

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIXING*  
(DSM) 10% KAPUR DIAMETER 4 CM BERPOLA *TRIANGULAR*  
TERHADAP DAYA DUKUNGTANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

**SKRIPSI**

**TEKNIK SIPIL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ANGELINE GRACE ALLO  
NIM. 125060107111003**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIXING* (DSM) 10% KAPUR  
DIAMETER 4 CM BERPOLA *TRIANGULAR* TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH  
EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

**SKRIPSI**

**TEKNIK SIPIL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh  
gelar Sarjana Teknik



**ANGELINE GRACE ALLO**  
**NIM. 125060107111003**

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

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT.**

NIP.19680707 199403 2 002

**Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D**

NIP. 19761023 200604 1 002

**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 Variasi Jarak Dan Panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% Kapur Diameter 4 cm Berpola *Triangular* Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro

Nama Mahasiswa : Angeline Grace Allo

NIM : 125060107111003

Program Studi : Teknik Sipil

### TIM DOSEN PENGUJI :

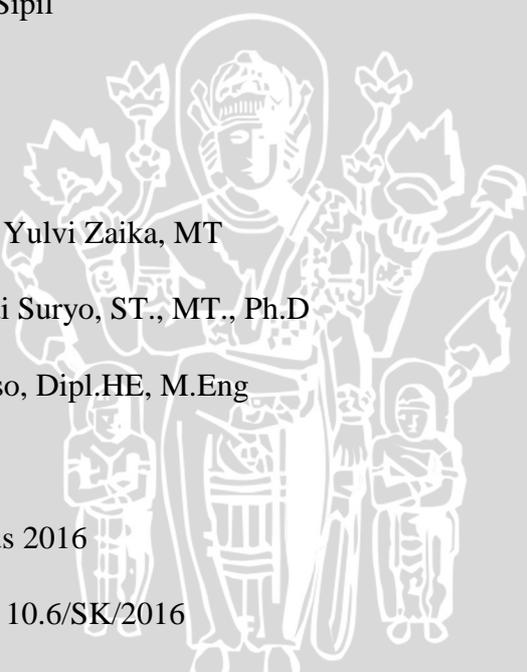
Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT

Dosen Penguji 2 : Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D

Dosen Penguji 3 : Ir. Suroso, Dipl.HE, M.Eng

Tanggal Ujian : 3 Agustus 2016

SK Penguji : 925/ 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,

**Angeline Grace Allo**  
NIM. 125060107111003



## RIWAYAT HIDUP

Angeline Grace Allo lahir di Kupang, 22 Agustus 1996, anak ke-2 dari ayah Fredrik Allo dan Ibu JubersyAllo. Menjalani pendidikan SD (Sekolah Dasar) di SDK St. Yoseph 3 pada tahun 2002. Setelah itu SMP (Sekolah Menengah Pertama) di SMP Kristen Mercusuar lulus tahun 2010. Melanjutkan pendidikan SMA (Sekolah Menengah Atas) ke SMA Kristen Mercusuar lulus tahun 2012. Kemudian, melanjutkan sekolah di Perguruan Tinggi di Universitas Brawijaya Malang, lulus Program Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2016.

Malang, Agustus 2016

Penulis



## LEMBAR PERUNTUKAN

Pertama-tama saya panjatkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatnya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Kepada Papa, Mama, Jon, Jessi, Jefferson yang memberi dukungan moral dan material dalam proses penyelesaian skripsi. Saya ucapkan terima kasih juga untuk Pak Indra Cahya, Pak Sugeng dan Pak Eko Andi Suryo yang selalu menjadi motivasi saya selama menjalani perkuliahan. Tidak lupa ucapan terima kasih untuk Anisa Oktavia, Frangky, Rendy Hartama Kosasih, M. Rizky Saputra, Adelina, Ahmad Ismail, Vicky, Galih Karno, Amalia Faticha sebagai teman seperjuangan skripsi.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan izin untuk melaksanakan penelitian skripsi ini. Kepada Ibu Yulvi dan Pak Eko Andi Suryo 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 kebahagiaan di lingkungan 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 mengucapkan permintaan 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 berprestasi dan memberikan kontribusi positif bagi bangsa dan negara. **TANAH AIR JALAN SIPIL, BAJA BETON JIWA SIPIL.**

Malang, Agustus 2016

Angeline Grace Allo

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang senantiasa memberikan kekuatan, rahmat, berkat, hidayah, dan kemudahan kepada penulis sehingga skripsi yang berjudul **”Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang *Deep Soil Mix (DSM)* 10% Kapur Diameter 4 cm Berpola *Triangular* terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro”** ini dapat penulis selesaikan.

Skripsi yang disusun guna memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik ini, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang Geoteknik. Selain itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Eng. Yulvi Zaika ST., MT, dan Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D. sebagai dosen pembimbing atas segala saran, masukan, arahan dan bimbingan yang telah diberikan.
2. Ir. Suroso Dipl. HE., M. Eng., Dr. Ir. Arief Rachmansyah, Dr. Ir. As’ad Munawir, MT., dan Dr. Ir. Harimurti, MT. sebagai dosen Geoteknik yang telah memberikan banyak saran dan masukan dalam 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 telah membantu dalam kelancaran skripsi ini.
5. Bapak Ibu Dosen dan Staff Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
6. Pak Ketut Sugiarto, Mbak Indah dan Mbak Asmi yang telah banyak memberi bantuan selama proses pengerjaan skripsi di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi.
7. Pak Sugeng Hendrik dan Mas Dino Teguh yang telah memberi banyak bantuan perihal alat uji dalam kelancaran skripsi ini.
8. Papa, Mama, Jon, Jessi, Dede, 3 tante gaul (Jeneva, Ellen dan Dessy) dan segenap keluarga atas doa, nasehat, semangat, dan dukungannya dalam penyelesaian skripsi ini.
9. Anisa, Sapu, Rendy dan Frangky yang merupakan teman seperjuangan dalam skripsi baik dalam suka maupun duka dari mulai sampai selesainya skripsi sehingga pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi ini berjalan dengan baik.

10. Galih, Amalia, Adel, Vicky dan Ismail yang memberi bantuan dan masukan sehingga skripsi berjalan dengan lancar.
11. Gosip Gengges ft. PPH Squad (Mbalcuu, Mbakyull, Karina, Dinda, Elina, Zahro), Anisa, Dina, Gina, Bos Ancha, Andry, Charly dan Yezky yang sudah menjadi keluarga yang selalu mencurahkan dukungan tanpa henti.
12. Dan teman-teman 2012 serta pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan penulis sebagai manusia biasa tentunya tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Agustus 2016

Penyusun



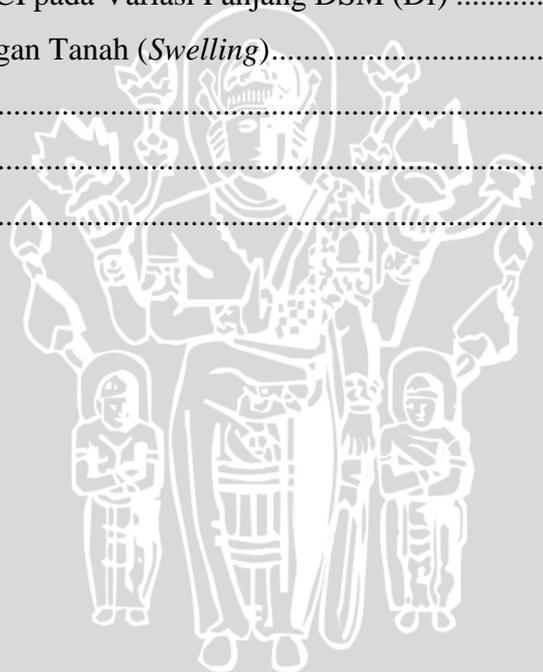
DAFTAR ISI

	Halaman
<b>PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xi
<b>RINGKASAN</b> .....	xiii
<b>SUMMARY</b> .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	3
1.3 Rumusan Masalah .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Tujuan Penelitian .....	5
1.6 Manfaat Penelitian .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Tanah dan Mineral Lempung .....	7
2.2 Tanah Lempung Ekspansif .....	9
2.3 Sistem Klasifikasi Tanah.....	9
2.3.1 <i>Unified Soil Classification System (USCS)</i> .....	10
2.3.2 <i>American Association of State Highway (AASHTO)</i> .....	11
2.4 Identifikasi Lempung Berpotensi Ekspansif .....	13
2.4.1 Identifikasi Mineralogi.....	13
2.4.2 Cara Tidak Langsung .....	13
2.4.2.1 Atterberg Limit .....	14
2.4.2.2 Linier Shrinkage.....	16
2.4.2.3 Uji Swelling .....	16
2.4.2.4 Activity Method .....	17
2.4.3 Cara Langsung .....	18
2.5 Stabilitas Tanah.....	18
2.5.1 Stabilitas Tanah dengan Kapur .....	19
2.5.2 Deep Soil Mixing (DSM).....	21



2.6 Daya Dukung Tanah .....	26
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>29</b>
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	29
3.2 Bahan Penelitian.....	29
3.3 Peralatan Penelitian .....	29
3.4 Metode Penelitian.....	30
3.4.1 Penelitian Pendahuluan .....	30
3.4.2 Persiapan Benda Uji .....	31
3.4.3 Uji Pembebanan .....	34
3.5 Metode Analisa Data.....	36
3.6 Variabel Penelitian .....	36
3.7 Rancangan Penelitian .....	37
3.8 Diagram Alir Penelitian .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
4.1 Pengujian Pendahuluan.....	41
4.1.1 Pemeriksaan <i>Specific Gravity</i> .....	41
4.1.2 Klasifikasi Tanah .....	42
4.1.3 <i>Atterberg Limit</i> .....	42
4.1.4 Sifat Ekspansifitas.....	43
4.1.5 Pemeriksaan Pemadatan Standar .....	44
4.2 Analisis Daya Dukung (Sebelum Perbaikan).....	46
4.2.1 Uji Kepadatan Tanah Asli.....	46
4.2.2 Uji Pembebanan Tanah Asli .....	47
4.3 Hasil dan Analisis Tanah dengan Perbaikan DSM .....	48
4.3.1 Uji Pembebanan .....	48
4.4 Analisis Daya Dukung Tanah .....	50
4.4.1 Analisis Daya Dukung Tanah dengan Variasi Jarak (L) .....	50
4.4.1.1 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM 2B=10cm ..50	
4.4.1.2 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM 3B=15cm ..51	
4.4.1.3 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM 4B=20cm ..53	
4.4.2 Analisis Daya Dukung Tanah dengan Variasi Panjang (Df) .....	55
4.4.2.1 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM 1D=4cm ....55	
4.4.2.2 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM 1,25D=5cm57	

4.4.2.3 Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM $1,5D=6\text{cm}$	58
4.5 Analisis Penurunan Tanah .....	61
4.5.1 Penurunan Tanah Penurunan Tanah yang distabilisasi Kolom DSM pada variasi jarak antar kolom(L) terhadap panjang kolom (Df).....	61
4.5.2 Penurunan Tanah Penurunan Tanah yang distabilisasi Kolom DSM pada variasi panjang kolom(Df) terhadap jarak antar kolom (L).....	62
4.6 Analisa <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) Berdasarkan Daya Dukung ultimit .....	64
4.6.1 Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L).....	64
4.6.2 Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df) .....	65
4.7 Analisa Pengembangan Tanah ( <i>Swelling</i> ).....	67
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	69
5.1 Kesimpulan .....	69
5.2 Saran.....	69
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	



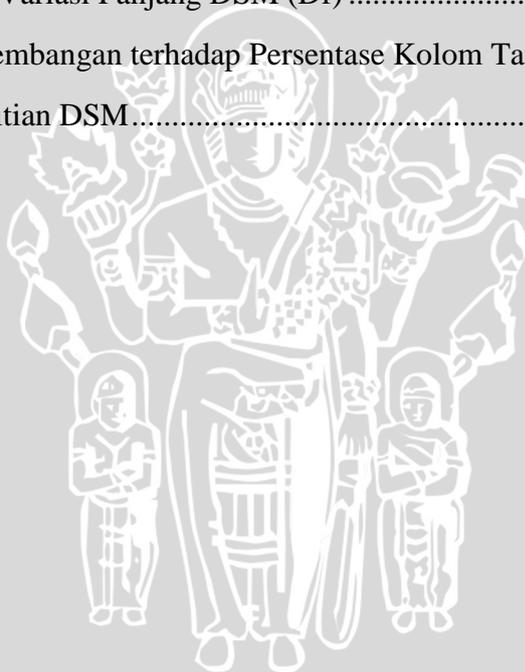


DAFTAR TABEL

Nomor	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sistem Klasifikasi USCS .....	10
Tabel 2.2	Sistem Klasifikasi AASHTO .....	12
Tabel 2.3	Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas .....	14
Tabel 2.4	Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP .....	15
Tabel 2.5	Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI.....	15
Tabel 2.6	Klasifikasi Potensi Mengembang didasarkan pada <i>Atteberg Limit</i> .....	16
Tabel 2.7	Hubungan Potensi Mengembang dengan Tekanan Mengembang .....	17
Tabel 2.8	Persyaratan Kimia Kapur Tipe I dan Tipe II.....	19
Tabel 2.9	Hasil Pengujian Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur .....	20
Tabel 2.10	Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L) .....	25
Tabel 2.11	Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df) .....	25
Tabel 2.12	Kapasitas daya dukung tanah berbagai jenis pondasi menurut cara Terzaghi.....	28
Tabel 3.1	Variasi Jarak dan Panjang <i>Deep Soil Mix</i> (DSM) dengan Diameter 4 cm <i>Pola Triangular</i> .....	33
Tabel 3.2	Pembacaan Load Cell dan Dial LVDT .....	35
Tabel 3.3	Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM.....	37
Tabel 3.4	Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM (L).....	38
Tabel 3.5	Daya Dukung dengan Variasi Panjang DSM (Df).....	38
Tabel 3.6	<i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) untuk Variasi Jarak.....	39
Tabel 3.7	<i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) untuk Variasi Panjang.....	39
Tabel 4.1	<i>Specific Gravity</i> Tanah Kabupaten Bojonegoro.....	41
Tabel 4.2	Hasil Pemeriksaan Batas-batas <i>Atterberg</i> .....	43
Tabel 4.3	Perbandingan Nilai CBR Tanah Stabilisasi .....	46
Tabel 4.4	Uji <i>density</i> pada Tanah Model .....	47
Tabel 4.5	Berat Kebutuhan Kolom DSM.....	48
Tabel 4.6	Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Jarak DSM...	49
Tabel 4.7	Beban dan Penurunan Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Panjang	



	DSM .....	49
Tabel 4.8	Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 2B = 10 cm .....	50
Tabel 4.9	Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 3B = 15 cm .....	52
Tabel 4.10	Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM 4B = 20 cm .....	53
Tabel 4.11	Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM 1D = 4 cm .....	55
Tabel 4.12	Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM 1,25D = 5 cm .....	57
Tabel 4.13	Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM 1,5D = 6 cm .....	59
Tabel 4.14	Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom (L) .....	61
Tabel 4.15	Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (Df) .....	63
Tabel 4.16	Nilai BCI untuk Variasi Jarak DSM (L) .....	64
Tabel 4.17	Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df) .....	66
Tabel 4.18	Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi Penelitian DSM .....	68



**DAFTAR GAMBAR**

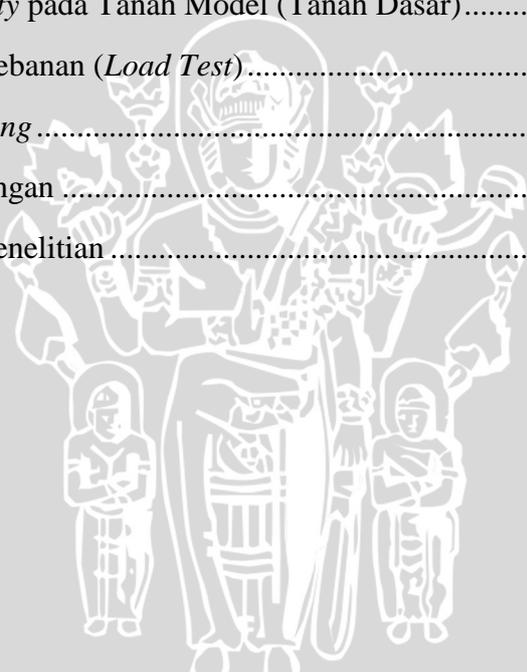
Nomor	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram struktur dari (a) <i>silica tetrahedra</i> (b) lembaran <i>silika</i> ; (c) <i>alumunium oktahedra</i> ; (d) lembaran <i>oktahedra (gibbsite)</i> ; (e) lembaran <i>silika-gibbsite</i> .....	8
Gambar 2.2	Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 .....	13
Gambar 2.3	Batas-batas <i>Atterberg</i> .....	14
Gambar 2.4	Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang .....	18
Gambar 2.5	Grafik hubungan persentase kapur dengan CBR .....	20
Gambar 2.6	Grafik hubungan persentase kapur dengan <i>Swelling</i> .....	21
Gambar 2.7	Alat <i>Deep Soil Mix</i> (DSM), (a) <i>Deep dry mixing</i> , (b) <i>Wet dry mixing</i> .....	22
Gambar 2.8	Pola <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM) .....	23
Gambar 2.9	Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM .....	23
Gambar 2.10	Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $3B= 15\text{cm}$ .....	24
Gambar 2.11	Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L).....	25
Gambar 2.12	Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df) ..	26
Gambar 2.13	Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal (a) Model Pondasi (b) Grafik Hubungan antara Beban dan Penurunan.....	27
Gambar 3.1	Pemodelan DSM Pola <i>Single Square</i> .....	32
Gambar 3.2	Skema Uji Pembebanan .....	35
Gambar 4.1	Analisis Saringan dan Hidrometer .....	42
Gambar 4.2	Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang .....	44
Gambar 4.3	Grafik Hasil Pemadatan Tanah Asli .....	45
Gambar 4.4	Grafik Hasil Pemadatan Tanah Stabilisasi .....	45
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli .....	48
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang $2B = 10\text{ cm}$ .....	51
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi	



	Jarak dengan Panjang $3B = 15 \text{ cm}$ .....	52
Gambar 4.8	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang $4B = 20 \text{ cm}$ .....	54
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1D = 4 \text{ cm}$ .....	56
Gambar 4.10	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,25D = 5 \text{ cm}$ .....	58
Gambar 4.11	Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM $1,5D = 6 \text{ cm}$ .....	59
Gambar 4.12	Grafik Hubungan Penurunan pada $q_{ultimit}$ terhadap Variasi Jarak antar Kolom.....	62
Gambar 4.13	Grafik Hubungan Penurunan pada $q_{ultimit}$ terhadap Variasi Panjang Kolom.....	63
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L).....	65
Gambar 4.15	Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df) ..	66
Gambar 4.16	Perbandingan Hasil <i>Swelling</i> terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total.....	67

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor	Judul	Halaman
Lampiran 1	Pengujian Kadar Air Tanah Asli ( <i>Undisturbed Sample</i> ) .....	71
Lampiran 2	Pengujian Berat Isi Tanah ( <i>Undisturbed Sample</i> ) .....	73
Lampiran 3	Pengujian Berat Jenis Tanah Asli ( <i>Specific Gravity</i> ) .....	75
Lampiran 4	Analisa Saringan dan Hydrometer .....	77
Lampiran 5	Pengujian Batas-batas <i>Atterberg</i> .....	79
Lampiran 6	Pemeriksaan Pematatan Standar Laboratorium Tanah Asli.....	81
Lampiran 7	Pemeriksaan Pematatan Standar Tanah Stabilisasi Kapur .....	83
Lampiran 8	Pemeriksaan <i>California Bearing Ratio</i> (CBR) Tanah Stabilisasi Kapur	85
Lampiran 9	Hasil Uji <i>Density</i> pada Tanah Model (Tanah Dasar).....	91
Lampiran 10	Hasil Uji Pembebanan ( <i>Load Test</i> ).....	93
Lampiran 11	Hasil Uji <i>Swelling</i> .....	119
Lampiran 12	Contoh Perhitungan .....	121
Lampiran 13	Dokumentasi Penelitian .....	123





## RINGKASAN

**Angeline Grace Allo**, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Agustus 2016, *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Deep Soil Mix (DSM) 10% Kapur Diameter 4 cm Berpola Triangulat terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro*, Dosen Pembimbing: Yulvi Zaika dan Eko Andi Suryo.

Saat ini di Indonesia, pembangunan telah berkembang dengan pesat khususnya dalam bidang konstruksi. Pada dasarnya dalam pembangunan tersebut, tanah merupakan material dasar penting yang berfungsi menahan beban dari bangunan fisik seperti pondasi bangunan, timbunan jalan raya, bendungan, jembatan dan lain-lain. Indonesia memiliki berbagai keadaan tanah yang berbeda di setiap tempat sehingga tidak bisa dihindari kerusakan pada jalan dan gedung akibat berbedanya sifat teknis tanah dasar tersebut. Jenis tanah yang perlu diperhatikan yaitu tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki daya dukung tanah yang rendah pada kondisi muka air yang tinggi, sifat fluktuasi kembang susut (*swelling*) yang besar dan plastisitas yang tinggi.

Upaya memperbaiki sifat kembang susut dan meningkatkan daya dukung tanah ekspansif dapat dilakukan dengan metode stabilisasi tanah mekanik dan kimiawi. Dalam penelitian ini menggunakan stabilisasi kimiawi yaitu dengan cara mencampurkan bahan *additive* (*kapur*) pada tanah dengan metode *deep soil mix* (DSM). DSM merupakan upaya perbaikan tanah dalam yang dilakukan dengan cara membuat kolom-kolom dan mencampurkan tanah dan bahan *kapur* pada lokasi tanah yang diperbaiki.

Pengujian ini dilakukan dalam *box* dengan volume sampel tanah asli  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ . Pada pengujian tanah stabilisasi diberikan DSM diameter 4 cm dengan variasi jarak (4 cm; 5 cm dan 6 cm) dan panjang (10 cm, 15 cm dan 20 cm) berpola *triangular*. Proses pembebanan dilakukan pada tanah asli dan tanah stabilisasi. Proses pembebanan menggunakan beban vertikal dengan pelat ukuran permukaan  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Untuk mendapatkan beban maksimum dilakukan pembacaan beban hingga tiga kali sehingga didapatkan daya dukung tanah. Berdasarkan hasil analisis, jarak dan panjang maksimum DSM terjadi pada DSM jarak terdekat  $L = 1D$  (4 cm) dan panjang kolom  $D_f = 4B$  (20 cm) dapat meningkatkan daya dukung tanah.

Selain itu rasio volume DSM dalam tanah dapat mempengaruhi pengembangan (*swelling*) tanah. Rasio volume DSM yang semakin besar dapat mengurangi potensi pengembangan. Pada rasio persentase stabilisasi DSM paling tinggi yaitu 87,52% memiliki persentase pengembangan (*Swelling*) paling kecil yaitu sebesar 0,75%.

**Kata kunci:** Tanah Ekspansif, Stabilisasi Tanah, Kapur, *Deep Soil Mixing*, Daya Dukung.

## SUMMARY

**Angeline Grace Allo**, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, August 2016, The Effect of Distance and Length Variation of 10% Lime Deep Soil Mixing (DSM) Using 4 cm Diameter with Triangular Configuration on Bearing Capacity of Expansive Soil at Bojonegoro, Supervisor: Yulvi Zaika and Eko Andi Suryo.

Currently in Indonesia, development has grown rapidly, especially in the physical infrastructure construction field. Basically in this development, land is an important basic material which serves to support the load of physical buildings such as foundations, road embankments, dams, bridges and others. Indonesia has a wide range of soil conditions which are different in each place so it is inevitable damage to roads and buildings due to different technical properties of the foundation soil. The type of soil to aware of, are expansive clays. An expansive clay soil has a very low bearing capacity in condition of high water content, wide range of fluctuation between soaked (swelling) and unsoaked (shrinkage), and high plasticity.

Efforts to reduce the wide range of swelling-shrinkage and to increase the bearing capacity of an expansive soil can be achieved by mechanical or chemical soil stabilizations. This study using the chemical stabilization, by mixing the additive materials (lime) an the local expansive soil by the method of Deep Soil Mixing (DSM). DSM is a method to improve expansive soils by making columns of mixed the soil and lime in-situ.

This testing is done in a box with the original soil sample volume  $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ . This soil test consists of 4 cm diameter DSMs with variations in distance 4 cm, 5 cm, 6 cm, and variations of length 10 cm, 15 cm, and 20 cm, patterned triangular in their position configurations. Loading process performed on the original soil and stabilized soil. Loading process using a vertical load to the  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  plate surface. To get the maximum load is done by reading the measuring instrument up to three times to obtain the soil bearing capacity. Based on the analysis, maximum bearing capacity of the DSM achieved at the closest distance  $L = 1D$  (4 cm) and the column length  $D_f = 4B$  (20 cm).

In addition, DSM volume ratio in the soil can affect the swelling of soil. The bigger the DSM volume ratio the lower the potential for swelling. For this test, the ratio of DSM stabilization ratio of 87.52% has reduce the swelling to 0.75%.

**Keywords:** Expansive Soil, Soil Stabilization, Lime, Deep Soil Mixing, Bearing Capacity.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Saat ini di Indonesia, pembangunan telah berkembang dengan pesat khususnya dalam bidang konstruksi. Pembangunan konstruksi dilakukan guna meningkatkan kebutuhan terhadap sarana dan prasarana transportasi yang ada. Pada dasarnya dalam pembangunan tersebut, tanah merupakan material dasar penting yang berfungsi menahan beban dari bangunan fisik seperti pondasi bangunan, timbunan jalan raya, bendungan, jembatan dan lain-lain.

Indonesia memiliki berbagai keadaan tanah yang berbeda di setiap tempat sehingga tidak bisa dihindari kerusakan pada jalan dan gedung akibat berbedanya sifat teknis tanah dasar tersebut. Jenis tanah yang perlu diperhatikan yaitu tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan tanah yang memiliki daya dukung tanah yang rendah pada kondisi muka air yang tinggi, sifat fluktuasi kembang susut (swelling) yang besar dan plastisitas yang tinggi. Tanah lempung ekspansif mempunyai kandungan mineral montmorillonite yang memiliki luas permukaan paling besar dan mudah menyerap air dalam jumlah banyak dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga tanah lempung ekspansif mempunyai kepekaan terhadap pengaruh air dan sangat mudah mengembang. Kemampuan mengembang yang cukup besar pada tanah lempung ekspansif mengakibatkan terjadinya penurunan yang sering kali tidak dapat dipikul oleh struktur di atasnya. Salah satu cara mengatasi untuk menstabilkan tanah ekspansif yaitu dengan stabilisasi tanah.

Stabilitas tanah merupakan suatu proses untuk memperbaiki sifat-sifat tanah dengan menambahkan sesuatu pada tanah agar dapat menaikkan kekuatan tanah dan mempertahankan kekuatan geser. Metode stabilisasi yang sering digunakan ada dua, yaitu stabilisasi mekanis dan stabilisasi kimiawi. Pada penelitian ini, digunakan stabilisasi kimiawi dengan penambahan bahan *additive* untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat-sifat teknis tanah menambah kekuatan dan kuat dukung tanah. Salah satu bahan aditif yang digunakan pada penelitian ini adalah kapur.

Kapur adalah salah satu bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah. Jenis kapur yang banyak digunakan adalah kapur tohor (CaO) dan Kapur Hidrasi atau Kapur Padam. Pada tanah yang mengandung lempung, kapur akan segera bereaksi membentuk suatu struktur campuran yang stabil. Hasil campurannya juga akan bersifat mudah dikerjakan dan dipadatkan. Penelitian mengenai pemanfaatan kapur sudah banyak dilakukan di Indonesia. Salah satu penelitian mengenai penambahan bahan *additive* kapur yang telah terbukti dapat memperbaiki sifat dan daya dukung tanah yaitu penelitian Warsiti (2009) mengenai peningkatan CBR dan memperkecil *swelling* tanah sub grade dengan metode stabilisasi tanah dengan kapur. Dari penelitian tersebut, hasil pengujian sifat fisik dan mekanis dari campuran tanpa pemeraman kepadatan kering ( $\gamma_d$ ), CBR keadaan *unsoaked* dan *soaked* terbesar dicapai pada persentase 10% kapur, sehingga dapat disimpulkan dari penelitian tersebut bahwa yang paling baik untuk stabilisasi tanah lempung adalah dengan penambahan kapur 10%.

Selain itu, adapun juga metode pencampuran bahan *additive* kapur pada tanah ekspansif yang dikenal sebagai pencampuran permukaan (*shallow soil mix*). Pencampuran permukaan dilakukan pada seluruh wilayah lokasi tanah yang akan dibangun pada kedalaman tanah kurang dari 1,5 meter. Apabila kedalaman tanah yang akan diperbaiki lebih dari 1,5 meter maka sebaiknya digunakan metode pencampuran *Deep Soil Mixing* (DSM), seperti pada tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur dengan kedalaman sekitar 1- 3 meter.

*Deep Soil Mixing* (DSM) adalah perbaikan tanah dimana tanah dicampur dengan bahan reagen semen dan dicampur secara mekanik dengan bantuan *crane* dilengkapi alat hidrolis dan auger. Tujuan dari *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi kompresibilitas tanah. Selain itu, *Deep Soil Mixing* (DSM) ini terbukti efektif untuk pemulihan tanah yang mengandung bahan organik maupun anorganik. *Deep Soil Mixing* (DSM) masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Walaupun dalam pelaksanaan metode ini lebih sederhana dibanding dengan metode pencampuran permukaan, metode *Deep Soil Mixing* membutuhkan alat yang canggih karena dalam waktu yang bersamaan alat harus dapat mengebor dan mencampur tanah dengan bahan *additive* secara rata.

Menurut penelitian Ichvan (2015) mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan pencampuran 15% *fly ash* pada tanah ekspansif di Bojonegoro menjelaskan bahwa semakin dekat jarak dan semakin panjang DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah, pengaruh panjang DSM lebih dominan dibandingkan pengaruh jarak DSM dan rasio volume DSM yang semakin besar akan mengurangi potensi pengembangan

(swelling). Sehingga, dalam penelitian ini lebih difokuskan untuk menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan menggunakan bahan *additive* kapur berpola *Triangular*.

### 1.2. Identifikasi Masalah

Tanah lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah. Dari hal tersebut dapat dijelaskan beberapa masalah yang dapat diidentifikasi, yaitu:

1. Lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang sangat besar karena jika kadar airnya naik maka tanah akan mengembang dan jika kadar airnya turun maka tanah akan menyusut sehingga berbahaya jika didirikan bangunan.
2. Lempung ekspansif mempunyai daya dukung tanah yang rendah akibat penambahan kadar air sehingga diperlukan upaya perbaikan tanah seperti pencampuran tanah dengan zat *additive* salah satunya dengan kapur.
3. Pencampuran zat *additive* umumnya dilakukan pada permukaan, padahal pencampuran tanah dan bahan *additive* pada permukaan (*shallow soil mix*) membutuhkan biaya yang besar karena semua tanah pada lokasi pembangunan dicampur dengan bahan *additive* sehingga meningkatkan biaya konstruksi.
4. Penelitian mengenai perbaikan tanah dalam di Indonesia masih belum ada yang meneliti walaupun penelitian tentang penambahan bahan *additive* sudah banyak dilakukan.

### 1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan urutan di atas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm konfigurasi pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro?
2. Berapa jarak dan panjang maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm konfigurasi pola *triangular* untuk meningkatkan nilai daya dukung pada tanah dukung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur?
3. Bagaimana pengaruh penambahan kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif dan pada penambahan berapa persen didapatkan nilai *swelling* minimum?

#### 1.4. Batasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup penelitian, maka pembatasan masalah diberikan sebagai berikut:

1. Sampel tanah yang digunakan adalah tanah lempung ekspansif dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.
3. Kapur yang digunakan merupakan kapur yang dijual di toko kawasan Kota Malang.
4. Digunakan kadar kapur 10% terhadap berat isi kering tanah sesuai penelitian pendahuluan.
5. Waktu perawatan yang dilakukan selama 3 hari.
6. Kadar air yang digunakan pada tanah asli yaitu 27,9% dengan berat isi kering tanah ( $\gamma_d$ ) 1,28 gr/cm<sup>3</sup>.
7. Kadar air yang digunakan untuk campuran 10% kapur yaitu 24,1% dengan berat isi kering tanah ( $\gamma_d$ ) 1,41 gr/cm<sup>3</sup> dimana data tersebut didapat dari penelitian pendahuluan.
8. Pada penelitian ini digunakan konfigurasi pola *triangular* pada *Deep Soil Mixing* (DSM).
9. Sampel yang dicampur dengan kapur (DSM) memiliki diameter 4 cm.
10. Tidak dilakukan analisa pengaruh kapur secara mendetail.
11. Variasi jarak DSM (L) yang digunakan yaitu 1D; 1,25D; 1,5D; D merupakan diameter *Deep Soil Mixing* (DSM) yaitu 4 cm.
12. Variasi panjang DSM (Df) yang digunakan dalam pencampuran kapur yaitu 2B, 3B, 4B dengan B merupakan lebar plat yang digunakan yaitu 5 cm.
13. Metode pencampuran yang digunakan *dry mixing*.
14. Luas area yang distabilisasi menggunakan DSM adalah 10x10 cm.
15. Pencampuran sampel tanah dengan kapur dianggap homogen dan dilakukan diluar *box*.
16. Tanah dasar yang distabilisasi hanya mencakup pada area yang terpengaruh tegangan vertikal di bawah luasan pelat yang menerima beban merata, yaitu hingga jarak 2×B arah horizontal dan 3×B arah vertikal dari titik pusat beban bekerja.
17. *Box* yang digunakan memiliki dimensi 30x30x30 cm<sup>3</sup>.
18. Volume tanah dalam *box* 30x30x20 cm<sup>3</sup>.
19. Uji pembebanan dilakukan dengan beban hidrolik vertikal.

20. Ukuran pelat yang digunakan sebagai model pondasi yaitu  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ .
21. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali sama dan penurunan masih berlanjut.
22. Alat pemadat yang digunakan untuk memadatkan tanah asli berbentuk persegi dengan ukuran luas  $12,5 \times 12,5 \text{ cm}$  dengan berat 9,56 kg.
23. Alat pemadat untuk *Deep Soil Mixing* merupakan pejal dengan berat 2,56 kg dengan diameter 2,9 cm.
24. Jumlah layer pada sampel pemadatan sebanyak 4 layer.
25. Volume tanah yang diperbaiki untuk analisis pengembangan berukuran  $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ .
26. Potensial pengembangan (*swelling*) diperoleh dari rumus pendekatan penelitian oleh Adelina M.F (2016).

### 1.5. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui adanya pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
3. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung ekspansif dan berapa persen penambahan kapur yang didapatkan nilai *swelling* minimum.

### 1.6. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk kalangan akademis hasil penelitian ini digunakan sebagai rujukan untuk penelitian pengembangan teknologi stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan bahan *additive* dengan metode *Deep Soil Mix* (DSM).
2. Untuk kalangan praktisi hasil penelitian ini menjadi sumber informasi sebagai bahan pertimbangan dalam merencanakan sebuah struktur bangunan maupun teknik perbaikan tanah pada tanah lempung ekspansif yang ada di lapangan khususnya di wilayah kabupaten Bojonegoro.



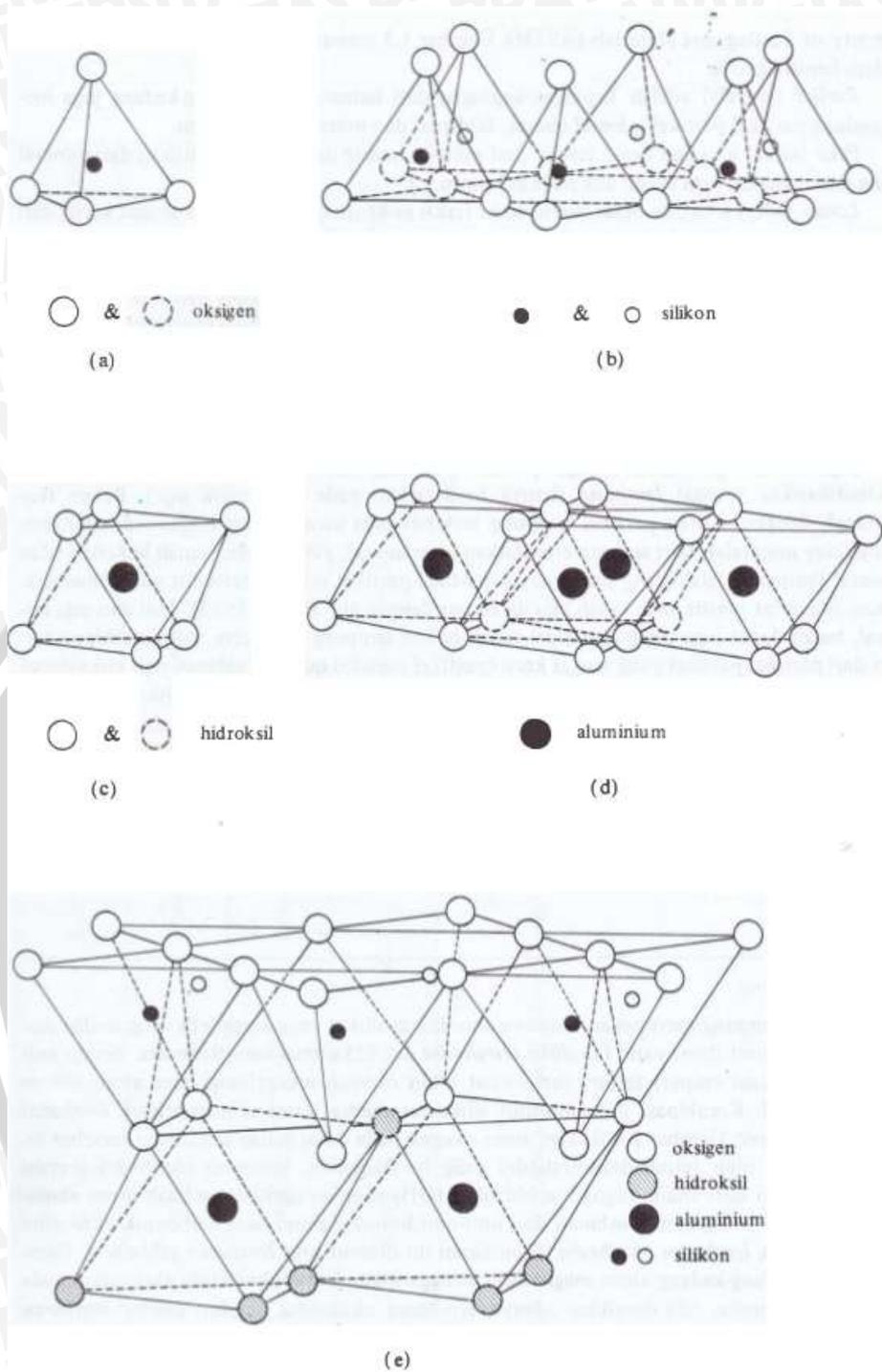
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Tanah Lempung dan Mineral Lempung

Lempung sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang berbentuk pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung dan mineral halus lainnya. Tanah lempung dapat didefinisikan sebagai golongan partikel yang berukuran kurang dari 0,002 mm (= 2 mikron), namun ukuran partikel antara 0,002 mm sampai 0,005 mm dapat digolongkan sebagai partikel lempung (ASTM D-653). Tanah diklasifikasikan sebagai lempung berdasarkan ukurannya dan tanah dengan ukuran partikel lempung belum tentu mengandung mineral-mineral lempung.

Tanah dapat juga disebut sebagai tanah bukan lempung meskipun terdapat partikel-partikel yang sangat kecil (tidak dapat menyebabkan terjadinya sifat plastis dari tanah). Berdasarkan segi ukuran, partikel-partikel dapat digolongkan mineral lempung yang mempunyai ukuran lebih kecil dari 2 mikron atau < 5 mikron menurut sistem klasifikasi. Mineral lempung merupakan senyawa aluminium silikat yang kompleks yang terdiri dari satu atau dua unit dasar yaitu *silika tetrahedra* dan *aluminium oktahedra*. Setiap unit tetrahedra (berisi empat) terdiri dari empat atom oksigen mengelilingi satu atom silikon. Kombinasi dari unit-unit *tetrahedra* dapat membentuk lembaran *silika*. Unit-unit *oktahedra* (berisi delapan) terdiri dari enam gugus ion hidroksil (OH) yang mengelilingi sebuah atom aluminium dan kombinasi dari unit-unit *oktahedra* akan membentuk lembaran *oktahedra* (*lembaran gibbsite*). Kombinasi lembaran-lembaran silika gibbsite ini nantinya akan membentuk mineral penyusun lempung. Mineral penyusun lempung dibagi atas 3, yaitu *kaolinite*, *illite* dan *montmorillite* (Das, 1995).



**Gambar 2.1.** (a) Silika tetrahedra; (b) lembaran silika; (c) alumunium oktahedra; (d) lembaran oktahedra (gibbsite); (e) lembaran silika-gibbsite

Sumber: Das (1995)

## 2.2. Tanah Lempung Ekspansif

Lempung ekspansif merupakan jenis tanah yang memiliki sifat kembang susut tanah yang tinggi yang disebabkan oleh kandungan mineral ekspansif sehingga memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi. Apabila terjadi peningkatan kadar air, lempung ekspansif akan mengembang disertai dengan meningkatnya tekanan air pori dan timbulnya tekanan pengembangan. Namun ketika kadar air berkurang sampai batas susutnya akan terjadi penyusutan. Menurut Bowles (1986) tanah lempung diperkirakan akan mempunyai perubahan volume yang besar (ekspansif) apabila indeks plastisitas melebihi 20 ( $IP > 20$ ).

Menurut Chen (1975), mineral lempung terdiri dari tiga komponen penting yaitu *montmorillonite*, *illite*, dan *kaolinite*. Mineral *montmorillonite* mempunyai luas permukaan yang lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah banyak bila dibandingkan dengan mineral lainnya. Sehingga tanah yang mempunyai kepekaan terhadap pengaruh air, sangat mudah mengembang. Struktur *kaolinite* terdiri dari unit lapisan *silica* dan *aluminium* yang diikat oleh ion Hidrogen, *kaolinite* membentuk tanah yang stabil karena strukturnya yang terikat teguh mampu menahan molekul-molekul air, sehingga tidak masuk ke dalamnya.

Struktur *illite* terdiri dari lapisan-lapisan unit *silica-aluminium-silica* yang dipisahkan oleh ion K (kalium) yang mempunyai sifat mengembang. Struktur *montmorillonite* mirip dengan struktur *illite*, tetapi ion pemisahannya berupa ion  $H_2O$  yang sangat mudah lepas, mineral ini dapat dikatakan sangat tidak stabil pada keadaan tergenang, air dengan mudah masuk ke dalam sela antar lapisan ini sehingga mineral mengembang, pada waktu mengering, air di antara lapisan juga mengering sehingga mineral menyusut. Karena sifat tersebut *montmorillonite* sangat sering menimbulkan masalah pada bangunan (Hardiyatmo, 2002).

## 2.3. Sistem Klasifikasi Tanah

Untuk menentukan jenis-jenis tanah pada suatu daerah dapat digunakan sistem klasifikasi tanah. Sistem klasifikasi tanah dapat didasarkan pada tekstur yang relatif sederhana karena hanya berdasarkan distribusi ukuran butir tanah (Das, 1995). Umumnya dalam pekerjaan konstruksi bangunan dipakai dua sistem klasifikasi tanah yaitu sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) dan sistem klasifikasi *American Association Of State Highway and Transportation Official* (AASHTO).

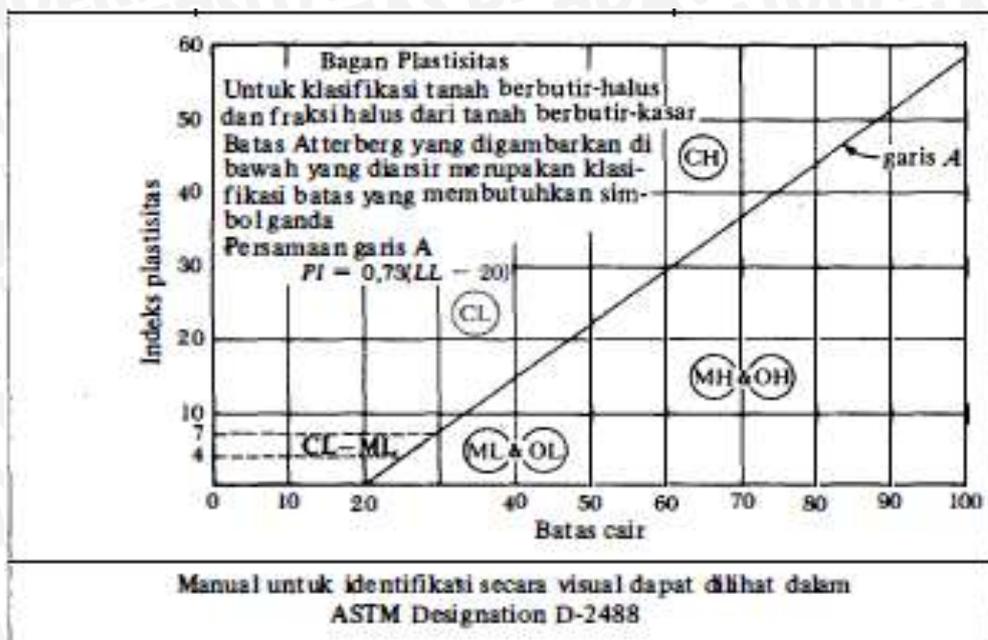
### 2.3.1. Unified Soil Classification System (USCS)

Dalam sistem ini, *Cassagrande* membagi tanah atas 3 (tiga) kelompok (Sukirman, 1992) yaitu :

1. Tanah berbutir kasar, < 50% lolos saringan No. 200.
2. Tanah berbutir halus, > 50% lolos saringan No. 200.
3. Tanah organik yang dapat dikenal dari warna, bau dan sisa-sisa tumbuh-tumbuhan yang terkandung di dalamnya.

Tabel 2.1 *Unified Soil Classification System (USCS)*

Divisi		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria Klasifikasi	
<p><i>Handwritten note:</i> Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar terlarut saringan no. 4 (4,75 mm)</p>	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3  Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.		
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$  Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		
	<p><i>Handwritten note:</i> Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)</p>		SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 60$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ atau 1 dan 3  Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
			SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus.	
Pasir bersih kandungan butiran halus		SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$  Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
SC	Pasir berlanau, campuran pasir-lempung				
<p><i>Handwritten note:</i> Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)</p>	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	<p>Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas atterberg yang termasuk dalam daerah yang arsir bermerk batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.</p> <p>Batas Cair LL (%) Garis A: <math>PI = 0,73 (LL - 20)</math></p>	
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('clean clays')		
	Lanau dan lempung batas cair > 50%	OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah		
		MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis.		
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')		
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi		
Tanah dengan organik tinggi		Gambut ('peat'), dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat ASTM Designation D-2488		



### 2.3.2. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO)

Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Hoentogler dan Terzaghi, yang akhirnya diambil oleh *Bureau Of Public Roads*. Sistem ini membedakan tanah dalam 8 kelompok yang diberi nama dari A-1 sampai A-8. A-8 adalah kelompok tanah organik yang bersifat tidak stabil sebagai bahan lapisan struktur jalan raya, maka pada revisi terakhir oleh AASHTO diabaikan.

Pada sistem klasifikasi AASHTO tanah bebutir lolos saringan no. 200 kurang dari 35% maka tanah diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A3. Tanah dengan persentase lolos saringan no. 200 lebih dari 35% diklasifikasikan ke dalam kelompok A4, A-5, A-6 dan A-7.

Sistem klasifikasi didasarkan pada kriteria di bawah ini (Das, 1995):

a. Ukuran butir

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm)

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No.10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm)

Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No.200

## b. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas [*plasticity index* (PI)] sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas sebesar 11 atau lebih.

## c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

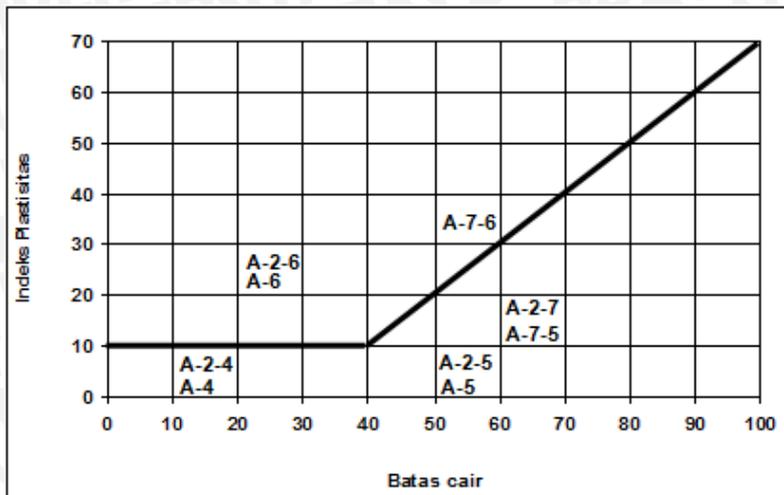
**Tabel 2.2** American Association Of State Highway and Transportation Official (AASHTO)

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Min 25	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Min 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling domonan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai tanah dasar	Baik sekali sampai baik						

Klasifikasi umum	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6"
Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling domonan	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai tanah dasar	Biasa sampai jelek			

\* Untuk A-7-5,  $PL \leq LL - 30$

" Untuk A-7-6,  $PL > LL - 30$



**Gambar 2.2** Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.

Sumber: Das (1995)

## 2.4. Identifikasi Lempung Berpotensi Ekspansif

Identifikasi tanah ekspansif dapat dilakukan dengan 3 cara (Chen, 1975), yaitu:

1. Identifikasi Mineralogi
2. Cara Tidak Langsung (*single index method*)
3. Cara Langsung

### 2.4.1. Identifikasi Mineralogi

Analisa mineralogi sangat berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang susut lempung. Identifikasi mineralogi dapat dilakukan dengan cara:

1. Difraksi Sinar X (*X-Ray Diffraction*).
2. Penyerapan terbilas (*Dye Absorbion*).
3. Penurunan Panas (*Differensial Thermal Analysis*).
4. Analisa Kimia (*Chemical Analysis*).
5. *Electron Microscope Resolution*.

### 2.4.2. Cara Tidak Langsung (*Single Index Method*)

Hasil sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi tanah yang berpotensi ekspansif. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas Atteberg, Linier shrinkage test (uji susut linier), uji pengembangan (*swelling test*) dan *activity method*.

### 2.4.2.1. Atteberg Limit

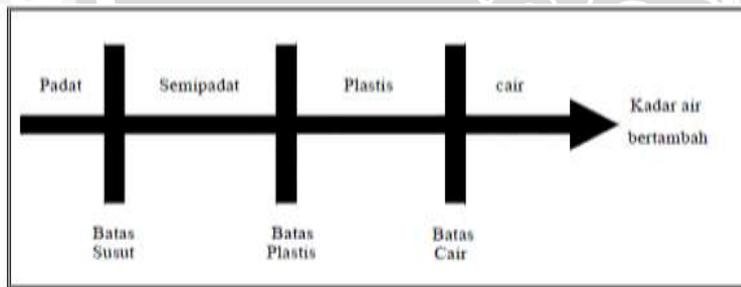
Menurut Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan antara nilai potensi mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji Atteberg. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitas (Chen, 1975), seperti pada Tabel 2.3:

**Tabel 2.3** Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas

Potensi Mengembang	Indeks Plastisitas (IP)
Rendah	0 - 15
Sedang	10 - 35
Tinggi	35 - 55
Sangat Tinggi	55<

Sumber: Chen (1975)

Menurut Atteberg tanah dapat dipisahkan dalam empat keadaan dasar yaitu padat, semi padat, plastis dan cair seperti yang ditunjukkan gambar berikut:



**Gambar 2.3.** Batas-batas Atterberg

#### 1. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (*Liquid Limit*) didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair ditentukan dari pengujian Casagrande (1948).

## 2. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas Plastis (*Plastic Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan silinder sekitar 3 mm mulai retak-retak ketika dipilin-pilin.

**Tabel 2.4** Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP

Plasticity Index (%)	Shrinkage Index (%)	Degree of Expansion
<12	<15	Low
12 - 30	15 - 30	Medium
23 - 30	30 - 40	High
>30	> 40	Very High

Sumber: Chen (1975)

## 3. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Suatu tanah akan mengalami penyusutan bila kadar air secara perlahan-lahan hilang dari dalam tanah. Dengan kehilangan air terus menerus akan mencapai suatu tingkat keseimbangan atau telah mencapai batas susutnya. Batas susut (*Shrinkage Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah.

**Tabel 2.5.** Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI

Plasticity Index (%)	Shrinkage Index (%)	Degree of Expansion
<12	<15	Low
12 - 30	15 - 30	Medium
23 - 30	30 - 40	High
>30	> 40	Very High

Sumber: Raman (1967)

### 2.4.2.2. Linier Shrinkage

Altmeyer (1955) dalam Chen (1975), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai presentasi susut linier dan persentase batas susut Atteberg, seperti yang ditunjukkan Tabel 2.6:

**Tabel 2.6.** Klasifikasi Potensi Mengembang didasarkan pada *Atteberg Limit*

Batas susut Atteberg (%)	Susut linier (%)	Derajat mengembang
<10	> 8	Kritis
10 -12	5 - 8	Sedang
> 12	0 - 8	Tidak kritis

Sumber: Altmeyer (1955) dalam hartosukma (2005)

Susut linier (*linier shrinkage*) didefinisikan sebagai pengurangan massa tanah pada satu ukuran yang dinyatakan dalam persentase terhadap keadaan sebelum terjadi pengurangan.

### 2.4.2.3. Uji Swelling

Swelling adalah bertambahnya volume tanah secara perlahan-lahan akibat tekanan air pori berlebih negatif. Tanah yang banyak mengandung lempung khususnya tanah lempung ekspansif mengalami perubahan volume yang ekstrim ketika kadar air berubah. Perubahan itulah yang dapat membahayakan konstruksi di atasnya. Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor, yaitu:

1. Tipe dan jumlah mineral di dalam tanah
2. Kadar air
3. Susunan tanah
4. Konsentrasi garam dalam air pori
5. Sementasi
6. Adanya bahan organik, dll.

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai swell akibat adanya beban vertikal. Hal ini terjadi akibat air yang masuk ke pori-pori tanah dan

menyebabkan perubahan isi pori tanah sehingga tekanan vertikal bekerja pada tanah tersebut.

Tekanan ke tanah sangat mempengaruhi proses terjadinya pengembangan pada tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah mengembang disebut tekanan pengembangan (*swelling pressure*). Tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah untuk mengembang pada berat volume kering di tempat, hal ini berlaku untuk tanah asli (*undisturbed*) (Chen, 1988). Sedangkan untuk tanah yang dibentuk kembali (*remolded*) pada tanah 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga berat volume kering tersebut.

**Tabel 2.7.** Hubungan Potensi Mengembang dengan Tekanan Mengembang

2.4.1. Swelling potential	Swelling pressure
Low	< 2
Medium	2-4
High	4-7
Very high	>7

**2.4.2.4. Activity Method**

Menurut Skempton (1953) yang disebut aktivitas dapat diketahui berdasarkan rumus berikut:

$$Activity (A) = \frac{PI}{C-10} \dots\dots\dots(2.1)$$

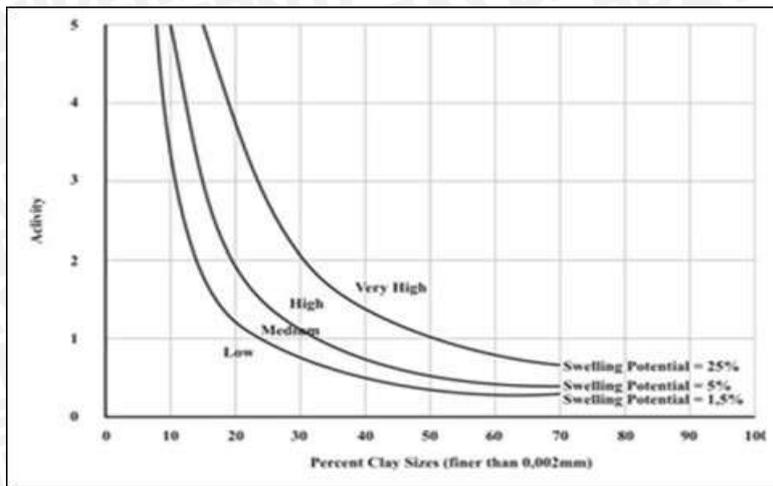
Keterangan : PI = Indeks Plastisitas

C = Presentase lempung lolos saringan 0,002 mm

Dari rumus tersebut kategori tanah terbagi dalam tiga golongan yaitu:

- A < 0,75 (Tidak Aktif)
- 0,75 < A < 1,25 (Normal)
- A > 1,25 (Aktif)





**Gambar 2.4** Grafik klasifikasi potensi mengembang  
Sumber: Seed dkk. (1962)

#### 2.4.2. Cara Langsung

Metode pengukuran langsung merupakan suatu cara yang digunakan untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Terdapat dua cara dalam pengukuran tekanan pengembangan secara langsung yaitu pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi, kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ke tanah semula. Cara yang kedua yaitu dengan merendam tanah dalam air dengan mempertahankan volume atau mencegah terjadinya pengembangan dengan cara menambah beban di atasnya setiap saat. Metode ini biasanya disebut *constan volume method*.

### 2.5. Stabilitas Tanah

Stabilisasi tanah adalah suatu metode yang digunakan untuk memperbaiki kualitas tanah dasar sehingga diharapkan tanah dasar tersebut mutunya dapat lebih baik dan dapat meningkatkan kemampuan daya dukung tanah terhadap konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Stabilisasi dapat dibagi menjadi 2 metode, yaitu: stabilisasi mekanis dan stabilisasi kimiawi. Stabilisasi tanah dengan cara mekanis adalah perbaikan dengan berbagai jenis pemadatan mekanis, seperti mesin gilas, benda berat yang dijatuhkan (*pounder*), peledakan dengan alat peledakan, dan lain-lain. Sedangkan stabilisasi tanah secara kimiawi adalah perbaikan dengan bahan *additive* seperti semen, gamping/kapur, *fly ash*, dan lain-lain. Metode ini sangat bergantung pada lama waktu pemeraman, hal ini disebabkan karena proses perbaikan sifat-sifat tanah terjadi proses kimia yang membutuhkan waktu lama untuk zat kimia yang ada didalam zat *additive* untuk bereaksi.

### 2.5.1. Stabilitas Tanah dengan Kapur

Kapur adalah salah satu bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah. Bentuk kapur yang banyak digunakan untuk tujuan stabilisasi tanah adalah kapur tohor (CaO) dan kapur hidrasi atau kapur padam.



Dari reaksi kimia diatas dapat disimpulkan bahwa kapur akan mengikat kadar air tanah yang berada didalam tanah, sehingga tanah lempung ekspansif akan mengalami penyusutan yang dapat meningkatkan daya dukung tanah lempung tersebut.

Menurut peraturan SK SNI S-01-1994-03 yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum mensyaratkan bahan kapur untuk stabilisasi adalah sebagai berikut:

1. Kapur berbentuk butiran halus
2. Jenis Kapur yang digunakan sebagai bahan stabilisasi adalah kapur padam dan kapur tohor
3. Spesifikasi ini mencakup persyaratan kapur tipe I dan II, yang masing-masing tipe terdiri dari kelas A, B, C. Kapur tipe I adalah kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi, dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4% berat. Kapur tipe II adalah kapur magnesium atau dolomit yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan paling tinggi 36% berat. Sedangkan ukuran butiran maksimum kelas A, B, C dan persyaratan kimia kapur tipe I dan II dapat dilihat pada Tabel 2.8 berikut.

**Tabel 2.8.** Persyaratan Kimia Kapur Tipe I dan Tipe II

Persyaratan Kimkia Kapur Tipe I				
NO	SENYAWA	KELAS		
		A	B	C
01.	HYDRATE ALKALINITY Ca(OH) <sub>2</sub>	90 %	85 %	75 %
02.	KALSIUM OKSIDA ANHIDRAT (CO) MAKSIMUM.	7 %	8 %	9 %
03.	KADAR AIR BEBAS MAKSIMUM	3 %	3 %	2%

Persyaratan Kimkia Kapur Tipe II				
NO	SENYAWA	KELAS		
		A	B	C
01.	KALSIUM OKSIDA MAGNESIUM OKSIDA (CAOMGO) MINIMUM	98 %	96 %	94 %
02.	KALSIUM OKSIDA ANHIDRAT (CO)	7 %	8 %	9 %
03.	KADAR AIR BEBAS MAKSIMUM	3 %	3 %	2%



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

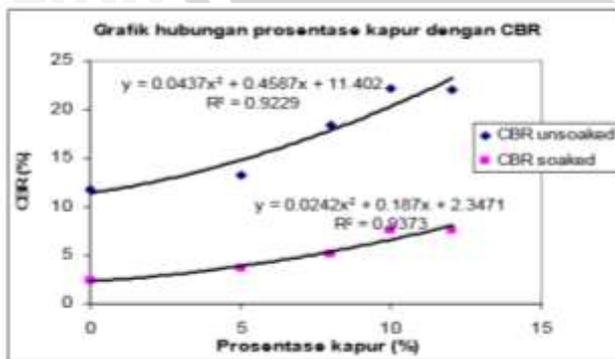
- Warsiti (2009) dengan judul “Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur”. Pada penelitian tersebut, persentase penambahan kapur pada tanah lempung sebesar 5%, 8%, 10%, dan 12% dengan waktu 3 hari pemeraman.

Hasil dari penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa penambahan kapur 10% dengan waktu *curing* 3 hari dapat meningkatkan CBR. Dalam keadaan *unsoaked*, presentase kapur 10% mengalami kenaikan dari 11,8% menjadi 22,1% tetapi pada pada persentase kapur 12% CBR turun sedikit menjadi 22,0%. Sedangkan dalam keadaan *soaked*, presentase kapur 10% mengalami kenaikan dari 2,45% menjadi 7,6% tetapi pada pada persentase kapur 12% CBR turun sedikit menjadi 7,58%. Dan pengujian *swelling* menghasilkan nilai *swelling* mengalami 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

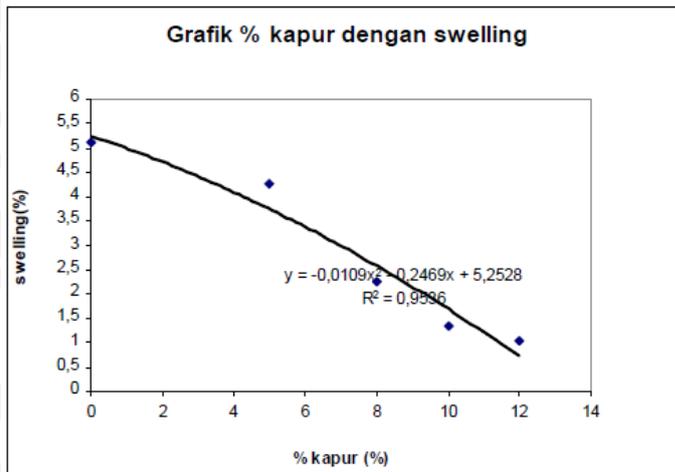
Jenis penelitian	Prosentase kapur					
	Kd air opt(%)	0 %	5 %	8 %	10 %	12 %
Kpdt kering mak		24.0	21.6	19.8	17.10	19.2
CBR unsoaked (%)		1,49	1,580	1,62	1,65	1,64
CBR soaked (%)		11,8	13.3	18.4	22.1	22
Kd air opt (%)		2,45	3.6	5.1	7.6	7.58
Swell potensial (%)		5,13	4,25	2,25	1,331	1,025

Sumber: Warsiti (2009)



**Gambar 2.5.** Grafik hubungan persentase kapur dengan CBR

Sumber: Warsiti (2009)



**Gambar 2.6.** Grafik hubungan persentase kapur dengan *Swelling*  
Sumber: Warsiti (2009)

- Dari penelitian Ninik Ariyani dan Ana Yuni M (2009) mengenai “Pengaruh Penambahan Kapur pada Tanah Lempung Ekspansif dari Dusun Bodrorejo Klaten”, bahwa penambahan kapur menurunkan nilai indeks plastisitas tanah. Penurunan yang ditunjukkan dari hasil uji batas-batas konsistensi pada tanah asli dengan nilai PI (*Plastic Index*) sebesar 36,80% mengalami penurunan sampai 2,87% pada prosentase penambahan kapur 10% dan waktu pemeraman 14 hari. Penurunan indeks plastisitas yang terjadi sebesar 128% dari tanah aslinya. Dan penambahan kapur menurunkan lekatan antara butiran tanah sehingga tanah akan mudah pecah ketika diberi tekanan vertikal, tetapi kemungkinan terjadi friksitas pada tanah atau timbulnya sudut geser internal ( $\phi$ ) pada tanah.

### 2.5.2. Deep Soil Mix (DSM)

*Deep Soil Mixing* (DSM) merupakan metode pencampuran tanah dengan bahan *additive* dengan panjang melebihi 30 m. Pada metode DSM digunakan bantuan *crane* yang dilengkapi *auger* hidrolik yang dapat menyemprotkan bahan *additive* pada ujung dan sisi *auger*. Proses pencampuran diawali dengan pengeboran pada titik yang telah direncanakan pada panjang tertentu, setelah panjang yang diinginkan tercapai dilanjutkan dengan proses penyampuran bahan *additive* dengan cara menyemprotkan bahan *additive* pada *auger* dengan putaran terbalik dengan kecepatan yang lebih tinggi sambil menarik *auger* ke atas. Setelah proses pencampuran selesai dilanjutkan dengan proses pemadatan pada titik tanah daerah yang diperbaiki kondisinya. Pada perbaikan tanah menggunakan *Deep Soil Mixing* (DSM) tanah tidak seluruhnya lokasi tanah yang diperbaiki sifat mekanisnya dicampur menggunakan bahan *additive* tetapi

hanya pada titik-titik pengeboran sehingga biaya dapat dikurangi sesuai kebutuhan perbaikan tanah.

Dalam pelaksanaan *Deep Soil Mix* (DSM) terbagi menjadi dua yaitu metode basah (*Deep wet mixing*) dan metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode basah (*Deep wet mixing*) bahan *additive* dicampurkan dalam keadaan basah seperti bubur kemudian diinjeksikan pada tanah untuk dicampur.

Metode pencampuran basah merupakan metode yang paling umum digunakan untuk pencampuran tanah dalam (*Deep Soil Mix*). Pada metode basah kondisi muka air tanah tidak berpengaruh sehingga metode ini cocok untuk berbagai kondisi tanah. Agar tanah tidak melekat pada pisau poros berputar (*auger*) maka alat pencampurnya biasanya dilengkapi dengan baling-baling anti-rotasi.

Selain metode basah dalam teknik perbaikan tanah dalam juga dikenal metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode kering tanah dicampur dengan bahan *additive* dalam kondisi kering (berbentuk bubuk) dengan menggunakan tekanan udara. Teknik pencampuran kering biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi kompresibilitas tanah lempung yang sangat lembut. Pada pencampuran metode kering harus diperhatikan kondisi kadar air tanah asli yaitu minimal 20% karena tidak ditambahkan air pada bahan *additive* untuk reaksi hidrasi.



(a)

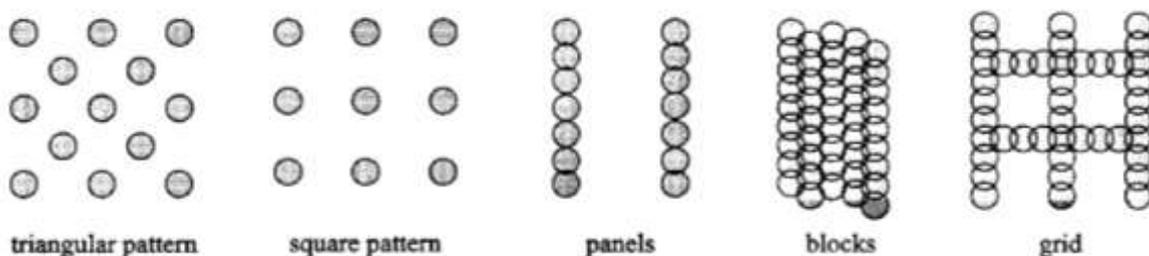


(b)

**Gambar 2.7.** Alat *Deep Soil mix* (DSM), (a) *Deep dry mixing*, (b) *Wet dry mixing*

Sumber: Bruce, dkk (2013)

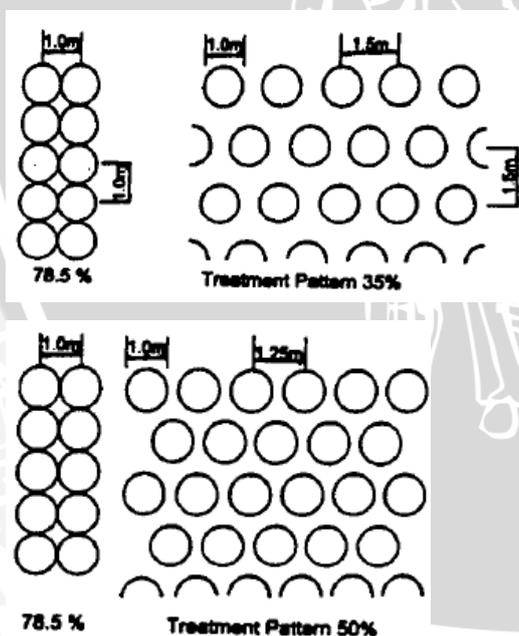
Dalam metode pelaksanaan *Deep soil Mixing* (DSM) terdapat beberapa pola yang sering diterapkan. Pola-pola tersebut diantaranya pola *triangular pattern*, pola *square pattern*, pola *panels*, pola *blocks*, dan pola *grid*. Gambar pola *deep soil mixing* dapat dilihat pada Gambar 2.8 ( Kosche, 2004).



**Gambar 2.8.** Pola *deep soil mix* (DSM)

Sumber: Kosche (2004)

Dalam beberapa kasus di lapangan, variasi konfigurasi dan jarak antar kolom dilakukan guna mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas tanah. Variasi ini pernah dilakukan pada proyek *Tomei Freeway* di Jepang, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.

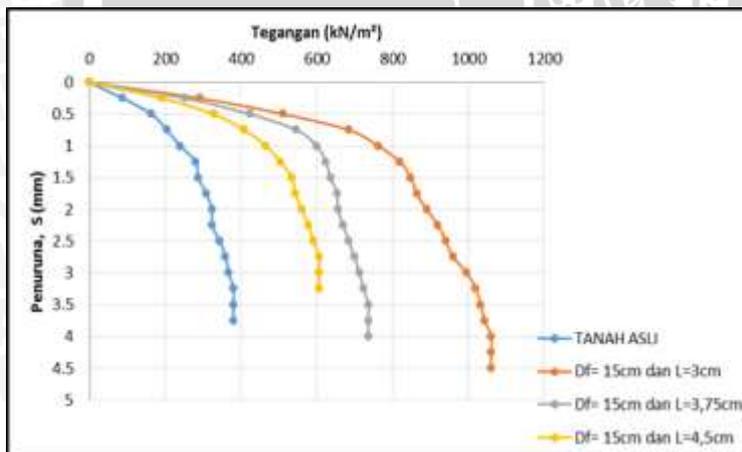


**Gambar 2.9.** Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM

Sumber: Bruce (2000)

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

- Pada tahun 2015 Ichvan Danny K. telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro. Hasil dari penelitian tersebut yaitu daya dukung terbesar terjadi pada panjang  $3B = 15$  cm dengan jarak DSM 3cm yaitu sebesar  $1060 \text{ Kn/m}^2$  dengan penurunan 4,5mm. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli. Selain itu, hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 15cm, terjadi peningkatan daya dukung tanah sebesar 179% dari tanah asli. Berikut ini adalah grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM dan grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L) dan panjang DSM (Df) :

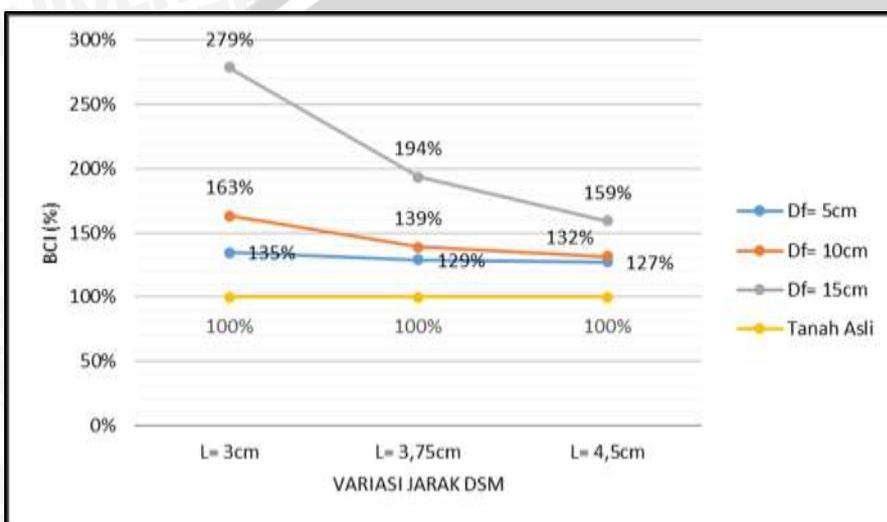


**Gambar 2.10.** Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang  $3B = 15$  cm

Sumber: Ichvan Danny K (2015)

**Tabel 2.10.** Nilai BCI untuk variasi jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kN/m <sup>2</sup> )	qu dengan DSM (kN/m <sup>2</sup> )	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)	Peningkatan BCI (%)	
1	1B= 5cm	1D= 3cm	380	512	135%	35%	4%	1%
2		1,25D= 3,75cm		490	129%	29%		
3		1,5D= 4,5cm		484	127%	27%		
4	2B= 10cm	1D= 3cm		620	163%	63%	17%	6%
5		1,25D= 3,75cm		528	139%	39%		
6		1,5D= 4,5cm		500	132%	32%		
7	3B= 15cm	1D= 3cm		1060	279%	179%	44%	21%
8		1,25D= 3,75cm		736	194%	94%		
9		1,5D= 4,5cm		606	159%	59%		

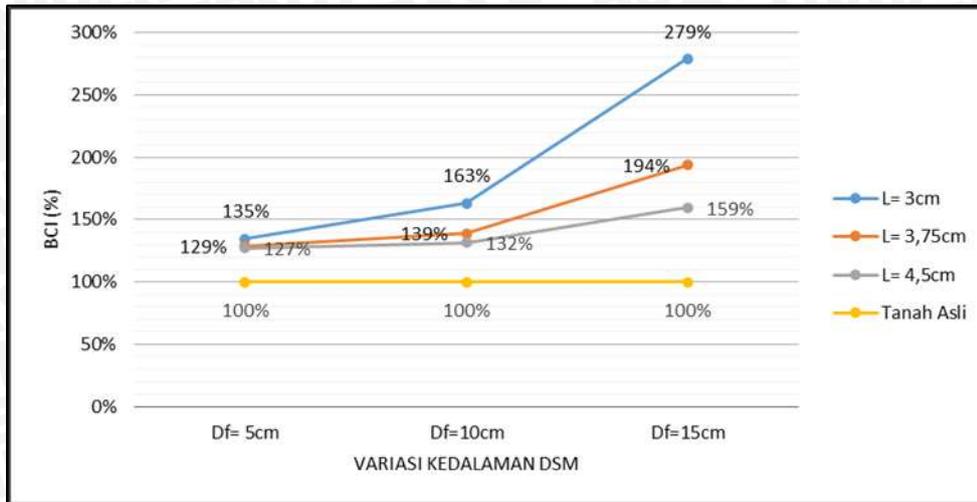


**Gambar 2.11.** Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Sumber: Ichvan Danny K (2015)

**Tabel 2.11** Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (Df)

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kN/m <sup>2</sup> )	qu dengan DSM (kN/m <sup>2</sup> )	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)	Peningkatan BCI (%)	
1	1D= 3cm	1B= 5cm	380	512	135%	35%	21%	71%
2		2B= 10cm		620	163%	63%		
3		3B= 15cm		1060	279%	179%		
4	1,25D= 3,75cm	1B= 5cm		490	129%	29%	8%	39%
5		2B= 10cm		528	139%	39%		
6		3B= 15cm		736	194%	94%		
7	1,5D= 4,5cm	1B= 5cm		484	127%	27%	3%	21%
8		2B= 10cm		500	132%	32%		
9		3B= 15cm		606	159%	59%		



Gambar 2.12. Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)  
Sumber: Ichvan Danny K (2015)

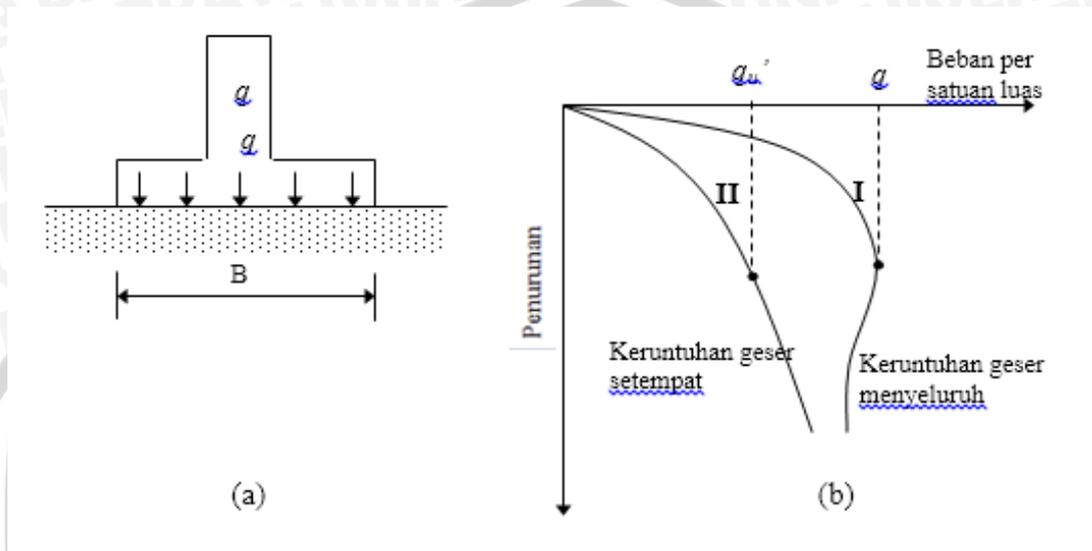
- Pada tahun 2009 Agus Setyo M. telah melakukan penelitian mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak Bantul-Yogyakarta di laboratorium. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Dalam penelitian Setyo M. (2009) 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. Penambahan kolom kapur meningkatkan daya dukung tanah baik pada arah vertikal maupun arah radial hingga mencapai 3 kali ukuran diameter dari pusat kolom kapur

## 2.6. Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah merupakan kemampuan atau kekuatan tanah memikul beban yang bekerja padanya yang biasanya disalurkan melalui pondasi. Sedangkan daya dukung batas ( $q_u = q_{ult} = \text{ultimate bearing capacity}$ ) merupakan beban maksimum yang dapat diterima oleh tanah tanpa menyebabkan keruntuhan pada tanah pendukung tepat di bawah dan di sekeliling pondasi.

Konsep perhitungan daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilihat dalam model pondasi menerus dengan lebar (B) yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat (tanah yang kaku) seperti pada Gambar 2.13a. Apabila

beban terbagi rata ( $q$ ) tersebut ditambah, maka penurunan pondasi akan bertambah pula. Bila besar beban terbagi rata  $q = q_u$  ( $q_u$  = daya dukung tanah batas) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban  $q$  lebih lanjut seperti Gambar 2.13 b. Hubungan antara beban dan penurunan ditunjukkan pada kurva I pada Gambar 2.13 b. Untuk keadaan ini,  $q_u$  didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah (Das, 1995)



**Gambar 2.13.** Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal

- (a) Model pondasi
- (b) Grafik hubungan antara beban dan penurunan

Menurut Terzaghi, suatu pondasi didefinisikan sebagai pondasi dangkal apabila kedalaman  $D_f$ , adalah kurang atau sama dengan lebar pondasi  $B$ . Sedangkan untuk daya dukung batas atau *ultimate bearing capacity* artinya suatu batas nilai apabila dilampaui akan menimbulkan keruntuhan (*collapse*). Oleh karena itu daya dukung yang diijinkan (*allowable bearing capacity*) harus lebih kecil daripada *ultimate bearing capacity*. Daya dukung batas (*quilt, ultimate bearing capacity*; kg/cm<sup>2</sup>, t/m<sup>2</sup>) suatu tanah yang berada di bawah beban pondasi akan bergantung kepada kekuatan geser (*shear strength*). Nilai daya dukung tanah yang diijinkan ( $q_a$ , *allowable bearing capacity*) untuk suatu rancangan pondasi ikut melibatkan faktor karakteristik kekuatan dan deformasi. Daya dukung ijin (*allowable bearing capacity, qa*) bergantung besarnya Faktor Keamanan ( $F$ ) yang dipilih. Pada umumnya nilai  $F$  yang dipilih adalah 2 hingga 5, sehingga nilai daya dukung yang diijinkan adalah sebagai berikut:

$$q_a = \frac{q_{ult}}{F} \dots\dots\dots (2.3)$$

Pada Tabel 2.12 merupakan cara menentukan kapasitas daya dukung tanah untuk beberapa jenis pondasi menurut cara Terzaghi:

**Tabel 2.12.** Kapasitas daya dukung tanah berbagai jenis pondasi menurut cara Terzaghi

Jenis Pondasi	Kapasitas Daya Dukung (Terzaghi)
Lajur/Menerus	$q_{ult} = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$
Segi Empat	$q_{ult} = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,4 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$
Lingkaran	$q_{ult} = 1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,3 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$

Sumber: Zakaria (2006)

Keterangan:

$q_{ult}$  = ultimate soil bearing capacity

$c$  = kohesi tanah

$q$  =  $\gamma \times D$  (berat satuan isi tanah x kedalaman)

$B$  = dimensi lebar atau diameter pondasi

$\phi$  = sudut geser dalam

$N_c, N_q, N_\gamma$  adalah faktor daya dukung tanah yang bergantung kepada  $\phi$

Kohesi ( $c$ ) menurun mengikuti kenaikan kadar air tanah ( $w$ ). Di samping itu sudut geser dalam ( $\phi$ ) juga menurun bila kadar air tanah meningkat. Dengan demikian kekuatan tanah juga akan menurun. Daya dukung tanah untuk pondasi dangkal (Bowles, 1986) bergantung dari kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Nilai kohesi dan sudut geser dalam tinggi pada massa tanah yang berkondisi kering atau kondisi kadar air tanah tak berpengaruh pada fondasi. Pada musim hujan, peningkatan kadar air di dalam tanah akan meningkatkan tekanan air pori ( $m$ ) yang arahnya berlawanan dengan kekuatan ikatan antar butir (kohesi). Sedangkan jarak antar butir relatif menjadi lebih berjauhan sehingga baik kohesi maupun sudut geser dalam menurun.

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. Sedangankan semakin besar rasio volume stabilisasi, nilai kohesi akan semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah kondisi asli dan remolded (tanpa perbaikan).

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan dimulai pada bulan Maret 2016 sampai dengan selesai. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

#### 3.2. Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tanah yang berasal dari Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Kapur dalam bentuk serbuk yang dibeli di toko bangunan di Malang.

#### 3.3. Peralatan Penelitian

Untuk mendukung terlaksananya penelitian ini, digunakan peralatan sebagai berikut:

1. Kotak (*box*) dengan ukuran 30x30x30 cm<sup>3</sup> yang terbuat dari *fiberglass*. *Box* dibuat kaku dengan diperkuat menggunakan profil siku 30.30.3 pada ujung-ujung sisinya. Selain itu, penggunaan *fiberglass* berfungsi agar perilaku benda uji dapat diamati saat pelaksanaan
2. Pipa besi dengan diameter 30 mm yang digunakan untuk instalasi kolom *Deep Soil Mixing* (DSM)
3. Saringan No. 4
4. Gelas ukur
5. Bak pencampur
6. Sendok
7. Timbangan digital
8. Alat pemadat untuk sampel tanah asli memiliki berat 9,56 kg dengan luas permukaan 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>.
9. Alat pemadat *Deep Soil Mixing* memiliki berat 2,56 kg dan diameter 3 cm
10. Ring density
11. Palu
12. Penggaris

13. Waterpass
14. Plastik kresek
15. Karung goni
16. Alat uji beban vertical berupa pompa hidrolik, dongkrak hidrolik
17. Pelat baja 5x5 cm<sup>2</sup> dan tebal 1,5 cm
18. Dial LVDT
19. Load cell
20. Frame pembebanan (portal)

### 3.4. Metode Penelitian

#### 3.4.1. Pengujian Pendahuluan

Untuk mendukung penelitian ini maka dilakukan penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang akan di uji merupakan jenis tanah lempung ekspansif. Dalam penelitian pendahuluan terdiri dari beberapa macam pengujian yaitu:

1. Pemeriksaan *specific gravity* (ASTM 1992 D 854-92);
2. Pemeriksaan batas cair, batas plastis indeks plastisitas tanah (ASTM 1984 D 4318-84);
3. Pemeriksaan batas susut (ASTM D 427-04);
4. Pengujian klasifikasi tanah metode USCS (ASTM 1992 D 2487-92);
5. Pengujian proktor standar (ASTM D-698 (Metode B)).

Setelah jenis tanah diketahui, penelitian dilanjutkan dengan pengujian proktor standar. Tujuan dari pengujian proktor standar untuk mendapatkan nilai kadar optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ( $\gamma_d$ ) yang selanjutnya akan diaplikasikan ke dalam *box* benda uji. Dalam pengujian proktor standar didapatkan berat isi kering ( $\gamma_d$ ) sebesar 1,406 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air optimum (OMC) 27,9%. Namun setelah diaplikasikan ke dalam *box* benda uji, berat isi kering tanah relatif yang dapat dilaksanakan sebesar 1,28 gr/cm<sup>3</sup> dan kadar air (OMC) 27,9%.

Percobaan pemadatan dalam *box* dilakukan dengan menggunakan alat dengan berat 9,56 kg dan ukuran permukaan 12,5x12,5 cm<sup>2</sup>. Pemadatan dilakukan pada setiap layer dengan ketinggian 5 cm sebanyak 6 kali putaran dan jumlah lintasan sebanyak 4 lintasan untuk satu putaran. Untuk mendapatkan jumlah tumbukan dan berat isi relatif, dalam percobaan ini dilakukan dengan metode *trial error* yaitu dengan melakukan

percobaan berulang-ulang hingga didapat berat isi kering relatif dalam *box* yang dapat dilaksanakan hingga ditetapkan jumlah tumbukan yang diperlukan. Setelah berat isi kering relatif dan jumlah tumbukan diperoleh dapat dilanjutkan dengan pembuatan sampel pada *box* uji.

Selain kepadatan tanah dalam *box* ditentukan, kepadatan tanah *Deep Soil Mixing* juga ditentukan. Untuk mendapatkan berat isi kering tanah campuran 10% kapur 1,41 gr/cm<sup>3</sup> dilakukan kontrol ketinggian tiap 5 cm dengan penumbuk seberat 2,56 kg dengan diameter 3 cm.

### 3.4.2. Persiapan Benda Uji

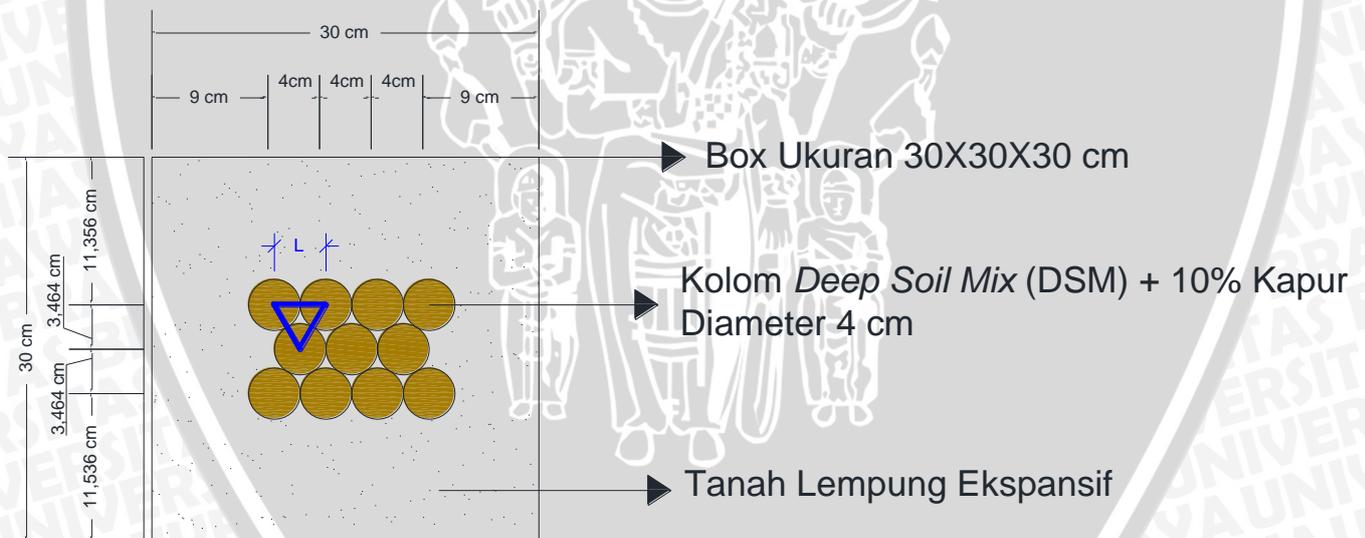
Sampel tanah merupakan tanah lempung ekspansif Bojonegoro dengan kondisi basah. Untuk itu diperlukan persiapan benda uji untuk menyamakan kondisi tanah lempung ekspansif yang akan di uji sehingga di didapatkan data yang valid sehingga terhindar dari kesalahan pada saat pengujian. Adapun persiapan benda uji meliputi kegiatan sebagai berikut:

1. Sampel tanah dikeringkan dengan dijemur dibawah terik matahari hingga mudah dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak lolos saringan No.4
3. Sampel tanah yang lolos saringan No.4 kemudian ditambahkan air dengan kadar air optimum(OMC) 27,9% yang digunakan sebagai tanah dasar atau asli. Pencampuran dilakukan hingga merata pada seluruh bagian selama 2 sampai 5 menit. Kemudian sampel dijenuhkan di dalam kresek selama 1 hari sehingga homogen.
4. Pembuatan benda uji dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi *Deep Soil Mixing* dan kondisi tanah dengan stabilisasi *Deep Soil Mixing*.
5. Tanah dasar atau asli dimasukkan ke dalam *box* berukuran (30x30x30) cm hingga ketinggian (H) 20 cm. Sampel dibagi menjadi 4 lapis dengan tinggi tiap lapisnya 5cm. Setiap lapisan dilakukan penumbukan sebanyak 6 kali putaran dengan jumlah lintasan sebanyak 4 lintasan untuk satu putaran. Pemadatan dilakukan menggunakan alat pemadat yang memiliki berat 9,56 kg dengan dimensi permukaan 12,5 x 12,5 cm dan tinggi jatuh tumbukan 21,5 cm.
6. Untuk kondisi tanah dengan stabilisasi *Deep Soil Mix* (DSM), setelah tanah dipadatkan, dilanjutkan dengan pembuatan lubang kolom untuk tanah sesuai dengan instalasi jarak dan panjang yang sudah ditentukan dengan bantuan pipa

besi. Dilanjutkan dengan proses pencampuran tanah yang dicampur dengan 10% kapur.

7. 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 tahap sebagai berikut :
  - a. Tanah campuran kapur dimasukkan ke dalam lubang dengan beberapa lapisan sesuai dengan tinggi variasi. Setiap lapisan memiliki tebal 5 cm.
  - b. Tiap lapisan dilakukan penumbukan dengan alat yang memiliki diameter 2,9 cm yang dipukul proktor dengan berat 2,56 kg.
8. Setelah proses instalasi selesai dilanjutkan proses waktu perawatan selama 3 hari.
9. Setelah proses waktu perawatan mencapai 3 hari dilanjutkan uji pembebanan.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan panjang pada konfigurasi kolom DSM yang digunakan (Tabel 3.1). Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap daya dukung tanah. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi pola *triangular* dengan diameter (D) 4cm yang ditampilkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Pemodelan DSM Pola *Triangular*

Adapun variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) Pola *Triangular* akan ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 3.1.** Variasi Jarak dan Panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan Diameter (D) 4 cm Pola *Triangular*

		Jarak Antar Kolom (L) ; Diameter (D) = 4 cm		
		L = 1 D	L = 1,25 D	L = 1,5 D
Panjang Kolom (Df) ; Lebar Plat (B) = 5 cm	Konfigurasi Pola <i>Triangular</i>			
	Df = 2B	Variasi 1 	Variasi 2 	Variasi 3 
	Df = 3B	Variasi 4 	Variasi 5 	Variasi 6 
Df = 4B	Variasi 7 	Variasi 8 	Variasi 9 	

### 3.4.3. Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack* atau dongkrak hidrolik. Sebagai pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton dan dapat langsung dibaca besarnya beban yang terjadi. Untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi, digunakan alat *LVDT*.

Pada proses uji beban diawali dengan persiapan alat uji beban dengan meletakkan *frame* uji beban di tengah *box* sampel tanah agar model pondasi berada tepat di tengah benda uji. Setelah *frame* dipasang dilanjutkan dengan meletakkan alat pemberat pada *frame* dengan tujuan agar *frame* uji beban tidak terangkat ketika uji beban berlangsung. Selanjutnya dilakukan pemasangan dongkrak hidrolik, *load cell*, *piston* dan pelat model pondasi.

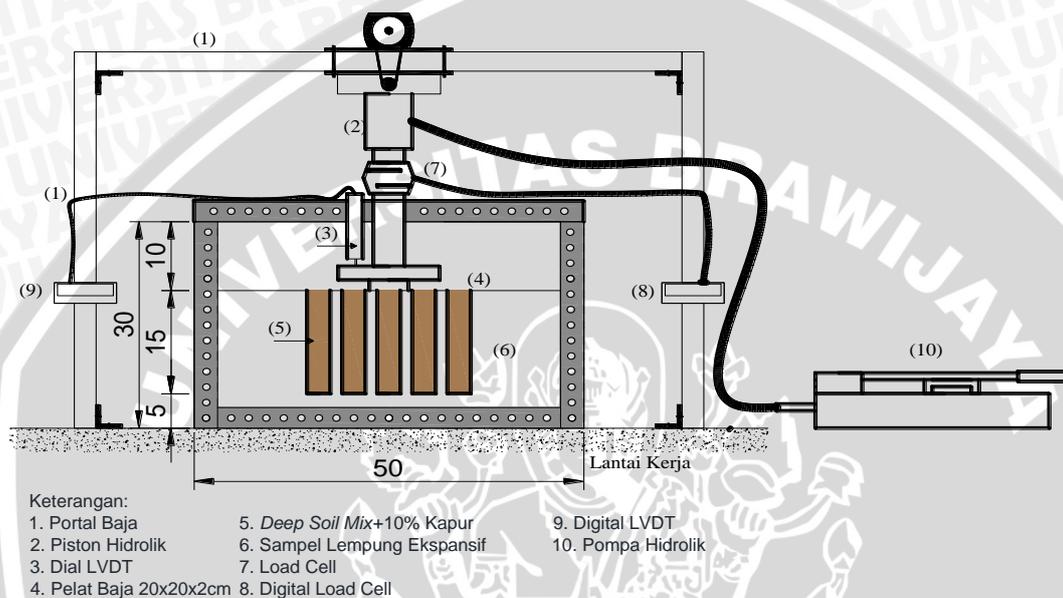
Pada uji beban vertikal model pondasi, ujung atas dari dongkrak hidrolik dihubungkan dengan *frame* pembebanan yang terbuat dari baja profil. Sedangkan ujung bawah dongkrak hidrolik dihubungkan pada *load cell* dilanjutkan dengan *piston* untuk meneruskan beban pada pelat baja. Pelat baja berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari *piston* dongkrak hidrolik menjadi beban merata yang digunakan sebagai model pondasi pada proses pembebanan. Letak dongkrak hidrolik diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat di atas benda uji (lihat Gambar 3.2). Hasil akhir dari uji pembebanan akan diperoleh kurva Beban-penurunan tanah sehingga didapatkan daya dukung tanah ekspansif.

Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli yang belum distabilisasi menggunakan kolom kapur. Hal ini dilakukan guna mengetahui kurva daya dukung tanah asli yang nantinya akan dibandingkan dengan tanah yang telah distabilisasi. Pengujian pembebanan selanjutnya dilakukan terhadap benda uji yang telah distabilisasi menggunakan kolom kapur. Pengujian dilakukan sebanyak 9 kali sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku terhadap daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan panjang optimum kolom kapur yang memberikan pengaruh terbesar pada daya dukung tanah.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan model benda uji
2. Meletakkan pelat baja di tengah pada permukaan benda uji

3. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan serta dial LVDT seperti pada gambar 3.2
4. Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolis
5. Pembebanan dilakukan bertahap dengan interval pembacaan dial LVDT 50 dan kemudian pembebanan dihentikan ketika pada alat pembaca menunjukkan 3 kali beban sama namun penurunan tetap terjadi.
6. Mencatat beban dan penurunan yang terjadi



**Gambar 3.2.** Skema Uji Pembebanan

**Tabel 3.2.** Pembacaan Load Cell dan Dial LVDT

Pembacaan LVDT	Interval	Luas Pelat	Penurunan	Pembacaan Beban	Tegangan
	$\Delta$	A	$S = \Delta \times 0.005$	P	$q = P/A$
		m <sup>2</sup>	mm	kg	kN/m <sup>2</sup>
0	0	0.0025	0	0	0
50	50	0.0025	0.25	40.5	162
100	100	0.0025	0.5	65	260
150	150	0.0025	0.75	85	340
200	200	0.0025	1.0	95	380
250	250	0.0025	1.25	105	420
300	300	0.0025	1.5	115	460

### 3.5. Metode Analisa Data

Data yang telah dicatat dari hasil pembacaan uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah ada dengan bantuan Software Microsoft Excel. Dari penelitian yang dilakukan akan didapatkan nilai beban dan penurunan yang terjadi akibat beban vertikal. Dari beban tersebut maka dapat diketahui berapa daya dukung dari tanah yang diuji berdasarkan luas pondasi model. Kemudian akan dibuat grafik perilaku tegangan dan penurunan tanah lempung ekspansif asli maupun distabilisasi dengan 10% kapur metode *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah hasil pengujian beban vertikal pondasi. Dengan memberikan variasi jarak dan panjang kolom kapur akan diketahui peningkatan daya dukung tanah tersebut. Perhitungan daya dukung digunakan rumus sebagai berikut:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan,  $q_u$  = kapasitas dukung ultimit (kN/m<sup>2</sup>)

$P_u$  = beban ultimit (kN)

$A$  = luas pondasi (m<sup>2</sup>)

Dari hasil uji beban vertikal (*load test*), maka daya dukung batas tanah ( $q_u$ ) pada pondasi bujur sangkar di atas tanah lempung ekspansif dapat dihitung dengan metode pendekatan berikut:

$$Q_u(\text{pondasi}) = Q_u(\text{pelat}) \dots\dots\dots(3.2)$$

Dari data uji beban, kemudian akan dibuat grafik hubungan antara beban dan penurunan tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 10% kapur menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Dari adanya variasi jarak dan panjang kolom kapur akan diketahui bagaimana pengaruhnya terhadap nilai daya dukung tanah.

### 3.6. Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan dua variabel, yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Pembagian dua variabel tersebut adalah sebagai berikut:

a. Variable bebas, terdiri dari:

- Konfigurasi
- Diameter
- Kedalaman

- Jarak antar kolom
- b. Variabel terikat, terdiri dari:
  - Tegangan
  - Penurunan yang terjadi akibat pembebanan

### 3.7. Rancangan Peneitian

Pada penelitian ini dibuat dua jenis benda uji, yaitu benda uji berupa tanah asli dan taah yang telah distabilisasi dengan campuran 10% kapur menggunakan *metode Deep Soil Mixing* (DSM). Pengujian pembebanan dilakukan terlebih dahulu terhadap tanah asli dan kemudian terhadap tanah yang telah distabilisasi. Nantinya akan diperoleh perilaku tegangan-penurunan tanah sebelum dan sesudah stabilisasi yang dibeeeri variasi jarak dan panjang kolom kapur dilakukan. Rancangan penelitian ditampilkan dalam Tabel 3.3.

**Tabel 3.3.** Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak antar DSM (L) cm	Panjang DSM (Df) cm	Penurunan mm	Beban Maksimum (Pu) kg	qu kg/cm <sup>2</sup>
Tanah Asli	-	-			
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1D = 4 cm	2B = 10cm			
		3B = 15cm			
		4B = 20cm			
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 5 cm	2B = 10cm			
		3B = 15cm			
		4B = 20cm			
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,5D = 6 cm	2B = 10cm			
		3B = 15cm			
		4B = 20cm			

**Tabel 3.4.** Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM (L)

No	Panjang DSM (Df)	Jarak antar DSM (L)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1		1D = 4 cm			
2	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm			
3		1,5D = 6 cm			
4		1D = 4 cm			
5	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm			
6		1,5D = 6 cm			
7		1D = 4 cm			
8	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm			
9		1,5D = 6 cm			

**Tabel 3.5.** Daya Dukung dengan Variasi Panjang DSM (Df)

No	Jarak antar DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1		2 B = 10 cm			
2	1D = 4 cm	3 B = 15 cm			
3		4 B = 20 cm			
4		2 B = 10 cm			
5	1,25D = 5 cm	3 B = 15 cm			
6		4 B = 20 cm			
7		2 B = 10 cm			
8	1,5D = 6 cm	3 B = 15 cm			
9		4 B = 20 cm			

Untuk mengetahui pengaruh jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk meningkatkan daya dukung tanah dilakukan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI).

Nilai BCI dapat diperoleh dengan rumus:

$$BCI = \frac{q_u \text{ tanah dengan DSM}}{q_u \text{ tanah asli}} \times 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

Hasil analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) kemudian disajikan dalam Tabel 3.6 berikut:

**Tabel 3.6.** *Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Jarak*

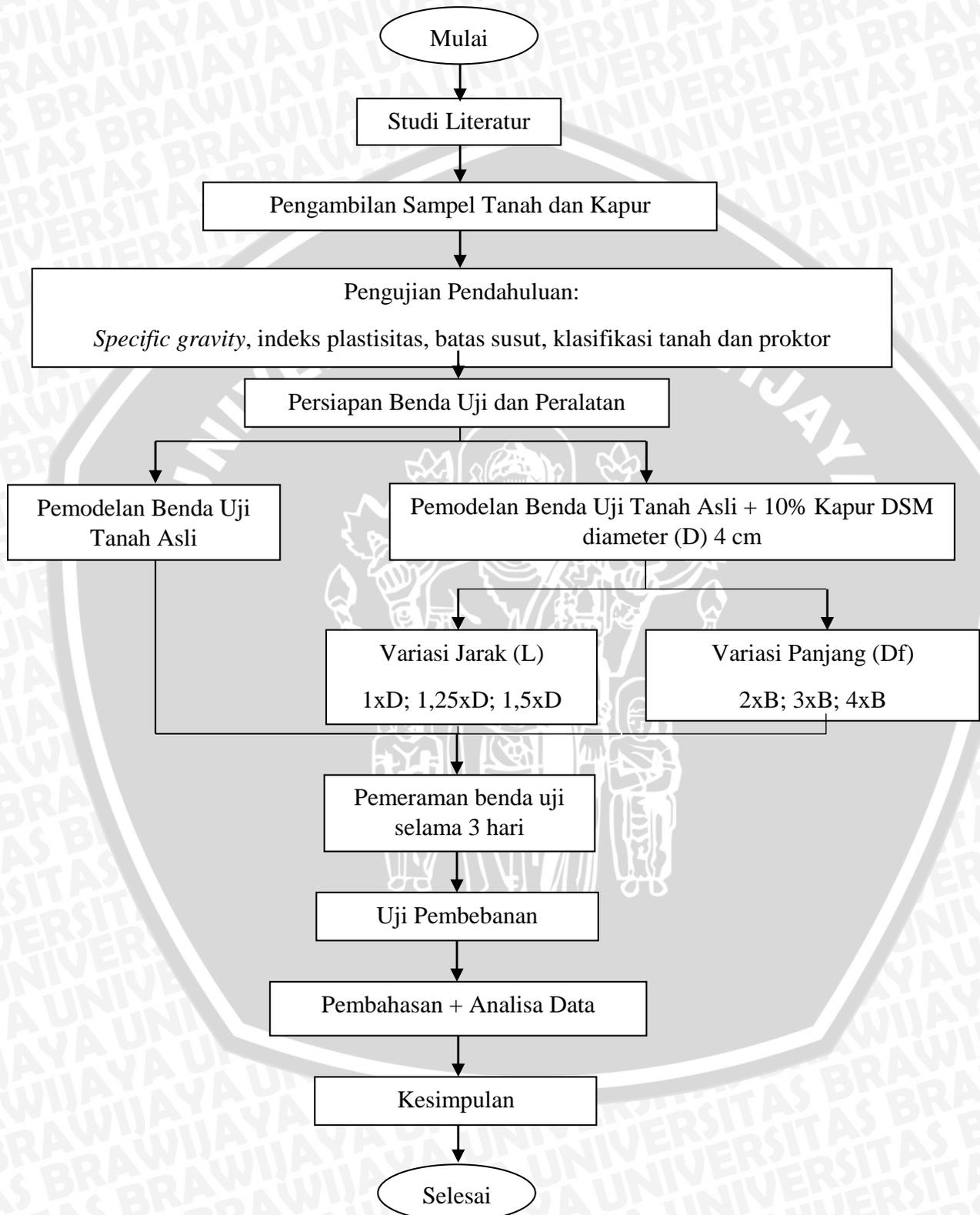
No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	qu tanah asli (kg/cm <sup>2</sup> )	qu dengan DSM (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI (%)
1		1D = 4 cm			
2	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm			
3		1,5D = 6 cm			
4		1D = 4 cm			
5	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm			
6		1,5D = 6 cm			
7		1D = 4 cm			
8	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm			
9		1,5D = 6 cm			

**Tabel 3.7.** *Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Panjang*

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm <sup>2</sup> )	qu dengan DSM (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI (%)
1		2B = 10 cm			
2	1D = 4 cm	3B = 15 cm			
3		4B = 20 cm			
4		2B = 10 cm			
5	1,25D = 5 cm	3B = 15 cm			
6		4B = 20 cm			
7		2B = 10 cm			
8	1,5D = 6 cm	3B = 15 cm			
9		4B = 20 cm			



### 3.8. Diagram Alir Penelitian



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengujian Pendahuluan

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

#### 4.1.1. Specific Gravity

*Specific gravity* ( $G_s$ ) atau berat spesifik merupakan perbandingan berat butiran tanah dengan berat air pada volume yang sama dan pada suhu tertentu. Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui *specific gravity* suatu bahan yang akan digunakan sebagai sampel benda uji. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan adalah 2,556.

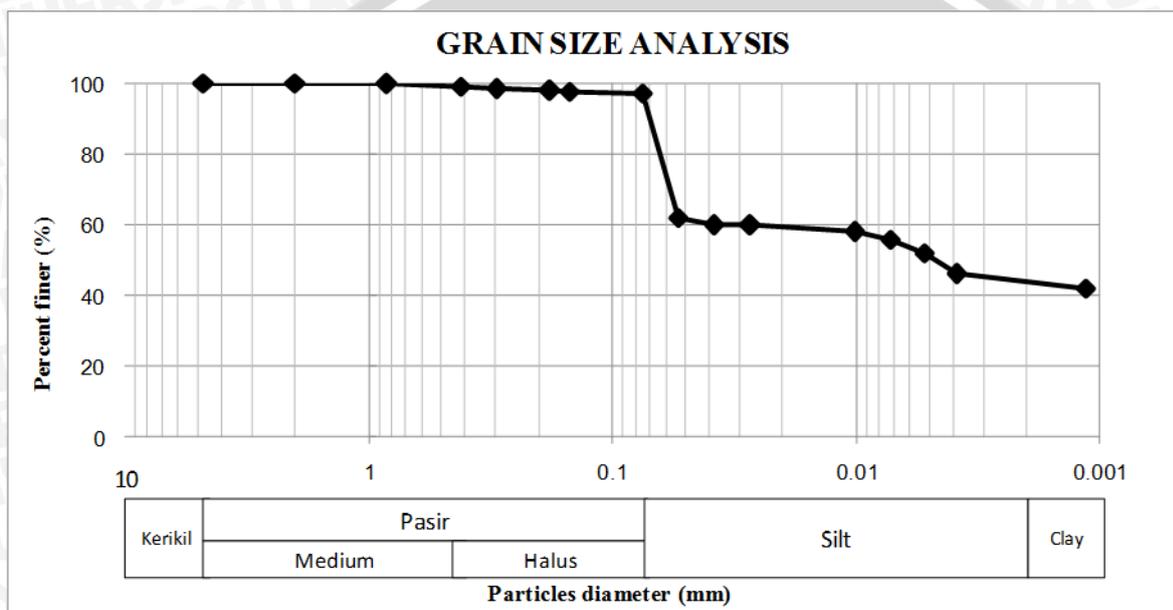
**Tabel 4.1.** *Specific Gravity* Tanah Kabupaten Bojonegoro

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
Specific Gravity ( $G_s$ )	$\frac{W_t}{W_6 - W_3}$		2.557	2.554
Rata - rata ( $G_s$ )			2.556	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

#### 4.1.2. Klasifikasi Tanah

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



**Gambar 4.1.** Analisis saringan dan Hidrometer

Dari Gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa tanah dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini memiliki persentase distribusi lolos saringan no. 200 sebesar 97,03% dan menurut sistem klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*) termasuk jenis tanah berbutir halus. Namun berdasarkan data yang didapat masih diperlukan data pendukung untuk menentukan jenis tanah menurut USCS yaitu Indeks Plastisitas (PI)

#### 4.1.3. Atterberg Limit

Berdasarkan pemeriksaan klasifikasi tanah, tanah yang digunakan sebagai benda uji merupakan tanah berbutir halus. Karena benda uji merupakan tanah berbutir halus, perlu dilakukan pengujian batas-batas atterberg untuk mengetahui sifat plastisitas dari benda uji yang akan digunakan.

Pengujian batas-batas atterberg terdiri dari uji batas cair (*Liquid limit*), uji batas plastis (*Plastic limit*) dan uji batas susut (*Shrinkage limit*). Batas cair dan batas plastis digunakan untuk mengetahui indeks plastisitas. Indeks plastisitas digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan jenis tanah yang di uji. Pengujian batas susut digunakan untuk mengetahui kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Berikut adalah hasil dari pengujian batas-batas atterberg.

**Tabel 4.2.** Hasil Pemeriksaan Batas-batas Atterberg

LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
79.11	31.3	13.79	47.81

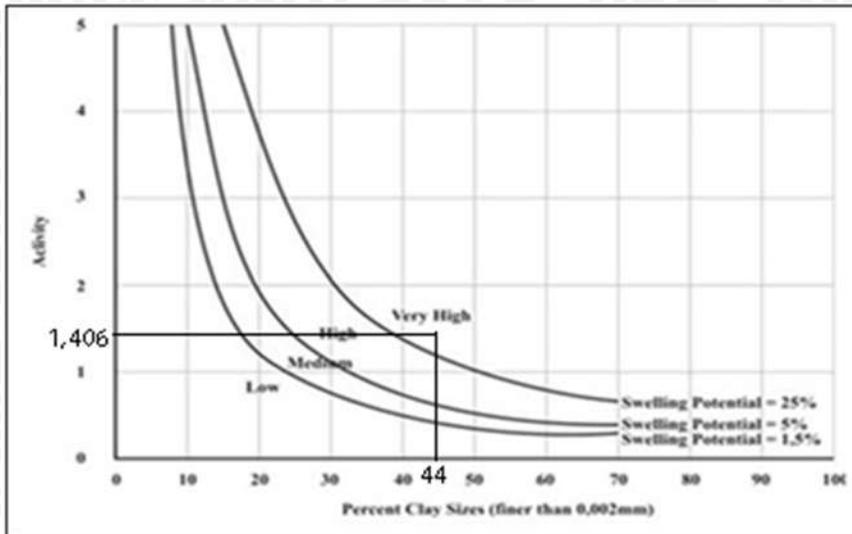
Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari hasil tersebut nantinya akan dimasukkan ke dalam suatu gambar yang bertujuan untuk menggolongkan jenis tanah tersebut berdasarkan kriteria-kriteria tertentu.

Hasil pemeriksaan batas-batas Atterberg didapatkan nilai batas cair (*liquid limit*) 79,11%, batas plastis (*plastic limit*) 31,30%, batas susut (*Shrinkage limit*) 13,79%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 47,81%. Berdasarkan klasifikasi tanah sistem *Unified* (USCS) dan kriteria *specific gravity* (Gs), tanah lempung dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH).

#### 4.1.4. Sifat Ekspansifitas

Dalam penelitian ini, untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah digunakan metode tidak langsung (*single index method*) yaitu dengan menggunakan nilai-nilai dari batas Atterberg. Berdasarkan rumus 2.1 nilai aktivitas sebesar 1,406 tanah tersebut termasuk tanah aktif dengan nilai aktifitas lebih dari 1,25. Dari nilai aktivitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan pada gambar 2.4 maka dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan yang tinggi seperti yang ditunjukkan Gambar 4.2.



**Gambar 4.2.** Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

Sumber: Seed (1962)

#### 4.1.5. Pemeriksaan Pematatan Standar

Dalam penelitian ini, pematatan standar digunakan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) ketika tanah memiliki berat isi kering maksimum ( $\gamma_d$  maks) sesuai dengan metode **ASTM D-698** Metode B. Pengujian pematatan standar dilakukan dengan metode B dengan spesifikasi alat sebagai berikut

- Diameter cetakan (*mold*) 152 mm (6")
- Bahan lolos saringan no.4 (4,75 mm)
- Berat alat pemukul (*proctor*) 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,48 cm (12")

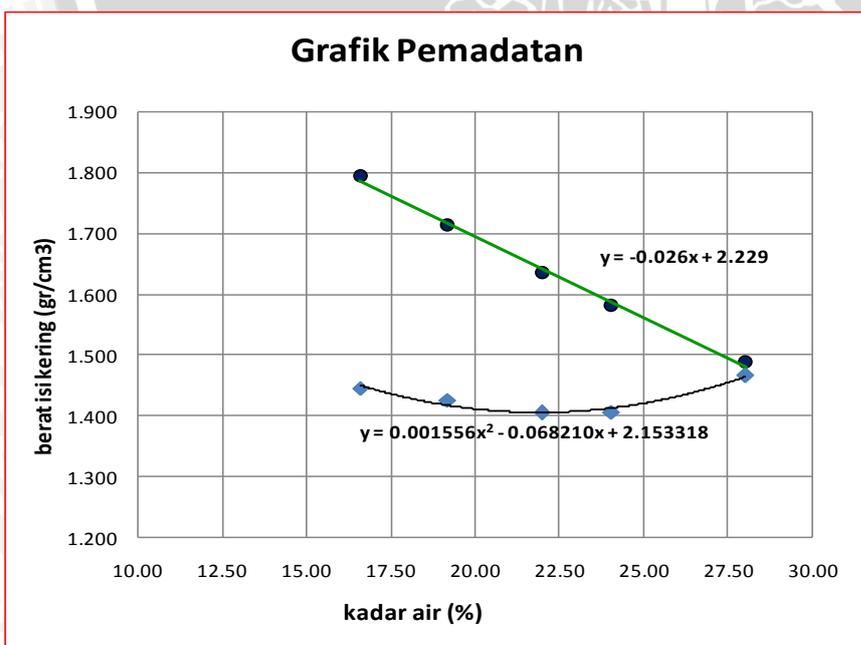
Grafik hasil pengujian pematatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini:



**Gambar 4.3.** Grafik Hasil Pemadatan Tanah Asli

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa besarnya kadar air optimum sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum 1,409 gr/cm<sup>3</sup>.

Sedangkan penentuan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah stabilisasi 10% kapur berdasarkan uji pemadatan yang dilakukan sebanyak 3 kali, tidak didapatkan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimumnya ( $\gamma_d$  maks) pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4** Grafik Hasil Pemadatan Tanah Stabilisasi

Sehingga penentuan nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah stabilisasi 10% kapur ditentukan dari hasil pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) yang mempunyai nilai CBR paling tinggi. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai daya dukung paling tinggi pada pemodelan kolom DSM stabilisasi tersebut. Besarnya nilai CBR dari tanah stabilisasi tersebut disajikan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3.** Perbandingan Nilai CBR Tanah Stabilisasi

No. Sampel	Kadar air (w) (%)	Berat Isi Kering ( $\gamma_d$ ) (gr/cm <sup>3</sup> )	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	<b>24.10</b>	<b>1.406</b>	<b>30.87</b>
5	28.03	1.466	13.20

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.3, didapatkan nilai kadar air optimum sebesar 24,10% dengan berat isi kering maksimum sebesar 1,406 gr/cm<sup>3</sup>. Nilai ini digunakan sebagai standarisasi kepadatan dalam mencetak kolom DSM stabilisasi tersebut.

## 4.2. Analisis Daya Dukung Tanah (Sebelum Perbaikan)

### 4.2.1 Uji Kepadatan Tanah Tanah Asli

Dalam penelitian ini digunakan kadar air sebesar 27,908% dan berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm<sup>3</sup> untuk mencapai kepadatan rencana ( $\gamma_{d \text{ maks}}$ ) sebesar 1,409 gr/cm<sup>3</sup> dalam pemodelan tanah asli. Nilai *trial dan error* pemodelan tanah di dalam *box* didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan Ichvan, dkk. (2015) pada Tabel 4.4:

**Tabel 4.4.** Uji *Density* pada Tanah Model

No Ring	Kadar air, (w) %	Berat isi tanah ( $\gamma_t$ ) gr/cm <sup>3</sup>	Berat isi kering, ( $\gamma_d$ ) gr/cm <sup>3</sup>	Rata-rata berat isi tanah gr/cm <sup>3</sup>	Rata-rata berat isi kering gr/cm <sup>3</sup>
I	27.88	1.656	1.295	1.635	1.279
II	27.43	1.6	1.255		
III	27.95	1.649	1.289		
IV	28.35	1.637	1.275		

Sumber: Ichvan, dkk (2015)

Dan untuk pemodelan kolom DSM stabilisasi 10% kapur, digunakan kadar air 24,10% dan berat isi kering maksimum 1,406 gr/cm<sup>3</sup>. Pemodelan dibuat dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan. Dalam pemodelan kolom DSM ini, pengisian sampel tanah ke dalam *box* dibagi menjadi 4 layer dengan tinggi setiap lapisnya 5 cm sehingga kepadatan tanah dalam setiap layer menjadi seragam hingga ketinggian total sampel mencapai 20 cm. Setiap lapisan dilakukan penumbukan sebanyak 4 kali putaran dengan jumlah lintasan sebanyak 16 lintasan untuk satu putaran. Penumbukan dilakukan dengan alat penumbuk yang memiliki berat 9,6 kg dengan ukuran permukaan kontak tumbukan 12,5 cm x 12,5 cm dan tinggi jatuh tumbukan 21,5 cm.

#### 4.2.2 Uji Pembebanan Tanah Asli

Pengujian benda uji diawali dengan pengujian tanah asli. Yang dimaksud tanah asli dalam penelitian ini adalah tanah lempung ekspansif tanpa stabilisasi DSM. Tanah ekspansif yang diuji memiliki data sebagai berikut:

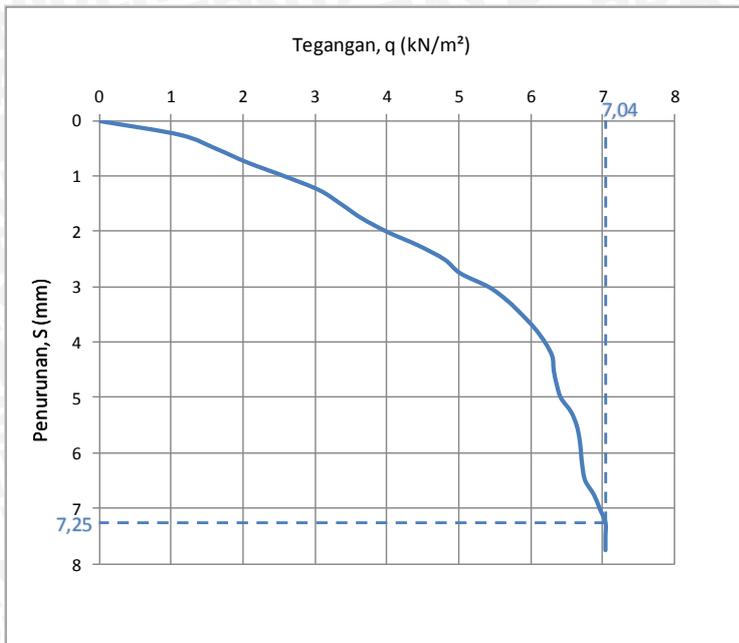
Berat isi kering tanah ( $\gamma_d$ ) rata-rata = 1,28 gr/cm<sup>3</sup>

Kadar air tanah rata-rata = 10,49 %

Luas pelat beban uji = 25 cm<sup>2</sup>

Dari data tersebut didapatkan hasil pengujian besar beban maksimum yang dapat ditahan tanah ( $P_u$ ) sebesar 176 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 7,25 mm.

Dengan menggunakan Rumus 3.1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate ( $q_u$ ) sebesar 7,04 kg/m<sup>2</sup>. Nilai tegangan dan penurunan tanah asli disajikan pada Gambar 4.5 berikut ini:



**Gambar 4.5.** Grafik Hubungan Tegangan dan Penurunan Tanah Asli

### 4.3. Hasil dan Analisis Tanah dengan Perbaikan DSM

#### 4.3.1. Uji Pembebanan

Dalam pembuatan benda uji dalam *box* tanah dibagi menjadi 4 layer beserta dengan berat tanah yang dimasukkan. Berat tanah yang dimasukkan setiap layer memiliki berat 6,36 kg. Setelah benda uji selesai dipadatkan, pada pengujian tanah asli langsung dilanjutkan pada uji beban vertikal. Namun untuk tanah yang distabilisasi dilanjutkan dengan pembuatan kolom DSM. Volume DSM tergantung pada panjang tanah yang diperbaiki namun memiliki kepadatan tanah yang sama yaitu  $1,406 \text{ gr/cm}^3$ . Berikut ini berat tanah yang dibutuhkan sebuah kolom DSM sesuai dengan variasi jarak dan panjang dengan berat isi kering  $1,28 \text{ gr/cm}^3$ :

**Tabel 4.5.** Berat Kebutuhan Kolom DSM

Berat	Panjang (Df)	Jarak DSM (L)		
		1D = 4 cm	1,25D = 5 cm	1,5D = 6 cm
Tanah+10% kapur (gr)	2B = 10 cm	177,26 gr	177,26 gr	177,26 gr
	3B = 15 cm	265,89 gr	265,89 gr	265,89 gr
	4B = 20 cm	221,57 gr	221,57 gr	221,57 gr

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Instalasi DSM diawali dengan pembuatan lubang DSM dengan diameter 4 cm dengan panjang dan jarak sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Setelah DSM

dipadatkan dengan alat seberat 2,5 kg dan diameter 3 cm maka dilanjutkan dengan meratakan permukaan tanah yang masih bergelombang. Setelah benda uji diratakan dilanjutkan dengan proses waktu perawatan selama 3 hari sebelum dilakukan pengujian pembebanan. Setelah proses waktu perawatan berlangsung selama 3 hari, dilakukan pembebanan vertikal pada titik tengah dari benda uji menggunakan pelat ukuran 5x5 cm<sup>2</sup> yang ditekan oleh dongkrak hidrolik dengan interval penurunan 50 skala dial LVDT. Setiap penurunan 50 skala LVDT dilakukan pembacaan beban. Beban dihentikan ketika penurunan terus bertambah namun pembacaan beban 3 kali sama berturut-turut.

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

No	Panjang DSM (Df)	Jarak antar DSM (L)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)
1		1D = 4 cm	25	10.5	485
2	2B = 10 cm	1,25D = 5 cm	25	16.25	471
3		1,5D = 6 cm	25	17	419
4		1D = 4 cm	25	10	494
5	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm	25	11.75	486
6		1,5D = 6 cm	25	16.25	432
7		1D = 4 cm	25	8.25	519
8	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm	25	11.75	518
9		1,5D = 6 cm	25	14	446

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

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

No	Jarak antar DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)
1		2 B = 10 cm	25	10.5	485
2	1D = 4 cm	3 B = 15 cm	25	10	493.5
3		4 B = 20 cm	25	8.25	519
4		2 B = 10 cm	25	16.25	470.5
5	1,25D = 5 cm	3 B = 15 cm	25	11.75	485.5
6		4 B = 20 cm	25	11.75	518
7		2 B = 10 cm	25	17	418.5
8	1,5D = 6 cm	3 B = 15 cm	25	16.25	431.5
9		4 B = 20 cm	25	14	446

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

#### 4.4. Analisis Daya Dukung Tanah

##### 4.4.1. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Jarak (L)

##### 1. Daya Dukung Tanah dengan Panjang DSM $2B = 10$ cm.

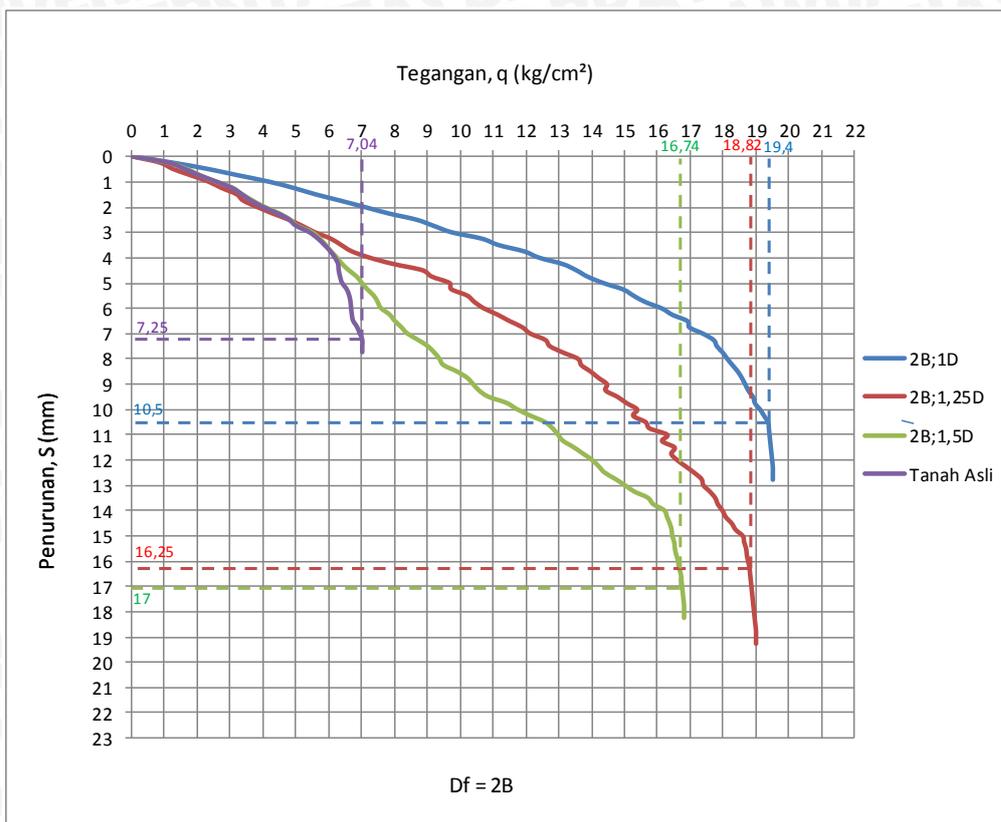
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 5 cm dengan variasi jarak (L)  $1D = 4$  cm;  $1,25D = 5$  cm dan  $1,5D = 6$  cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 4 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.8.

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

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat ( $\text{cm}^2$ )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum ( $\text{Pu}$ ) (kg)	Daya Dukung ( $q_u$ ) ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
1	2B = 10 cm	$1D = 4$ cm	25	10.5	485	19.4
2		$1,25D = 5$ cm	25	16.25	470.5	18.82
3		$1,5D = 6$ cm	25	17	418.5	16.74

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada tabel 4.8 terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6.** Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang  $2B = 10$  cm

Dari Gambar 4.6 menunjukkan bahwa tanah yang yang distabilisasi DSM dengan panjang  $2B = 10$  cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 4 cm selalu berada di atas variasi jarak 5 cm dan diikuti 6 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji walaupun pada grafik tersebut pengaruh jarak DSM terlihat kecil. Pada jarak DSM 4 cm memiliki daya dukung terbesar yaitu  $19,4 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan yang terjadi  $10,5 \text{ mm}$  dan jarak DSM  $1,5D = 6$  cm memiliki daya dukung terkecil yaitu  $16,74 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan  $17 \text{ mm}$ .

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

Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang  $15 \text{ cm}$  dengan variasi jarak (L)  $1D = 4 \text{ cm}$ ;  $1,25D = 5 \text{ cm}$  dan  $1,5D = 6 \text{ cm}$ ; D merupakan diameter DSM dengan ukuran  $4 \text{ cm}$ , dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis

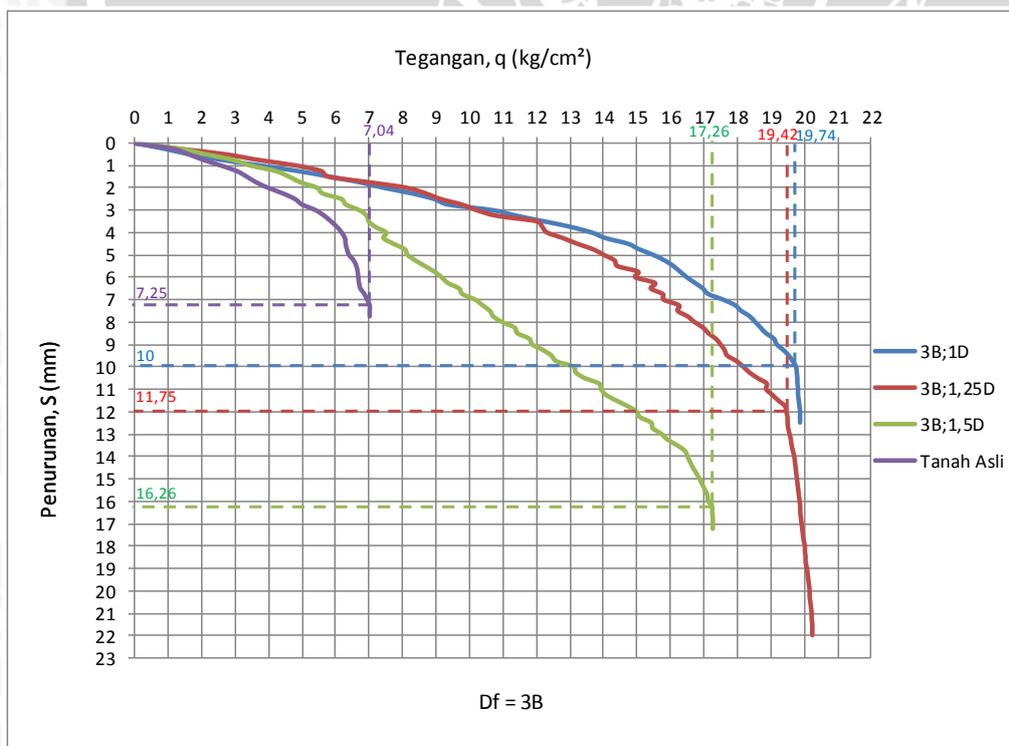
menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.9.

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

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan Beban Maksimum (mm)	Daya Dukung (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1		1D = 4 cm	25	10	493.5	19.74
2	3B = 15 cm	1,25D = 5 cm	25	11.75	485.5	19.42
3		1,5D = 6 cm	25	16.25	431.5	17.26

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM juga memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan seperti halnya pada panjang DSM 2B = 10 cm. Pada tabel 4.9 terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7.** Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang 3B = 15 cm

Dari Gambar 4.7 menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang  $3B = 15$  cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 4 cm selalu berada di atas variasi jarak 5 cm dan diikuti jarak 6 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang diuji. Pada jarak DSM  $1D = 4$  cm memiliki daya dukung terbesar yaitu  $19,74 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan 10 mm dan jarak DSM  $1,5D = 6$  cm memiliki daya dukung terkecil yaitu  $17,26 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan 16,25 mm. Dari gambar 4.8 terlihat bahwa selisih daya dukung antara DSM jarak 4 cm dengan 5 cm dan DSM jarak 5 cm dengan 6 cm berbeda. Selisih daya dukung DSM jarak 4 cm dengan 5 cm memiliki rentang yang lebih lebar dibanding dengan selisih DSM jarak 5 cm dengan 6 cm. Hal tersebut menunjukkan stabilisasi pada jarak DSM  $1D$  memberikan pengaruh yang lebih signifikan dibanding dengan jarak DSM  $1,25D$  dan  $1,5D$ .

### 3. Daya dukung tanah dengan panjang DSM $4B = 20$ cm

Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 20 cm dengan variasi jarak (L)  $1D = 4$  cm;  $1,25D = 5$  cm dan  $1,5D = 6$  cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 4 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada Tabel 4.10.

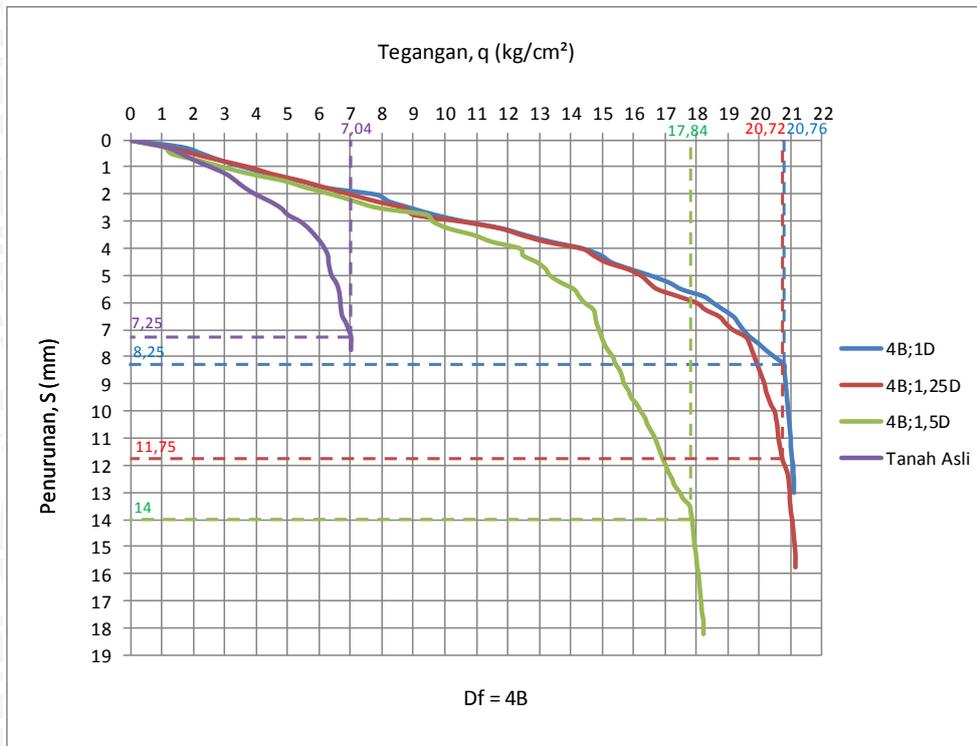
**Tabel 4.10.** Daya Dukung Variasi Jarak DSM dengan Panjang DSM  $4B = 20$  cm

No	Panjang DSM (Df)	Jarak DSM (L)	Luas Pelat ( $\text{cm}^2$ )	Penurunan Beban Maksimum (Pu) (mm)	Daya Dukung (qu) (kg)	Daya Dukung (qu) ( $\text{kg/cm}^2$ )
1		$1D = 4$ cm	25	8.25	519	20.76
2	$4B = 20$ cm	$1,25D = 5$ cm	25	11.75	518	20.72
3		$1,5D = 6$ cm	25	14	446	17.84

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.10 dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada tabel 4.10 terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik

perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.8.** Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Jarak dengan Panjang  $4B = 20$  cm

Dari Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tanah yang yang distabilisasi DSM dengan panjang  $4B = 20$  cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 4 cm selalu berada di atas variasi jarak 5 cm dan diikuti 6 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji. Pada jarak DSM  $1D = 4$  cm memiliki daya dukung terbesar yaitu  $20,76 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan 8,25 mm dan jarak DSM  $1,5D = 6$  cm memiliki daya dukung terkecil yaitu  $17,84 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan 14 mm. Dari gambar 4.8 pengaruh dari variasi jarak DSM terlihat sangat jelas, hal tersebut terlihat dari rentang daya dukung antara jarak DSM 4 cm dengan jarak DSM 5 cm lebih lebar dibanding rentang daya dukung antara jarak DSM 5 cm dengan jarak DSM 6 cm.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten

Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung yang terlihat dari rentang daya dukung yang semakin lebar pada variasi jarak DSM antara 1D dengan 1,25D dibanding rentang daya dukung antara variasi jarak 1,25D dan 1,5D. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh.

Pada analisis variasi jarak, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM 1D = 4 cm pada panjang DSM 20 cm yaitu sebesar 20,76 kg/cm<sup>2</sup> dengan penurunan 8,25 mm. Pengaruh jarak DSM 4 cm dapat terjadi karena DSM dapat mengurangi penyebaran distribusi tegangan pada tanah asli dan ditahan oleh DSM, seperti teori Beussinesq distribusi tegangan digambarkan sebagai isobar yang menyebar hingga 2B ke arah horisontal. Tegangan yang menyebar pada tanah dapat ditahan oleh DSM yang semakin rapat, sehingga akan meningkatkan daya dukung pada tanah.

#### 4.4.2. Daya Dukung Tanah dengan Variasi Panjang (Df) DSM

##### 1. Daya dukung tanah dengan jarak DSM 1D = 4 cm

Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 4 cm dengan variasi panjang 2B = 10 cm; 3B = 15 cm dan 4B = 20 cm ; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.11.

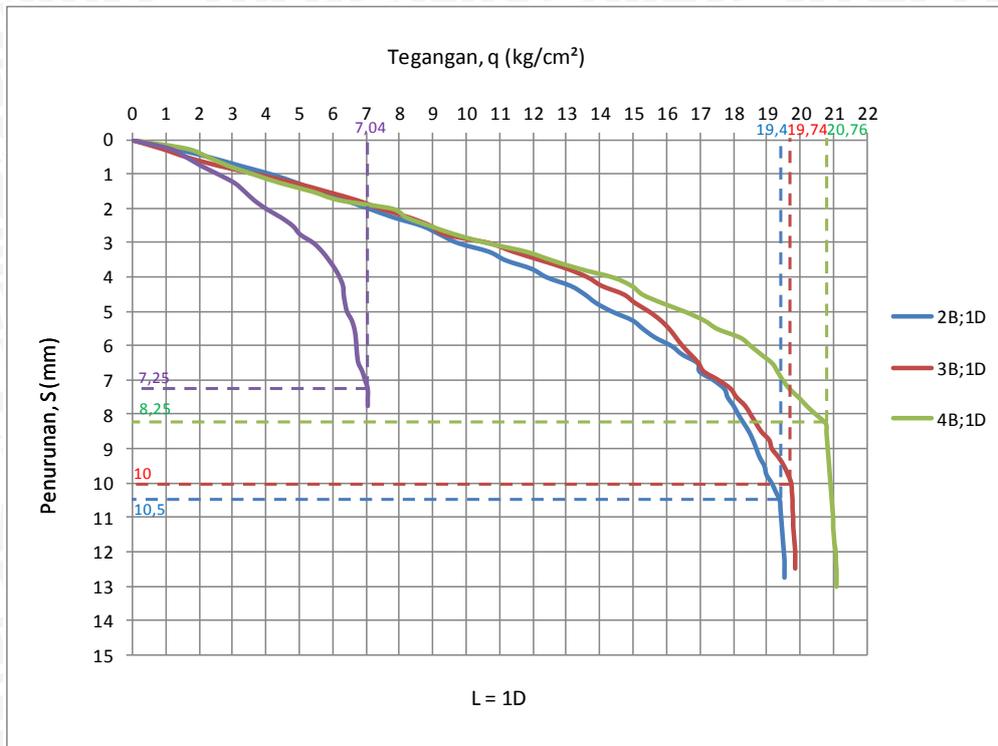
**Tabel 4.11.** Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM 1D = 4 cm

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1	1D = 4 cm	2B = 10 cm	25	10.5	485	19.4
2		3B = 15 cm	25	10	493.5	19.74
3		4B = 20 cm	25	8.25	519	20.76

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.11 terlihat bahwa panjang DSM 20 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 15 cm dan yang terakhir panjang DSM 10 cm. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 20 cm yaitu 20,76 kg/cm<sup>2</sup> dengan penurunan 8,25

mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.9.



**Gambar 4.9.** Grafik Hubungan Daya Dukung dan Penurunan DSM pada Variasi Panjang dengan Jarak DSM 1D = 4 cm

Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 20 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 10 cm dan 15 cm. Pada gambar 4.10 juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 20 cm dengan 15 cm lebih lebar dibanding dengan rentang antara panjang 15 cm dan 10 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Selain itu, peningkatan signifikan daya dukung tanah terlihat pada variasi panjang 4B = 20 cm yang menghasilkan daya dukung sebesar 20,76 kg/cm<sup>2</sup> dengan penurunan 8,25 mm.

## 2. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,25D = 5$ cm

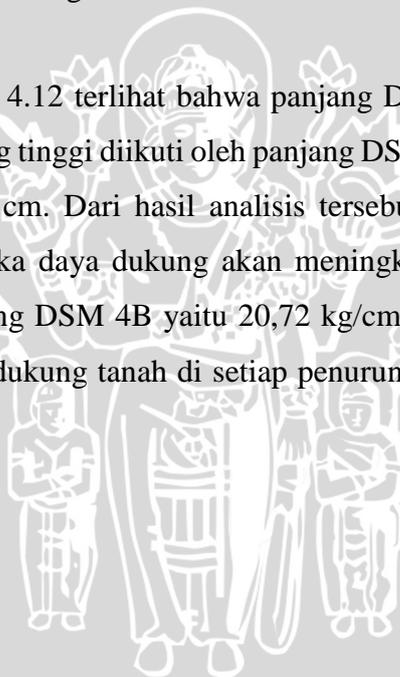
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 4 cm dengan variasi panjang  $2B = 10$  cm;  $3B = 15$  cm dan  $4B = 20$  cm ; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.12.

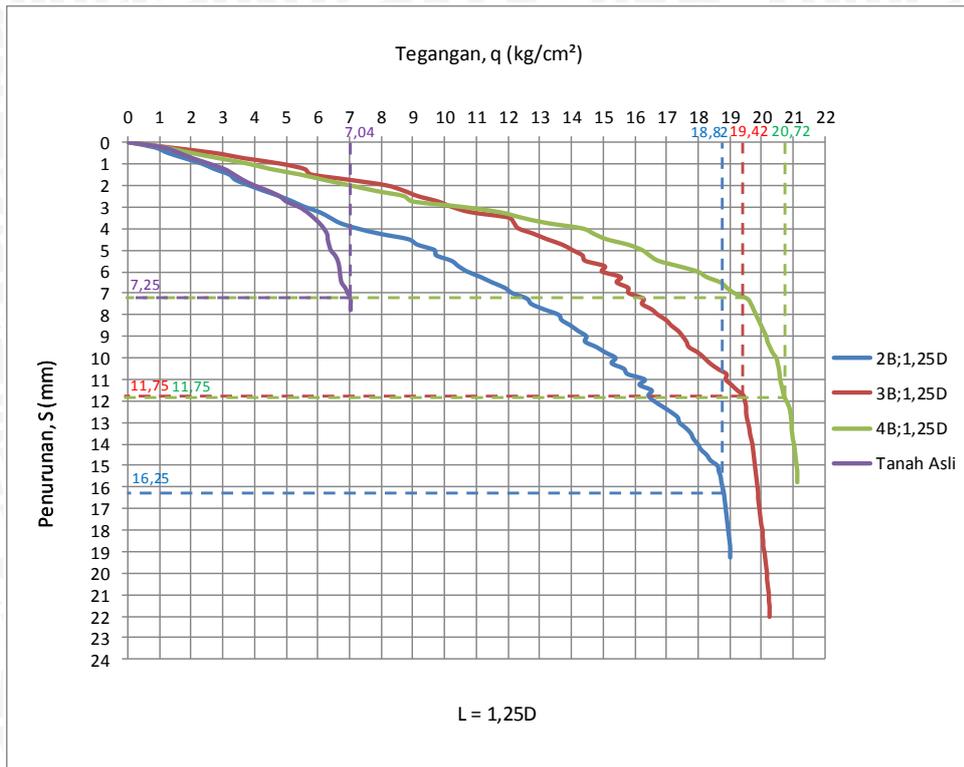
**Tabel 4.12.** Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM  $1,25D = 5$  cm

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1		$2B = 10$ cm	25	16.25	470.5	18.82
2	$1,25D = 5$ cm	$3B = 15$ cm	25	11.75	485.5	19.42
3		$4B = 20$ cm	25	11.75	518	20.72

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa panjang DSM 20 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 15 cm dan yang terakhir panjang DSM 10 cm. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM  $4B$  yaitu  $20,72$  kg/cm<sup>2</sup> dengan penurunan 11,75 mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.10.





**Gambar 4.10.** Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM  $1,25D = 5$  cm

Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B atau 20 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 10 cm dan 15 cm. Pada gambar 4.10 juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 20 cm dengan 15 cm lebih lebar dibanding dengan panjang 15 cm dan 10 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

### 3. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,5D = 6$ cm

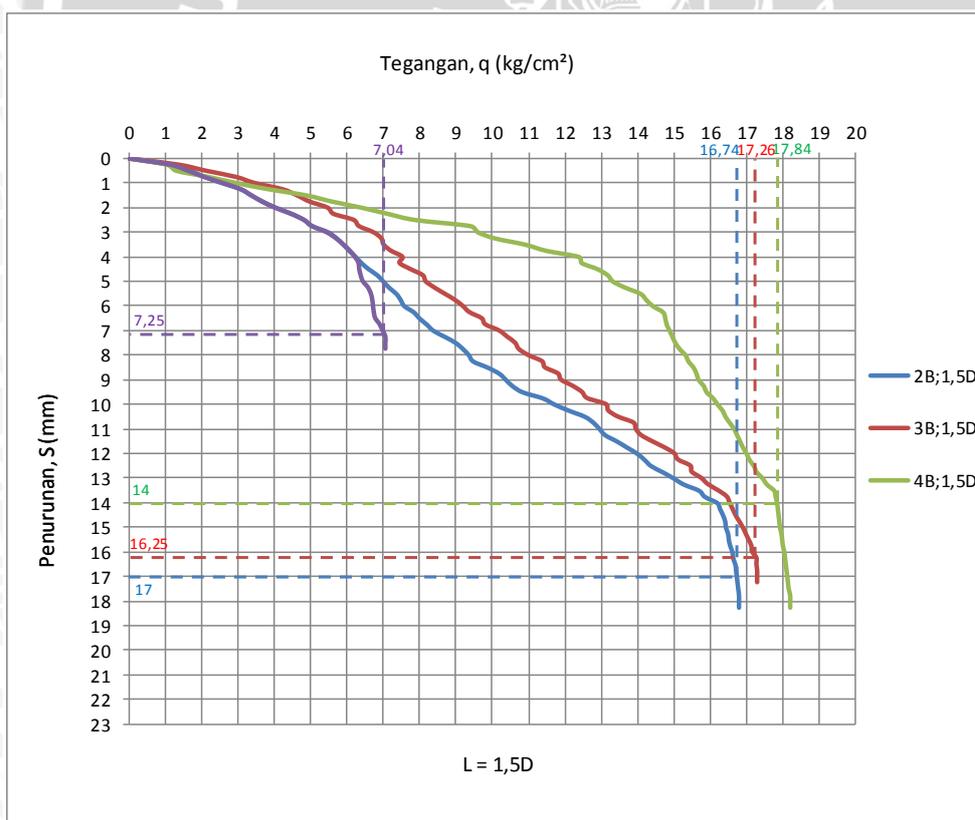
Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 4 cm dengan variasi panjang  $2B = 10$  cm;  $3B = 15$  cm dan  $4B = 20$  cm ; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada Tabel 4.13.

**Tabel 4.13.** Daya Dukung Variasi Panjang DSM dengan Jarak DSM  $1,5D = 6$  cm

No	Jarak DSM (L)	Panjang DSM (Df)	Luas Pelat (cm <sup>2</sup> )	Penurunan (mm)	Beban Maksimum (Pu) (kg)	Daya Dukung (qu) (kg/cm <sup>2</sup> )
1		2B = 10 cm	25	17	418.5	16.74
2	1,5D = 6 cm	3B = 15 cm	25	16.25	431.5	17.26
3		4B = 20 cm	25	14	446	17.84

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Dari Tabel 4.13 terlihat bahwa panjang DSM 20 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 15 cm dan yang terakhir panjang DSM 10 cm. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 4B yaitu 17,84 kg/cm<sup>2</sup> dengan penurunan 14 mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada Gambar 4.11.



**Gambar 4.11.** Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM  $1,5D = 6$  cm

Dari Gambar 4.11 terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 4B atau 20 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 10 cm dan 15 cm. Pada gambar 4.11 juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 20 cm dengan 15 cm lebih lebar dibanding dengan panjang 15 cm dan 10 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa Panjang DSM ( $D_f$ ) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung terlihat dari rentang daya dukung yang semakin lebar pada variasi panjang DSM antara 4B dengan 3B dibanding rentang daya dukung antara variasi jarak 3B dan 2B. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang DSM ( $D_f$ ) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding panjang DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang 4B atau 20 cm dengan jarak DSM 4 cm yaitu sebesar  $20,76 \text{ kg/cm}^2$  dengan penurunan  $8,25 \text{ mm}$ . Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli.

Seperti pada teori Lambe dalam Das (1995) bahwa peningkatan kepadatan tanah dapat menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkoheisi. Perubahan-perubahan tersebut meliputi perubahan pada daya rembes (*permeability*), kemampatan (*compressibility*), dan kekuatan dari tanah. Selain itu pengaruh panjang DSM juga dapat disebabkan karena distribusi tegangan pada panjang 3B masih besar, seperti yang dijelaskan Beussinesq bahwa tegangan akan turun sesuai dengan panjang yang digambarkan pada garis-garis isobar dalam grafik *Bulb Pressure*.

#### 4.5. Analisis Penurunan Tanah

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

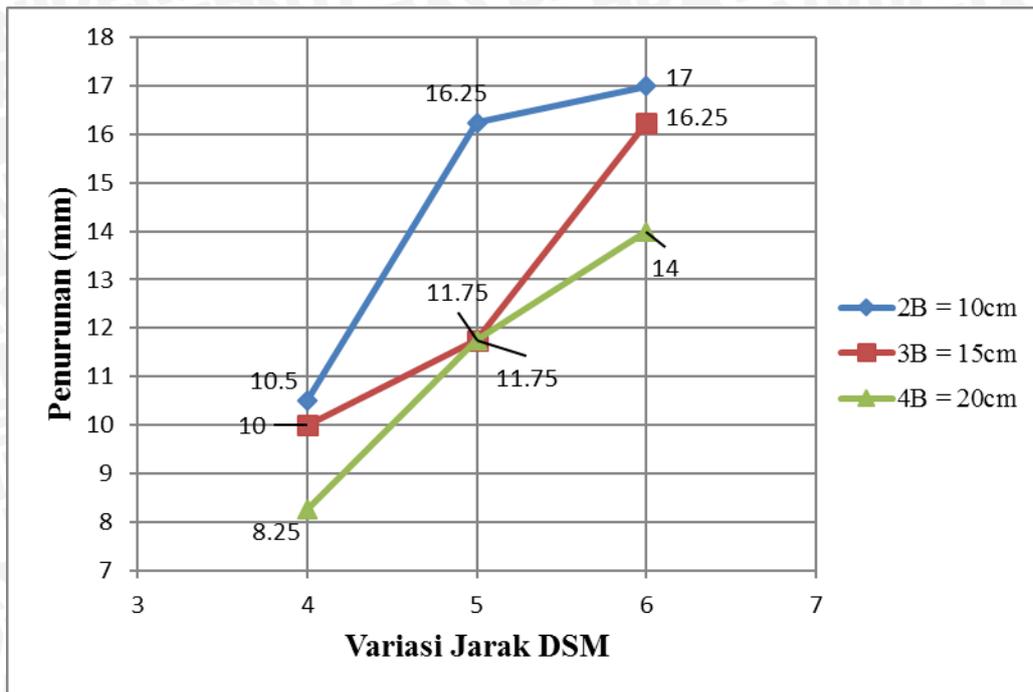
##### 4.5.1. Penurunan Tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi jarak antar kolom(L) terhadap panjang kolom (Df)

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

**Tabel 4.14.** Penurunan Akibat Variasi Jarak antar Kolom (L)

Jenis Sampel	Panjang DSM (Df) cm	Jarak antar DSM (L) cm	Luas Pondasi (A) cm <sup>2</sup>	$q_u$ kg/cm <sup>2</sup>	Penurunan mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	2B = 10 cm	1D = 4 cm	25	19.4	10.5
		1,25D = 5 cm	25	18.82	16.25
	3B = 15 cm	1,5D = 6 cm	25	16.74	17
		1D = 4 cm	25	19.74	10
	4B = 20 cm	1,25D = 5 cm	25	19.42	11.75
		1,5D = 6 cm	25	17.26	16.25
		1D = 4 cm	25	20.76	8.25
			1,25D = 5 cm	25	20.72
		1,5D = 6 cm	25	17.84	14

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



**Gambar 4.12.** Grafik Hubungan Penurunan pada  $q_{ultimit}$  terhadap Variasi Jarak antar Kolom

Dari Tabel 4.14 dan Gambar 4.12, dapat dilihat bahwa pada panjang kolom (Df)  $2B = 10$  cm,  $3B = 15$  cm dan  $4B = 20$  cm besarnya penurunan (*settlement*) berbanding lurus dengan jarak antar kolom, dimana besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom.

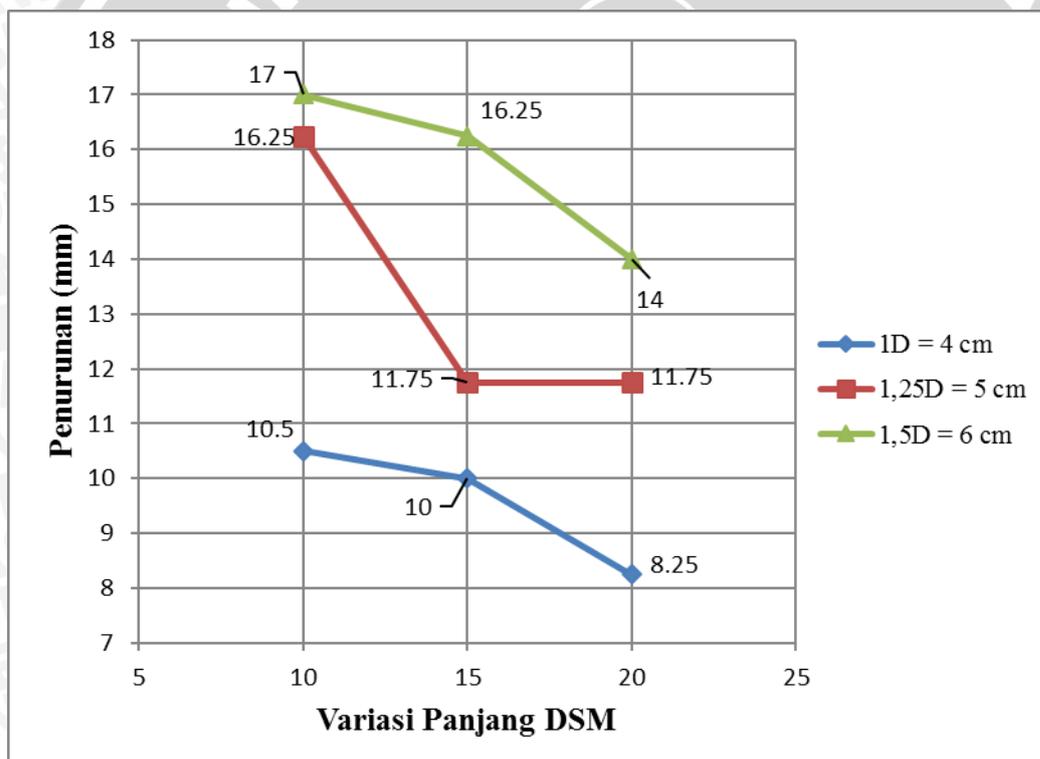
#### 4.5.2. Penurunan tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi panjang kolom(Df) terhadap jarak antar kolom (L)

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

**Tabel 4.15.** Penurunan Akibat Variasi Panjang Kolom (Df)

Jenis Sampel	Jarak antar DSM	Panjang DSM	Luas Pondasi	$q_u$	Penurunan
	(L) cm	(Df) cm	(A) cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	mm
Tanah Asli	-	-	25	7,04	7,25
	1D = 4 cm	2B = 10 cm	25	19.4	10.5
		3B = 15 cm	25	19.74	10
Tanah Asli + Kolom DSM 10% Kapur	1,25D = 5 cm	4B = 20 cm	25	20.76	8.25
		2B = 10 cm	25	18.82	16.25
		3B = 15 cm	25	19.42	11.75
	1,5D = 6 cm	4B = 20 cm	25	20.72	11.75
		2B = 10 cm	25	16.74	17
		3B = 15 cm	25	17.26	16.25
	4B = 20 cm	25	17.84	14	

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

**Gambar 4.13.** Grafik Hubungan Penurunan pada  $q_{ultimit}$  terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Tabel 4.15 dan Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa pada jarak antar kolom (L) 1D = 4 cm dan 1,5D = 6 cm besarnya penurunan (*settlement*) sesuai dengan hipotesa yang ada, dimana besarnya *settlement* akan semakin berkurang seiring dengan bertambahnya panjang kolom. Sedangkan pada jarak antar kolom (L) 1,25D = 5 cm, besarnya penurunan (*settlement*) tidak mengalami penurunan pada panjang 20 cm

sehingga tidak sesuai hipotesa. Hal ini terjadi karena faktor-faktor kesalahan yang terjadi pada saat pengujian pembebanan yang dilakukan secara manual menggunakan *hydraulic pump* juga dapat menyebabkan penetrasi beban tidak konstan (lebih cepat atau lebih lambat), hal ini menyebabkan *settlement* yang terjadi dapat lebih besar atau lebih kecil. Pemotongan kolom saat sebelum pembebanan juga mengurangi kepadatan kolom DSM yang mempengaruhi besar kecilnya *settlement*.

#### 4.6. Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) Berdasarkan Daya Dukung ultimit

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

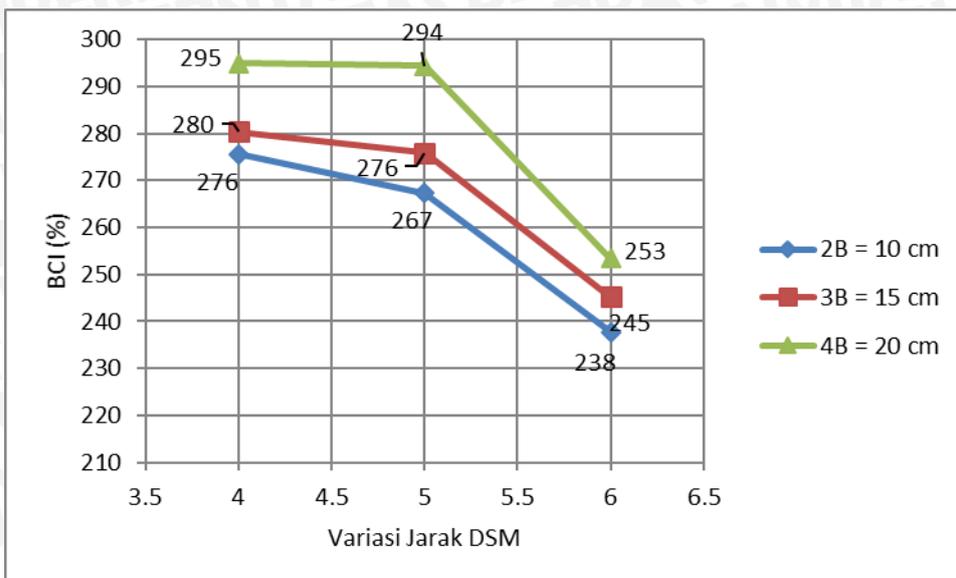
##### 4.6.1. Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Untuk analisis BCI digunakan rumus 3.3 untuk mengetahui besar peningkatan nilai BCI akibat variasi jarak DSM (L). Jarak DSM yang digunakan adalah  $1D = 4$  cm;  $1,25D = 5$  cm; dan  $1,5D = 6$  cm, D merupakan diameter DSM yaitu 4 cm. Hasil analisis pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan nilai BCI dapat dilihat pada Tabel 4.16.

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

No	Panjang DSM (Df)	Jarak antar DSM (L)	$q_u$ tanah asli (kg/cm <sup>2</sup> )	$q_u$ dengan DSM (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI (%)
1		$1D = 4$ cm		19.40	276
2	2B = 10 cm	$1,25D = 5$ cm	7.04	18.82	267
3		$1,5D = 6$ cm		16.74	238
4		$1D = 4$ cm		19.74	280
5	3B = 15 cm	$1,25D = 5$ cm	7.04	19.42	276
6		$1,5D = 6$ cm		17.26	245
7		$1D = 4$ cm		20.76	295
8	4B = 20 cm	$1,25D = 5$ cm	7.04	20.72	294
9		$1,5D = 6$ cm		17.84	253

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan



**Gambar 4.14.** Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Dari Tabel 4.16 dan Gambar 4.14 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai BCI pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Pada jarak DSM yang semakin dekat terjadi peningkatan nilai BCI, seperti yang tampak pada panjang DSM 20 cm. Pada jarak 6 cm terjadi peningkatan nilai BCI sebesar 253%, data tersebut terus meningkat pada variasi 5 cm dengan peningkatan nilai BCI sebesar 294%. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi jarak 4 cm sebesar 295%.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan dan jarak DSM maksimum terletak pada jarak DSM 4 cm dengan nilai BCI sebesar 295%.

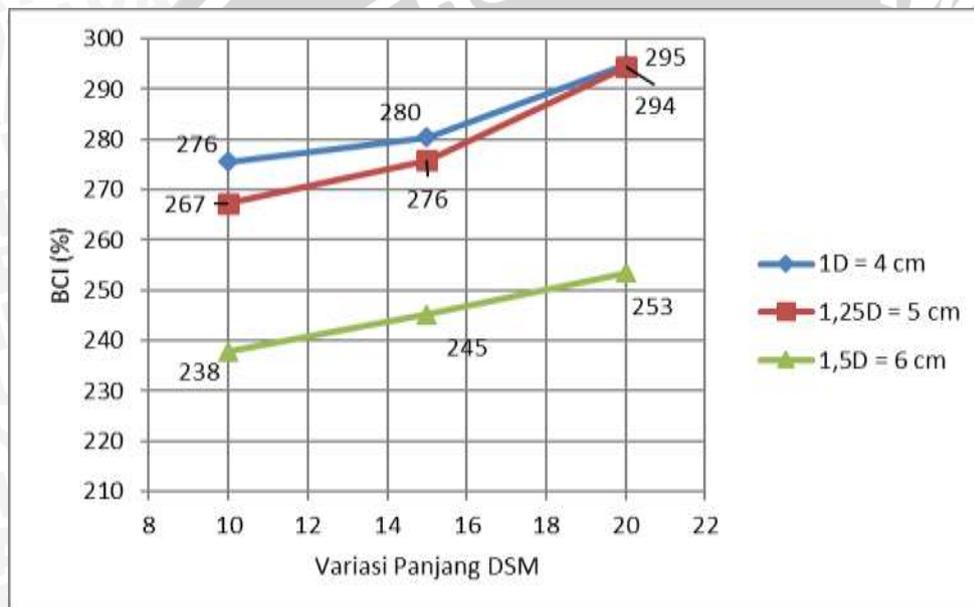
#### 4.6.2. Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Untuk analisis BCI digunakan rumus 3.3 untuk mengetahui besarnya peningkatan nilai BCI akibat variasi Panjang DSM (Df). Jarak DSM yang digunakan adalah 1B = 5 cm; 2B = 10 cm; dan 3B = 15 cm, B lebar pelat uji yaitu 5 cm. Hasil analisis pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan nilai BCI dapat dilihat pada Tabel 4.17.

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

No	Jarak antar DSM (L)	Panjang DSM (Df)	qu tanah asli (kg/cm <sup>2</sup> )	qu dengan DSM (kg/cm <sup>2</sup> )	BCI (%)
1		2B = 10 cm		19.4	276
2	1D = 4 cm	3B = 15 cm	7.04	19.74	280
3		4B = 20 cm		20.76	295
4		2B = 10 cm		18.82	267
5	1,25D = 5 cm	3B = 15 cm	7.04	19.42	276
6		4B = 20 cm		20.72	294
7		2B = 10 cm		16.74	238
8	1,5D = 6 cm	3B = 15 cm	7.04	17.26	245
9		4B = 20 cm		17.84	253

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

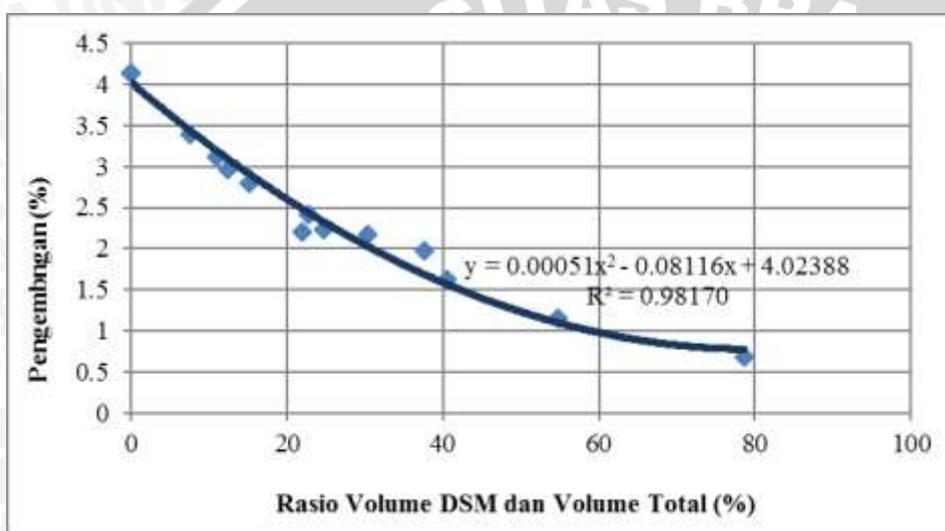
**Gambar 4.15.** Grafik Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Dari Tabel 4.17 dan Gambar 4.15 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai BCI pada tanah ketika DSM semakin panjang. Pada panjang DSM yang semakin panjang terjadi peningkatan nilai BCI, seperti yang tampak pada jarak DSM 4 cm. Pada variasi panjang 4 cm terjadi peningkatan nilai BCI sebesar 276%, data tersebut terus meningkat pada variasi panjang 15 cm sebesar 280%. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi panjang 20 cm sebesar 295%.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang DSM dapat meningkatkan nilai BCI dibanding dengan panjang DSM yang lebih pendek dan panjang DSM maksimum terletak pada panjang 20 cm dengan nilai BCI sebesar 295%.

#### 4.7. Analisis Pengembangan (*Swelling*)

Pada data hasil penelitian yang dilakukan oleh Firdaus, A.M (2016) mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing*, maka pada penelitian ini pun bisa membandingkan terhadap hasil penelitian tersebut. Di mana penelitian tersebut mengidentifikasi jumlah kolom DSM yang berarti berhubungan dengan persentase tanah stabilisasi yang digunakan akan mempengaruhi nilai pengembangan tanah lempung ekspansif Bojonegoro. Data hasil penelitian mengenai pengaruh pengembangan terhadap persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Gambar 4.16.



**Gambar 4.16.** Perbandingan Hasil *Swelling* terhadap Rasio Volume DSM dan Volume Total  
Sumber: Firdaus (2016)

Dari Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa semakin besar rasio volume DSM dalam tanah mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*). Hal tersebut dapat terjadi karena kepadatan pada tanah yang memiliki volume DSM lebih besar memiliki kepadatan yang tinggi dan volume kadar kapur juga lebih tinggi sehingga dapat mengurangi potensi pengembangan. Tabel perbandingan persentase tanah yang distabilisasi disajikan pada Tabel 4.18.

**Tabel 4.18.** Persentase Pengembangan terhadap Persentase Kolom Tanah Stabilisasi Penelitian DSM

Jenis Benda Uji	Variabel	Persentase Stabilisasi	Swelling	Penurunan Swelling dari Tanah Asli
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4.133	0
Tanah Asli + Kolom	L = 1D ; Df = 2B	43.76	1.43	2.70
	L = 1,25D ; Df = 2B	25.9	2.26	1.88
	L = 1,5D ; Df = 2B	20	2.60	1.53
Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 1D ; Df = 3B	65.64	0.85	3.28
	L = 1,25D ; Df = 3B	38.85	1.62	2.51
	L = 1,5D ; Df = 3B	30	2.04	2.10
Kapur	L = 1D ; Df = 4B	87.52	0.75	3.39
	L = 1,25D ; Df = 4B	51.8	1.16	2.97
	L = 1,5D ; Df = 4B	40	1.58	2.56

Sumber : Hasil Pengujian dan Perhitungan

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), besarnya pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm (0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata kedalaman tanah lempung ekspansif pada lokasi penelitian yaitu 1,5 meter yang berarti persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk struktur *flexible pavement* sebesar 0,8%.

Sehingga dari Tabel 4.18 dapat disimpulkan analisa uji pengembangan terhadap pemodelan di laboratorium yang dilakukan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase pengembangan adalah konfigurasi jarak (L) = 4 cm dan kedalaman (Df) = 20 cm.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm pola *triangular* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin dekat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah.
2. Jarak dan panjang maksimum DSM terjadi pada DSM jarak terdekat  $L = 1D$  (4 cm) dan panjang kolom  $D_f = 4B$  (20 cm).
3. Stabilisasi dengan bahan *additive* 10% kapur pada metode DSM berpola *triangular* dapat mengurangi nilai pengembangan (swelling) seiring dengan meningkatnya volume tanah yang distabilisasi. Persentase stabilisasi tanah sebesar 87,52% telah mampu menghentikan pengembangan (*swelling*) tanah asli.

#### 5.2. Saran

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan dalam penelitian ini, masih terdapat banyak kelemahan yang perlu diperhatikan. Untuk itu agar penelitian selanjutnya kelemahan-kelemahan yang terjadi dapat diminimalisir maka diperlukan beberapa upaya untuk menghindari kesalahan dalam penelitian, diantaranya:

1. Perlu dilakukan analisis lebih detail mengenai pemadatan dalam *box* sehingga berat isi kering maksimum dalam *box* dapat memenuhi kriteria berat isi kering maksimum berdasarkan uji proktor standar.
2. Operator pembebanan vertikal harus membawa *stopwatch*, agar penurunan yang dihasilkan dari pembacaan beban dapat berjalan konstan, karena dalam penelitian ini pembebanan masih dilakukan secara manual.
3. Menggunakan alat dengan kondisi yang baik, keakuratan pembacaan alat sangat mempengaruhi hasil pengujian. Sehingga diperlukan kontrol untuk menjaga kondisi alat yang digunakan.

