	27.88	27.43	27.95	28.35
Soil unit weight (γ_t)	gr/cm ³	1.656	1.600	1.649	1.637
Dry density of soil, (γ_d)	gr/cm ³	1.295	1.255	1.289	1.275
Average soil unit weight	gr/cm ³	1.635			
Average dry density of soil	gr/cm ³	1.279			

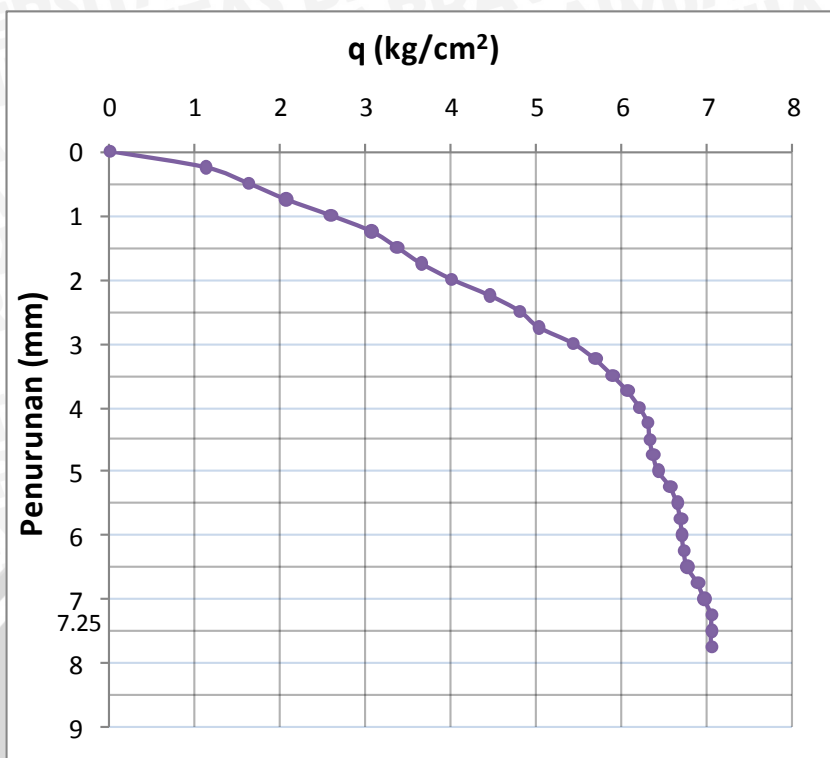
Lampiran 10. Hasil Uji Pembebanan (*Load Test*)

- Hasil Uji Beban pada Tanah Asli

Faktor kalibrasi alat LVDT = 0,005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
4500	0	0	0	25	0
4450	50	0.25	28	25	1.12
4400	100	0.5	40.5	25	1.62
4350	150	0.75	51.5	25	2.06
4300	200	1	64.5	25	2.58
4250	250	1.25	76.5	25	3.06
4200	300	1.5	84	25	3.36
4150	350	1.75	91	25	3.64
4100	400	2	100	25	4
4050	450	2.25	111	25	4.44
4000	500	2.5	120	25	4.8
3950	550	2.75	125.5	25	5.02
3900	600	3	135.5	25	5.42
3850	650	3.25	142	25	5.68
3800	700	3.5	147	25	5.88
3750	750	3.75	151.5	25	6.06
3700	800	4	155	25	6.2
3650	850	4.25	157.5	25	6.3
3600	900	4.5	158	25	6.32
3550	950	4.75	159	25	6.36
3500	1000	5	160.5	25	6.42
3450	1050	5.25	164	25	6.56
3400	1100	5.5	166	25	6.64
3350	1150	5.75	167	25	6.68
3300	1200	6	167.5	25	6.7
3250	1250	6.25	168	25	6.72
3200	1300	6.5	169	25	6.76
3150	1350	6.75	172	25	6.88
3100	1400	7	174	25	6.96
3050	1450	7.25	176	25	7.04
3000	1500	7.5	176	25	7.04
2950	1550	7.75	176	25	7.04

$q_u = 7.04 \text{ kg/cm}^2$



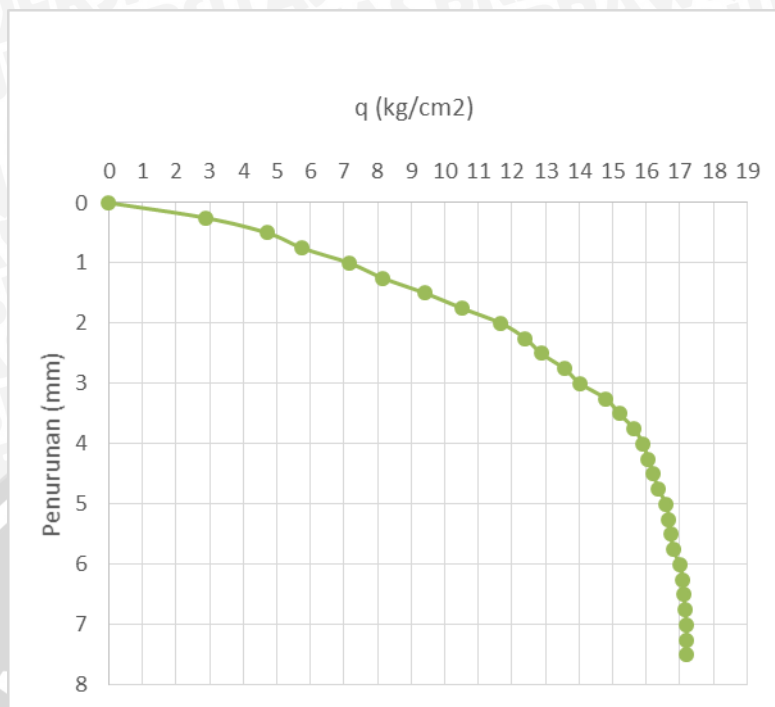
- Hasil Uji Beban pada Tanah Stabilisasi Kolom DSM Tipe Panels Diameter 3 cm

1. Variasi : $L = 1D$ (3 cm) ; $D_f = 10$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
2950	0	0	0	25	0
2900	50	0.25	72	25	2.88
2850	100	0.5	118	25	4.72
2800	150	0.75	144	25	5.76
2750	200	1	179	25	7.16
2700	250	1.25	204	25	8.16
2650	300	1.5	235.5	25	9.42
2600	350	1.75	263	25	10.52
2550	400	2	292	25	11.68
2500	450	2.25	310	25	12.4
2450	500	2.5	322	25	12.88
2400	550	2.75	339	25	13.56
2350	600	3	351	25	14.04
2300	650	3.25	370	25	14.8
2250	700	3.5	380	25	15.2
2200	750	3.75	391	25	15.64
2150	800	4	397.5	25	15.9
2100	850	4.25	401.5	25	16.06
2050	900	4.5	405.5	25	16.22
2000	950	4.75	409	25	16.36
1950	1000	5	415	25	16.6
1900	1050	5.25	417	25	16.68
1850	1100	5.5	418.5	25	16.74
1800	1150	5.75	420	25	16.8
1750	1200	6	425	25	17
1700	1250	6.25	427.5	25	17.1
1650	1300	6.5	428	25	17.12
1600	1350	6.75	429	25	17.16
1550	1400	7	430	25	17.2
1500	1450	7.25	430	25	17.2
1450	1500	7.5	430	25	17.2

$$q_u = 17,2 \text{ kg/cm}^2$$

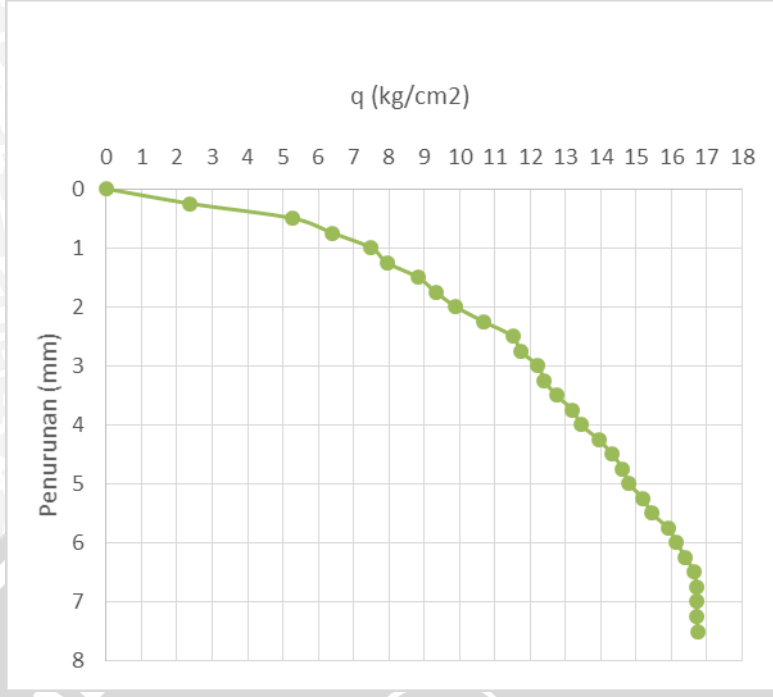
2.



Variasi : $L = 1.25D$ (3,75 cm) ; $D_f = 10$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	A = 5 x 5	q = P/A
2500	0	0	0	25	0
2450	50	0.25	59.5	25	2.38
2400	100	0.5	132	25	5.28
2350	150	0.75	160	25	6.4
2300	200	1	187.5	25	7.5
2250	250	1.25	198.5	25	7.94
2200	300	1.5	220.5	25	8.82
2150	350	1.75	233	25	9.32
2100	400	2	247.5	25	9.9
2050	450	2.25	267	25	10.68
2000	500	2.5	287.5	25	11.5
1950	550	2.75	293	25	11.72
1900	600	3	305.5	25	12.22
1850	650	3.25	310	25	12.4
1800	700	3.5	318.5	25	12.74
1750	750	3.75	330	25	13.2
1700	800	4	336	25	13.44
1650	850	4.25	348.5	25	13.94
1600	900	4.5	358	25	14.32
1550	950	4.75	365.5	25	14.62
1500	1000	5	370	25	14.8
1450	1050	5.25	380	25	15.2
1400	1100	5.5	386	25	15.44
1350	1150	5.75	397.5	25	15.9
1300	1200	6	403.5	25	16.14
1250	1250	6.25	410	25	16.4
1200	1300	6.5	416	25	16.64
1150	1350	6.75	417.5	25	16.7

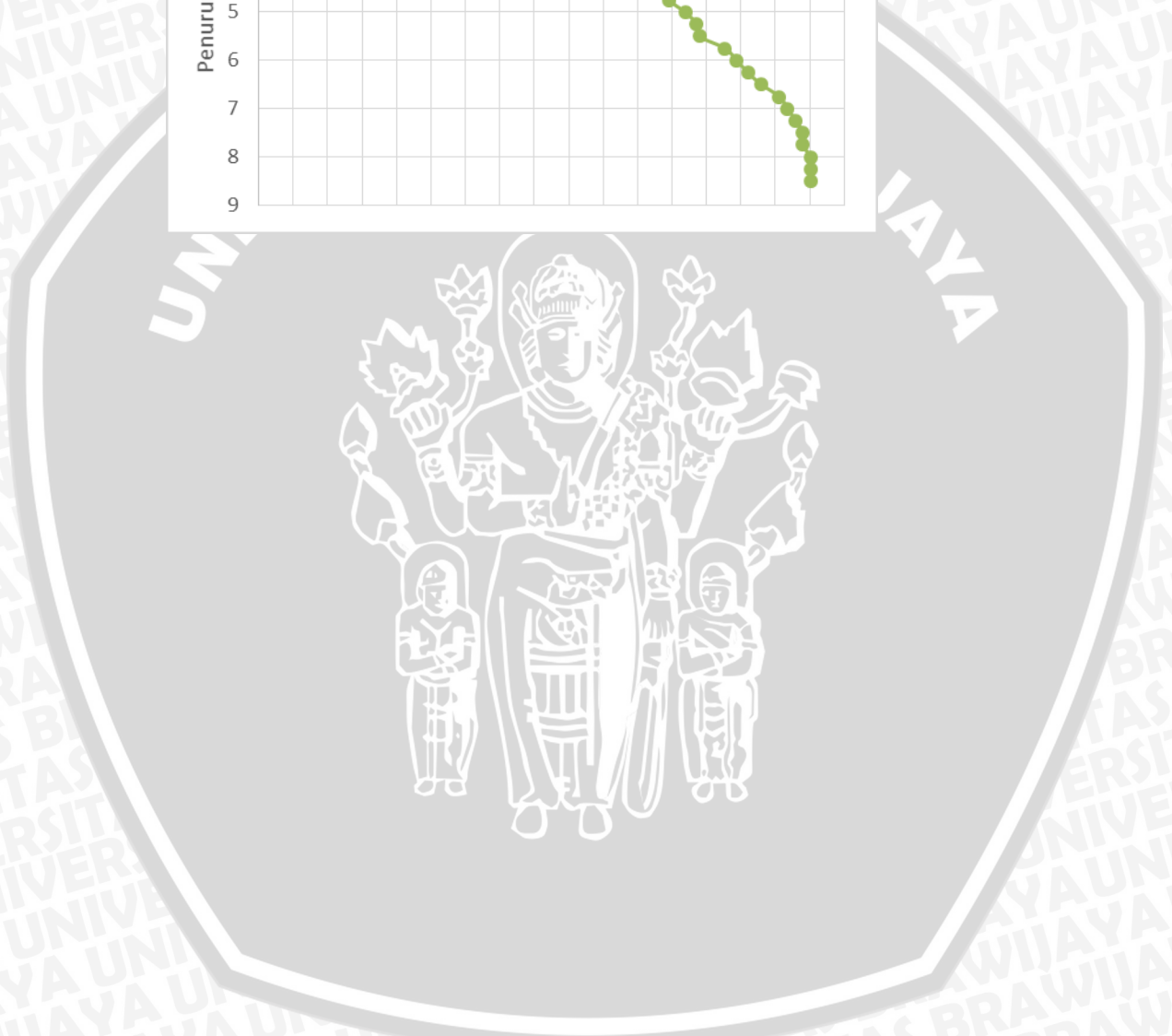
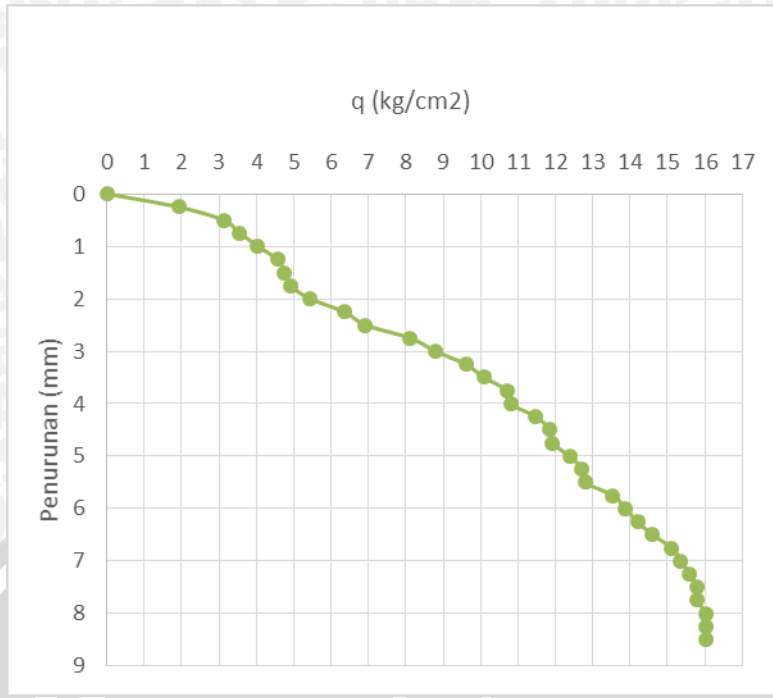
$q_u = 16,7\text{kg/cm}^2$



3. Variasi : $L = 1.5D$ (4,5 cm) ; $D_f = 10$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1100	0	0	0	25	0
1050	50	0.25	48	25	1.92
1000	100	0.5	78	25	3.12
950	150	0.75	89	25	3.56
900	200	1	101	25	4.04
850	250	1.25	114	25	4.56
800	300	1.5	119	25	4.76
750	350	1.75	123	25	4.92
700	400	2	136	25	5.44
650	450	2.25	159	25	6.36
600	500	2.5	173	25	6.92
550	550	2.75	203	25	8.12
500	600	3	220	25	8.8
450	650	3.25	240	25	9.6
400	700	3.5	252.5	25	10.1
350	750	3.75	267.5	25	10.7
300	800	4	270	25	10.8
250	850	4.25	287	25	11.48
200	900	4.5	296	25	11.84
150	950	4.75	298	25	11.92
100	1000	5	309.5	25	12.38
50	1050	5.25	318	25	12.72
0	1100	5.5	320	25	12.8
-50	1150	5.75	338.5	25	13.54
-100	1200	6	347	25	13.88
-150	1250	6.25	355	25	14.2
-200	1300	6.5	365	25	14.6
-250	1350	6.75	378	25	15.12
-300	1400	7	384	25	15.36
-350	1450	7.25	390	25	15.6
-400	1500	7.5	395	25	15.8
-450	1550	7.75	395	25	15.8
-500	1600	8	400.5	25	16.02
-550	1650	8.25	400.5	25	16.02
-600	1700	8.5	400.5	25	16.02

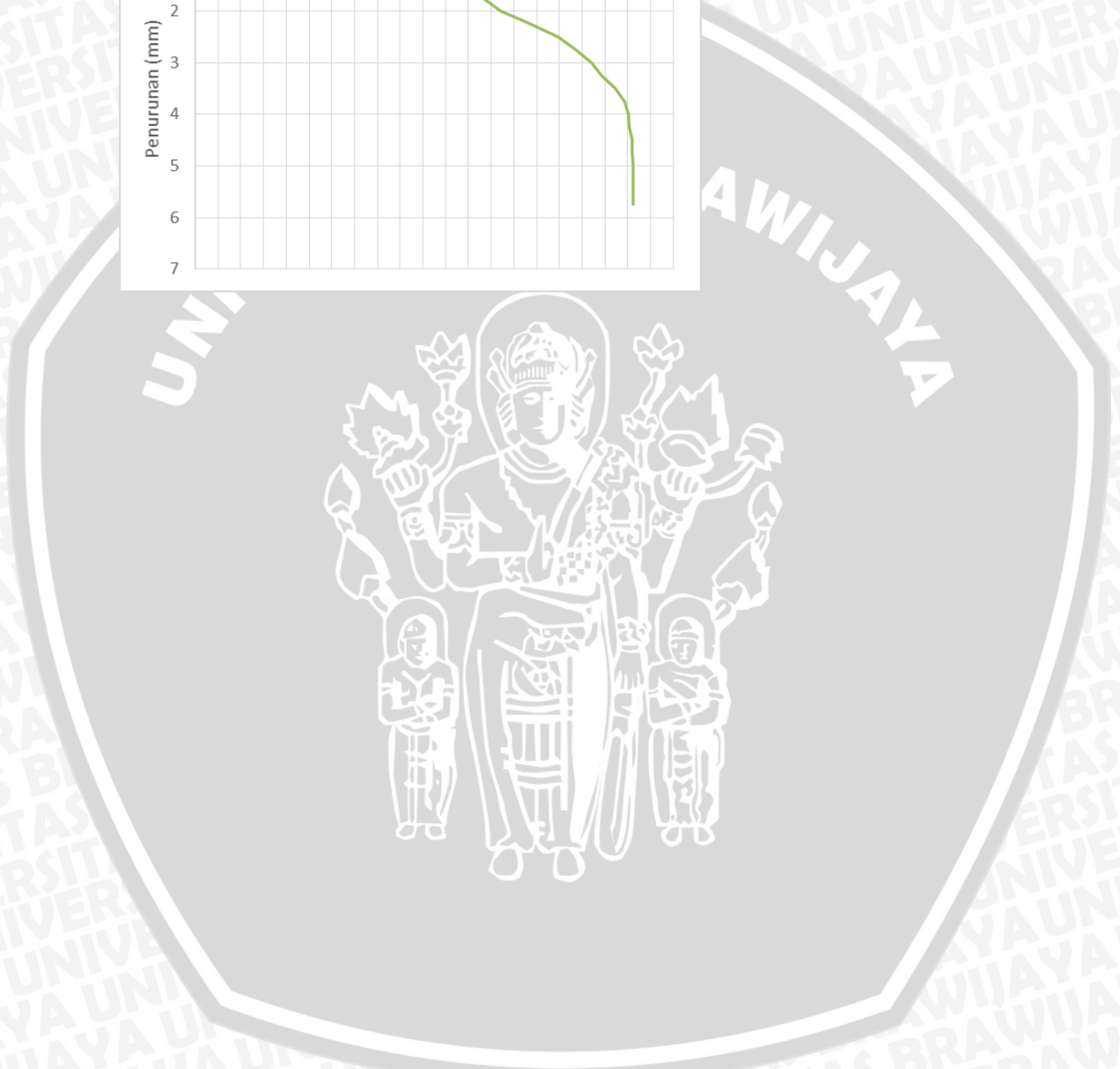
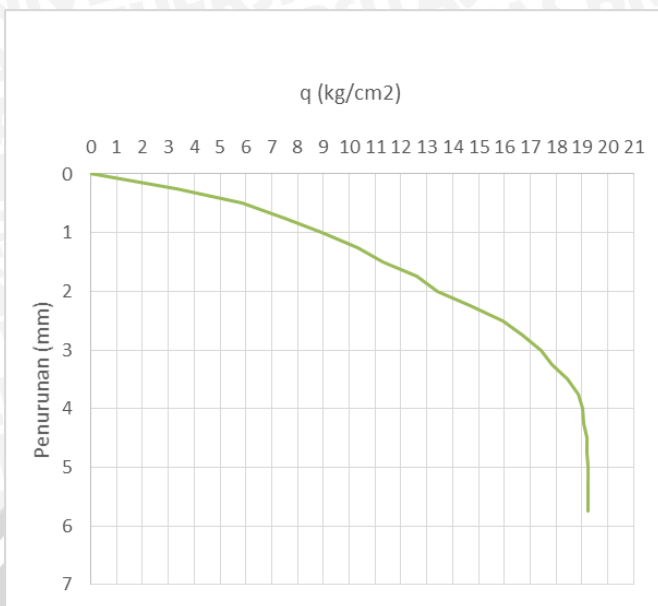
$$q_u = 16,02 \text{ kg/cm}^2$$



4. Variasi : $L = 1D (4.5 \text{ cm}) ; D_f = 15 \text{ cm}$

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm^2	Daya Dukung (q) kg/m^2
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
400	0	0	0	25	0
350	50	0.25	83.5	25	3.34
300	100	0.5	147	25	5.88
250	150	0.75	188	25	7.52
200	200	1	223.5	25	8.94
150	250	1.25	258	25	10.32
100	300	1.5	283	25	11.32
50	350	1.75	315	25	12.6
0	400	2	335.5	25	13.42
-50	450	2.25	367.5	25	14.7
-100	500	2.5	398.5	25	15.94
-150	550	2.75	417.5	25	16.7
-200	600	3	436	25	17.44
-250	650	3.25	446	25	17.84
-300	700	3.5	461	25	18.44
-350	750	3.75	471	25	18.84
-400	800	4	475.5	25	19.02
-450	850	4.25	477	25	19.08
-500	900	4.5	479.5	25	19.18
-550	950	4.75	480	25	19.2
-600	1000	5	480.5	25	19.22
-650	1050	5.25	481	25	19.24
-700	1100	5.5	481	25	19.24
-750	1150	5.75	481	25	19.24

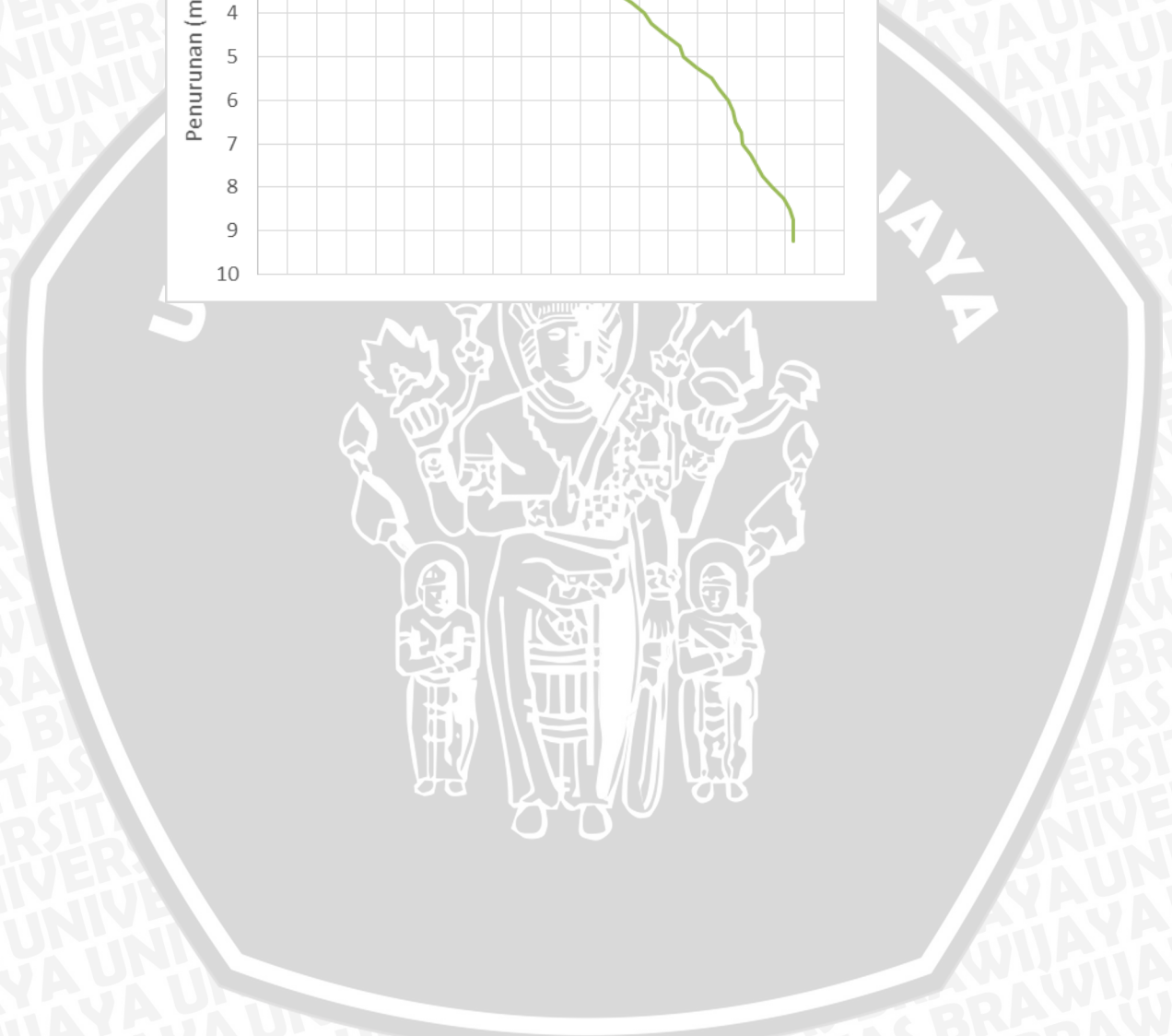
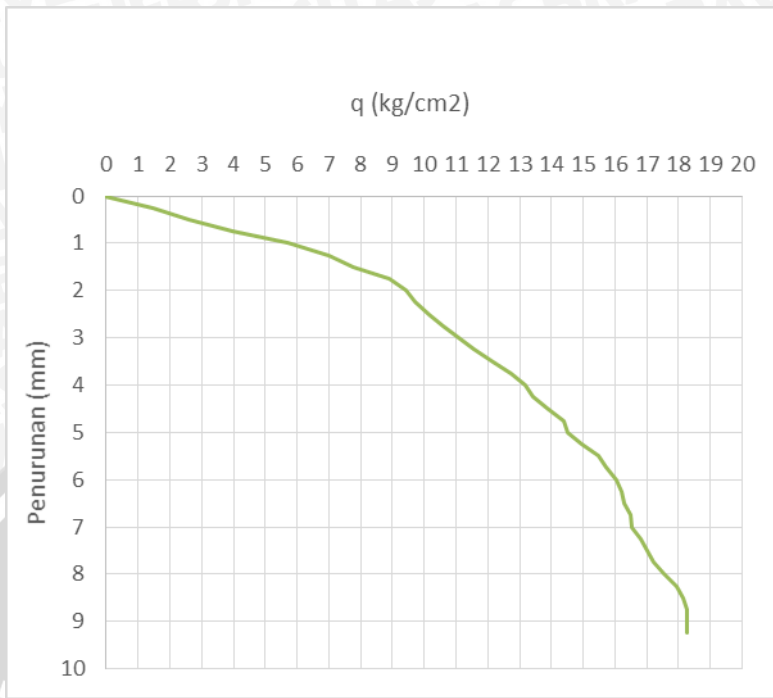
$$q_u = 19.24 \text{ kg/cm}^2$$



5. Variasi : $L = 1.25D$ (3,75 cm) ; $D_f = 15$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm^2	Daya Dukung (q) kg/m^2
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
400	0	0	0	25	0
350	50	0.25	37	25	1.48
300	100	0.5	65	25	2.6
250	150	0.75	99	25	3.96
200	200	1	143	25	5.72
150	250	1.25	175	25	7
100	300	1.5	194	25	7.76
50	350	1.75	223	25	8.92
0	400	2	236	25	9.44
-50	450	2.25	243	25	9.72
-100	500	2.5	253.5	25	10.14
-150	550	2.75	265	25	10.6
-200	600	3	277	25	11.08
-250	650	3.25	289.5	25	11.58
-300	700	3.5	304	25	12.16
-350	750	3.75	318.5	25	12.74
-400	800	4	329	25	13.16
-450	850	4.25	336	25	13.44
-500	900	4.5	347	25	13.88
-550	950	4.75	360	25	14.4
-600	1000	5	363	25	14.52
-650	1050	5.25	374	25	14.96
-700	1100	5.5	387	25	15.48
-750	1150	5.75	393.5	25	15.74
-800	1200	6	401	25	16.04
-850	1250	6.25	405	25	16.2
-900	1300	6.5	407	25	16.28
-950	1350	6.75	412	25	16.48
-1000	1400	7	413	25	16.52
-1050	1450	7.25	420	25	16.8
-1100	1500	7.5	425	25	17
-1150	1550	7.75	430	25	17.2
-1200	1600	8	438	25	17.52
-1250	1650	8.25	448.5	25	17.94
-1300	1700	8.5	456	25	18.24
-1350	1750	8.75	467	25	18.68
-1400	1800	9	469	25	18.76
-1450	1850	9.25	469	25	18.76

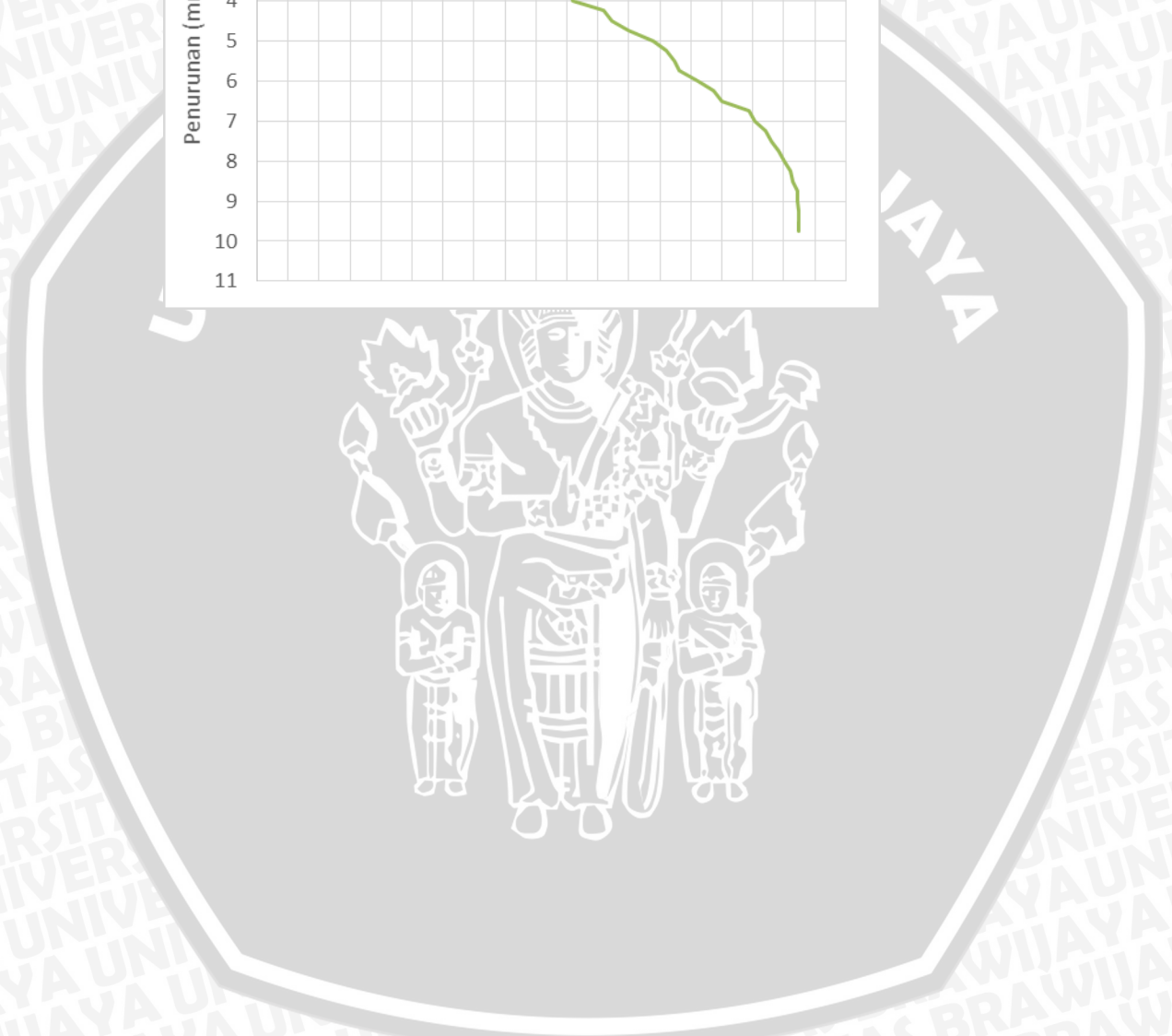
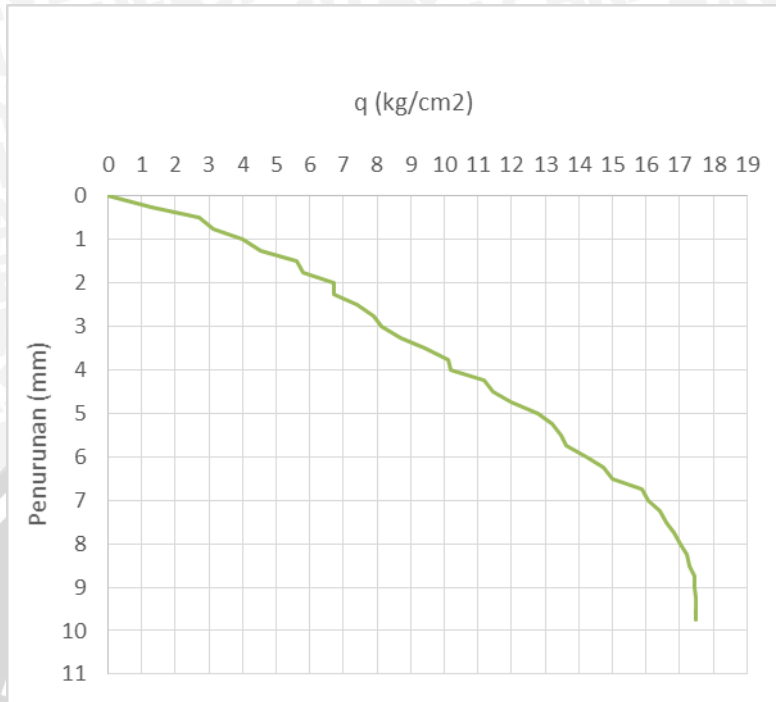
$q_u = 18.76 \text{ kg}/\text{cm}^2$



6. Variasi : $L = 1.5D$ (4,5 cm) ; $D_f = 15$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm^2	Daya Dukung (q) kg/m^2
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
700	0	0	0	25	0
650	50	0.25	32.5	25	1.3
600	100	0.5	67.5	25	2.7
550	150	0.75	78.5	25	3.14
500	200	1	100	25	4
450	250	1.25	113.5	25	4.54
400	300	1.5	140	25	5.6
350	350	1.75	145	25	5.8
300	400	2	168	25	6.72
250	450	2.25	168	25	6.72
200	500	2.5	185	25	7.4
150	550	2.75	198	25	7.92
100	600	3	203	25	8.12
50	650	3.25	217.5	25	8.7
0	700	3.5	235.5	25	9.42
-50	750	3.75	253	25	10.12
-100	800	4	255	25	10.2
-150	850	4.25	279.5	25	11.18
-200	900	4.5	286	25	11.44
-250	950	4.75	300	25	12
-300	1000	5	320	25	12.8
-350	1050	5.25	330.5	25	13.22
-400	1100	5.5	337	25	13.48
-450	1150	5.75	340.5	25	13.62
-500	1200	6	355.5	25	14.22
-550	1250	6.25	368	25	14.72
-600	1300	6.5	375	25	15
-650	1350	6.75	397	25	15.88
-700	1400	7	402	25	16.08
-750	1450	7.25	410.5	25	16.42
-800	1500	7.5	415	25	16.6
-850	1550	7.75	420.5	25	16.82
-900	1600	8	426	25	17.04
-950	1650	8.25	430	25	17.2
-1000	1700	8.5	432.5	25	17.3
-1050	1750	8.75	436	25	17.44
-1100	1800	9	436.5	25	17.46
-1150	1850	9.25	437	25	17.48
-1200	1900	9.5	437	25	17.48
-1250	1950	9.75	437	25	17.48

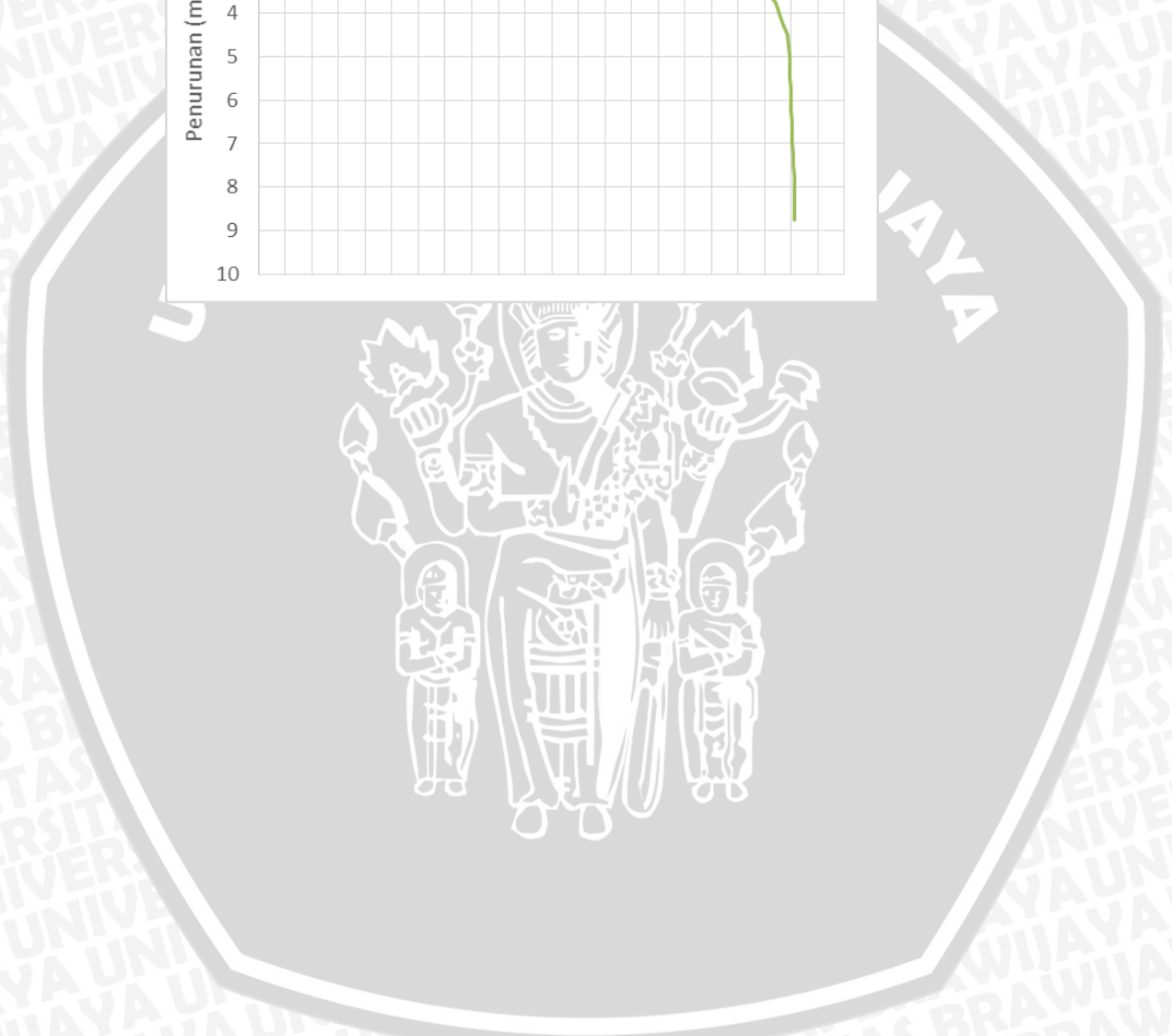
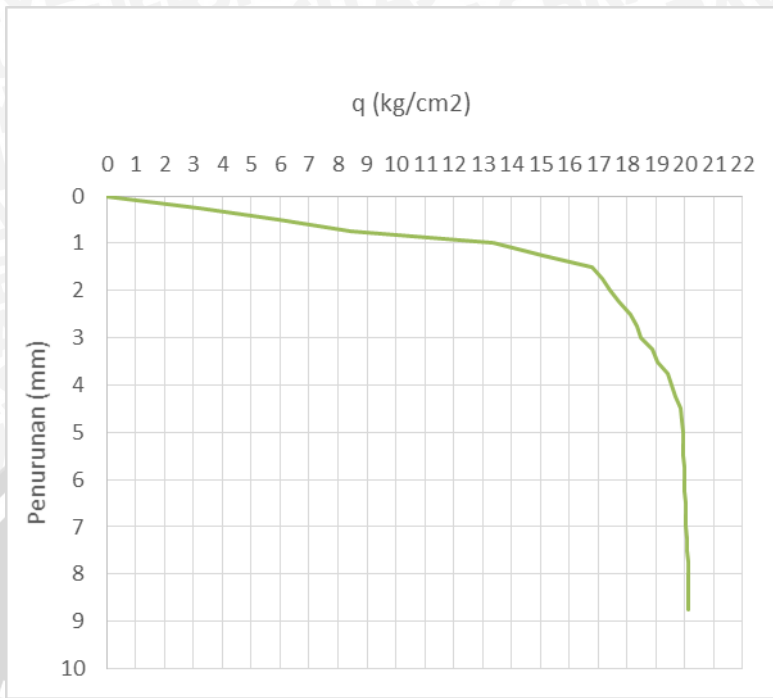
$$q_u = 17,48 \text{ kg/cm}^2$$



7. Variasi : $L = 1D (3 \text{ cm})$; $D_f = 20 \text{ cm}$

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1600	0	0	0	25	0
1550	50	0.25	80.5	25	3.22
1500	100	0.5	148.5	25	5.94
1450	150	0.75	211	25	8.44
1400	200	1	334	25	13.36
1350	250	1.25	378	25	15.12
1300	300	1.5	420	25	16.8
1250	350	1.75	428.5	25	17.14
1200	400	2	435.5	25	17.42
1150	450	2.25	442.5	25	17.7
1100	500	2.5	452.5	25	18.1
1050	550	2.75	459	25	18.36
1000	600	3	462	25	18.48
950	650	3.25	471.5	25	18.86
900	700	3.5	476	25	19.04
850	750	3.75	485.5	25	19.42
800	800	4	489	25	19.56
750	850	4.25	492	25	19.68
700	900	4.5	496	25	19.84
650	950	4.75	497	25	19.88
600	1000	5	498	25	19.92
550	1050	5.25	498	25	19.92
500	1100	5.5	498.5	25	19.94
450	1150	5.75	499.5	25	19.98
400	1200	6	499.5	25	19.98
350	1250	6.25	500	25	20
300	1300	6.5	500.5	25	20.02
250	1350	6.75	501	25	20.04
200	1400	7	501	25	20.04
150	1450	7.25	502	25	20.08
100	1500	7.5	502	25	20.08
50	1550	7.75	502.5	25	20.1
0	1600	8	503	25	20.12
-50	1650	8.25	503.5	25	20.14
-100	1700	8.5	503.5	25	20.14
-150	1750	8.75	503.5	25	20.14

$$q_u = 20.14 \text{ kg/cm}^2$$



8. Variasi : $L = 1.25D$ (3,75 cm) ; $D_f = 20$ cm

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
350	0	0	0	25	0
300	50	0.25	109	25	4.36
250	100	0.5	143	25	5.72
200	150	0.75	167	25	6.68
150	200	1	200	25	8
100	250	1.25	232	25	9.28
50	300	1.5	258	25	10.32
0	350	1.75	269	25	10.76
-50	400	2	281	25	11.24
-100	450	2.25	292	25	11.68
-150	500	2.5	299	25	11.96
-200	550	2.75	301	25	12.04
-250	600	3	318	25	12.72
-300	650	3.25	326	25	13.04
-350	700	3.5	333	25	13.32
-400	750	3.75	339	25	13.56
-450	800	4	353	25	14.12
-500	850	4.25	361	25	14.44
-550	900	4.5	368	25	14.72
-600	950	4.75	369.5	25	14.78
-650	1000	5	377	25	15.08
-700	1050	5.25	384.5	25	15.38
-750	1100	5.5	388	25	15.52
-800	1150	5.75	390	25	15.6
-850	1200	6	392	25	15.68
-900	1250	6.25	399	25	15.96
-950	1300	6.5	395.5	25	15.82
-1000	1350	6.75	404	25	16.16
-1050	1400	7	414	25	16.56
-1100	1450	7.25	418	25	16.72
-1150	1500	7.5	423	25	16.92
-1200	1550	7.75	429	25	17.16
-1250	1600	8	431	25	17.24
-1300	1650	8.25	436	25	17.44
-1350	1700	8.5	440	25	17.6
-1400	1750	8.75	442	25	17.68
-1450	1800	9	446	25	17.84
-1500	1850	9.25	452	25	18.08
-1550	1900	9.5	454.5	25	18.18

-1600	1950	9.75	458	25	18.32
-1650	2000	10	461	25	18.44
-1700	2050	10.25	463	25	18.52
-1750	2100	10.5	467	25	18.68
-1800	2150	10.75	469	25	18.76
-1850	2200	11	468.5	25	18.74
-1900	2250	11.25	472	25	18.88
-1950	2300	11.5	476	25	19.04
-2000	2350	11.75	478	25	19.12
-2050	2400	12	480	25	19.2
-2100	2450	12.25	481	25	19.24
-2150	2500	12.5	483	25	19.32
-2200	2550	12.75	485	25	19.4
-2250	2600	13	488	25	19.52
-2300	2650	13.25	487.5	25	19.5
-2350	2700	13.5	495.5	25	19.82
-2400	2750	13.75	495.5	25	19.82

qu = 19.82kg/cm²



9. Variasi : $L = 1.5D (4,5)$; $D_f = 20 \text{ cm}$

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm^2	Daya Dukung (q) kg/m^2
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
200	0	0	0	25	0
150	50	0.25	60	25	2.4
100	100	0.5	85	25	3.4
50	150	0.75	115	25	4.6
0	200	1	146	25	5.84
-50	250	1.25	168	25	6.72
-100	300	1.5	195	25	7.8
-150	350	1.75	215	25	8.6
-200	400	2	225.5	25	9.02
-250	450	2.25	239	25	9.56
-300	500	2.5	247	25	9.88
-350	550	2.75	259	25	10.36
-400	600	3	268.5	25	10.74
-450	650	3.25	278	25	11.12
-500	700	3.5	298	25	11.92
-550	750	3.75	311.5	25	12.46
-600	800	4	319	25	12.76
-650	850	4.25	332.5	25	13.3
-700	900	4.5	342	25	13.68
-750	950	4.75	355	25	14.2
-800	1000	5	365	25	14.6
-850	1050	5.25	382	25	15.28
-900	1100	5.5	385.5	25	15.42
-950	1150	5.75	397	25	15.88
-1000	1200	6	400	25	16
-1050	1250	6.25	407.5	25	16.3
-1100	1300	6.5	410	25	16.4
-1150	1350	6.75	418	25	16.72
-1200	1400	7	425	25	17
-1250	1450	7.25	428	25	17.12
-1300	1500	7.5	431.5	25	17.26
-1350	1550	7.75	435	25	17.4
-1400	1600	8	437	25	17.48
-1450	1650	8.25	438.5	25	17.54
-1500	1700	8.5	439	25	17.56
-1550	1750	8.75	440	25	17.6
-1600	1800	9	443	25	17.72
-1650	1850	9.25	449.5	25	17.98
-1700	1900	9.5	453	25	18.12

-1750	1950	9.75	455	25	18.2
-1800	2000	10	458	25	18.32
-1850	2050	10.25	460.5	25	18.42
-1900	2100	10.5	462	25	18.48
-1950	2150	10.75	463	25	18.52
-2000	2200	11	464	25	18.56
-2050	2250	11.25	464.5	25	18.58
-2100	2300	11.5	465	25	18.6
-2150	2350	11.75	467.5	25	18.7
-2200	2400	12	469	25	18.76
-2250	2450	12.25	469.5	25	18.78
-2300	2500	12.5	470	25	18.8
-2350	2550	12.75	470	25	18.8

qu = 18,8 kg/cm²

