



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

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



RADIA SURYAJAYA TEJOKUSUMO

NIM. 135060100111008

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

LEMBAR PENGESAHAN

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

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RADIUS SURYAJAYA TEJOKUSUMO

NIM. 135060100111008

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Juli 2017

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

NIP. 19761023 200604 1002

Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT.

NIP. 19680707 199403 2 002

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1

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

NIP. 19810220 200604 1 002



HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI :

Stabilisasi Tanah Ekspansif Metode Deep Soil Mixing (DSM) Berpola Panels dan Kapur dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom Diameter 3,2 CM terhadap Perubahan Daya Dukung dan Pengembangan

Nama Mahasiswa : Radius Suryajaya Tejokusumo

NIM : 135060100111008

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Geoteknik

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Harimurti, MT

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

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT

Tanggal Ujian : 20 Juli 2017

SK Penguji : 824 / UN10.F7 / SK / 2017



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 plagiaris, 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, 27 Juli 2017

Mahasiswa,

Radius Suryajaya Tejokusumo

NIM. 135060100111008

RIWAYAT HIDUP

Radius Suryajaya Tejokusumo lahir di Jakarta, 13 November 1995, anak ke-2 dari Ir. Hartono Tedjokusumo (Papa) dan Tuty Nurjanah (Mama). Menempuh pendidikan di TK Al-Fadilah Bekasi pada tahun 2000-2001, dilanjutkan menempuh pendidikan ke SDN Kota Baru IV Bekasi pada tahun 2001-2007, lalu menempuh pendidikan ke SMPN 13 Bekasi pada tahun 2007-2008 yang kemudian pindah sekolah ke SMPN 138 Jakarta pada tahun 2008-2010 dan melanjutkan pendidikan ke SMAN 102 Jakarta pada tahun 2010-2013.

Kemudian, melanjutkan Perguruan Tinggi di Universitas Brawijaya Malang, lulus Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Brawijaya tahun 2007. Selama menjadi mahasiswa aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan antara lain sebagai Wakil Ketua Departemen Internal HMS FT-UB, Staff Departemen Sosial Masyarakat BEM Teknik, Ketua Pelaksana Diklat HMS, Ketua Panitia Lokal Pemira UB, *Steering Commitee* Probinmaba, Ketua Hubungan Masyarakat Kemah Kerja Mahasiswa dan lain sebagainya.

Serta, Aktif dalam berbagai kegiatan yang bergerak dibidang akademis seperti menjadi Asisten Sistem dan Bangunan Irigasi, Asisten Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi serta mengikuti berbagai perlombaan hingga berprestasi menjadi Juara Umum Lomba Karya Tulis Ilmiah Nasional “Inovasi Waste to Energy yang Berbasis Masyarakat dan Berkelanjutan” pada tahun 2016.

Malang, 27 Juli 2017

Penulis

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat Rahmat dan Karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “*Stabilisasi Tanah Ekspansif dengan Metode Deep Soil Mixing (DSM) Berpolo Panels dan Kapur dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom Diameter 3,2 cm terhadap Perubahan Daya Dukung dan Pengembangan*” ini.

Shalawat serta salam semoga senantiasa terlimpah curahkan kepada Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, para sahabatnya, hingga kepada umatnya hingga akhir zaman, Aamiin.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil Universitas Brawijaya, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya pengembangan dalam bidang Geoteknik. Selain itu, dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Ir. Sugeng P. Budio, MS. dan Ir. Siti Nurlina, MT. selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang membantu kelancaran skripsi ini.
2. Dr. Eng. Indradi Wijatmiko ST., M. Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil yang membantu dan memberikan izin kepada penulis untuk melakukan kegiatan penelitian.
3. Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D. dan Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT., sebagai dosen pembimbing atas segala arahan, masukan dan bimbingan yang telah diberikan pada pelaksanaan penelitian maupun penulisan skripsi.
4. Eko Andi Suryo, ST., MT. selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi yang telah memberikan izin dalam pelaksanaan penelitian di Laboratorium.
5. Bapak Ibu Dosen Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
6. Bapak dan Ibu saya yang memberikan do'a dan dukungan moral serta materi yang membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Kepala Desa Ngasem Kabupaten Bojonegoro yang memberikan izin pengambilan sampel tanah sehingga melancarkan penelitian.
8. Mbak Indah dan Mbak Asmi sebagai Admin Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberi bantuan untuk kelancaran pengerjaan skripsi ini.



9. Pak Ketut Sugiarto sebagai Staff Laboran Mekanika Tanah yang telah membantu pada penelitian ini.
10. Pak Sugeng Hendrik sebagai Staff Laboran Struktur dan Bahan Konstruksi yang telah membantu pada penelitian ini.
11. Ir. Hartono Tedjokusumo (Papa), Tuty Nurjanah (Mama) dan Halimah (Nenek) yang membuat setiap hari menjadi penuh dengan warna dan selalu memberikan dukungan, do'a dan memenuhi segala kebutuhan baik moral maupun moril.
12. Panji Pangestu (Kakak), Rosita Kencana (Adik Pertama) dan Agung Tirtamas (Adik Kedua) yang sama-sama berjuang dan saling memberikan do'a.
13. Aditya Leo Dharmawan, Abthal Hazazi Puspito, I Made Bayu Rasmawan, Gusti Raditya, Salwa Saputri, Afria Nurizky Minata, Ismiralda Citra, dan Devina Nadia yang sama-sama berjuang dan menjadi partner terbaik selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi.
14. Mahardika, Fadel dan Gusti sebagai teman kos "Garlina Brotherhood" yang selalu berjuang bersama sejak awal kuliah.
15. Teman-teman MDC, Galuh Team dan semua penghuni Gedung E yang senantiasa membantu segala kebutuhan berkaitan dengan penelitian.
16. Keluarga Besar Mahasiswa Sipil dan Mahasiswa Teknik Sipil Angkatan 2013 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dari tugas akhir ini tidak luput dari kesalahan dan jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengucapkan permintaan maaf sebesar-besarnya jika terjadi kesalahan yang disengaja maupun tidak disengaja. Penulis juga menerima segala kritik dan saran yang membangun terhadap tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi acuan jika dilakukan penelitian lebih lanjut.

Malang, 27 Juli 2017

Penyusun

**DAFTAR ISI**

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN	xii
SUMMARY	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Tujuan Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tanah.....	7
2.2 Tanah Lempung.....	7
2.3 Tanah Lempung Ekspansif.....	8
2.3.1 Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif.....	9
2.4 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif.....	9
2.4.1 Identifikasi Tidak Langsung.....	9
2.4.2 Identifikasi Langsung.....	11
2.5 Mineral Pembentuk Lempung.....	11
2.5.1 Kaolinite.....	12
2.5.2 Illite.....	12
2.5.3 Montmorillonite.....	12
2.6 Kapur sebagai Bahan Stabilisasi.....	13
2.6.1 Stabilisasi Kapur (<i>Lime Stabilization</i>).....	13
2.6.2 Proses Reaksi Tanah dan Kapur.....	14
2.6.3 Manfaat Stabilisasi Kapur terhadap Tanah Lempung.....	16
2.7 <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM).....	17
2.8 Daya Dukung Batas Tanah.....	19



2.9 Pengembangan Tanah	20
2.10 Pengangkatan Tanah	21
2.11 Tegangan Vertikal yang Diakibatkan Beban Bujur Sangkar	21
2.12 Uji Laboratorium	22
2.12.1 Pemodelan <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM) Laboratorium	22
2.12.2 Area Stabilisasi Kolom <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM)	24
2.12.3 Uji Pembebanan	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Waktu dan Tempat	27
3.2 Bahan Penelitian	27
3.3 Peralatan Penelitian	27
3.4 Rancangan Penelitian	28
3.4.1 Rancangan Pengujian Pembebanan	28
3.4.2 Rancangan Pengujian Pengembangan (<i>Swelling</i>)	29
3.5 Variabel Penelitian	29
3.6 Metode Penelitian	29
3.6.1 Penelitian Pendahuluan	29
3.6.2 Persiapan Benda Uji Pembebanan	30
3.6.3 Persiapan Benda Uji Pengembang (<i>Swelling</i>)	33
3.6.4 Uji Pembebanan	33
3.6.5 Uji Pengembangan (<i>Swelling</i>)	36
3.7 Metode Analisis Data	36
3.8 Diagram Alir Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif Berdasarkan Pengujian Sifat Fisik Tanah ..	41
4.2 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif	42
4.3 Uji Pemadatan	43
4.4 Hasil Uji Beban (<i>Load Test</i>) Benda Uji	44
4.4.1 Analisis Daya Dukung Tanah	44
4.4.1.1 Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Stabilisasi Tanah dengan Kolom <i>Deep Soil Mixing</i>	44
4.4.1.2 Nilai Daya Dukung Tanah Asli	46
4.4.1.3 Nilai Daya Dukung Tanah dengan 100% Stabilisasi	46
4.4.1.4 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Jarak antar Kolom (L) terhadap	



Kedalaman Kolom (D_f)	47
4.4.1.5 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L)	50
4.4.2 Analisis Daya Dukung Tanah dengan menggunakan Metode <i>Tangen Intersection</i>	53
4.4.2.1 Daya Dukung Tanah Asli Metode <i>Tangen Intersection</i>	53
4.4.2.2 Daya Dukung Tanah dengan 100 Stabilisasi Metode <i>Tangen Intersection</i> ...	53
4.4.2.3 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 3,2$ cm; $D_f = 10$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	54
4.4.2.4 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4$ cm; $D_f = 10$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	54
4.4.2.5 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4,8$ cm; $D_f = 10$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	55
4.4.2.6 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 3,2$ cm; $D_f = 15$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	55
4.4.2.7 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4$ cm; $D_f = 15$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	55
4.4.2.8 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4,8$ cm; $D_f = 15$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	56
4.4.2.9 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 3,2$ cm; $D_f = 20$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	56
4.4.2.10 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4$ cm; $D_f = 20$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	57
4.4.2.11 Daya Dukung Tanah dengan dengan Variasi $L = 4$ cm; $D_f = 20$ cm Metode <i>Tangen Intersection</i>	57
4.4.3 Analisis <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI_u) Berdasarkan pada Daya Dukung Batas	59
4.4.3.1 Perbandingan BCI_u pada Variasi Jarak Antar Kolom (L) terhadap Kedalaman Kolom (D_f)	59
4.4.3.2 Perbandingan BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L)	60
4.4.4 Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom (L) dan Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Nilai Daya Dukung Tanah	61
4.4.5 Analisis <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) dengan Metode <i>Tangen</i>	



Intersection..... 62

4.4.5.1 Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) dengan Metode *Tangen Intersection* pada Variasi Jarak antar Kolom (L) 63

4.4.5.2 Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) dengan Metode *Tangen Intersection* pada Variasi Kedalaman Kolom (D_r) 64

4.5 Daya Dukung Izin..... 64

4.6 Pemeriksaan Pengembangan (*Swelling*) 65

BAB V PENUTUP 69

5.1 Kesimpulan 69

5.2 Saran 70

DAFTAR PUSTAKA 71

LAMPIRAN..... 73



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Batasan Ukuran Golongan Tanah.....	7
Tabel 2.2	Karakteristik Mineral Lempung	8
Tabel 2.3	Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas (PI)	10
Tabel 2.4	Derajat Ekspansifitas Berdasarkan Batas Susut (SL)	10
Tabel 2.5	Korelasi Tingkat Keaktifan dengan Potensi Pengembangan	10
Tabel 2.6	Kapasitas Penggantian Mineral Lempung	11
Tabel 2.7	Persyaratan Kimia Kapur Tipe 1 (SNI 03-4147-1996)	14
Tabel 2.8	Persyaratan Kimia Kapur Tipe 2 (SNI 03-4147-1996)	14
Tabel 2.9	Nilai <i>Atterberg Limit</i> terhadap Penambahan Kadar Kapur.....	16
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom.....	28
Tabel 3.2	Rancangan Penelitian Untuk Uji Pengembangan.....	29
Tabel 3.3	Pembacaan Beban dan Penurunan Uji Beban (<i>Load Test</i>)	35
Tabel 3.4	Pembacaan Uji Pengembangan	36
Tabel 3.5	Peningkatan Daya Dukung pada Variasi Benda Uji.....	37
Tabel 3.6	Persentase Perbaikan terhadap Nilai Pengembangan	37
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Sifat Fisik Tanah	41
Tabel 4.2	Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah	45
Tabel 4.3	Nilai Daya Dukung Tanah Hasil Uji Beban dengan Variasi Jarak antar (L) terhadap Kedalaman Kolom (D_f).....	48
Tabel 4.4	Nilai Daya Dukung Hasil Uji dengan Variasi Kedalaman Kolom terhadap Jarak antar Kolom.....	51
Tabel 4.5	Nilai Daya Dukung Tanah dengan Metode <i>Tangen Intersection</i>	58
Tabel 4.6	Nilai BCI_u pada Variasi Jarak antar Kolom.....	59
Tabel 4.7	Nilai BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom	60
Tabel 4.8	Nilai BCI dengan Metode <i>Tangen Intersection</i>	62
Tabel 4.9	Nilai Daya Dukung Tanah Perbaikan.....	64
Tabel 4.10	Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi	66



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Senyawa Aluminium Silikat	8
Gambar 2.2	Mineral Dasar Lempung	12
Gambar 2.3	<i>Kaolinite</i>	12
Gambar 2.4	Illite.....	13
Gambar 2.5	<i>Montmorillonite</i>	13
Gambar 2.6	Mekanisme Stabilisasi Kapur pada Tanah Lempung	16
Gambar 2.7	Pengaruh Penambahan Kadar Kapur terhadap Nilai CBR	17
Gambar 2.8	Pengaruh Penambahan Kadar Kapur terhadap Nilai Swelling	17
Gambar 2.9	Proses <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM).....	18
Gambar 2.10	Hasil Kolom Stabilisasi DSM	18
Gambar 2.11	Konfigurasi Kolom DSM.....	19
Gambar 2.12	Isobar Tegangan Vertikal.....	22
Gambar 2.13	Skema Permodelan Kolom Kapur dalam <i>Box</i>	23
Gambar 2.14	Variasi Jarak dan Panjang Kolom Diameter 4,5cm	24
Gambar 2.15	Tampak Atas Skema Pembebanan terhadap Tanah Stabilisasi.....	25
Gambar 2.16	Susunan Kolom Tipe <i>Square</i>	25
Gambar 2.17	Bentuk Umum Grafik Hubungan antara Beban per Unit Luas dan Penurunan yang didapat dari Uji Beban	26
Gambar 3.1	Variasi Jarak dan Panjang Kolom Berpola <i>Panels</i> Diameter 3,2 cm.....	32
Gambar 3.2	Skema Uji Pembebanan	34
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 3.4	Diagram Alir Uji Pembebanan.....	39
Gambar 3.5	Diagram Alir Uji Pengembangan (<i>swelling</i>).....	40
Gambar 4.1	Analisis Butiran Tanah	41
Gambar 4.2	Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS	42
Gambar 4.3	Klasifikasi Potensi Mengembang	43
Gambar 4.4	Hasil Pengujian Pemadatan Tanah	44
Gambar 4.5	Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah	45
Gambar 4.6	Hubungan Tegangan dengan Penurunan Tanah Asli	46
Gambar 4.7	Hubungan Tegangan dengan Penurunan Tanah dengan 100%	



Stabilisasi	47
Gambar 4.8 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm.....	47
Gambar 4.9 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm.....	48
Gambar 4.10 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm.....	48
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak antar Kolom (L) terhadap kedalaman kolom	49
Gambar 4.12 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 3,2 cm	50
Gambar 4.13 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 4 cm	51
Gambar 4.14 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 4,8 cm	51
Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L)	52
Gambar 4.16 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah Asli.....	53
Gambar 4.17 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan 100% Stabilisasi	53
Gambar 4.18 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 3,2 cm ; D_f = 10 cm.....	54
Gambar 4.19 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 4 cm ; D_f = 10 cm.....	54
Gambar 4.20 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 4,8 cm ; D_f = 10 cm.....	55
Gambar 4.21 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 3,2 cm ; D_f = 10 cm.....	55
Gambar 4.22 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 4 cm ; D_f = 10 cm.....	56
Gambar 4.23 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i> Tanah dengan Variasi L = 4,8 cm ; D_f = 10 cm.....	56
Gambar 4.24 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode <i>Tangen Intersection</i>	



Tanah dengan Variasi $L = 3,2 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$ 57

Gambar 4.25 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection*
Tanah dengan Variasi $L = 4 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$ 57

Gambar 4.26 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection*
Tanah dengan Variasi $L = 4,8 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$ 58

Gambar 4.27 Grafik Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom terhadap Nilai BCI_u 60

Gambar 4.28 Grafik Pengaruh Variasi Kedalaman Kolom terhadap Nilai BCI_u 61

Gambar 4.29 Hubungan $BCI (q_s)$ terhadap Variasi Jarak antar Kolom (L).....63

Gambar 4.30 Hubungan $BCI (q_s)$ terhadap Variasi Kedalaman Kolom (D_f).....64

Gambar 4.30 Nilai Pengembangan Tanah terhadap Prosentase Stabilisasi.....66

**DAFTAR LAMPIRAN**

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Pengujian Kadar Air Tanah Asli (<i>Undisturbed Sample</i>).....	73
Lampiran 2.	Pengujian Berat Isi Tanah (<i>Undisturbed Sample</i>).....	74
Lampiran 3.	Kalibrasi Labu Ukur.....	75
Lampiran 4.	Pengujian <i>Specific Gravity</i> (Gs).....	77
Lampiran 5.	Analisa Saringan dan Hydrometer	79
Lampiran 6.	Pengujian Batas-Batas <i>Atterberg</i>	81
Lampiran 7.	Pemeriksaan Pematatan Standar Laboratorium Tanah Asli	83
Lampiran 8.	Hasil Uji Pembebanan (<i>Load Test</i>)	85
Lampiran 9.	Hasil Uji Pengembangan (<i>Swelling</i>)	114
Lampiran 10	Dokumentasi Penelitian.....	122

RINGKASAN

Radius Suryajaya Tejokusumo, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2017, *Stabilisasi Tanah Ekspansif dengan Metode Deep Soil Mixing (DSM) Berpola Panels dan Kapur dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom Diameter 3,2 cm terhadap Perubahan Daya Dukung dan Pengembangan Tanah Ekspansif*, Dosen Pembimbing: Eko Andi Suryo dan Yulvi Zaika

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

Stabilisasi dilakukan untuk memperbaiki sifat fisik tanah sehingga mutu tanah akan meningkat. Penelitian difokuskan pada pengaruh variasi jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f) dengan material aditif kapur. Penggunaan material aditif kapur dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi plastisitas tanah. Metode yang digunakan pada penelitian merupakan *deep soil mixing* (DSM) dengan mencampurkan 8% kapur pada kedalaman rata-rata 1,5 meter dengan variasi kolom, kedalaman dan jarak tertentu. Pengujian dilakukan di Laboratorium, dengan memadatkan model tanah pada *box* berukuran (30x30x30) cm dan kemudian akan dilakukan uji pembebanan (*load test*). Pada model tanah akan dilakukan perawatan (*curing*) selama 3 hari sebelum di uji pembebanan dengan variasi jarak antar kolom (L) 1D, 1,25D, 1,5D dan variasi kedalaman kolom (D_f) 10 cm, 15 cm, 20cm.

Berdasarkan hasil pengujian terbukti stabilisasi tanah menggunakan 8% kapur metode *deep soil mixing* (DSM) mampu meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi pengembangan tanah. Hal ini terjadi karena pengaruh bahan stabilisasi kapur yang meningkatkan kepadatan tanah. Selain itu, dengan variasi jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f) memberikan hasil yang bervariasi. Karena, semakin tinggi persentase stabilisasi maka nilai daya dukung akan semakin meningkat dan semakin turun persentase pengembangan tanah. Berdasarkan pengujian dengan metode *deep soil mixing* (DSM), jarak antar kolom (L) 3,2 cm dengan kedalaman kolom (D_f) 20 cm memberikan nilai daya dukung paling maksimum yaitu sebesar 36,4 kg/cm² atau meningkat 280% dari tanah sebelum distabilisasi, serta memiliki nilai pengembangan (*swelling*) terkecil yaitu sebesar 0,369% dan mengalami penurunan 93,47% dari tanah sebelum distabilisasi.

Pengembangan izin untuk struktur *flexible pavement* 0,8% dapat terpenuhi oleh variasi jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm. Sedangkan, untuk stuktur *rigid pavement* dapat terpenuhi oleh antara lain $L = 3,2$ cm ; $D_f = 15$ cm, $L = 3,2$ cm ; $D_f = 20$ cm, $L = 4$ cm ; $D_f = 20$ cm dan $L = 4,8$ cm ; $D_f = 20$ cm.

Kata kunci : tanah lempung ekspansif, stabilisasi, *deep soil mixing* (DSM), daya dukung, pengembangan.

SUMMARY

Radius Suryajaya Tejokusumo, Departement of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, in July 2017, *Stabilization of Expansive Soil with Deep Soil Mixing (DSM) Method by using Panels Pattern with lime which Depth and Distance Variation (Diameter 3,2 cm) to changing of Bearing Capacity and Swelling*, Academic Supervisor: Eko Andi Suryo and Yulvi Zaika.

Expansive clay soil can cause some damages to construction in cause of high potential in shrinkage. Another problem can also occur on expansive soil, it happen because of low bearing capacity in high water content. Expansive soil can be found in Ngasem, Bojonegoro. Because of that problem, expansive soil need to stabilize to increase bearing capacity and reduce swell potential.

Stabilization of expansive soil improve on characteristic of soil. This research is focused on variety of depth (Df) and space of coloumn with lime as additive material. Usage of lime material can reduce index plasticity of soil. Deep Soil Mixing (DSM) is one of method of soil stabilization. On this research it use DSM method with 8% lime with variety of depth (Df) and space. Some tests need to conducted in laboratory, to determine bearing capacity by do loading test in small scalle model (30x30x30) cm. Sample of soil which used lime will need 3 days of curing process. Variety of space are 1D, 1,25D, 1,5D and variety of depth (Df) are 10 cm, 15 cm, 20 cm.

This research is proving that stabilization of soil with DSM by using 8% lime can increase bearing capacity and reduce swell potential. Variety of space and depth (Df) can cause variety number of result, which is percentage of soil stabilization that can affect changes on bearing capacity and swelling potential. Based on result of stabilization with DSM, panels pattern with distance (L) = 3,2 cm and depth (Df) = 20 cm has highest improvement of bearing capacity and smallest swell potential. These pattern can give value of bearing capacity (q_u) = 36,4 kg/cm² and swelling = 0,369%.

Keyword : Expansive Clay Soil, Stabilization, *deep soil mixing* (DSM), bearing capacity, swelling.



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara berkembang menyebabkan pembangunan infrastruktur terus meningkat sehingga mengakibatkan berbagai kesulitan untuk mendapat lahan yang memadai. Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki kondisi geografis dengan daratan yang luas dengan karakteristik tanah yang berbeda-beda dan tanah memiliki peran yang penting dalam pekerjaan konstruksi. Tanah dapat menjadi dasar sebuah konstruksi di bangun. Konstruksi yang baik tentu harus didukung oleh tanah yang baik. Namun, yang terjadi konstruksi sering mengalami kerusakan disebabkan oleh perilaku tanah yang kurang baik, penyebabnya perilaku kembang dan susut tanah yang tinggi disebabkan oleh tanah lempung ekspansif.

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah dengan daya dukung rendah pada kondisi kadar air tinggi dengan kandungan mineral lempung *montmorillonite* dengan angka pengembangan (*swelling*) yang sangat tinggi umumnya disebut tanah dengan plastisitas tinggi. Hal ini menyebabkan tanah lempung ekspansif sensitif terhadap kadar air dan tanah ini sangat rentan terhadap pergantian musim. Sehingga perlu adanya upaya untuk perbaikan sifat tanah lempung ekspansif yang tidak stabil menjadi lebih stabil dan daya dukungnya dapat meningkat.

Stabilisasi tanah adalah suatu usaha memperbaiki sifat teknis tanah dan meningkatkan kualitas tanah agar dapat digunakan sesuai dengan perencanaan. Stabilisasi tanah diharapkan dapat memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, seperti potensi pengembangan, daya dukung tanah, dan sensitifitas terhadap air sehingga mempermudah dalam pelaksanaan konstruksi. Upaya stabilisasi tanah dengan menambahkan zat aditif umumnya disebut *stabilizing agent*, salah satunya adalah kapur (*lime*).

Ismail, A. (2016) berdasarkan hasil pengujian mengenai *deep soil mixing* (DSM) dengan variasi jarak dan panjang kolom tipe *panels* berdiameter 4,5 cm dengan kadar kapur 10%, berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah. Apabila jarak antar kolom (L) diperkecil nilai daya dukung semakin meningkat. Sedangkan untuk kedalaman kolom, semakin dalam panjang kolom nilai daya dukung semakin meningkat. Variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah dibandingkan variasi kedalaman kolom. Jarak dan panjang kolom yang

memberi peningkatan nilai daya dukung (q_u) paling maksimum yaitu jarak antar kolom terkecil (L) 4,5 cm dan kedalaman kolom terbesar (D_f) 20 cm. Daya dukung paling maksimum tersebut sebesar 20,02 kg/cm² atau meningkat 184,38% dari tanah sebelum distabilisasi. Berdasarkan hasil penelitian ini terlihat bahwa tanah yang sudah distabilisasi sangat kaku, karena dilihat dari hubungan tegangan dan regangan.

Ranggaesa, R.A. (2016) berdasarkan hasil pengujian sifat fisik dan mekanis campuran tanah lempung dengan kadar kapur 0%, 6%, 8%, 9%, 10% dan pemeraman (*curing*) selama 3 hari, dihasilkan kadar kapur 8% merupakan kadar paling baik untuk stabilisasi. Kadar campuran tersebut, dapat meningkatkan nilai CBR keadaan *unsoaked* sampai pada persentase 8% dari 14,76% menjadi 22,52% dan nilai CBR *soaked* dari 4,66% menjadi 12,04%. Sedangkan nilai pengembangan (*swelling*) tanah lempung, dengan bertambah persentase kadar kapur maka nilai pengembangan (*swelling*) menjadi semakin kecil.

Laras, A.W (2017) berdasarkan hasil pengujian mengenai waktu *curing*, campuran tanah asli dengan 8% kapur dengan lama waktu *curing* tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap kenaikan nilai CBR.

Atas dasar referensi dan hasil penelitian yang telah ada, maka perlu ada upaya untuk mengembangkan penelitian dengan metode *deep soil mixing* (DSM) dengan stabilisasi campuran kapur. Pada Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur merupakan salah satu daerah yang tanahnya lempung ekspansif sehingga dapat dijadikan objek untuk melaksanakan penelitian dengan metode *deep soil mixing* (DSM) secara tepat. Kapur sebagai bahan aditif dapat mereduksi sifat kembang susut tanah. Material kapur juga mudah diperoleh, sehingga sangat relevan digunakan untuk penelitian ini.

Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi terhadap tanah ekspansif di Bojonegoro. Stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan kadar kapur 8% dengan metode *deep soil mixing* (DSM) tipe *panels* berdiameter 3,2 cm sehingga dapat digunakan sebagai referensi untuk perbaikan tanah di sekitar Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

1.2. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang diakibatkan oleh tanah lempung ekspansif begitu banyak dalam hal ini tanah lempung ekspansif di daerah Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur. Sifat tanah lempung ekspansif yang sensitif terhadap pengaruh musim, menyebabkan tanah lempung ekspansif sensitif terhadap pengaruh kadar air sehingga tanah dapat mengalami pengembangan (*swelling*) ketika musim hujan. Hal tersebut mengakibatkan penurunan daya dukung tanah. Saat musim kemarau tanah lempung

ekspansif menyusut dan mengakibatkan retakan yang sering menimbulkan kerusakan bangunan.

Akan tetapi di Indonesia belum banyak yang menerapkan metode Deep Soil Mixing (DSM) khususnya di daerah Bojonegoro, Jawa Timur. Sehingga perlu adanya perbaikan dan pengembangan terhadap penelitian yang telah ada, untuk mengetahui nilai daya dukung tanah lempung ekspansif dengan stabilisasi menggunakan kadar kapur 8%. Metode pencampuran menggunakan *deep soil mixing* (DSM) dengan memberikan variasi jarak dan panjang kolom tipe *panels*.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat dirumuskan masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perubahan daya dukung dan pengembangan (swelling) tanah tanpa perbaikan dan 100% perbaikan?
2. Bagaimana perbandingan daya dukung tanah yang diperbaiki 100% dengan tanah yang diperbaiki menggunakan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* dengan variasi jarak dan panjang kolom?
3. Bagaimana perubahan pengembangan (swelling) tanah akibat perkerasan dengan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels*?
4. Berapa jarak dan kedalaman kolom metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* yang memberi daya dukung izinkan pada tanah lempung ekspansif di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur?
5. Berapa jarak dan panjang kolom yang dapat digunakan sebagai konfigurasi stabilisasi kolom metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels*, berdasarkan pengembangan yang diizinkan?

1.4. Batasan Masalah

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

1. Sampel tanah yang digunakan adalah sampel tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Jenis kapur yang digunakan yaitu kapur yang telah terhidrasi atau kapur padam yang umum dan bisa dibeli di toko bangunan.
3. Penelitian ini tidak membahas tentang reaksi kimia dan analisis ekonomi.



4

4. Metode pencampuran yang digunakan adalah *slurry*. Pemodelan dilakukan di dalam *box* berukuran (30x30x30) cm dengan volume tanah (30x30x20) cm.
5. Kadar kapur yang digunakan yaitu 8% dari berat kering tanah.
6. Waktu *curing* sebelum pengujian adalah 3 hari.
7. Variasi jarak antar kolom 1D, 1,25D, dan 1,5D sedangkan variasi panjang kolom (kedalaman kolom) adalah $0,5D_f$, $0,75D_f$, dan $1D_f$ dimana D adalah diameter kolom 3,2 cm dan D_f adalah kedalaman kolom 20 cm.
8. Pengujian laboratorium yang dilakukan adalah uji beban hidrolik (*loading test*). Beban uji terbuat dari pelat baja berukuran (5x5x2) cm, sebagai penyalur beban yang merupakan pemodelan dari beban pondasi. Pembebanan akan dilakukan dan dihentikan sampai batas runtuh tanah, yaitu ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali beban sama pada penurunan tanah yang berbeda.

1.5. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui perubahan daya dukung dan pengembangan (swelling) tanah tanpa perbaikan dan 100% perbaikan.
2. Mengetahui perbandingan daya dukung tanah yang diperbaiki 100% dengan tanah yang diperbaiki menggunakan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* dengan variasi jarak dan panjang kolom.
3. Mengetahui perubahan pengembangan (swelling) tanah akibat perkerasan dengan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels*.
4. Mengetahui jarak dan kedalaman kolom metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* yang memberi daya dukung izin pada tanah lempung ekspansif di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
5. Mengetahui jarak dan panjang kolom yang dapat digunakan sebagai konfigurasi stabilisasi kolom metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels*, berdasarkan pengembangan yang diizinkan.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan bisa diambil dari peneliti ini sebagai berikut :

1. Bagi praktisi lapangan. Menjadi sumber informasi dan pertimbangan dalam perancangan suatu konstruksi yang akan dibangun di atas tanah lempung ekspansif, khususnya pembangunan di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
2. Bagi kalangan akademis. Sebagai pengetahuan di luar perkuliahan yang dapat digunakan pada bidang mekanika tanah dan geoteknik, untuk stabilisasi dan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah

Tanah merupakan hasil dari proses pelapukan yang terjadi pada batuan. Menurut (Wesley, 2010) dalam bukunya menjelaskan bahwa pelapukan fisika terdiri dari atas dua jenis. Jenis pertama adalah penghancuran disebabkan terutama oleh pembasahan dan pengeringan terus menerus ataupun pengaruh salju dan es. Jenis kedua adalah pengikisan akibat air, angin ataupun sungai es (*glacier*). Proses ini menghasilkan butiran yang kecil sampai yang besar, namun komposisinya masih tetap sama dengan batuan asalnya. Sedangkan pelapukan kimiawi adalah proses yang lebih rumit daripada pelapukan fisika. Pelapukan kimiawi memerlukan air serta oksigen dan karbondioksida.

Menurut ukuran butirannya, tanah diklasifikasikan menjadi dua jenis tanah yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus. Tanah berbutir kasar terdiri dari krikil dan/ atau pasir sedangkan tanah berbutir halus terdiri dari lanau dan/ atau lempung. Menurut (M. Das, 1991) dalam bukunya menjabarkan golongan tanah terhadap batas ukuran seperti pada Tabel 2.1 berikut.

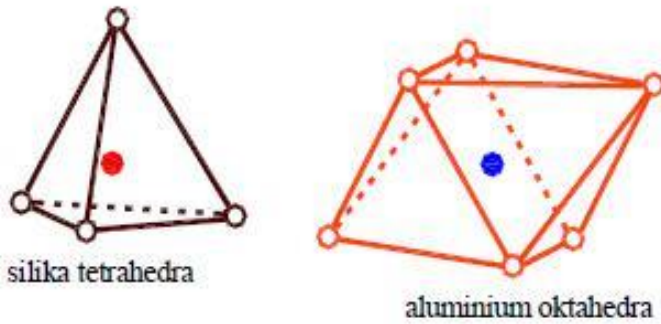
Tabel 2.1
Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 – 0,06	0,06 – 0,002	<0,002
USDA	>2	2 – 0,05	0,05 – 0,002	<0,002
AASTHO	76,2 – 2	2 – 0,075	0,075 – 0,002	<0,002
USCS	76,2 – 4,75	4,75 – 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) < 0,0075	

Sumber: M. Das (1991)

2.2. Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan senyawa aluminium silikat yang kompleks yang terdiri dari satu atau dua unit dasar yaitu *silika tetrahedral* dan *aluminium oktahedra* seperti pada Gambar 2.1 di bawah ini.



Gambar 2.1 Senyawa Aluminium Silikat

Tanah lempung merupakan partikel mineral dengan ukuran butiran lebih kecil dari 0,002 mm dan memiliki sifat kohesi dan plastisitas. Kandungan mineral pada tanah lempung merupakan kombinasi dari senyawa aluminat yang bernama *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite*. Perilaku dan sifat-sifat lempung bergantung pada kandungan mineralnya dan juga kondisi lingkungan disekitarnya.

Menurut (Nelson, 1992) dalam bukunya menjabarkan bahwa karakteristik mineral lempung tersebut memiliki nilai yang berbeda berdasarkan batas-batas *atterberg* seperti pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2
Karakteristik mineral lempung

Mineral Group	Basal Spacing (Å)	Particle Features	Interlayer Bonding	Specific Surface (m ² /g)	Atterberg Limits ^a			Activity ^b (PI/% Clay)
					LL (%)	PL (%)	SI (%)	
<i>Kaolinites</i>	14,4	Thick, stiff 6-sided flakes 0,1 to 4 x 0,05 to 2 µm	Strong hydrogen bonds	10 - 20	30 - 100	25 - 40	25 - 29	0,38
<i>Illites</i>	10	Thin, stacked plates 0,003 to 0,1 x 1,0 to 10 µm	Strong potassium bonds	65 - 100	60 - 120	35 - 60	15 - 17	0,9
<i>Montmorillonites</i>	9,6	Thin, filmy, flakes > 10 Å x 1,0 to 10 µm	Very weak van der Waals bonds	700 - 840	100 - 900	50 - 100	8,5 - 15	7,2

2.3. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah dengan daya dukung rendah pada kondisi kadar air tinggi dengan kandungan mineral lempung *montmorillonite* dengan angka pengembangan (*swelling*) yang sangat tinggi umumnya disebut tanah dengan plastisitas tinggi.

Mineral tanah lempung ekspansif memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air. Pada peningkatan kadar air, tanah ekspansif akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan mengembang. Bila kadar airnya berkurang sampai batas susutnya, akan terjadi penyusutan. Sifat kembang susut

yang demikian dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan di atasnya. (Hardiyatmo, 2006)

2.3.1. Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif

Munurut buku Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan Departemen Pekerjaan Umum tahun 2005, tanah ekspansif memiliki karakteristik yang berbeda dengan jenis tanah pada umumnya, yaitu sebagai berikut :

1. Mineral lempung

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

2. Kimia tanah

Meningkatnya konsentrasi kation dan bertambah tingginya valensi kation dapat menghambat pengembangan tanah. Sebagai contoh, kation Mg^{++} akan memberikan pengembangan yang lebih kecil dibandingkan dengan Na^+ .

3. Plastisitas

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

4. Struktur tanah

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

5. Berat isi kering

Tanah yang mempunyai berat isi kering yang tinggi menunjukkan jarak antar partikel yang kecil, hal ini berarti gaya tolak yang besar dan potensi pengembangan yang tinggi.

2.4. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

2.4.1. Identifikasi Tidak Langsung

Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung, dapat dianalisa menggunakan uji nilai Batas *Atterberg* dan prosentase kandungan lempung untuk menggambarkan suatu tanah secara kualitatif.

a. Nilai indeks plastisitas (PI) dan batas susut (SI)

Identifikasi tanah secara tidak langsung dapat diketahui potensi pengembangannya berdasarkan nilai indeks plastisitas (PI) dan derajat pengembangannya berdasarkan nilai

batas susut tanah (SL). Chen (1975) secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji *Atterberg*.

Tabel 2.3

Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas (PI)

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

Sumber: Chen (1975)

Tabel 2.4

Derajat Ekspansifitas Berdasarkan Batas Susut (SL)

Batas Susut Atterberg (%)	Susut Linier (%)	Derajat Mengembang
< 10	> 8	Kritis
10 – 12	5 – 8	Sedang
> 12	0 – 8	Tidak Kritis

Sumber: Chen (1975)

b. Tingkat keaktifan (*activity*)

Batas *Atterberg* dan fraksi lempung dapat dikombinasikan menjadi satu parameter yang dinamakan tingkat keaktifan (*activity*). Pada umumnya, tanah dengan indeks plastisitas (PI) kurang dari 15% tidak akan memperlihatkan perilaku pengembangan. Untuk tanah dengan PI lebih besar dari 15%, kadar lempung dan batas *Atterberg*nya harus diuji. Skempton (1953), telah membuat parameter untuk tingkat keaktifan dalam rumus sebagai berikut:

$$\text{Activity (A)} = \frac{PI}{C - 10} \dots\dots\dots(2-1)$$

Keterangan ; PI = Indeks Plastisitas

C = persentase lempung lolos saringan 0.002 mm

Berikut merupakan tabel korelasi tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan yang terbagi menjadi tiga kelas berdasarkan tingkat keaktifannya.

Tabel 2.5

Korelasi Tingkat Keaktifan dengan Potensi Pengembangan

Tingkat Keaktifan	Potensi Pengembangan
< 0,75	Tidak Aktif
0,75 – 1,25	Normal
> 1,25	Aktif

Sumber: Skempton (1953)

c. Mineral lempung

Mineral lempung merupakan faktor utama yang mengontrol perilaku tanah ekspansif. Mineral lempung dapat diketahui dengan pengujian *X-ray diffraction*, *X-ray diffraction* merupakan salah satu metode yang direkomendasikan untuk dipakai di antara metode-metode lainnya karena relative murah dan cepat.

Perubahan volume merupakan pertimbangan utama dalam mengevaluasi tanah yang akan dipakai dalam pekerjaan tanah dan pondasi. Kapasitas penggantian beberapa mineral lempung adalah sebagai berikut :

Tabel 2.6

Kapasitas Penggantian Mineral Lempung

Mineral Lempung	Kapasitas Penggantian (meq/100 gr)
Kaolinite	3 – 15
Illite	10 – 40
Montmorilonite	80 – 150

meq = mili ekivalen (Bowles, 1984)

2.4.2. Identifikasi Langsung

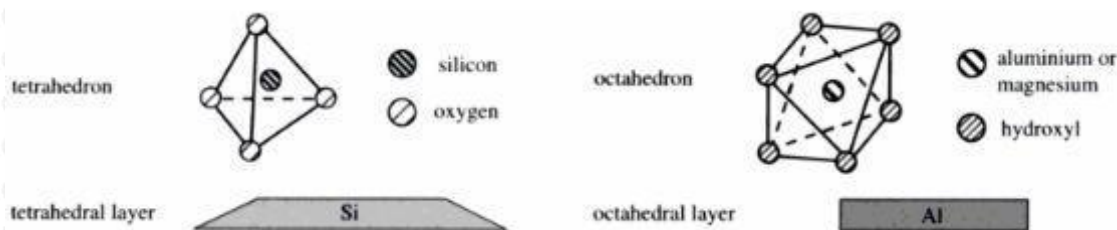
Identifikasi langsung memiliki metode yang cukup beragam, salah satunya menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Metode pengukuran langsung yaitu suatu cara untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif. Contoh tanah berbentuk silinder tipis diletakkan dalam konsolidometer yang dilapisi dengan lapisan pori pada sisi atas dan bawahnya yang selanjutnya diberi beban sesuai dengan beban yang diinginkan. Besarnya pengembangan contoh tanah dibaca beberapa saat setelah contoh tanah dibasahi dengan air. Besarnya pengembangan adalah tinggi pengembangan tanah dibagi dengan tebal awal contoh tanah. Adapun cara pengukuran tekanan pengembangan ada dua cara yang umum digunakan.

Cara pertama, pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ketebal semula. Cara kedua, contoh tanah direndam dalam air dengan mempertahankan volume atau

mencegah terjadinya pengembangan dengan cara menambah beban di atasnya setiap saat. Metode ini sering juga disebut *constant volume method*.

2.5. Mineral Pembentuk Lempung

Mineral lempung pada dasarnya terbentuk dari kristalisasi mineral. Mineral lempung sebagian besar terdiri dari dua mineral dasar yaitu *silicon tetrahedron* atau *aluminium octahedron*. *Aluminium octahedron* pada dasarnya tidak dapat berdiri sendiri, mineral ini mengkombinasi dengan satu atau dua tetrahedral dari sekelompok partikel yang melapisinya. (Barnes, 2000)



Gambar 2.2 Mineral Dasar Lempung

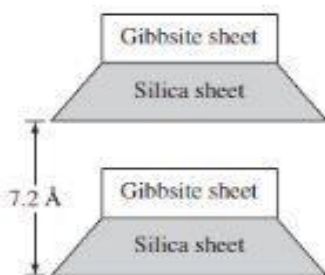
Sumber: Barnes (2002)

2.5.1. Kaolinite

Mineral *kaolinite* tercipta dari banyak tumpukan mineral. Satuan struktur *kaolinite* terdiri dari rangkaian rantai hidrogen, yang berfungsi sebagai pencegah hidrasi antar lapisan.

Hal tersebut menjadikan tanah stabil karena struktur yang terikat kuat mampu menahan molekul-molekul air sehingga tidak masuk ke dalamnya. Mineral *kaolinite* memiliki karakteristik sangat rendah terhadap potensi mengembang (*swelling*) dan susut tanah.

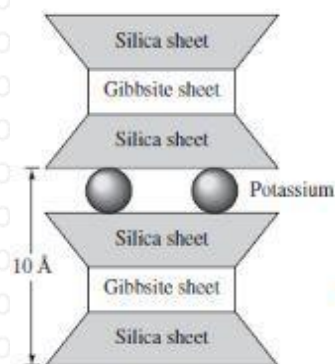
Kapasitas penggantian mineral lempung *kaolinite* adalah 3 – 15 Meq/100gr. (Barnes, 2000)



Gambar 2.3 Kaolinite

2.5.2. Illite

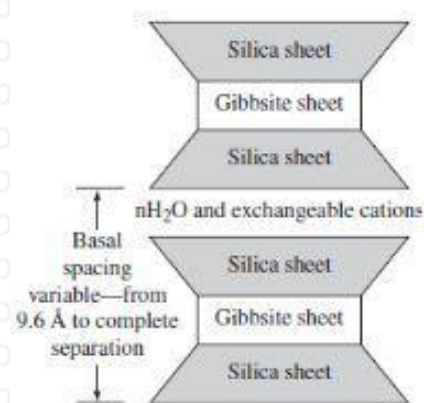
Struktur *illite* terdiri dari lapisan-lapisan unit *silica-aluminium-silica* yang dipisahkan oleh ion K^+ yang mempunyai sifat mengembang dan menyusut sedang. Kapasitas penggantian mineral lempung *illite* adalah 10 – 15 Meq/100gr. (Barnes, 2000)



Gambar 2.4 Illite

2.5.3. Montmorillonite

Struktur *montmorillonite* serupa dengan struktur *illite*, tetapi ion pemisahannya berupa H_2O yang sangat mudah lepas. Mineral ini, dapat dikatakan tidak stabil karena rekatan antara lapisan terutama diakibatkan oleh gaya *Van der Waals*, dan rekatan itu sangat lemah jika dibandingkan dengan rekatan hydrogen atau rekatan ion lainnya. Berbagai substitusi terjadi, antara Al dan Si dalam lapisan tetrahedral dan Mg, Fe, Li, atau Zn, untuk Al dalam lapisan octahedral. Perubahan-perubahan tersebut mengakibatkan terjadinya daya *negative netto* yang relatif tidak seimbang terhadap mineral, dimana terjadi perubahan kation yang besar dalam kapasitas dan tarikan terhadap air dengan ion-ion H^+ , karena tidak terdapat ion-ion logam. Mineral *montmorillonite* memiliki karakteristik sangat tinggi terhadap potensi mengembang dan susut tanah. Kapasitas penggantian mineral lempung ini adalah lebih dari 100 Meq/100gr. (Barnes, 2000)



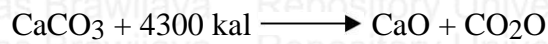
Gambar 2.5 Montmorillonite

2.6. Kapur sebagai Bahan Stabilisasi

2.6.1. Stabilisasi Kapur (*Lime Stabilization*)

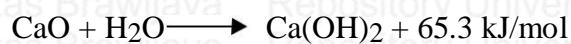
Kapur (*lime*) sebagai bahan campuran untuk stabilisasi mengacu pada beberapa arti antara lain Kalsium Karbonat ($CaCO_3$) yang sering digunakan untuk keperluan pertanian,

Kalsium Hidroksida (CaOH_2) yang telah terhidrasi atau kapur mati, dan Kalsium Oksida (CaO). *Quicklime* yaitu CaO dan CaOH_2 adalah jenis kapur yang digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah dalam bidang *engineering* sedangkan CaCO_3 kurang efektif dipergunakan sebagai bahan campuran atau stabilisasi. Secara kimiawi kapur diperoleh dari hasil pembakaran kalsium karbonat (batu kapur alamiah) sampai karbon dioksida terbakar.



Pada saat proses hidrasi berlangsung, melibatkan reduksi dari berat isi dari 3,3 gr/cc menjadi 2,2 gr/cc, hal inilah yang menjadi dasar dari teknik stabilisasi yang menggunakan kapur sebagai bahan campuran.

Quicklime (Kalsium Oksida) bereaksi cepat dengan air. Kalsium Oksida apabila bereaksi dengan air akan menghasilkan kapur hidrad. Berikut adalah reaksi kimia transisi dari *quicklime* ke *hydrated lime*.



Antara *quicklime* (CaO) dan *hydratedlime* (CaOH_2), keduanya dapat bereaksi dengan tanah lempung yang dapat mempengaruhi nilai plastisitas, ukuran butir (*grain size*), kemampuan dan kuat geser. (Croce dan Russo, 2003)

Berdasarkan SNI 03-4147-1996 tentang Spesifikasi Kapur Untuk Stabilisasi Tanah dapat diketahui acuan untuk memilih kapur yang dapat digunakan sebagai material aditif untuk bahan stabilisasi tanah. Kapur yang digunakan pada spesifikasi ini adalah kapur tohor dan kapur padam. Kapur dibagi menjadi 2 tipe berdasarkan persyaratan kimia kapur, yaitu :

Tabel 2.7

Persyaratan Kimia Kapur Tipe 1 (SNI 03-4147-1996)

No	Senyawa	Kelas		
		A	B	C
1	Hydrate Alkalinity (CA(OH)_2)	90%	85%	75%
2	Kalsium Oksida Anhidrat (CO) Maksimum	7%	8%	9%
3	Kadar Air Bebas Maksimum	3%	3%	2%

Tabel 2.8

Persyaratan Kimia Kapur Tipe 2 (SNI 03-4147-1996)

No	Senyawa	Kelas		
		A	B	C
1	Kalsium Oksida Magnesium Oksida (CAOMGO) Minimum	98%	96%	94%

2	Kalsium Oksida Anhidrat (CO)	7%	8%	9%
3	Kadar Air Bebas Maksimum	3%	3%	2%

2.6.2. Proses Reaksi Tanah dan Kapur

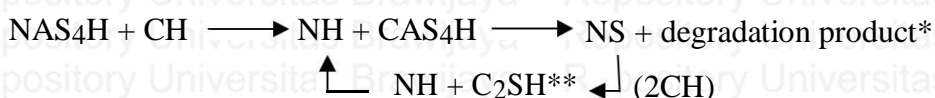
Reaksi pertama terbentuk dalam selang beberapa jam setelah pencampuran, yaitu setelah terjadinya reaksi pertukaran ion-ion dari mineral dengan kapur yang mana memberikan efek pada penurunan ketebalan *diffuse double layers* sehingga tarikan tepi permukaan partikel lempung meningkat. (Hilt dan Davidson, 1960) dalam Prasetijo (1991).

Penarikan gaya tarik *Van der Wall* pada tepi partikel lempung mengakibatkan terjadinya flokulasi partikel-partikel lempung yang mempunyai sifat plastisitas rendah, *texture* besar dan lepas. Dalam kondisi kelebihan air terjadinya reaksi *isotermis* pada tanah selama proses pengeringan akan memberikan kemudahan didalam pekerjaan tanah. Reaksi pada tahap ini biasanya dikenal sebagai proses modifikasi.

Reaksi kedua terjadi segera setelah flokulasi antara partikel-partikel lempung dan kapur, dilanjutkan pembentukan *pozzolanic* yang memberikan efek kestabilan tanah. Dalam lingkungan alkalis tinggi terjadi peningkatan pelepasan ion Silica dan Alumina dari mineral lempung yang selanjutnya akan bereaksi dengan ion Calcium dari mineral kapur untuk membentuk *Calcium Silicate Hydrates* dan *Calcium Aluminate Hydrates*.

Hasil reaksi ikatan yang terbentuk memungkinkan tanah mempunyai sifat *durability* dan *strength* yang tinggi. Dalam kondisi suspensi butir-butir *colloidal* lempung *terdispersi*, muatan negative pada campuran lempung mengabsorpsi kalsium (larutan dalam kondisi jenuh ion Ca^{++}) mendorong terbentuknya granulasi. Peristiwa pembutiran ini, disebut sebagai proses flokulasi antara mineral lempung dengan ion-ion yang tersebar dalam larutan. Granulasi yang dihasilkan tidak selamanya permanen, adanya pengeringan dan pembasahan bisa mengakibatkan pada agregat yang telah terbentuk. (Ingels dan Metcalf, 1972)

Proses reaksi kimia stabilisasi kapur pada lempung, menurut Ingels (1972) sebagai berikut :

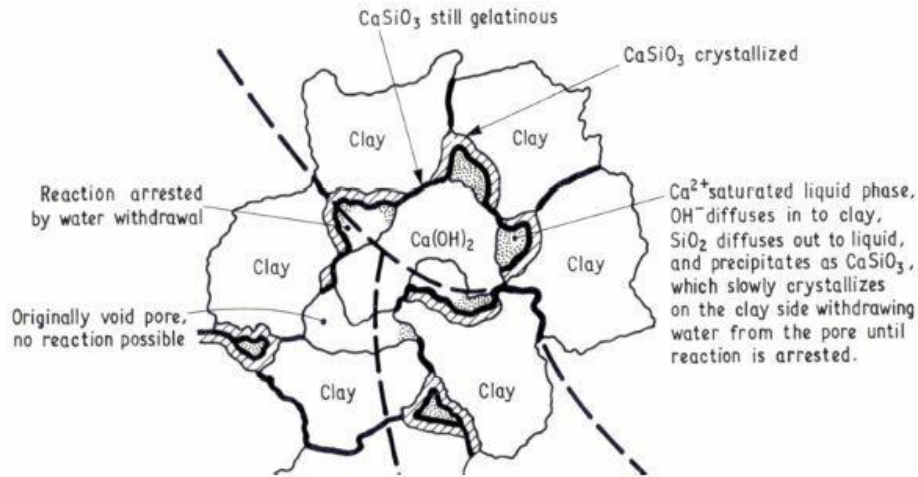


Dimana : S = SiO₂, H = H₂O, A = Al₂O₃, C = CaO, N = Na₂O

*ion Si makin berkurang, terbentuk endapan Kalsium Aluminat dan Alumina

**atau CSH.

NAS₄H = lempung *montmorillonit*. Selain kation Na ion lain seperti Ca dan Mg, kadang ditemukan pula dalam lempung tersebut.



Gambar 2.6 Mekanisme Stabilisasi Kapur pada Tanah Lempung

Sumber: Ingles dan Metcalf (1972)

Efek terpenting dari stabilisasi adalah bagaimana membentuk suatu ikatan yang kuat (*cementation*) dari hasil reaksi kapur dengan mineral lempung, sehingga dapat meningkatkan nilai kuat geser (*shear strength*) dan daya dukung (*bearing capacity*) tanah serta mengurangi kerentanan terhadap *swelling* dan *shrinkage* serta meningkatkan ketahanan akibat pengaruh cuaca jelek, fluktuasi lalu-lintas yang tinggi, adanya perubahan kadar air serta meningkatkan kemudahan pelaksanaan pemadatan. (Ingles dan Metcalf, 1972)

2.6.3. Manfaat Stabilisasi Kapur terhadap Tanah Lempung

Berdasarkan penelitian Ranggaesa, R.A (2016) ada beberapa dampak yang terjadi bila tanah asli dilakukan stabilisasi dengan material aditif kapur dilokasi yang sama, antara lain:

1. Nilai batas cair (LL) dan batas plastis (PI) mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar kapur.
2. Nilai batas plastis (PL) dan batas susut (SL) mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kadar kapur.

Tabel 2.9

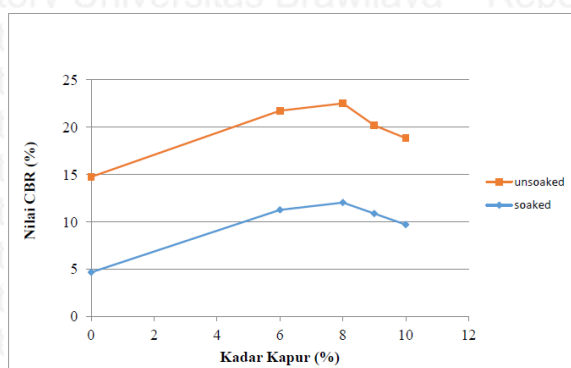
Nilai Atteberg Limit terhadap Penambahan Kadar Kapur

Jenis Sampel	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Tanah asli	81,50	35,59	6,77	45,91
Tanah + 6% Kapur	58,50	45,16	17,65	13,34
Tanah + 8% Kapur	55,00	45,76	18,18	9,24

Tanah + 9% Kapur	54,50	46,24	18,79	8,26
Tanah + 10% Kapur	53,00	46,67	19,34	6,33

Sumber: Ranggaesa, R.A (2016)

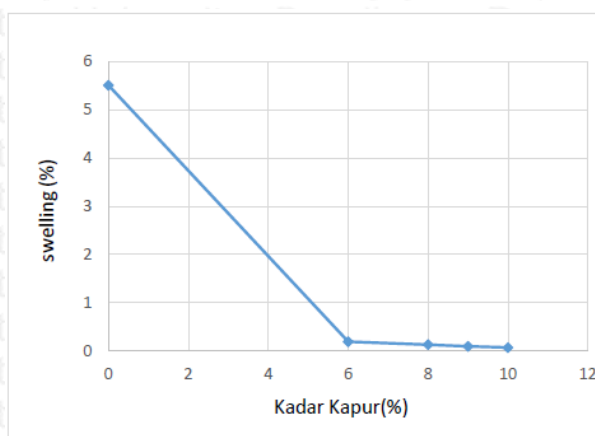
3. Mengalami kenaikan CBR *soaked* dan *unsoaked* tertinggi pada penambahan kadar kapur 8%.



Gambar 2.7 Pengaruh Penambahan Kadar Kapur terhadap Nilai CBR

Sumber: Ranggaesa, R.A (2016)

4. Semakin banyak kadar kapur yang ditambahkan semakin kecil *swelling* yang terjadi.



Gambar 2.8 Pengaruh Penambahan Kadar Kapur terhadap Nilai Swelling

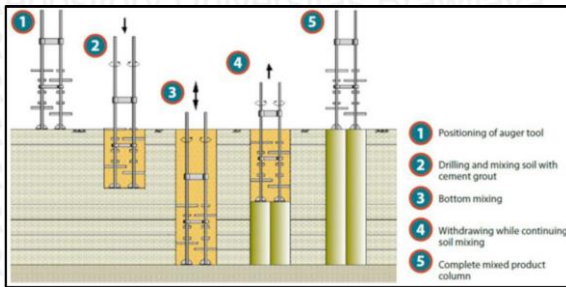
Sumber: Ranggaesa, R.A (2016)

2.7. Deep Soil Mixing (DSM)

Berdasarkan penelitian Raja & Anand (2014) metode *deep soil mixing* (DSM) merupakan metode modifikasi tanah lunak guna meningkatkan kualitas tanah lunak dengan pelaksanaan langsung. Bertujuan meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi penurunan serta mengurangi pengembangan tanah.

Deep Soil Mixing (DSM) dilakukan dengan mencampurkan bahan aditif kapur (lime), *fly ash*, dan semen. Terdapat 2 metode dalam pencampuran *deep soil mixing* (DSM) antara lain pencampuran kering (*dry mixing*) dan pencampuran basah (*slurry mixing*).

Menurut (National Lime Association, 2004) pencampuran basah (slurry mixing) terdapat beberapa keuntungan, yaitu mudah pelaksanaan karena mudah meratakan campuran kapur dengan tanah, dan kadar air yang digunakan lebih sedikit pada proses pencampurannya. Kerugiannya, yaitu pada pelaksanaan lebih memakan waktu, kurang ekonomis karena membutuhkan biaya peralatan dan tidak dapat diaplikasikan pada tanah dengan kadar air yang tinggi.

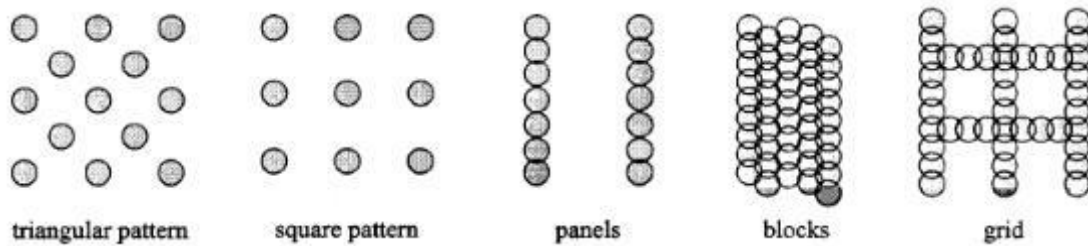


Gambar 2.9 Proses Deep Soil Mixing (DSM)



Gambar 2.10 Hasil Kolom Stabilisasi DSM

Kolom DSM dapat diterapkan dengan konfigurasi yang berbeda-beda, seperti *single column*, *blocks column*, *panels*, dan *grids types* yang ditunjukkan pada gambar 2.11. Untuk mengurangi penurunan di bawah timbunan digunakan konfigurasi *single column* dengan pola persegi. Sedangkan konfigurasi *panels*, *grids*, atau *blocks* biasanya digunakan untuk bangunan atas dengan dimensi yang besar seperti lereng, dam, dinding penahan tanah, dan di bawah timbunan. (Mirja, 2004)



Gambar 2.11 Konfigurasi Kolom DSM

Sumber: Mirja (2004)

Anshorie, A. (2015) Berdasarkan uji beban yang telah dilakukan, stabilisasi dengan metode DSM untuk konfigurasi bentuk single square diameter 3 cm menggunakan bahan aditif 15% *fly ash* yang diberikan variasi jarak dan panjang kolom dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Peningkatan daya dukung tanah memberikan hasil beragam karena pengaruh variasi jarak dan panjang kolom, dimana daya dukung tanah semakin meningkatkan seiring dengan jarak kolom yang semakin rapat dan panjang kolom yang semakin dalam. Menurut Hakim (2015) stabilisasi dengan metode *deep soil mixing* tipe *panels* berdiameter 2 cm menggunakan bahan aditif 15% *fly ash* dengan variasi jarak dan panjang kolom dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Namun variasi jarak dan panjang kolom dengan metode DSM memberikan pengaruh lebih besar terhadap peningkatan daya dukung. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai daya dukung tanah maksimum 1040 kN/m^2 yang meningkat 173,648%, nilai ini terletak pada kolom dengan jarak terkecil (L) = 2 cm dengan panjang kolom terbesar (D_f) = 15 cm.

2.8. Daya Dukung Batas Tanah

Menurut Terzaghi (1943) kapasitas/daya dukung tanah batas (*ultimate bearing capacity*) adalah tekanan maksimum yang dapat diterima oleh tanah akibat beban yang bekerja tanpa menimbulkan kelongsoran geser pada tanah pendukung tepat di bawah dan sekeliling pondasi. Secara umum tenggangan merupakan gaya per satuan luas dibagi dengan luas, sehingga untuk mencari suatu tegangan pada tanah dapat menggunakan persamaan :

$$q = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2-2)$$

dimana :

q = tegangan (kN/m^2)

P = beban batas (kN)

A = luas pondasi (m^2)

Menurut Brooms (2000) dan Bouassida & Porbaha (2004) menghitung daya dukung batas tanah yang telah diperbaiki (bearing capacity of composite ground) menurunkan persamaan sebagai berikut :

$$q_u = 0,7 q_{uc} \alpha + \lambda (1 - \alpha) c_{us} \dots \dots \dots (2-3)$$

dimana:

q_u = Daya Dukung Batas

q_{uc} = Kuat Tekan Kolom Unconfined

c_{us} = Kuat Geser Tanah Asli Undrained

α = Rasio Area Perbaikan

λ = 5,5 (Bergado, dkk., 1994)

Pada proses perbaikan tanah dengan metode DSM, hasil akhir yang didapat adalah kenaikan daya dukung tanah yang diperbaiki dibandingkan dengan tanah asli. Kenaikan daya dukung tanah dapat diperhitungkan dengan menggunakan rumus *Bearing Capacity Improvement* (BCI) sebagai berikut :

$$BCI = \frac{q_u(I)}{q_u} \dots \dots \dots (2-4)$$

dimana:

BCI = Bearing Capacity Improvement

$q_u(I)$ = Daya dukung batas tanah perbaikan dengan DSM

q_u = Daya dukung batas tanah asli

2.9. Pengembangan Tanah

Pengembangan tanah merupakan hal yang sering terjadi dalam pelaksanaan konstruksi pada tanah ekspansif. Potensi pengembangan diartikan sebagai rasio peningkatan ketinggian dengan ketinggian awal dtanah pada tanah yang dipadatkan dengan kadar air optimum (OMC) dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$SP = \frac{H_i - H_f}{H_i} \times 100\% \dots \dots \dots (2-5)$$

dimana:

SP = Potensi Pengembangan

H_i = Ketinggian tanah awal

H_f = Ketinggian tanah akhir

2.10. Pengangkatan Tanah

Variasi kolom pada metode *deep soil mixing* (DSM) berdasarkan teori model prediksi pengangkatan tanah oleh Rao, Dkk (1988) yang kemudian disempurnakan oleh Fredlund dan Rahardjo (1993) dengan persamaan :

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \frac{C_{s,i,h_i}}{1+e_{o,i}} \log \frac{p'_{f,i}}{p'_{s,i}} \dots \dots \dots (2-6)$$

dimana:

C_s = Indeks Pengembangan

h = Ketebalan lapisan

e_o = Angka Pori Awal

p'_f = Tegangan akhir

p'_s = Tekanan pengembangan tanah awal

Persamaan diatas kemudian dimodifikasi untuk prediksi pengangkatan tanah yang diperbaiki dengan metode DSM

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \frac{C_{s,comp,i,h_i}}{1+e_{o,comp,i}} \log \frac{p'_{f,comp,i}}{p'_{s,comp,i}} \dots \dots \dots (2-7)$$

Pada persamaan diatas parameter $C_{s,comp}$, $e_{o,comp}$, $p'_{f,comp}$ dan $p'_{s,comp}$ merupakan modifikasi dari persamaan sebelumnya dimana tanah sudah menjadi komposit setelah dicampur dengan material perbaikan *deep soil mixing* (DSM) dengan persamaan :

$$C_{s,comp,i} = C_{s,col.ar} + C_{s,soil} \cdot (1 - ar) \dots \dots \dots (2-8)$$

$$p'_{s,comp,i} = p'_{s,col.ar} + p'_{s,soil} \cdot (1 - ar) \dots \dots \dots (2-9)$$

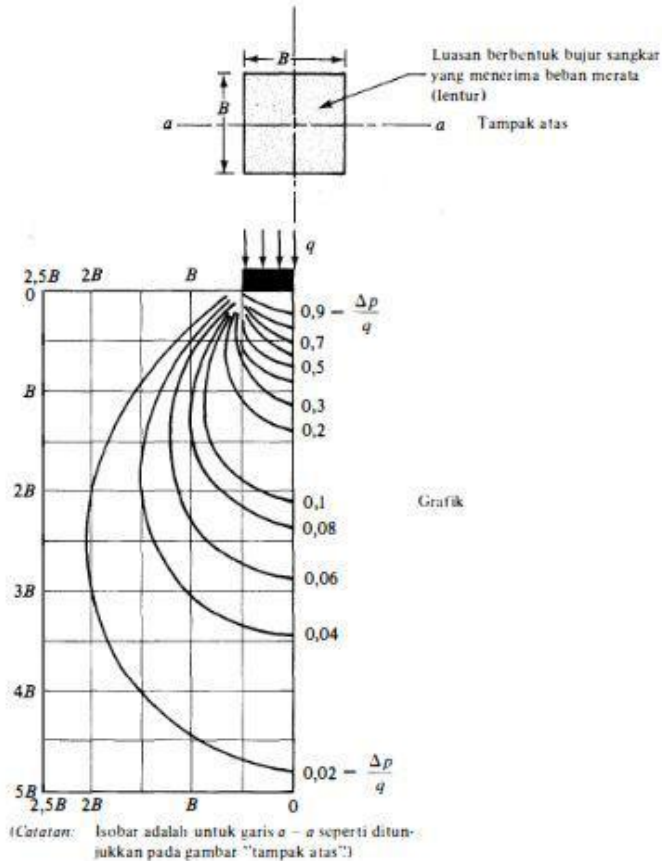
col merupakan tanah perbaikan dan $soil$ merupakan tanah asli. Kemudian berdasarkan batasan bahwa angka pori (e_o), $C_{s,comp}$ dan $p'_{s,comp}$ akan selalu konstan dengan kedalaman lapisan tanah maka Persamaan (2-5) dapat disederhanakan lagi menjadi :

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \frac{C_{s,comp,i,h_i}}{1+e_o} \log \frac{p'_{f,i}}{p'_{s,comp,i}} \dots \dots \dots (2-10)$$

2.11. Tegangan Vertikal yang Diakibatkan Beban Bujur Sangkar

Pada tanah yang harus mendukung pondasi dengan berbagai bentuk umumnya terjadi kenaikan tegangan. Kenaikan tegangan pada tanah tersebut tergantung pada beban per satuan luas dimana pondasi berada, kedalaman tanah di bawah pondasi dimana tegangan tersebut ditinjau, dan faktor-faktor lainnya. Boussinesq telah membuat suatu persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung tegangan vertikal pada sebuah titik sembarang

akibat beban bujur sangkar yang lentur. Kemudian, garis-garis tegangan *isobar* (tempat kedudukan titik-titik yang bertegangan sama) dapat digambarkan seperti terlihat pada berikut.



Gambar 2.12 Isobar Tegangan Vertikal

Sumber: Das (1995)

Isobar yang telah digambarkan dari persamaan tegangan vertikal Boussinesq, dapat digunakan sebagai acuan luasan tanah yang distabilisasi. Berdasarkan *isobar* tersebut, terlihat titik-titik tegangan yang terpengaruh akibat menerima beban merata. Titik-titik tersebut terletak hingga jarak $2,5B$ arah horizontal dan $5B$ arah vertikal. Akan tetapi tegangan yang terjadi pada kedalaman $3B$ ke bawah cukup kecil. Sehingga ditentukan luasan yang distabilisasi menggunakan metode *Deep Soil Mixing*, pada jarak $2,5B$ arah horizontal dan $4B$ arah vertikal dari titik beban bekerja.

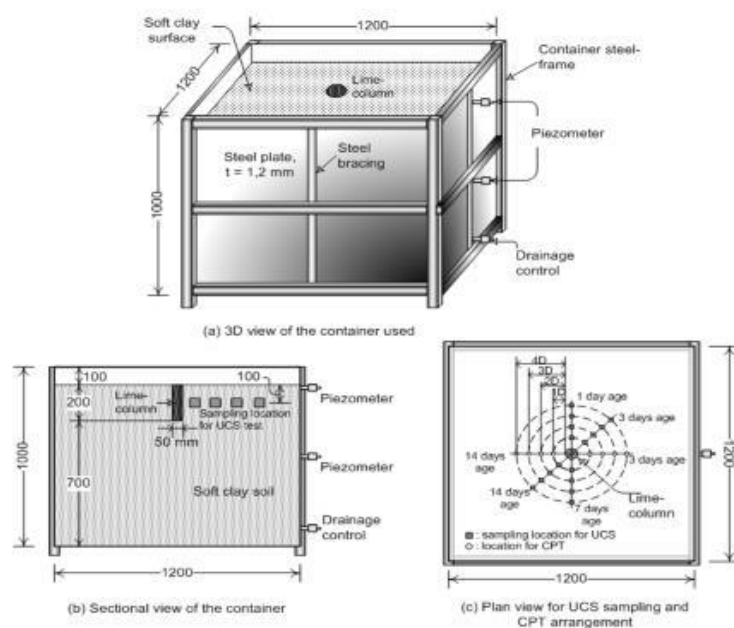
2.12. Uji Laboratorium

2.12.1 Pemodelan *Deep Soil Mixing* (DSM) Laboratorium

Ada beberapa metode untuk menyiapkan benda uji pada metode *deep soil mixing* (DSM). Belum prosedur standar yang harus dilakukan pada pengujian laboratorium. Namun,

beberapa penelitian yang pernah dilakukan dapat menjadi referensi dalam perlakuan pemodelan *deep soil mixing* (DSM).

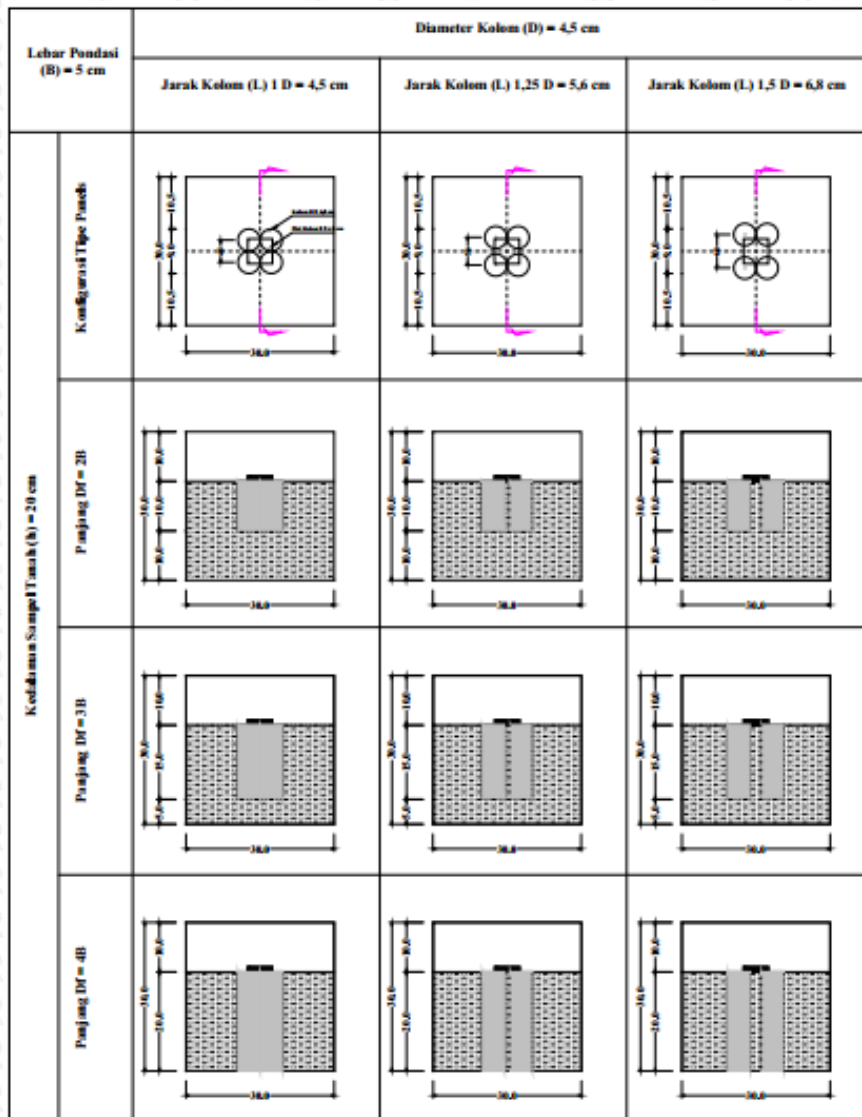
Muntohar (2010) dalam penelitiannya mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak di daerah Bantul Yogyakarta, membuat pemodelan dengan skala laboratorium. Hal tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Kolom kapur dirancang sebagai kolom tunggal dengan diameter 50 mm dan panjang 200 mm, yang ditempatkan dalam *box* berukuran 1,2 m x 1,2 m dan tinggi 1 m.



Gambar 2.13 Skema Permodelan Kolom Kapur dalam *Box*

Sumber: Muntohar (2010)

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Ismail, A (2016) yang meneliti tentang pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* diameter 4,5 cm terhadap daya dukung tanah. Pembuatan benda uji dibagi menjadi dua kondisi tanah asli tanpa stabilisasi *deep soil mixing* (DSM) dan kondisi tanah dengan stabilisasi *deep soil mixing* (DSM). Tanah dasar atau asli dimasukkan ke dalam *box* berukuran (30x30x30) cm hingga ketinggian (H) 20 cm. Kemudian instalasi kolom dilakukan sesuai konfigurasi dan kedalaman yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan panjang kolom *deep soil mixing* (DSM) yang digunakan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap nilai daya dukung tanah.

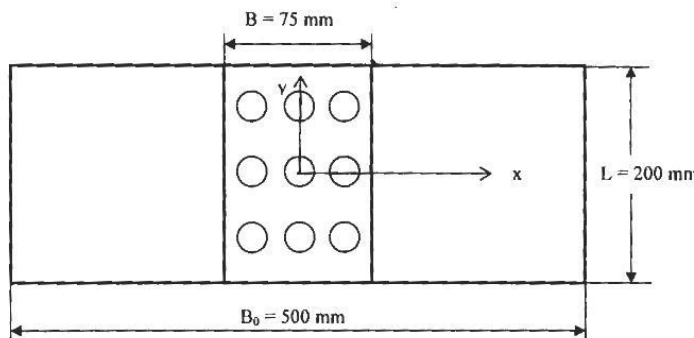


Gambar 2.14 Variasi Jarak dan Panjang Kolom Diameter 4,5 cm

Sumber: Ismail, A (2016)

2.12.2 Area Stabilisasi Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM)

Area stabilisasi kolom DSM di dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan 2 metode. Metode pertama digunakan untuk mengetahui hubungan kenaikan area stabilisasi dengan kenaikan daya dukung tanah. Seperti pada penelitian yang dilakukan (Bouassida, M & Porbaha, A, 2004) pada tanah lempung lunak dengan skema pembebanan sesuai Gambar berikut.

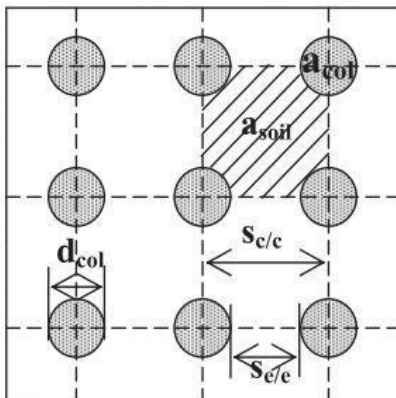


Gambar 2.15 Tampak Atas Skema Pembebanan terhadap Tanah Distabilisasi

Sumber: Bouassida, M. dan Porbaha, A. (2004)

Seperti tampak pada gambar, *rigid plate* dengan panjang 200 mm dan 75 mm diletakkan diatas tanah model tepat di garis tengah tanah. Persentase tanah yang distabilisasi dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *rigid plate*, yaitu $75 \times 200 \text{ mm}^2$ dengan kedalaman tanah di dalam box 190 mm.

Metode kedua dalam menghitung area stabilisasi digunakan untuk mengetahui hubungan kenaikan area stabilisasi dengan nilai potensi pengembangan (*swelling*). Madhyannapu dan Puppala (2014) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa area stabilisasi adalah luasan kolom stabilisasi dibagi dengan luasan persegi yang dibentuk dari as kolom seperti yang dapat dilihat pada Gambar berikut.



Gambar 2.16 Susunan Kolom Tipe Square

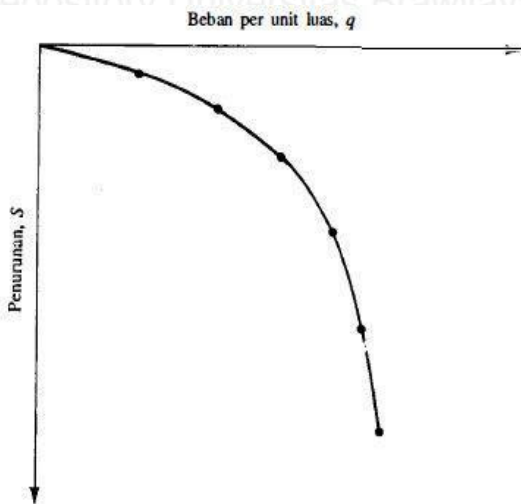
Sumber: Madhyannapu dan Puppala (2014)

2.12.3 Uji Pembebanan

Das (1995) menyatakan bahwa dalam beberapa keadaan, uji beban (*load test*) dilakukan untuk menentukan daya dukung batas pondasi yang bersangkutan. Metode yang baku mengenai uji beban di lapangan diatur oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*) nomor D-1194. Diperlukan adanya pelat dukung (*bearing plate*) untuk mendukung pelaksanaan uji beban pada pondasi. *Bearing plate* diletakkan pada tanah dasar

yang kemudian dilakukan uji beban dengan memberikan beban di atas *bearing plate* secara bertahap.

Selanjutnya, beban yang bekerja didiamkan sedemikian rupa sehingga dianggap cukup untuk menyebabkan penurunan. Apabila penurunan *bearing plate* sudah kecil sekali (dapat diabaikan), maka penambahan beban dilakukan lagi secara bertahap. Dari hasil pengujian, akan diperoleh grafik hubungan antara beban dan penurunan seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.17 Bentuk Umum Grafik Hubungan antara Beban per Unit Luas dan Penurunan yang Didapat dari Uji Beban (*load test*)



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Penelitian ini mulai dilaksanakan dari bulan Maret – September 2017. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.2. Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut :

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

3.3. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Kotak (*box*) berbentuk kubus yang terbuat dari akrilik berdimensi (30x30x30)cm dengan ketebalan 5mm
2. Pipa aluminium diameter 3,2 cm
3. Bak pencampur
4. Saringan No.4
5. *Ring density*
6. Gelas ukur
7. Botol penyemprotan (*water sprayer*)
8. Alat timbang digital
9. *Mold* dan *proctor* sesuai metode B ASTM D-698; AASHTO T-99
10. Alat pemadat untuk kolom *deep soil mixing* berbentuk silinder pejal berdiameter 3,2 cm
11. Palu
12. Penggaris
13. *Waterpass*
14. Kantong plastik

15. Karung goni

16. Satu set alat uji beban yang terdiri dari frame pembebanan, dongkrak hidrolik, *load cell*, *dial lvdt*, piston, pelat baja ukuran 5cm x 5cm dan ketebalan 2cm.

3.4. Rancangan Penelitian

3.4.1. Rancangan Pengujian Pembebanan

Pada penelitian ini terdapat tiga jenis benda uji digunakan dalam penelitian ini, yaitu benda uji berupa tanah asli, tanah stabilisasi dengan campuran kapur 8% dan tanah stabilisasi dengan campuran kapur 8% metode *Deep Soil Mixing* (DSM) berpola *panels*. Tanah asli yang telah melalui tahap pemadatan akan dilakukan uji pembebanan terlebih dahulu kemudian uji pembebanan pada tanah yang telah distabilisasi dengan campuran kapur 8% serta tanah yang telah distabilisasi dengan campuran kapur 8% dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) berpola *panels*. Dari uji yang dilakukan, diperoleh nilai daya dukung tanah (*qu*) sebelum dan sesudah pencampuran kapur dengan variasi jarak dan panjang kolom. Rancangan penelitian terlihat pada Tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1
Rancangan Penelitian dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom

Jenis Sampel	Jarak Kolom	Kedalaman Kolom	Pu	qu
	(L)	(D _f)		
	cm	cm	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	x	y
Tanah Asli + Campuran Kapur 8%	-	-	x	y
Tanah Asli + Kolom DSM Kapur 8%	L = 1 x D (3,2cm)	10cm	x	y
		15cm	x	y
		20cm	x	y
	L = 1,25 x D (4cm)	10cm	x	y
		15cm	x	y
		20cm	x	y
	L = 1,5 x D (4,8cm)	10cm	x	y
		15cm	x	y
		20cm	x	y

3.4.2. Rancangan Pengujian Pengembangan (*Swelling*)

Pada penelitian ini dilakukan uji pengembangan (*swelling*) dengan menggunakan 5 beda uji, antara lain:

- a. 1 Benda uji tanah asli.
- b. 4 Benda uji yang distabilisasi dengan menggunakan 8% campuran kapur dengan metode *deep soil mixing* (DSM).

Dengan variasi untuk benda uji ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 3.2

Rancangan Penelitian Untuk Uji Pengembangan

Benda Uji	Pengembangan (%)
Tanah Asli	
DSM dengan 2 kolom (D=3,2 cm)	
DSM dengan 2 kolom (D=4 cm)	
DSM dengan 2 kolom (D=4,8 cm)	
DSM dengan 3 kolom (D=4,8 cm)	

3.5. Variabel Penelitian

Terdapat dua variabel dalam penelitian ini, antara lain :

1. Variabel Bebas
 - a. Konfigurasi Kolom
 - b. Diameter Kolom
 - c. Kedalaman Kolom
 - d. Jarak Antar Kolom
2. Variabel Terikat
 - a. Daya Dukung
 - b. Pengembangan (*swelling*)

3.6. Metode Penelitian

3.6.1. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan bertujuan mengetahui klasifikasi tanah yang digunakan sebagai benda uji. Penelitian ini meliputi:

1. Penelitian *specific gravity* berdasarkan ASTM 1992 D 854-92
2. Penelitian *liquid limit* (LL) dan *plastic limit* (PL) berdasarkan ASTM 1984 D 4318-84
3. Penelitian *shrinkage limit* (SL) berdasarkan ASTM D 427-04
4. Penelitian klasifikasi tanah USCS berdasarkan ASTM 1992 D 2487-92

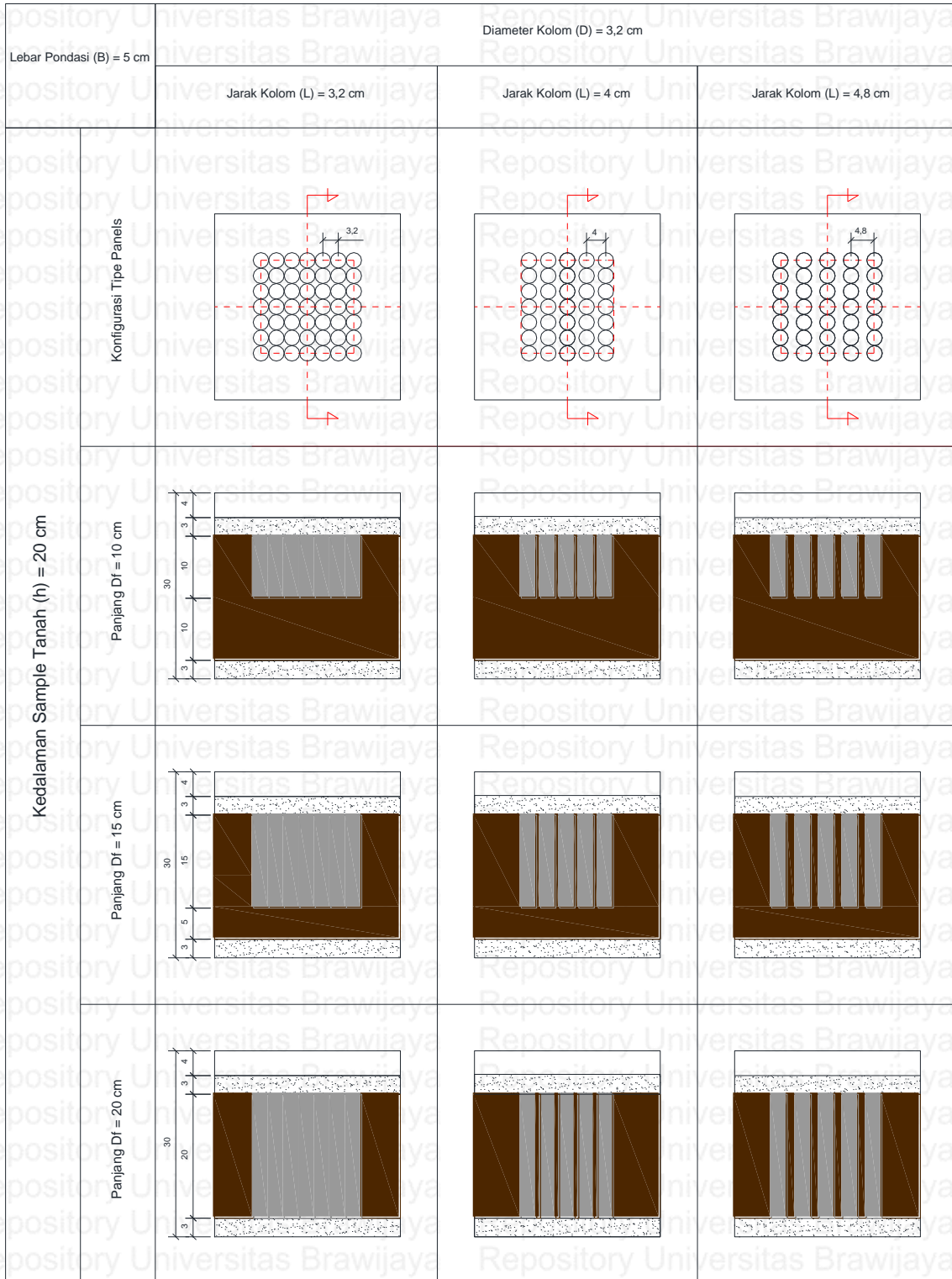
5. Penelitian pemadatan standar berdasarkan ASTM D-698 (Metode B)

3.6.2. Persiapan Benda Uji Pembebanan

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

1. Sampel tanah dijemur atau dioven hingga sampel tanah cukup kering sehingga gumpalan tanah 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) yang digunakan sebagai tanah asli. Pencampuran dilakukan merata pada seluruh bagian kemudian sampel dijenuhkan di dalam kantong plastik selama 24 jam, hingga tanah menjadi homogen.
4. Pembuatan benda uji dibagi menjadi tiga kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi, tanah yang distabilisasi menggunakan campuran kapur 8% dan tanah yang distabilisasi menggunakan campuran 8% kapur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan diameter kolom 3,2 cm.
5. Pembuatan benda uji tanah asli dengan langkah sebagai berikut :
Pada box terdapat tiga lapisan, lapisan pertama atau lapisan dasar berupa pasir dengan volume 2700 cm^3 (30x30x3) cm. Dilanjutkan dengan lapisan kedua berupa tanah dasar atau tanah asli dengan volume 18000 cm^3 (30x30x20) cm untuk mempermudah pada lapisan kedua dibagi menjadi empat segmen, setiap lapisan diusahakan mencapai kepadatan kering maksimum (γ_d). Terakhir, lapisan ketiga berupa pasir dengan volume 2700 cm^3 (30x30x3) cm. Agar kepadatan kering maksimum tercapai, tiap lapisan harus dipadatkan sesuai dengan kebutuhan berat tanah sesuai dengan volume lapisannya.
6. Setelah pembuatan benda uji tanah asli selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan.
7. Kemudian, ulangi langkah 5 untuk pembuatan benda uji tanah yang distabilisasi menggunakan campuran kapur 8%. Tetapi, benda uji distabilisasi 100% dengan campuran 8% kapur pada area pengaruh tegangan dengan panjang dan lebar masing-masing 3B dengan kedalaman (D_f) 20 cm.
8. Setelah benda uji tanah asli dengan campuran kapur 8% selesai, dilakukan *curing* selama 3 hari, setelah itu dilakukan uji pembebanan.

9. Untuk benda uji yang distabilisasi menggunakan campuran 8% kapur dengan metode *deep soil mixing* (DSM) berpola *panels* dicampur dengan kadar kapur 8% dari berat kering tanah yang distabilisasi. Kemudian dicampur dengan kadar air optimum (OMC). Pencampuran dilakukan di luar *box* hingga rata (homogen).
10. Kemudian, dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan jarak dan panjangnya (terlihat pada Tabel 3.1). Proses instalasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :
 - a. Pipa besi dikeluarkan dari tanah sehingga diperoleh lubang kolom.
 - b. Tanah campuran 8% kapur dimasukkan ke dalam lubang dengan membagi beberapa lapisan, dimana untuk panjang kolom (Df) 10 cm dibagi menjadi 2 lapisan, (Df) 15 cm dibagi menjadi 3 lapisan, dan (Df) 20 cm dibagi menjadi 4 lapisan.
 - c. Tiap lapisan dipadatkan dengan kepadatan kering maksimum (γ_d) dengan kondisi kadar air optimum (OMC) ditambaha dengan campuran 8% kapur. Agar tercapai kepadatan yang diinginkan, setiap lapis harus dikontrol dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
11. Setelah selesai, kemudian dilakukan pemeraman (*curing*) selama 3 hari.
12. Setelah pemeraman selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan. Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan pajang pada konfigurasi kolom DSM yang ditampilkan pada Gambar 3.1. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap perilaku daya dukung (q_u) tanah. Konfigurasi kolom DSM yang digunakan yaitu tipe *panels* berdiameter (D) 3,2 cm.



Gambar 3.1 Variasi Jarak dan Panjang Kolom Berpola *Panels* Diameter 3,2cm

3.6.3. Persiapan Benda Uji Pengembangan (*Swelling*)

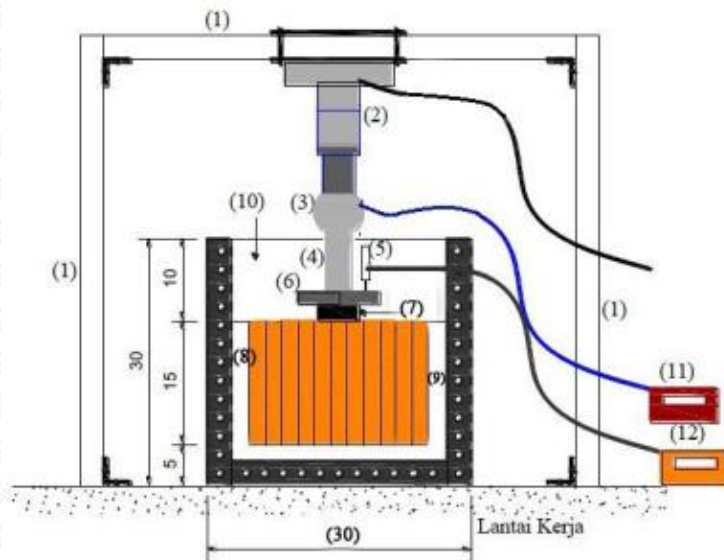
Berikut adalah tahapan persiapan benda uji pengembangan (*swelling*). Adapun persiapan benda uji meliputi kegiatan sebagai berikut:

1. Sample tanah dijemur atau dioven hingga sample tanah cukup kering sehingga mudah dihancurkan.
2. Sample tanah diayak hingga lolos saringan No.4.
3. Sample tanah yang lolos saringan No.4 diberikan sejumlah kadar air sesuai dengan kadar air optimum (OMC)
4. Sample tanah dicetak pada *mold* dengan ketentuan seperti pengujian pemadatan standar berdasarkan ASTM D-698 (Metode B)
5. Sample tanah dibuat menjadi 5 benda uji sesuai dengan Tabel 3.2.
6. Sample tanah yang telah di cetak pada *mold*, di *curing* selama 3 hari.
7. Sample tanah yang telah di *curing*, dilakukan uji pengembangan (*swelling*).

3.6.4. Uji Pembebanan

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

Dongkrak hidrolik dihubungkan ke piston yang terhubung dengan batang portal (*frame*) yang terbuat dari baja profil. Secara manual dongkrak hidrolik dilakukan pemompaan yang memberikan tekanan pada piston yang kemudian tekanan dari piston disalurkan melalui *load cell* agar terbaca beban yang diberikan. Kemudian *load cell* dihubungkan ke piston bantuan yang akan menekan ke pelat pondasi. Pelat baja tersebut berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari piston dongkrak hidrolik menjadi beban merata. Letak piston bantuan diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat simetris di atas permukaan benda uji. Skema uji pembebanan disajikan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema Uji Pembebanan

Keterangan :

1. Portal baja
2. Piston hidrolik
3. *Load cell*
4. Piston besi
5. *Linear variabel differential transformer (LVDT)*
6. Pelat silinder
7. Pelat baja (5x5x2)cm
8. Kolom stabilisasi *deep soil mixing (DSM)*
9. Tanah dasar atau tanah asli
10. Box berukuran 30x30x30 cm
11. Alat pembaca *load cell*
12. Alat pembaca LVDT

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

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

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

Tabel 3.3

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

Pembacaan LVDT	Luas Pelat (A) cm ²	Beban (P) kg	Penurunan (S)	Tegangan (σ)
			mm $S = A \times 0,005$	kg/cm ² $\sigma = P/A$
0	25			
50	25			
100	25			
150	25			
200	25			
250	25			
300	25			
350	25			
400	25			
450	25			
500	25			
550	25			
Dst	25			

3.6.5. Uji Pengembangan (*Swelling*)

Pengujian pengembangan (*swelling*) dilakukan sesuai dengan standar pengujian pengembangan ASTM D4546-86, kemudian dibuat lima benda uji, antara lain:

- Benda uji tanah asli
- Benda uji dengan 2 kolom stabilisasi tanah dengan campuran 8% kapur berdiameter 3,2 cm.
- Benda uji dengan 2 kolom stabilisasi tanah dengan campuran 8% kapur berdiameter 4 cm.
- Benda uji dengan 2 kolom stabilisasi tanah dengan campuran 8% kapur berdiameter 4,8 cm.
- Benda uji dengan 3 kolom stabilisasi tanah dengan campuran 8% kapur berdiameter 4,8 cm.

Hasil pengujian pengembangan sesuai dengan Tabel 3.4.

Tabel 3.4
Pembacaan Uji Pengembangan

Waktu (menit)	Pembacaan ($\times 0,01$ mm)	Pengembangan (%)
5		
10		
15		
Dst.		

3.7. Metode Analisis Data

Data hasil pengujian beban kemudian diolah menggunakan *Microsoft Excel* menggunakan persamaan tegangan, sehingga diperoleh tegangan yang kemudian nilai maksimumnya dijadikan sebagai nilai daya dukung tanah, baik daya dukung tanah asli, daya dukung tanah dengan campuran 8% kapur maupun daya dukung tanah yang distabilisasi dengan metode *deep soil mixing* (DSM) campuran 8% kapur.

Kemudian diolah, untuk mengetahui besarnya peningkatan daya dukung tanah yang dihitung sebagai perbandingan daya dukung tanah yang telah distabilisasi dengan daya dukung tanah asli, peningkatan daya dukung dilakukan dengan analisis BCI (*Bearing Capacity Improvement*), sehingga diperoleh persentase peningkatan daya dukung yang terjadi akibat pengaruh stabilisasi tanah untuk mengetahui pengaruh dari tanah dengan campuran 8% kapur maupun pengaruh variasi jarak dan kedalaman kolom terhadap peningkatan daya dukung, sesuai dengan Tabel 3.5.

Tabel 3.5
Peningkatan Daya Dukung pada Variasi Benda Uji

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

Kemudian, untuk mengetahui nilai pengembangan tanah (*swelling*) yang telah dilakukan sesuai Tabel 3.2, diolah dan ditampilkan sesuai dengan Tabel 3.5 yang selanjutnya, data yang telah diperoleh di plot dalam grafik hubungan persentase volume perbaikan dan pengembangan (*swelling*).

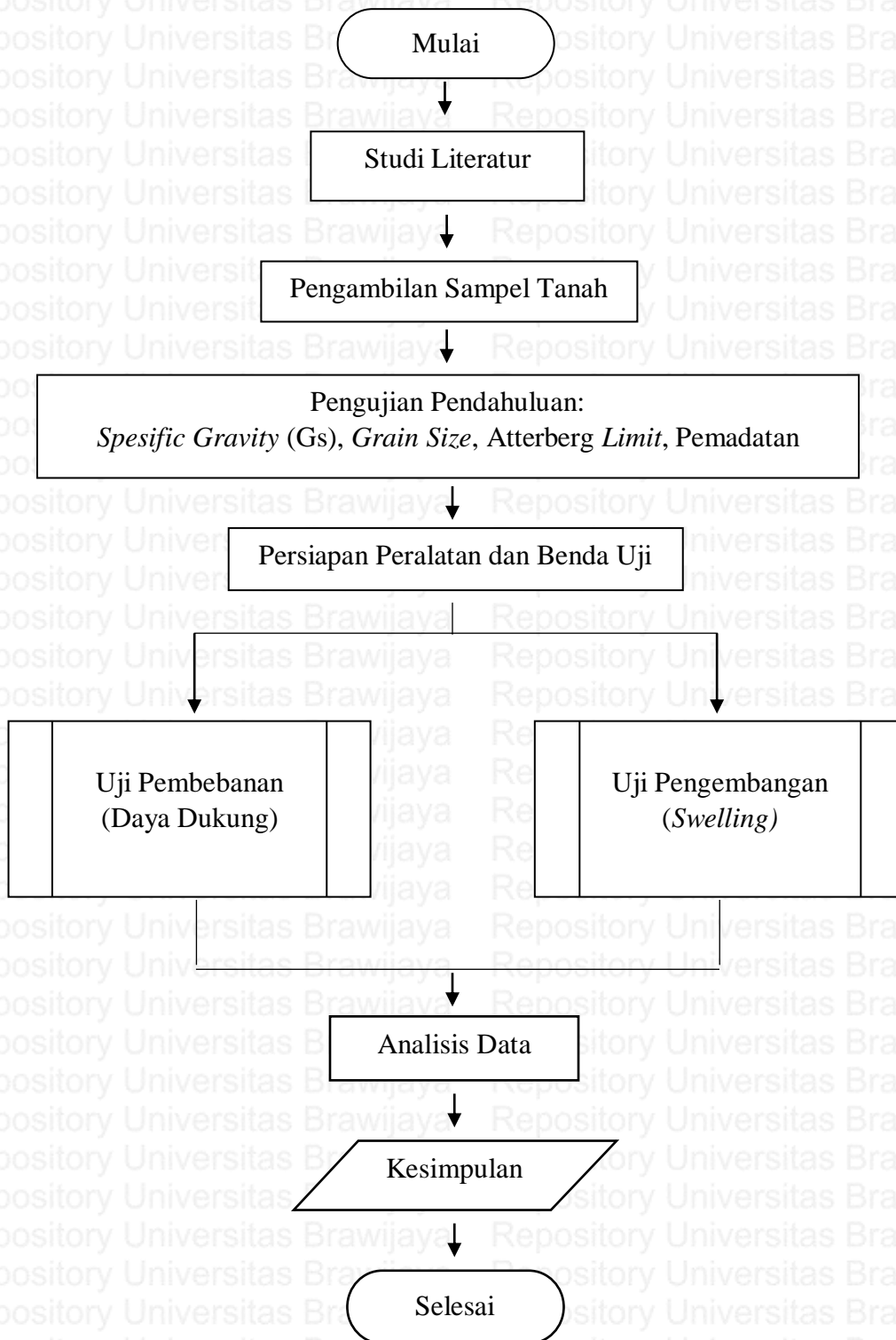
Tabel 3.6
Persentase Perbaikan terhadap Nilai Pengembangan

Benda Uji	Volume Benda Uji (V) (cm ³)	Volume DSM (V _i) (cm ³)	Persentase Perbaikan (V _i /V) (%)	Pengembangan (Swelling) (%)
Tanah Asli				
DSM dengan 2 kolom (D=3,2 cm)				
DSM dengan 2 kolom (D=4 cm)				
DSM dengan 2 kolom (D=4,8 cm)				
DSM dengan 3 kolom (D=4,8 cm)				

3.8. Diagram Alir Penelitian

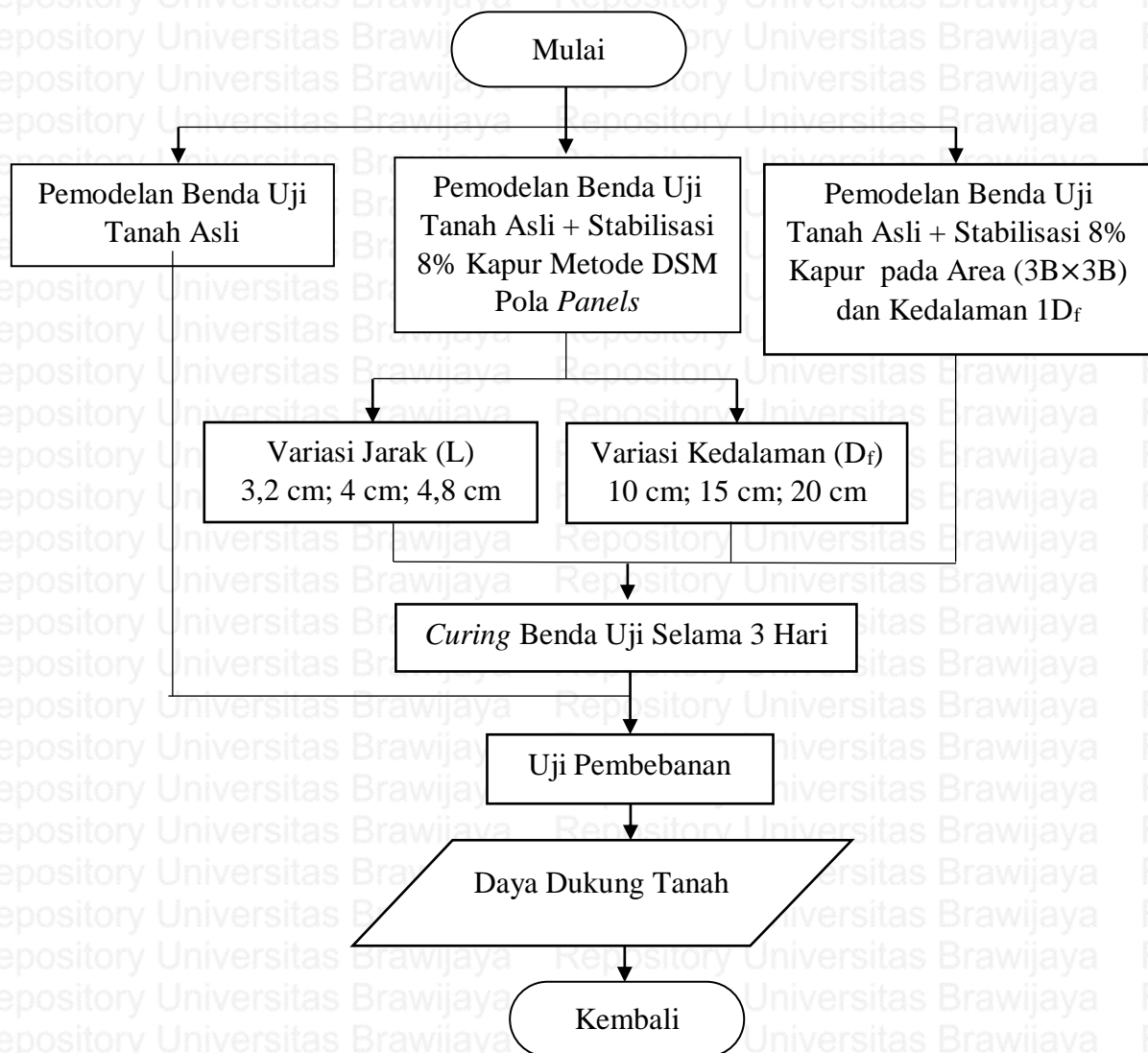
Penelitian dilakukan sesuai dengan diagram alir penelitian berikut:

1. Diagram Alir Penelitian



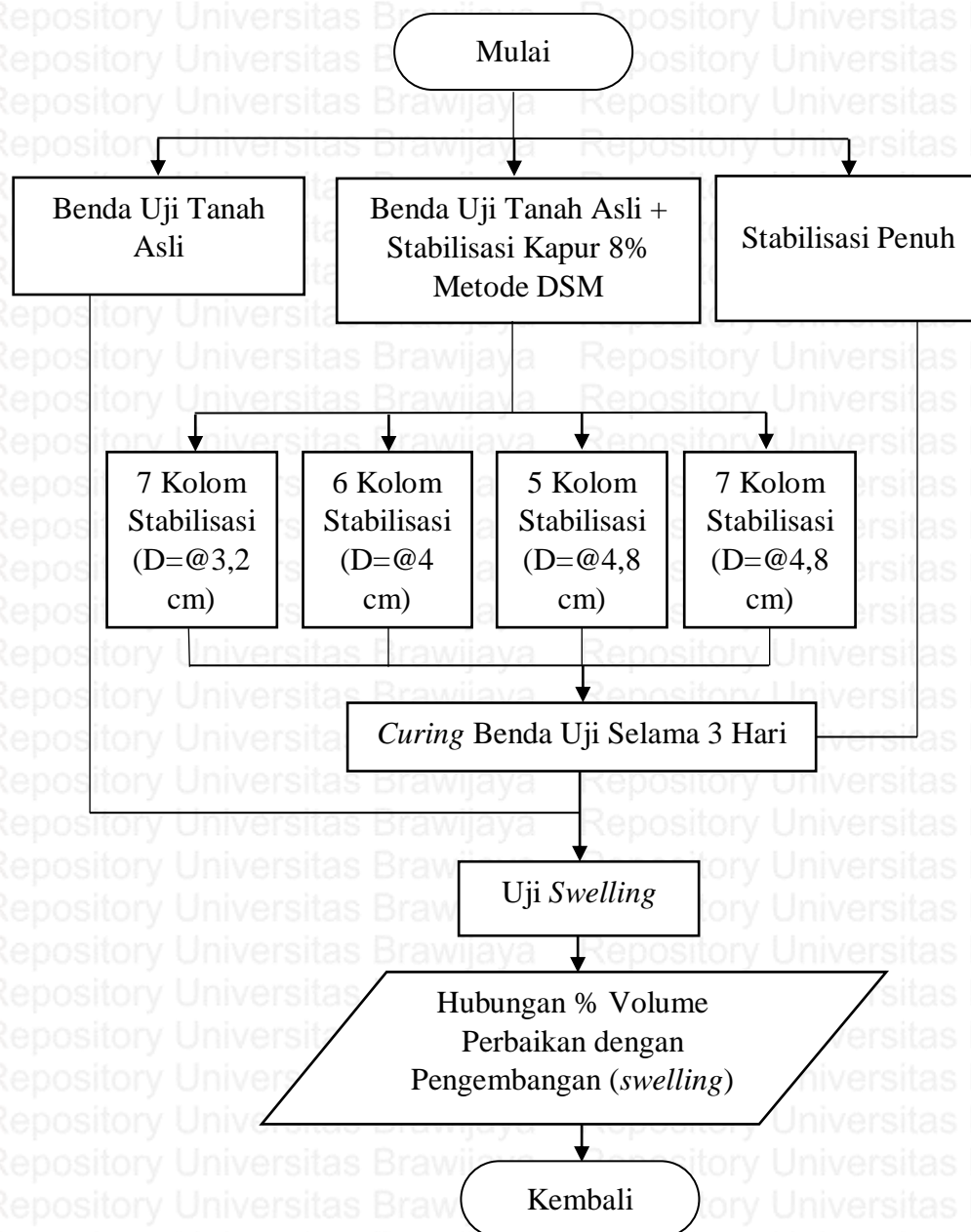
Gambar 3.3 Diagram alir penelitian

2. Diagram Alir Uji Pembebanan



Gambar 3.4 Diagram alir uji pembebanan

3. Diagram Alir Uji Pengembangan

Gambar 3.5 Diagram alir uji pengembangan (*swelling*)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif Berdasarkan Pengujian Sifat Fisik Tanah

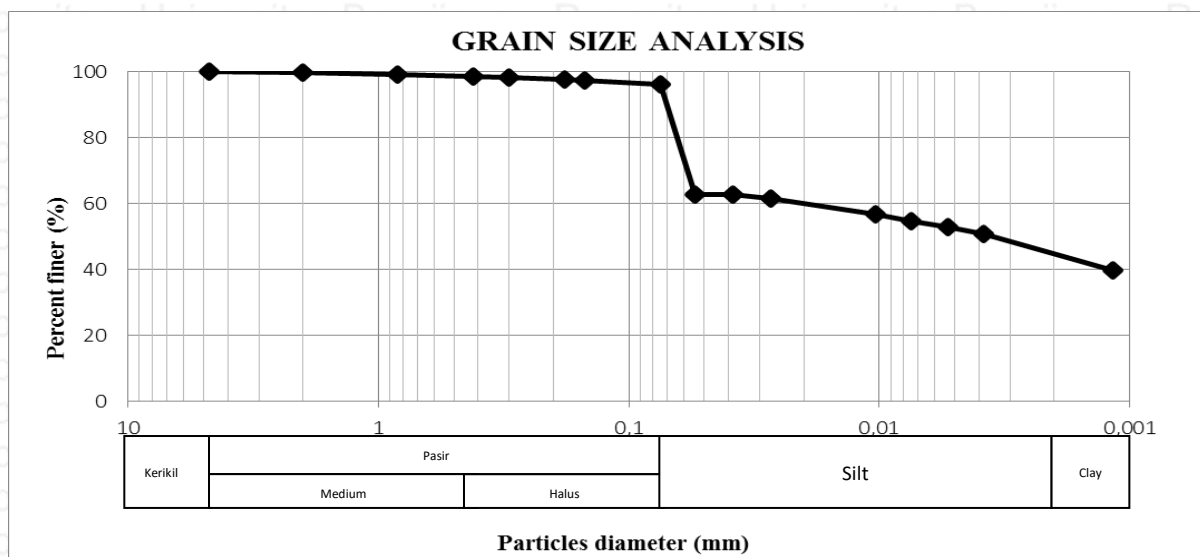
Pengujian sifat fisik tanah dilakukan dengan tujuan mengetahui klasifikasi jenis tanah yang digunakan dalam penelitian. Berdasarkan hasil pengujian di Laboratorium diperoleh data yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.1
Hasil Pengujian Sifat Fisik Tanah

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

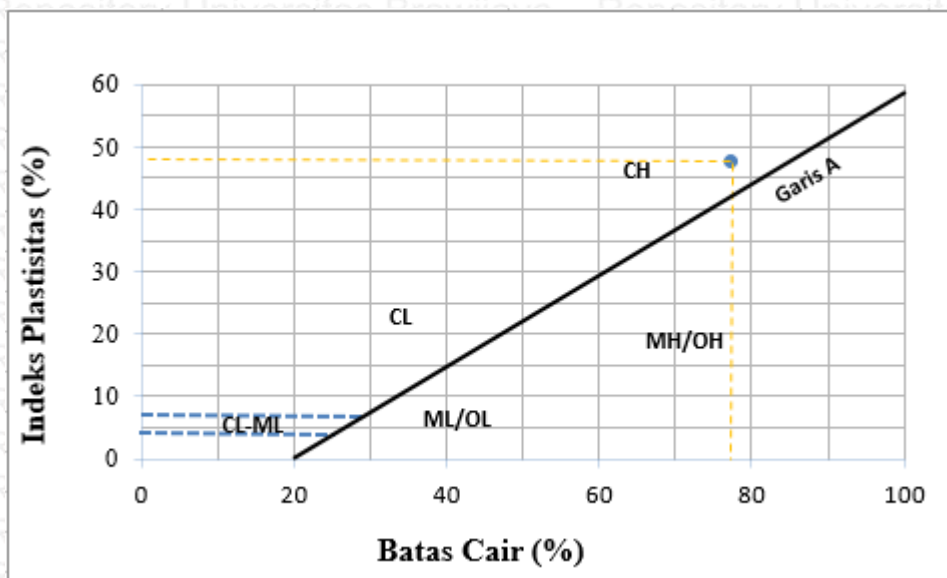
Pengujian sifat fisik tanah dapat terlihat lengkap pada Lampiran.

Pengujian analisis saringan (*grainsize*) dan hydrometer diperoleh distribusi contoh tanah ditampilkan pada Gambar 4.1 berikut ini :



Gambar 4.1 Analisis Butiran Tanah

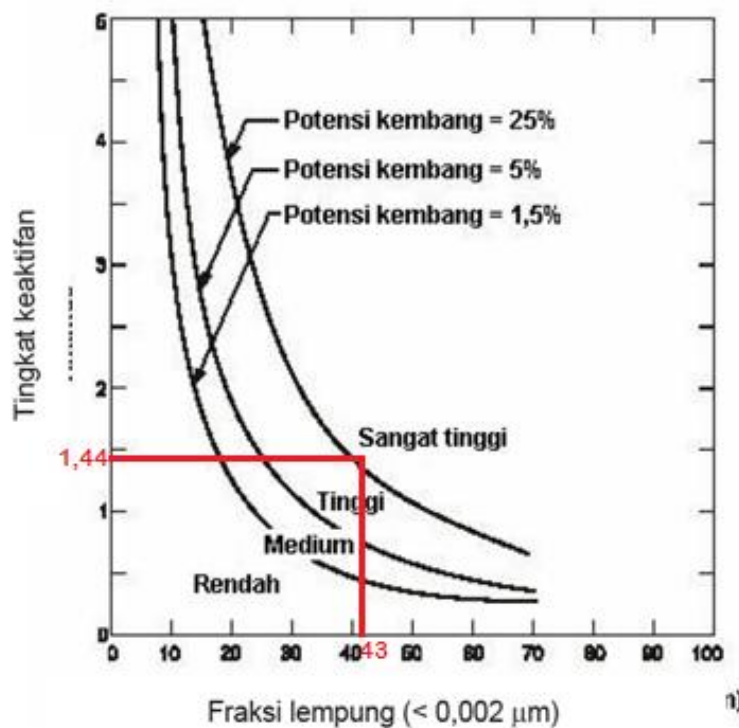
Identifikasi gradasi tanah dilakukan dengan pengujian Analisis saringan (*grainsize*) dan hydrometer, diperoleh bahwa persentase lolos saringan No. 200 (diameter 0,075 mm) melebihi 50% yaitu 96,24%. Hasil tersebut menurut klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) termasuk kedalam kategori tanah berbutir halus yang ditunjukkan bahwa persentase butiran halus cukup dominan. Selanjutnya dilakukan identifikasi tanah menggunakan nilai Batas Cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) yang besarnya masing-masing yaitu 77,354% dan 47,518%. Selanjutnya nilai Batas Cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) tersebut diplotkan ke dalam grafik klasifikasi tanah berdasarkan USCS sehingga diperoleh tanah lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi (CH).



Gambar 4.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

4.2. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Mengidentifikasi tanah lempung ekspansif dapat menggunakan metode menggunakan batas-batas *atterberg* dan analisis butiran tanah. Berdasarkan uji batas-batas *atterberg* dan analisis gradasi butiran tanah, sehingga dapat ditentukan potensi pengembangan tanah lempung ekspansif.



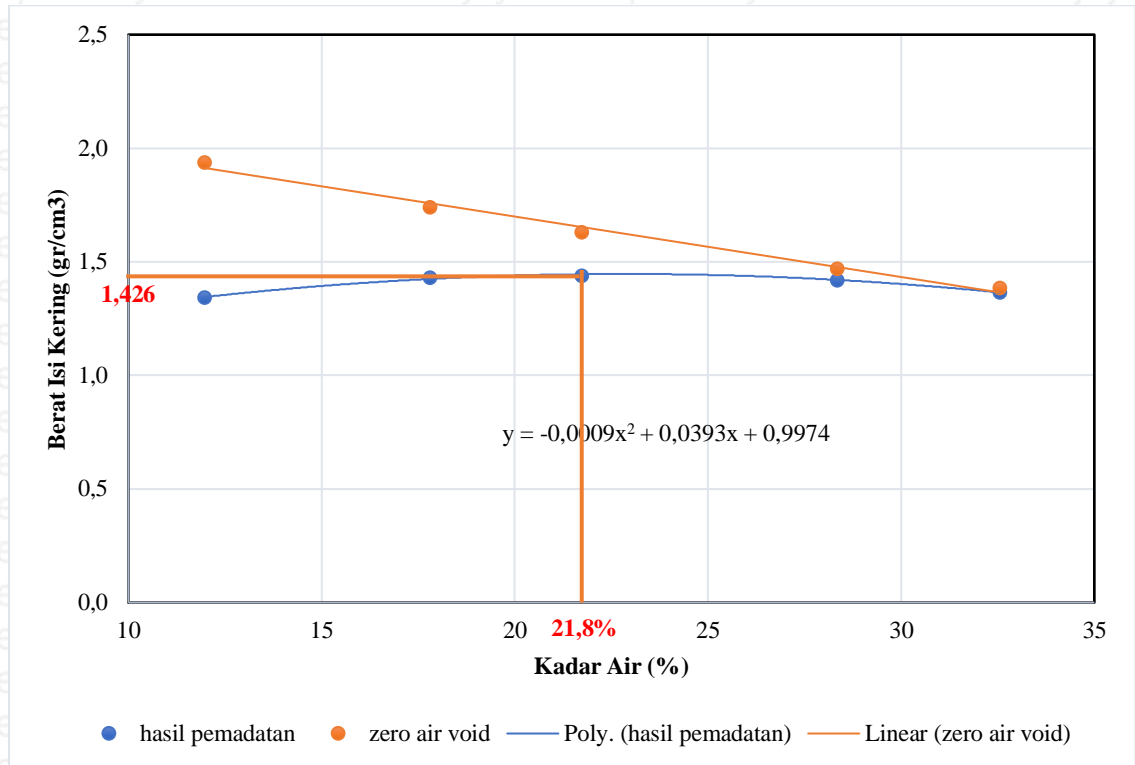
Gambar 4.3 Klasifikasi Potensi Mengembang

Berdasarkan Tabel 2.4 diketahui bahwa sample tanah digunakan untuk penelitian memiliki nilai batas susut (SL) sebesar 8,303% dengan potensi mengembang kritis.

Pada Tabel 2.3 ditunjukkan bahwa tanah tergolong pada kriteria derajat ekspansifitas sangat tinggi karena nilai indeks plastisitas 47,581%. Kemudian, pada Gambar 4.3 terlihat sample tanah memiliki potensi mengembang yang sangat tinggi. Hal tersebut berdasarkan rumus nilai aktivitas yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 diperoleh 1,44 dan persentase tanah ukuran 0,002 mm adalah 43%

4.3. Uji Pemadatan

Pengujian pemadatan bertujuan mengetahui kadar air optimum (OMC) saat tanah memiliki berat isi maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$). Kadar air optimum diperoleh dari plot hubungan kadar air (w) dengan berat isi kering tanah dengan metode pemadatan standar ASTM-D-689 Metode B. Hasil pengujian diperoleh kadar air optimum (OMC) sebesar 21,8% dan berat isi bering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) sebesar 1,426 gr/cm³ ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Hasil pengujian pemadatan tanah

4.4. Hasil Uji Beban (*Load Test*) Benda Uji

4.4.1 Analisis Daya Dukung Tanah

Penelitian ini menggunakan metode analisis daya dukung dengan cara eksperimen yang hasilnya dari uji pembebanan. Metode analitik tidak dilakukan karena pengujian menggunakan alat laboratorium. Analisis daya dukung menggunakan variasi jarak antar kolom dan panjang kolom. Hal ini bertujuan untuk mengetahui variasi yang paling berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah.

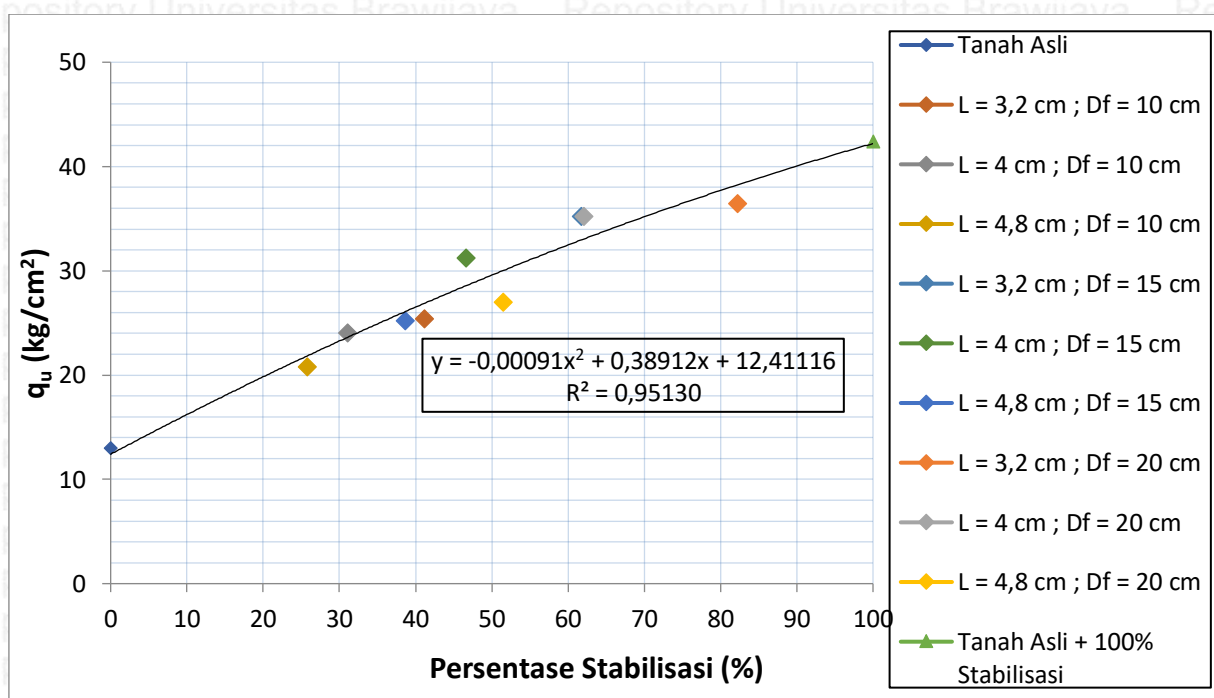
4.4.1.1 Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Stabilisasi Tanah dengan Kolom Deep Soil Mixing

Persentase tanah yang distabilisasi ditentukan oleh dua metode. Metode pertama dilakukan berdasarkan luasan area yang berada di bawah plat beban. Persentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm² dengan kedalaman 20 cm. Metode kedua dianalisis berdasarkan hubungan jarak dan konfigurasi kolom. Metode ini, berguna untuk mengetahui pengaruh perbaikan terhadap potensi mengembang (*swell potential*) atau yang tidak berkaitan dengan analisis daya dukung tanah.

Hasil pengujian daya dukung tanah terhadap persentase tanah ditampilkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.5.

Tabel 4.2
 Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

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

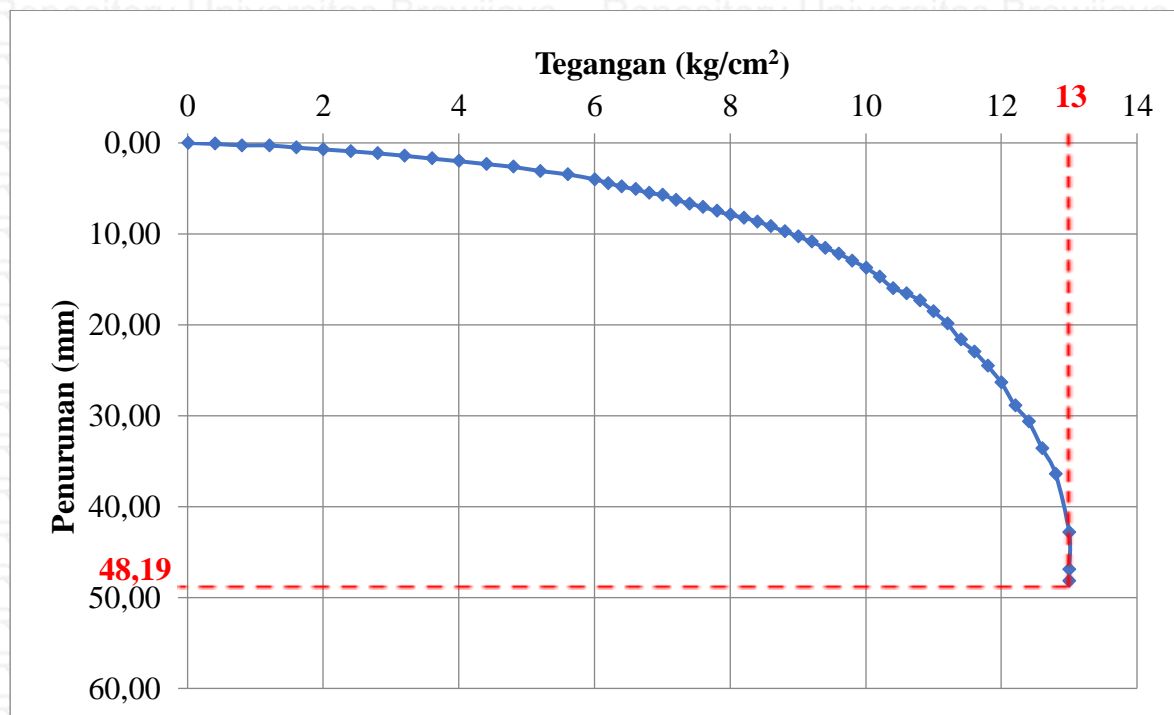


Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

Berdasarkan Gambar 4.5, diperoleh persamaan pengaruh persentase stabilisasi terhadap nilai daya dukung tanah. Berdasarkan grafik dapat diketahui nilai daya dukung tanah mengalami peningkatan berkaitan dengan nilai perbaikan atau stabilisasi. Berdasarkan grafik didapatkan nilai persentase maksimum pada persentase stabilisasi 100% dengan nilai daya dukung (q_u) 42,4 kg/cm².

4.4.1.2 Nilai Daya Dukung Tanah Asli

Pengujian pembebanan uji model tanah asli dilakukan untuk mengetahui nilai daya dukung batas dan penurunan yang diperoleh berdasarkan hasil pengujian. Hasil pengujian pembebanan tanah asli dapat terlihat pada Gambar 4.6.

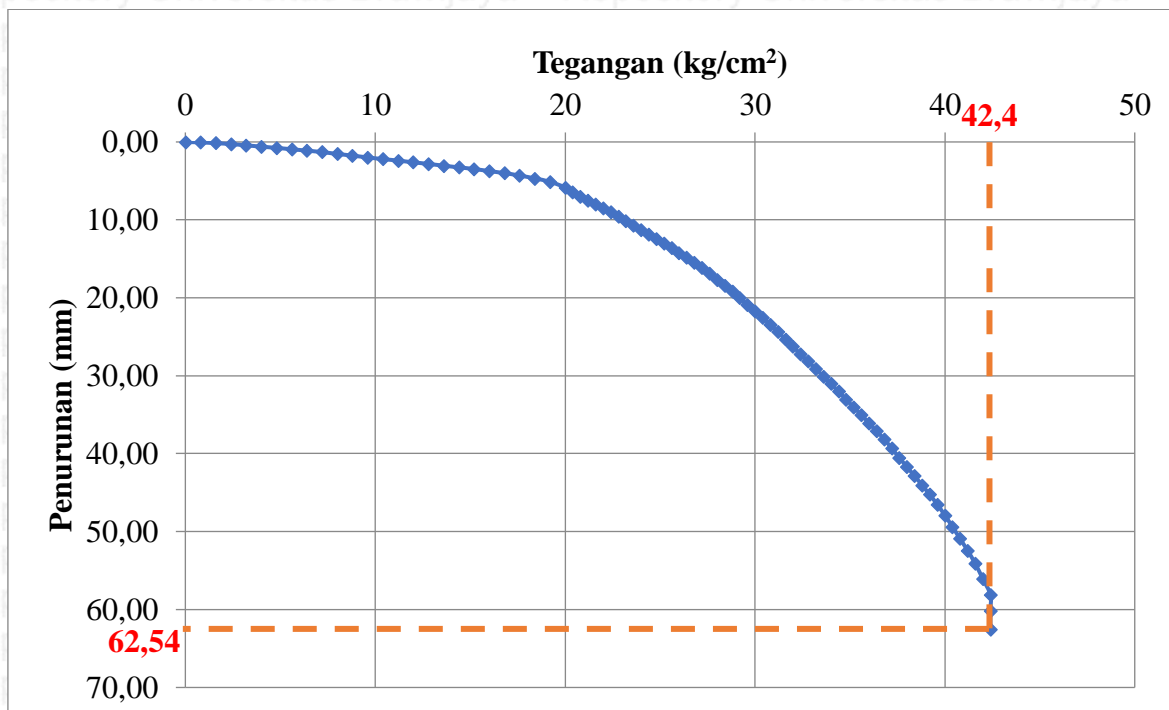


Gambar 4.6 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Tanah Asli

Berdasarkan Gambar 4.6 diperoleh hasil pengujian model tanah asli dengan nilai daya dukung batas sebesar 13 kg/cm² dan mengalami penurunan 48,19 mm.

4.4.1.3 Nilai Daya Dukung Tanah dengan 100% Stabilisasi

Pengujian pembebanan uji model tanah dengan 100% Stabilisasi dilakukan untuk mengetahui nilai daya dukung batas dan penurunan pada kondisi maksimum yaitu dengan campuran zat aditif kapur 8%. Hasil pengujian pembebanan tanah dengan 100% stabilisasi dapat terlihat pada Gambar 4.7.

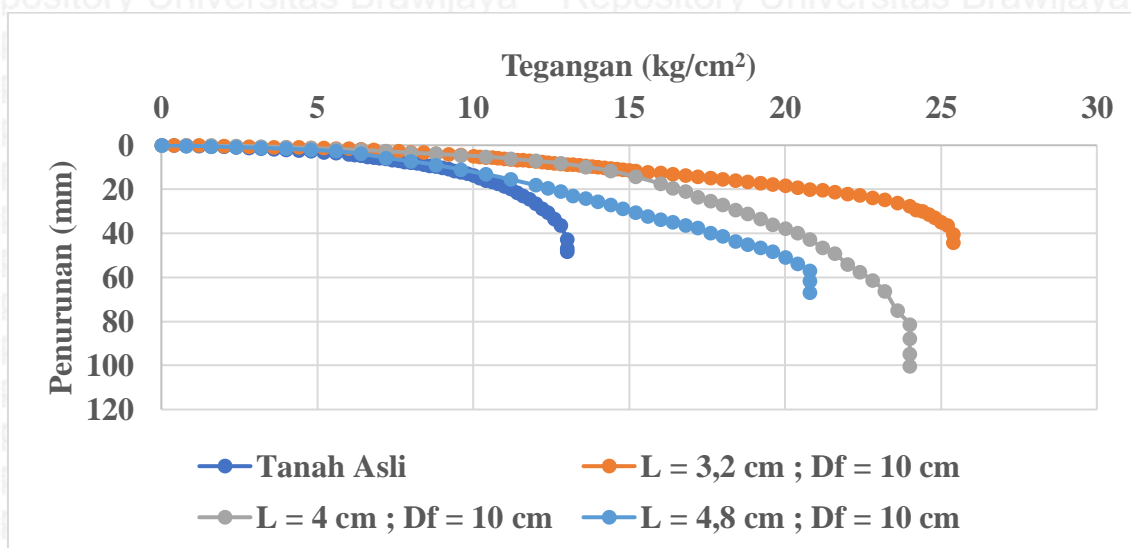


Gambar 4.7 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Tanah dengan 100% Stabilisasi

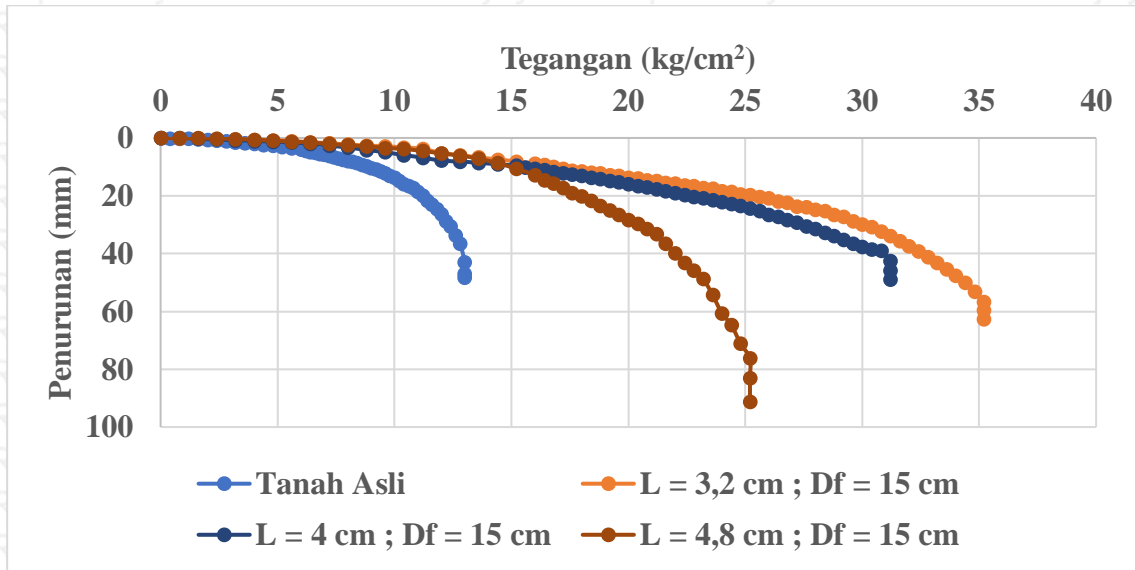
Berdasarkan Gambar 4.7 pada model tanah dengan 100% stabilisasi diperoleh nilai daya dukung batas sebesar 42,4 kg/cm² dan mengalami penurunan 62,54 mm.

4.4.1.4 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Jarak antar Kolom (L) terhadap Kedalaman Kolom (D_f)

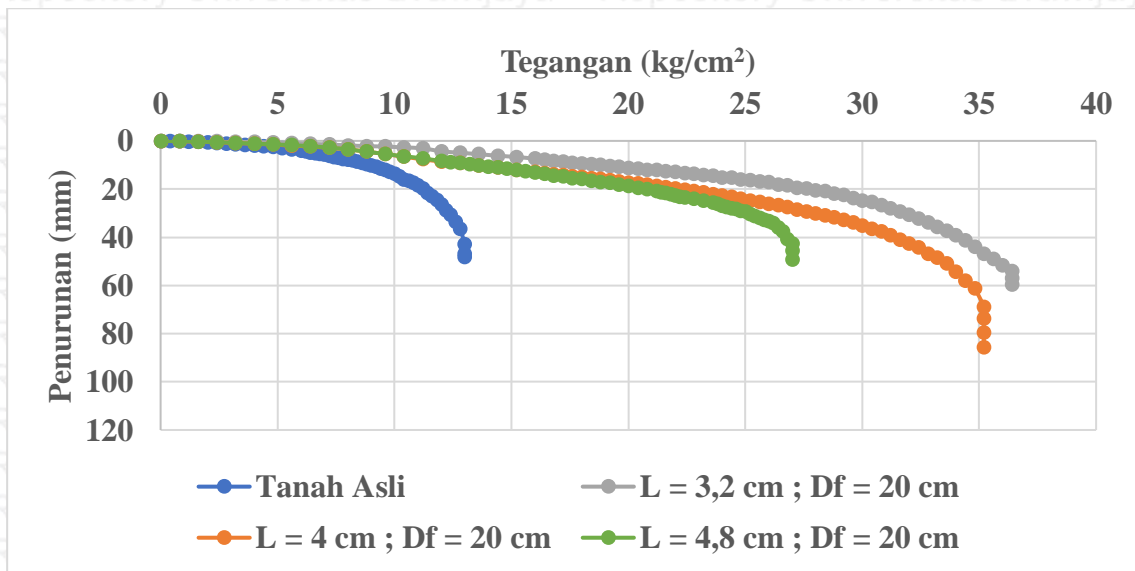
Analisis ini dilakukan untuk mengetahui hubungan nilai daya dukung tanah (q) dengan variasi jarak antar kolom (L) terhadap kedalaman kolom (D_f). Analisis nilai daya dukung tanah dengan kedalaman kolom ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 4.8 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm



Gambar 4.9 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm



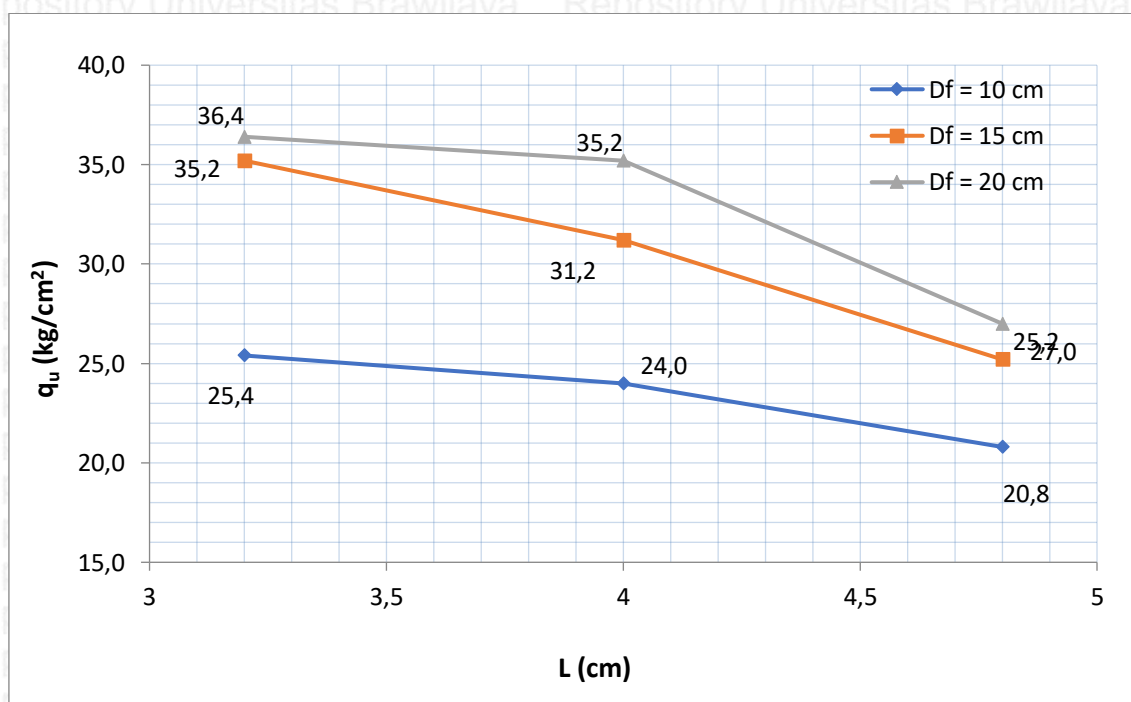
Gambar 4.10 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm

Berdasarkan Gambar 4.8, Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 hasil pengujian terhadap nilai daya dukung tanah dengan variasi jarak antar kolom ditampilkan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.11.

Tabel 4.3

Nilai Daya Dukung Tanah Hasil Uji Beban dengan Variasi Jarak antar Kolom (L) terhadap Kedalaman Kolom (D_f)

Jenis Beban Uji	Panjang Kolom (D_f)	Jarak Kolom (L)	P_u	q_u
	cm	cm	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	325	13,0
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	10	20	1060	42,4
		3,2	635	25,4
		4	600	24,0
	15	4,8	520	20,8
		3,2	880	35,2
		4	780	31,2
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	20	4,8	630	25,2
		3,2	910	36,4
		4	880	35,2
	-	4,8	675	27,0
		3,2	910	36,4
		4	880	35,2



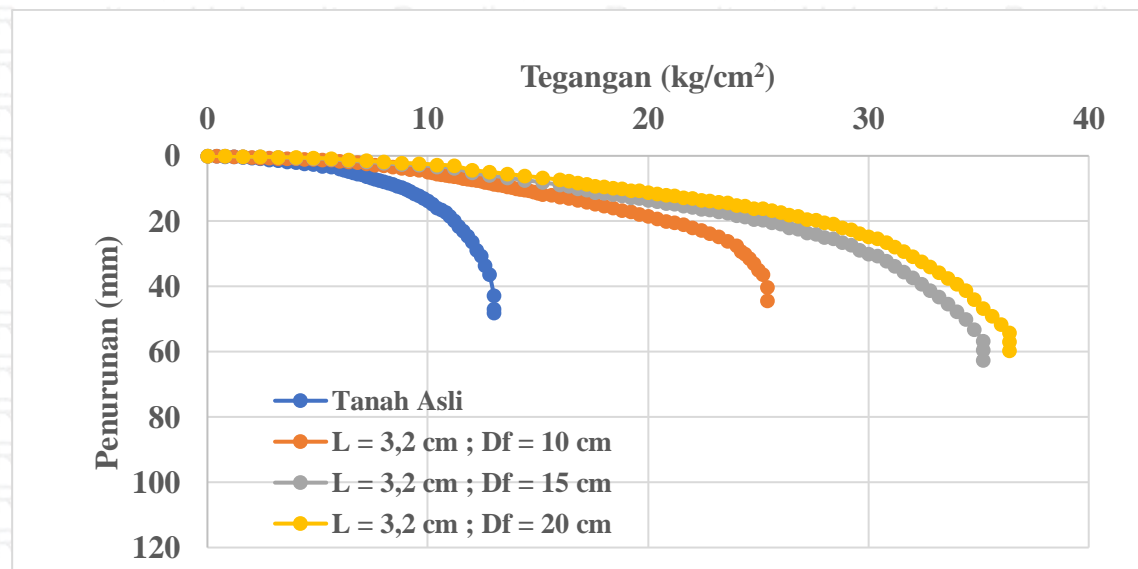
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak antar Kolom (L) terhadap Kedalaman Kolom (D_f)

Berdasarkan hasil perbandingan nilai daya dukung dengan variasi jarak antar kolom terhadap kedalaman kolom, terlihat bahwa nilai q_u tanah asli 13 kg/cm². Setelah tanah distabilisasi dengan kolom DSM, nilai q_u mengalami peningkatan seiring dengan rapatnya

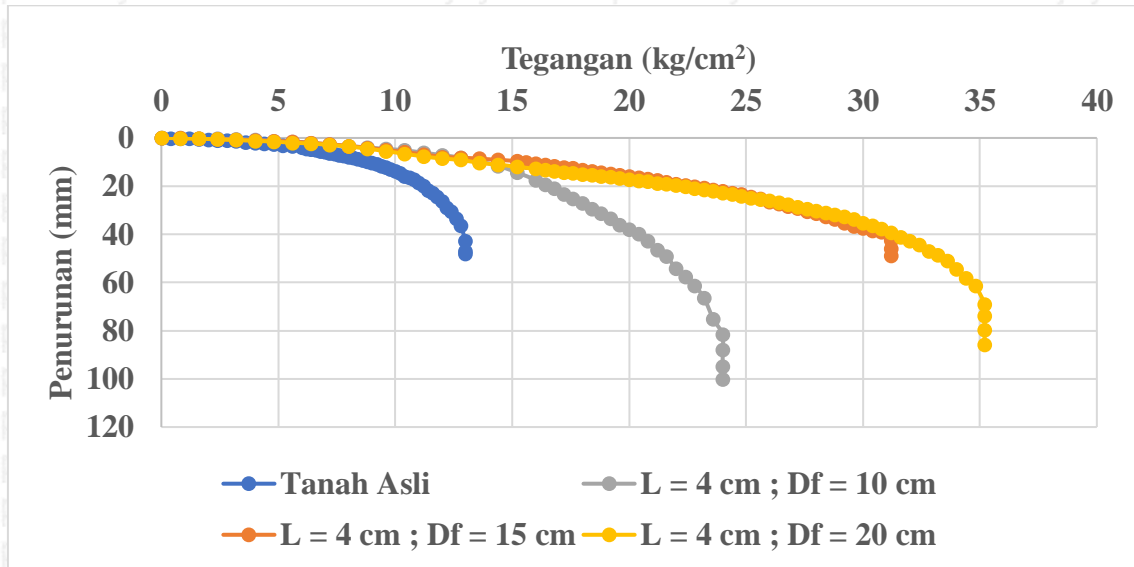
jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f). Berdasarkan Gambar 4.11 terlihat bahwa peningkatan daya dukung meningkat secara signifikan pada perubahan jarak (L) 4,8 cm ke 4 cm. Peningkatan daya dukung terjadi juga pada perubahan variasi jarak 4 cm ke 3,2 cm, namun kurang signifikan juga dibandingkan dengan variasi sebelumnya. Nilai daya dukung paling tinggi terdapat pada kedalaman yang sama pada variasi jarak antar kolom 3,2 cm. Hal tersebut dipengaruhi oleh luasan tanah terstabilisasi yang menerima pengaruh plat beban menjadi lebih besar.

4.4.1.5 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L)

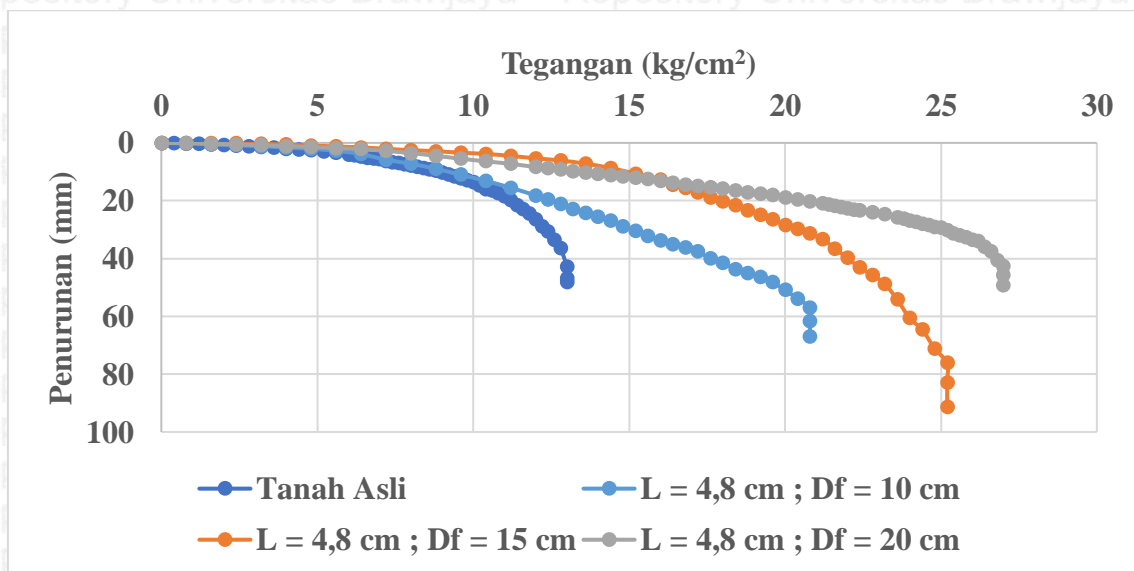
Analisis ini dilakukan untuk mengetahui hubungan nilai daya dukung tanah (q) dengan variasi kedalaman kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L) Analisis nilai daya dukung tanah dengan kedalaman kolom ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 4.12 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 3,2 cm



Gambar 4.13 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 4 cm



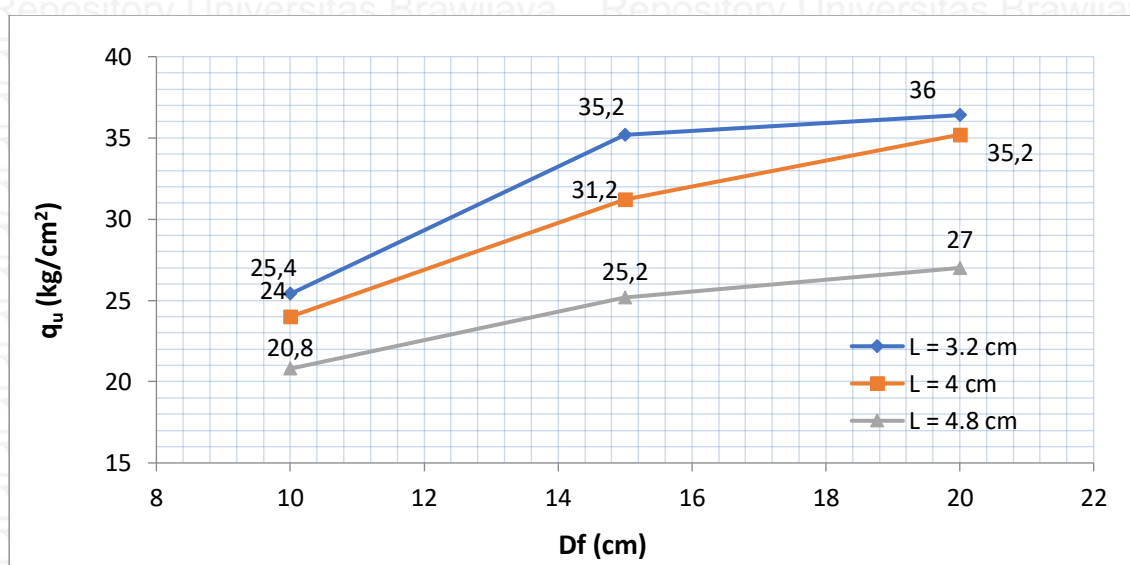
Gambar 4.14 Hubungan Tegangan dengan Penurunan terhadap Jarak antar Kolom (L) = 4,8 cm

Berdasarkan Gambar 4.12, Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 hasil pengujian pada nilai daya dukung tanah terhadap variasi kedalaman kolom DSM ditampilkan pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.15.

Tabel 4.4

Nilai Daya Dukung Hasil Uji Beban dengan Variasi Kedalaman Kolom terhadap Jarak antar Kolom

Jenis Beban Uji	Jarak Kolom (L)	Kedalaman Kolom (D_f)	P_u	q_u
	cm	cm	kg	kg/cm ²
Tanah Asli	-	-	325	13
Tanah Asli + 100% Stabilisasi	3,2	20	1060	42,4
		10	635	25,4
		15	880	35,2
	4,8	20	910	36
		10	600	24
		15	780	31,2
Tanah Asli + Kolom DSM 8% Kapur	4	20	880	35,2
		10	520	20,8
		15	630	25,2
	4,8	20	675	27
		10	520	20,8
		15	630	25,2



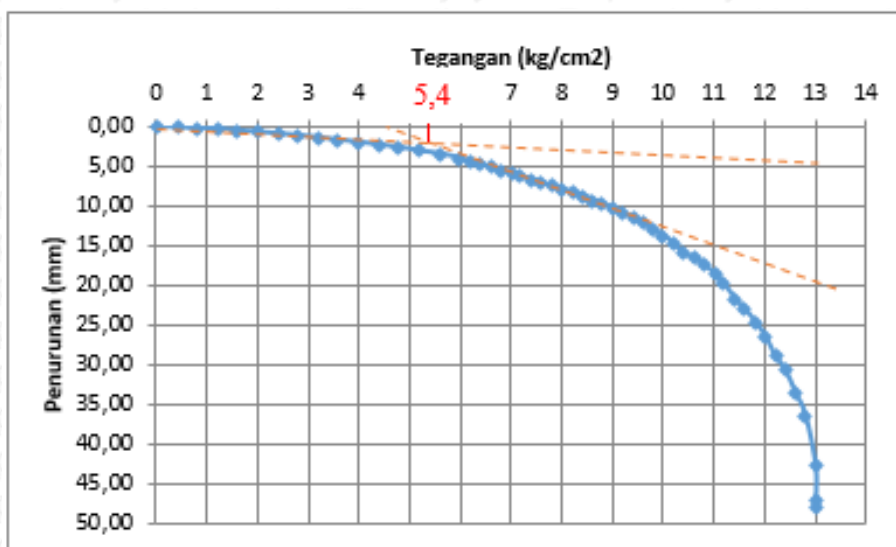
Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar kolom (L)

Berdasarkan hasil grafik tanah dengan stabilisasi kolom DSM mengalami peningkatan nilai q_u seiring dengan semakin dalamnya kolom (D_f) pada jarak antar kolom (L) yang sama. Berdasarkan Gambar 4.15, peningkatan nilai daya dukung pada variasi kedalaman berubah secara signifikan seiring dengan semakin dalamnya kolom DSM dibuktikan dengan peningkatan nilai q_u .

4.4.2 Analisis Daya Dukung Tanah dengan menggunakan Metode *Tangen Intersection*

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

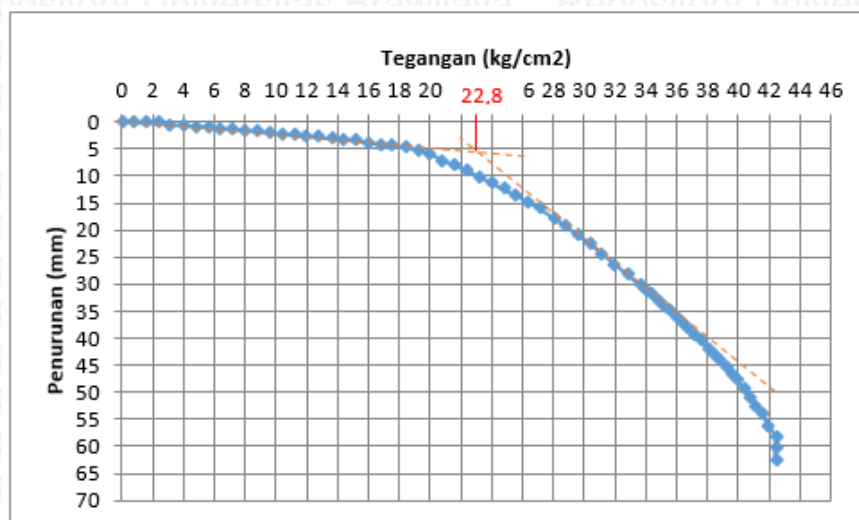
4.4.2.1. Daya Dukung Tanah Asli Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.16 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah Asli

Berdasarkan gambar 4.16 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $5,4 \text{ kg/cm}^2$.

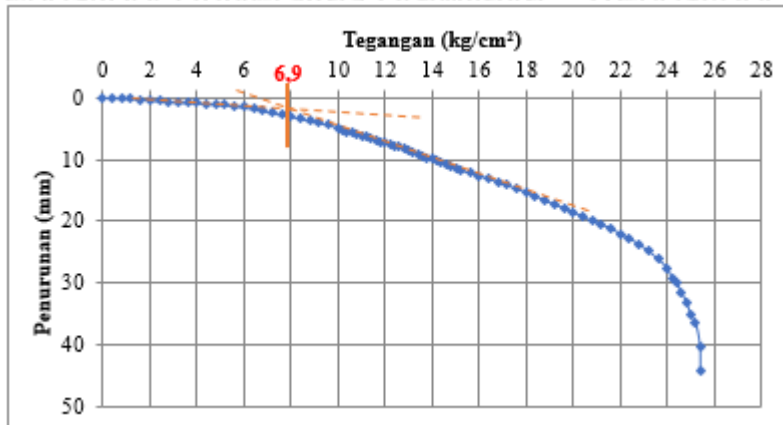
4.4.2.2. Daya Dukung Tanah dengan 100% Stabilisasi Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.17 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan 100% Stabilisasi

Berdasarkan gambar 4.17 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar 22,8 kg/cm².

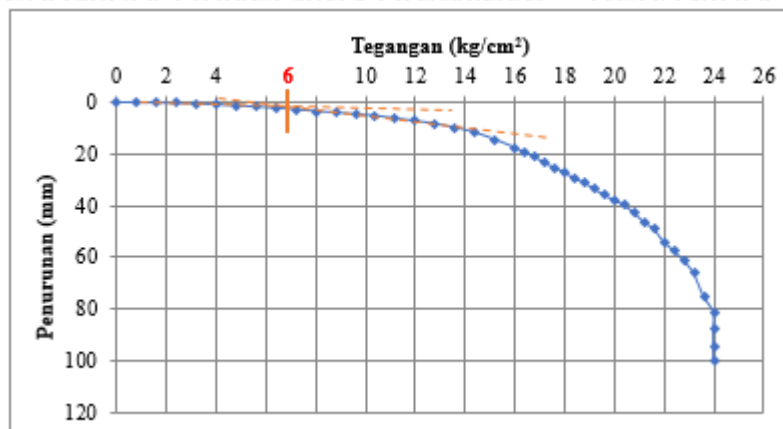
4.4.2.3. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 3,2$ cm ; $D_f = 10$ cm Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.18 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 3,2$ cm ; $D_f = 10$ cm

Berdasarkan gambar 4.18 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar 6,9 kg/cm².

4.4.2.4. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4$ cm ; $D_f = 10$ cm Metode *Tangen Intersection*

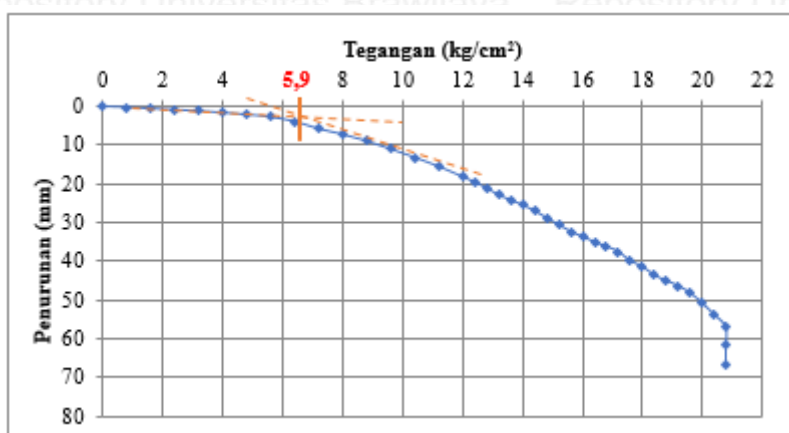


Gambar 4.19 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4$ cm ; $D_f = 10$ cm

Berdasarkan gambar 4.19 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar 6 kg/cm².

4.4.2.5. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4,8 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$ Metode *Tangen*

Intersection

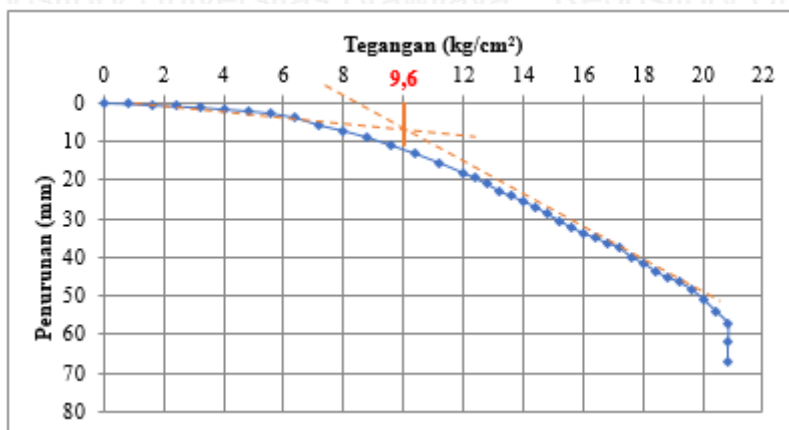


Gambar 4.20 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4,8 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$

Berdasarkan gambar 4.20 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $5,9 \text{ kg/cm}^2$.

4.4.2.6. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 3,2 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$ Metode *Tangen*

Intersection

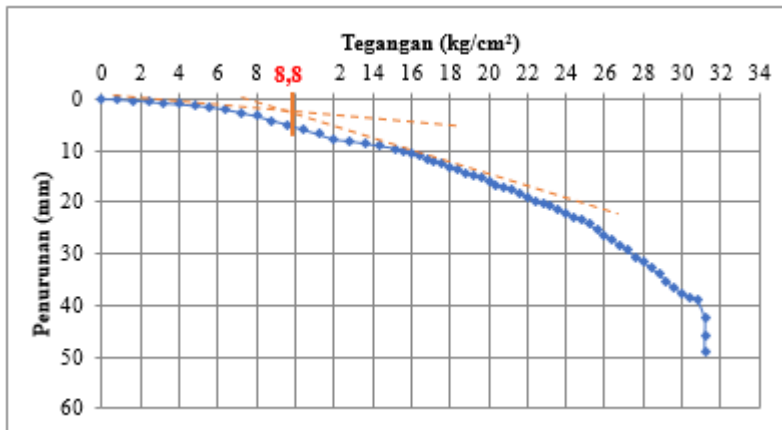


Gambar 4.21 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 3,2 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$

Berdasarkan gambar 4.21 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $9,6 \text{ kg/cm}^2$.

4.4.2.7. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$ Metode *Tangen*

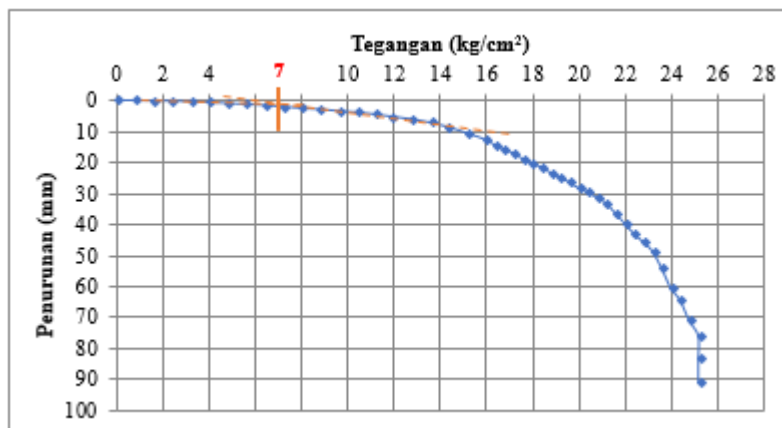
Intersection



Gambar 4.22 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$

Berdasarkan gambar 4.22 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $8,8 \text{ kg/cm}^2$.

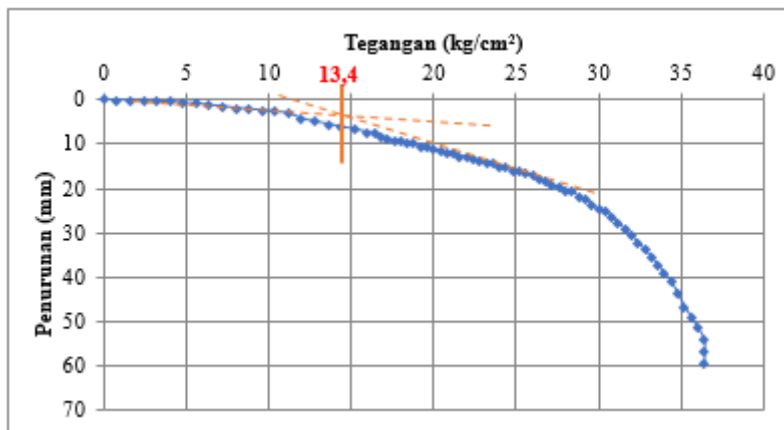
4.4.2.8. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4,8 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$ Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.23 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4,8 \text{ cm}$; $D_f = 15 \text{ cm}$

Berdasarkan gambar 4.23 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar 7 kg/cm^2 .

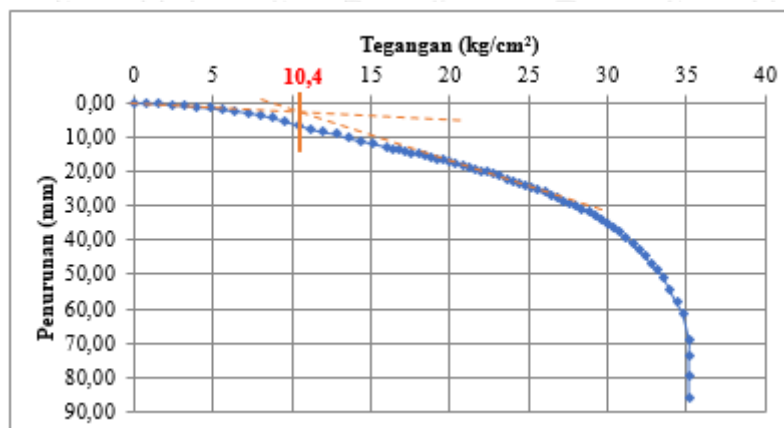
4.4.2.9. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 3,2 \text{ cm}$; $D_f = 20 \text{ cm}$ Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.24 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 3,2$ cm ; $D_f = 20$ cm

Berdasarkan gambar 4.24 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $13,4$ kg/cm².

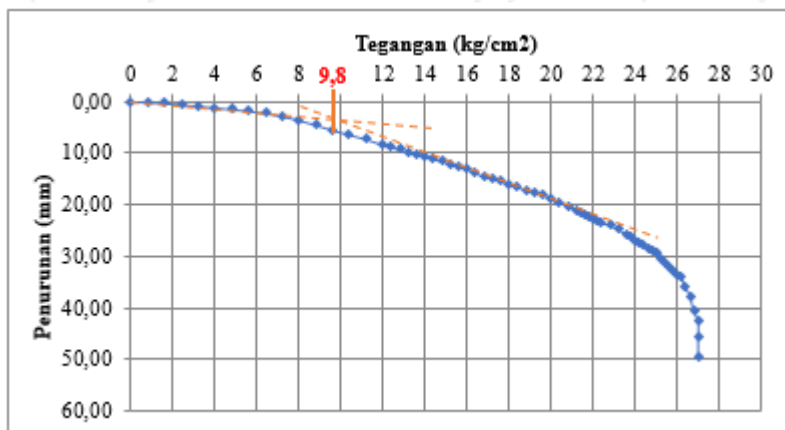
4.4.2.10. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4$ cm ; $D_f = 20$ cm Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.25 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4$ cm ; $D_f = 20$ cm

Berdasarkan gambar 4.25 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $10,4$ kg/cm².

4.4.2.11. Daya Dukung Tanah dengan Variasi $L = 4,8$ cm ; $D_f = 20$ cm Metode *Tangen Intersection*



Gambar 4.26 Hubungan Tegangan dengan Penurunan Metode *Tangen Intersection* Tanah dengan Variasi $L = 4,8$ cm ; $D_f = 20$ cm

Berdasarkan gambar 4.26 dengan metode *tangen intersection* perpotongan garis diperoleh dengan nilai daya dukung tanah yaitu sebesar $9,8$ kg/cm².

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *tangen intersection* (q_s) diperoleh nilai daya dukung tanah yang lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai daya dukung ultimit (q_u). Terjadi perbedaan yang cukup signifikan antara kedua metode ini, dengan menggunakan metode *tangen intersection* dapat diperkirakan penurunan yang terjadi pada perpotongan tangen apabila ditarik garis horizontal. Nilai daya dukung menggunakan metode *tangen intersection* ditampilkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5
Nilai daya dukung tanah dengan metode *tangen intersection*

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

4.4.3 Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI_u) Berdasarkan pada Daya Dukung

Batas




Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI_u) adalah analisis perbandingan antara daya dukung batas saat tanah distabilisasi dengan kolom DSM 8% kapur dengan tanah tanpa stabilisasi. Analisis ini bertujuan mengetahui peningkatan nilai daya dukung yang terjadi akibat pengaruh stabilisasi dengan kolom DSM pada variasi jarak antar kolom dan kedalaman kolom. Analisis BCI_u ini dapat mengetahui variasi mana yang lebih berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah.

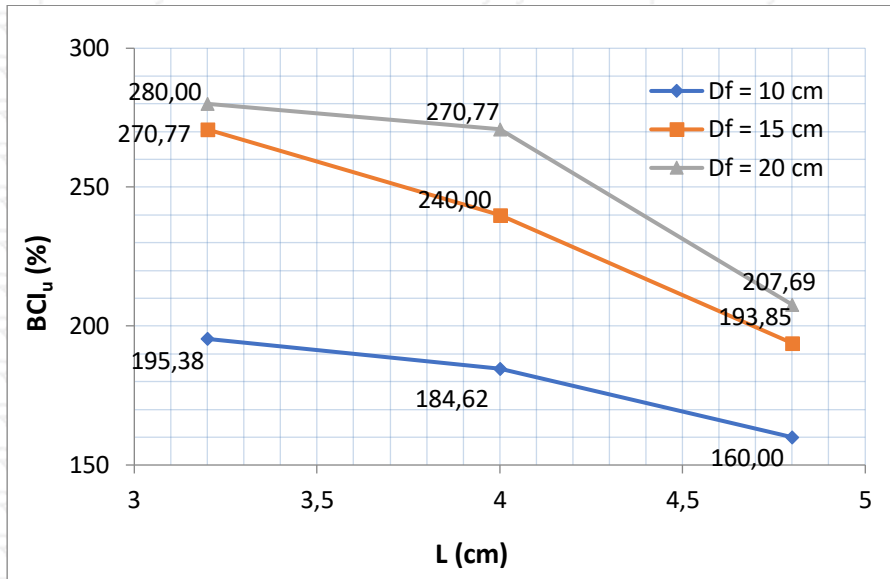
4.4.3.1. Perbandingan BCI_u pada Variasi Jarak Antar Kolom (L) terhadap

Kedalaman Kolom (D_f)

Berdasarkan hasil pengujian dapat terlihat pengaruh variasi jarak antar kolom terhadap BCI_u , ditampilkan pada Gambar 4.16 dan hasil daya dukung telah dilakukan pada masing-masing variasi jarak antar kolom, maka nilai BCI_u dapat dihitung yang ditampilkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6
Nilai BCI_u pada Variasi Jarak antar Kolom

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



Gambar 4.27 Grafik Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom terhadap Nilai BCI_u

Berdasarkan hasil Tabel 4.5 dan Gambar 4.27, seiring dengan rapatnya jarak antar kolom (L) akan meningkatkan nilai BCI_u. Terlihat pada grafik yang ditampilkan terjadi peningkatan nilai BCI_u yang signifikan pada perubahan jarak (L) 4 cm ke 4,8 cm. Peningkatan BCI_u juga terjadi pada perubahan variasi jarak 3,2 cm ke 4 cm, namun peningkatannya tidak terlalu signifikan juga dibandingkan dengan peningkatan sebelumnya. Nilai BCI_u terbesar pada kedalaman kolom (D_f) 20 cm untuk variasi jarak antar kolom 3,2 cm yaitu sebesar 280,00%. Sedangkan pada variasi jarak antar kolom 4,8 cm, nilai BCI_u yaitu sebesar 207,69%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi jarak antar kolom berpengaruh besar terhadap nilai daya dukung tanah.

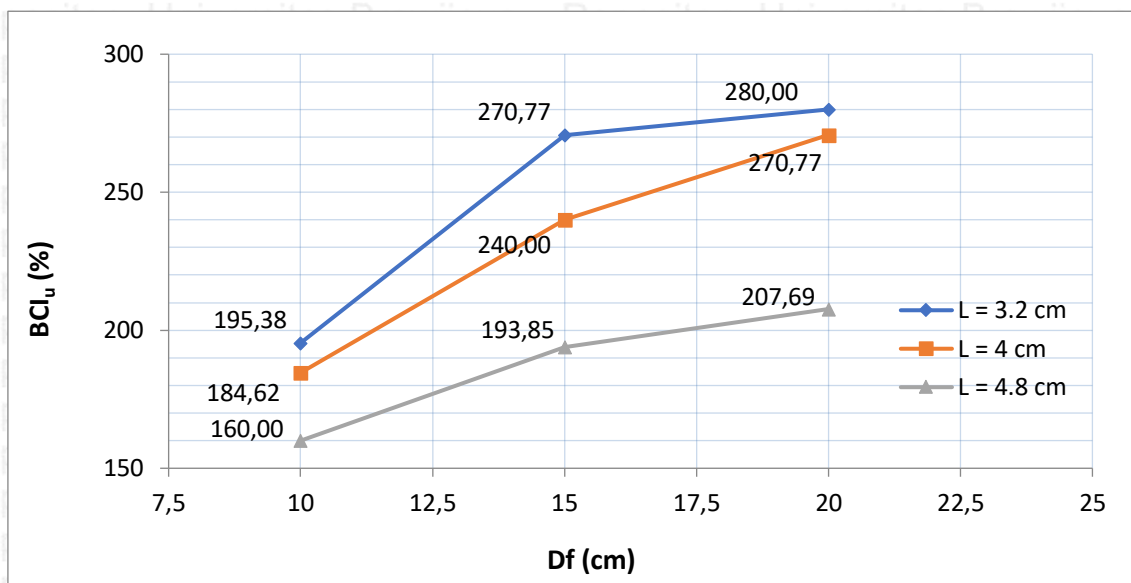
4.4.3.2. Perbandingan BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Jarak antar Kolom (L)

Pengaruh variasi kedalaman kolom terhadap nilai BCI_u, terlihat pada Gambar 4.28. Berdasarkan hasil daya dukung dari masing-masing variasi kedalaman kolom, maka nilai BCI_u dapat dihitung terlihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.7
Nilai BCI_u pada Variasi Kedalaman Kolom

L	D _f	q _u	q _u tanah sebelum distabilisasi	BCI _u	Peningkatan BCI _u
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)
3,2	10	25,4	13	195,38	75,38
	15	35,2	13	270,77	9,23

	20	36,4	13	280,00	
	10	24	13	184,62	55,38
4	15	31,2	13	240,00	30,77
	20	35,2	13	270,77	
	10	20,8	13	160,00	33,85
4,8	15	25,2	13	193,85	
	20	27	13	207,69	13,85



Gambar 4.28 Grafik Pengaruh Variasi Kedalaman Kolom terhadap Nilai BCI_u

Berdasarkan hasil Tabel 4.6 dan Gambar 4.28, terlihat bahwa seiring dengan bertambahnya kedalaman kolom (D_f) maka nilai BCI_u akan mengalami peningkatan. Berdasarkan grafik BCI_u terbesar terdapat pada kedalaman kolom 20 cm dengan jarak antar kolom (L) 3,2 cm yaitu sebesar 280,00%. Nilai BCI_u pada jarak antar kolom (L) 3,2 cm variasi kedalaman kolom 10 cm sebesar 195,38%, sedangkan nilai BCI_u pada jarak antar kolom (L) 3,2 cm variasi kedalaman kolom (D_f) 15 cm yaitu sebesar 270,77%.

Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa peningkatan yang terjadi pada nilai BCI_u pada variasi kedalaman kolom (D_f) = 10 cm ke kedalaman kolom (D_f) = 15 cm merupakan yang terbesar jika dibandingkan dengan variasi kedalaman kolom (D_f) = 15 cm ke kedalaman kolom (D_f) = 20 cm. Hal ini terjadi karena, pada saat prosedur pelaksanaan upaya yang dilakukan tidak seragam sehingga menyebabkan perbedaan peningkatan pada variasi kedalaman kolom (D_f) 10 cm, 15 cm dan 20 cm.

4.4.4 Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom (L) dan Kedalaman Kolom (D_f) terhadap Nilai Daya Dukung Tanah

Penelitian ini salah satunya bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak antar kolom dan panjang kolom yang distabilisasi dengan menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) terhadap nilai daya dukung tanah.

Secara umum, stabilisasi tanah ekspansif menggunakan kolom DSM dengan kadar kapur 8% terbukti dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Hal tersebut terjadi karena pengaruh penambahan nilai kepadatan tanah akibat reaksi dari zat aditif kapur.

Dengan memberikan variasi jarak antar kolom dan panjang kolom, peningkatan nilai daya dukung tanah memberikan hasil yang berbeda-beda. Hal ini terjadi karena variasi yang diberikan memiliki persentase perbaikan tanah yang distabilisasi akibat penambahan zat aditif kapur.

Berdasarkan hasil pengujian, dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung tanah dengan persentase tanah dengan kolom DSM berbanding lurus. Semakin besar persentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung diperoleh. Hal ini terjadi akibat reaksi kimia kapur dengan tanah lempung yang menghasilkan kalsium silikat hidrat yang menyebabkan pengikat butiran halus lempung sehingga gaya geser menjadi lebih besar dan meningkatkan daya dukung. Menurut penelitian yang dilakukan Ismail, A. (2016) apabila jarak antar kolom (L) diperkecil nilai daya dukung semakin meningkat. Sedangkan semakin dalam kolom maka nilai daya dukung akan semakin meningkat.

Dari hasil penelitian, diperoleh persentase terbesar tanah yang distabilisasi yaitu 82,23% dengan nilai daya dukung batas (q_u) sebesar 36,4 kg/cm². Hasil ini terletak pada variasi jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm. Sedangkan tanah dengan 100% perbaikan memiliki nilai daya dukung batas (q_u) sebesar 42,4 kg/cm² atau meningkat 326,15%.

4.4.5 Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) dengan Metode *Tangen*

Intersection

Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) adalah analisis perbandingan antara daya dukung batas saat tanah distabilisasi dengan kolom DSM 8% kapur dengan tanah tanpa stabilisasi. Analisis ini bertujuan mengetahui peningkatan nilai daya dukung yang terjadi menggunakan metode *tangen intersection*. Analisis BCI ini dapat mengetahui variasi mana yang lebih berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8

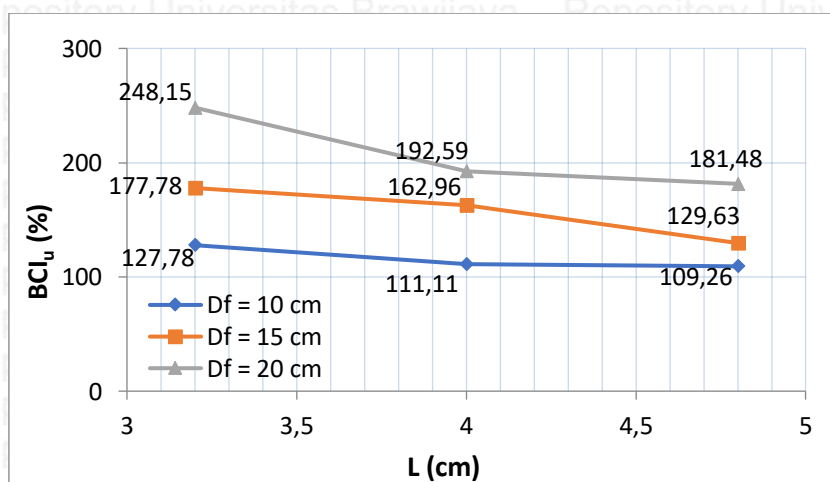
Nilai BCI dengan Metode *Tangen Intersection*

L	Df	qs	BCI
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ² (%)
3,2	10	6,9	5,4
	15	9,6	5,4
	20	13,4	5,4
4	10	6	5,4
	15	8,8	5,4
	20	10,4	5,4
4,8	10	5,9	5,4
	15	7	5,4
	20	9,8	5,4

4.4.5.1. Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) dengan Metode *Tangen*

Intersection pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Analisis ini terdapat tiga jenis variasi jarak antar kolom (L) yaitu 3,2 cm, 4 cm dan 4,8 cm untuk tiap kolom DSM. Pengaruh variasi jarak antar kolom (L) terhadap nilai BCI, terlihat pada Gambar 4.29.



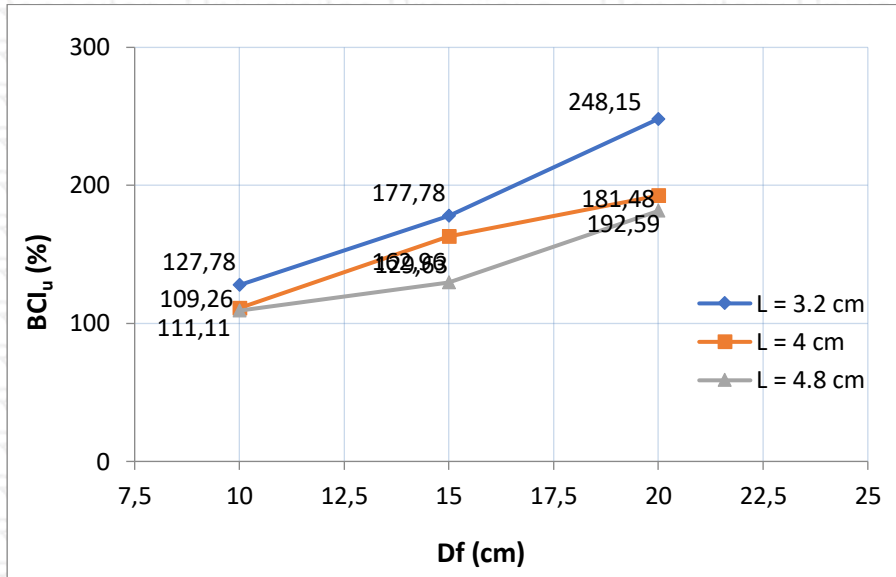
Gambar 4.29 Hubungan BCI (q_s) terhadap variasi jarak antar kolom (L)

Berdasarkan Gambar 4.29 terlihat bahwa variasi jarak antar kolom mempengaruhi peningkatan daya dukung tanah, semakin sempit jarak antar kolom (L) maka akan semakin besar nilai daya dukungnya. Nilai daya dukung tertinggi terdapat pada variasi jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm yaitu sebesar 248,15%.

4.4.5.2. Analisis Bearing Capacity Improvement (BCI) dengan Metode Tangen

Intersection pada Variasi Kedalaman Kolom (D_f)

Analisis ini terdapat tiga jenis variasi kedalaman kolom (D_f) yaitu 10 cm, 15 cm dan 20 cm untuk tiap kolom DSM. Pengaruh variasi kedalaman kolom (D_f) terhadap nilai BCI, terlihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Hubungan BCI (q_s) terhadap variasi kedalaman kolom (D_f)

Berdasarkan Gambar 4.30 terlihat bahwa variasi kedalaman kolom mempengaruhi peningkatan daya dukung tanah, semakin besar kedalaman kolom maka semakin besar juga nilai daya dukung. Nilai daya dukung tertinggi terdapat pada variasi jarak antar kolom (L) 3,2 cm dan kedalaman kolom (D_f) 20 cm yaitu sebesar 248,15%.

4.5 Daya Dukung Izin

Daya dukung izin digunakan untuk mengetahui nilai daya dukung yang diizinkan berdasarkan kebutuhan jalan raya dengan menggunakan pembebanan “T” dan beban lapis perkerasan. Berdasarkan pengujian, nilai daya dukung tanah perbaikan ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9
Nilai Daya Dukung Tanah Perbaikan

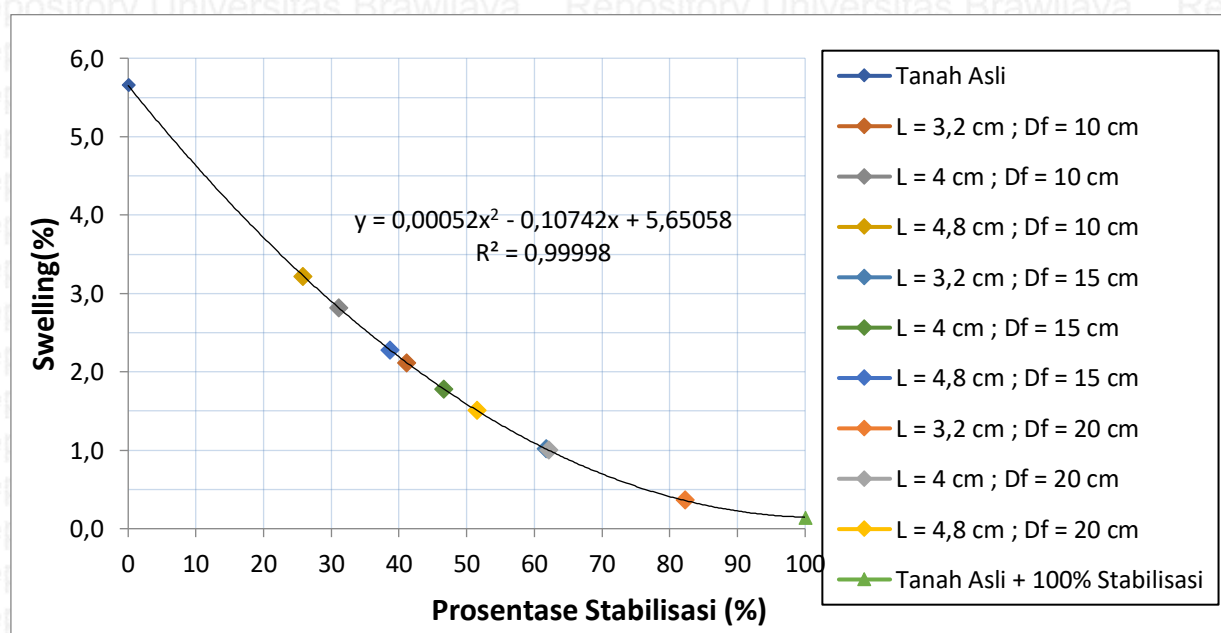
Jenis Benda Uji	Variabel	q_u kg/cm ²	q (q_u/f_s) kg/cm ²
Tanah Asli	$L = 3,2 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$	25,4	18,1
+ Kolom	$L = 4 \text{ cm}$; $D_f = 10 \text{ cm}$	24	17,1

Stabilisasi	L = 4,8 cm ; Df = 10 cm	20,8	14,9
DSM	L = 3,2 cm ; Df = 15 cm	35,2	25,1
dengan 8%	L = 4 cm ; Df = 15 cm	31,2	22,3
Kapur	L = 4,8 cm ; Df = 15 cm	25,2	18,0
	L = 3,2 cm ; Df = 20 cm	36,4	26,0
	L = 4 cm ; Df = 20 cm	35,2	25,1
	L = 4,8 cm ; Df = 20 cm	27	19,3

Daya dukung akibat beban “T” diperoleh sebesar 2,42 kg/cm² dari beban kendaraan truk dengan beban roda ganda 10 ton, beban lapisan perkerasan diperoleh 0,04 kg/cm² dan beban lapisan pondasi 0,0615 kg/cm² sehingga beban luar total sebesar 2,5215 kg/cm². Dengan menganggap daya dukung izin untuk jalan raya sebesar 2,5215 kg/cm². Berdasarkan hasil Tabel 4.9 semua variasi jarak antar kolom (L) dan kedalaman kolom (D_f) memenuhi daya dukung izin tersebut.

4.6 Pemeriksaan Pengembangan (*Swelling*)

Pengembangan (*swelling*) merupakan perbandingan perubahan tinggi selama perendaman terhadap tinggi sample awal sebelum dilakukan perendaman dinyatakan dalam persentase (%). Uji pengembangan (*swelling*) menggunakan kadar air optimum (OMC) yang diperoleh dari pengujian pemadatan dengan variasi jumlah kolom DSM yang bertujuan mengetahui pengaruh persentase tanah yang distabilisasi terhadap nilai pengembangannya. Hasil pengujian pengembangan ditampilkan pada Gambar 4.18



Gambar 4.31 Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Berdasarkan Gambar 4.31, pengujian *swelling* dari berbagai variasi membuktikan semakin bertambahnya persentase stabilisasi maka semakin kecil *swelling* yang terjadi. Hal tersebut terjadi karena kapur mengalami flokulasi sehingga menyebabkan butiran halus lempung menjadi lebih padat.

Berdasarkan Pedoman Konstruksi dan Bangunan Departemen Pekerjaan Umum mengenai Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan tahun 2005, kapur yang digunakan sebagai stabilisasi yaitu 2 – 10% dari berat kering tanah. Di dukung oleh hasil penelitian yang dilakukan oleh Ranggaesa, R. A. (2016) terhadap sifat fisik dan mekanis tanah lempung ekspansif menunjukkan kadar kapur yang baik digunakan untuk stabilisasi pada Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro yaitu sebesar 8% dari berat kering tanah.

Berdasarkan hasil pengujian *swelling* dapat diperoleh grafik seperti pada Gambar 4.18, sehingga dapat dihitung besarnya persentase stabilisasi model tanah di dalam *box* menggunakan persamaan tersebut. Hasil potensi *swelling* terhadap persentase tanah stabilisasi kolom DSM, ditampilkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10
Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

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

L = 4 cm ; D _f = 20 cm	62,06	1,007	82,20
L = 4,8 cm ; D _f = 20 cm	51,48	1,511	73,30

Berdasarkan Tabel 4.10, tanah yang telah distabilisasi kolom DSM dengan kedalaman kolom (D_f) 20 cm dan jarak antar kolom (L) 3,2 cm memiliki nilai *swelling* terkecil sebesar 0,369% dan mengalami penurunan 93,47% dari tanah asli. Sehingga stabilisasi kolom DSM menghasilkan penurunan nilai *swelling* yang tinggi.

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diizinkan adalah 12 mm (0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*. Tanah lempung ekspansif di lokasi penelitian rata-rata memiliki kedalaman 1,5 meter sehingga persentase mengembang maksimum yang diizinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%. Berdasarkan hasil analisis uji pengembangan terhadap model di laboratorium, pengembangan izin tersebut yang konfigurasi yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang untuk *flexible pavement* merupakan jarak antar kolom (L) = 3,2 cm dengan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm.

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

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

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

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

5.2. Saran

Setelah melaksanakan penelitian, untuk mencapai hasil yang lebih optimal terhadap nilai daya dukung tanah dan pengembangan tanah. perlu dilakukan variasi lain agar dapat melengkapi penelitian yang telah dilakukan. Saran yang diberikan antara lain :

1. Tanah lempung ekspansif sangat bergantung dari *density* dan kadar air, sehingga perlu diperhatikan kondisi tanah dan perlu variasi lain yang dapat dikembangkan berkaitan dengan *density* dan kadar air.
2. Perlu sebuah metode yang efektif dan alat yang mendukung pada saat pelaksanaan penelitian sehingga dapat mengurangi faktor kesalahan saat pembuatan model tanah dalam *box* dan saat dilakukan pengujian.
3. Perlu variasi bahan aditif untuk penelitian lanjutan dengan perilaku permodelan benda uji yang sama agar dapat mengetahui perubahan daya dukung yang didapatkan.
4. Saat pembuatan model tanah dalam *box* perlu sebuah alat yang dapat mengebor dan mencampurkan tanah dengan kapur kedalam *box* sehingga kesalahan dalam pembuatan model tanah dalam *box* dapat di minimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Anshorie, A. A. 2015. *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Single Square Diameter 3 cm Terhadap Daya Dukung Tanah*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Barnes, G. E. 2000. *Soil Mechanics, Principles and Practice (Second Edition)*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- Bouassida, M. dan Porbaha, A. 2004. Ultimate Bearing Capacity of Soft Clays Reinforced by a Group of Columns - Application to a Deep Mixing Technique. *Article in Soil and Foundations*. Tokyo: Japanese Geotechnical Society.
- Bowles, J. 1984. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta.
- Chen, F. H. 1975. *Foundations on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. 1991, “*Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid I*”. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M., 1995, “*Mekanika Tanah, Jilid I*. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., “Overview of unsaturated soil behavior”, Proc. Unsaturated soil, 1993, ASCE, pp. 1-31.
- Hakim, A. L. 2015. *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Panels Diameter 2 cm Terhadap Daya Dukung Tanah*. Skripsi. Tidak di publikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ismail, Ahmad. 2016. *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Kapur Metode Deep Soil Mixing Tipe Panels Berdiameter 4,5 cm terhadap Nilai Daya Dukung Tanah*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on The Transition Zone and The Boundary layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Linkoping : Swedish Deep Stabilization Research Center.
- Laras, Ario W. 2016. *Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan*

(Curing) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Tanah Lempung Ekspansif. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.

Madhyannapu, R. S. dan Puppala, A. J. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 140. American Society of Civil Engineers.

Muntohar, A. S. 2010. Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom di Laboratorium. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*. 10 (3):202-207. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Ranggaesa, Riota A. 2016. *Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.

Skempton, A. W. 1953. The Colloidal "Activity" of Clays. *Proc. Of The 3rd Internasional Conference of Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1: 57-61. Zurich: Selected Papers on Soil Mechanics.

Wesley, D. Laurence. 2010. "Mekanika Tanah Untuk Tanah Endapan dan Residu" Yogyakarta: Andi

Zaika, Y dan Rachmansyah, A. 2016. *Improvement of High Expansive Soils by Deep Soil Mixing Method in The Small Scale Laboratory Experiment*. Sixth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Bangkok, Thailand, Nov. 14-16, 2016, ISBN: 978-4-9905958-6-9 C3051



LAMPIRAN

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

Container no. (cup)		1	2	3
Mass of cup + wet soil	gram	22,47	26,69	25,5
Mass of cup + dry soil	gram	16,43	21,37	19,4
Mass of cup	gram	4,18	8,27	5,9
Mass of dry soil, Ms	gram	12,25	13,10	13,5
Mass of water, Mw	gram	6,04	5,32	6,1
Water content, w %	%	49,31	40,61	44,97
WC Average, %	%		44,96	

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

Nomor ring		I	II
Berat ring	gr	18,38	17,7
Diameter ring	cm	2,3	2,3
Tinggi ring	cm	2,6	2,6
Volume ring	cm ³	10,91	10,80
Berat cawan	gram	4,18	8,27
Berat tanah basah + ring	gram	36,67	36,12
Berat tanah kering + ring + cawan	gram	34,81	39,07
Berat tanah	gram	18,29	18,42
Berat tanah kering	gram	12,25	13,1
Berat isi tanah	gr/cm ³	1,68	1,71
Berat air	gram	6,04	5,32
Kadar air (WC)	%	49,31	40,61
Berat isi kering	gr/cm ³	1,12	1,21
Berat isi rata-rata	gr/cm ³		1,69
Berat isi kering rata-rata	gr/cm ³		1,17

Lampiran 3. Kalibrasi Labu Ukur

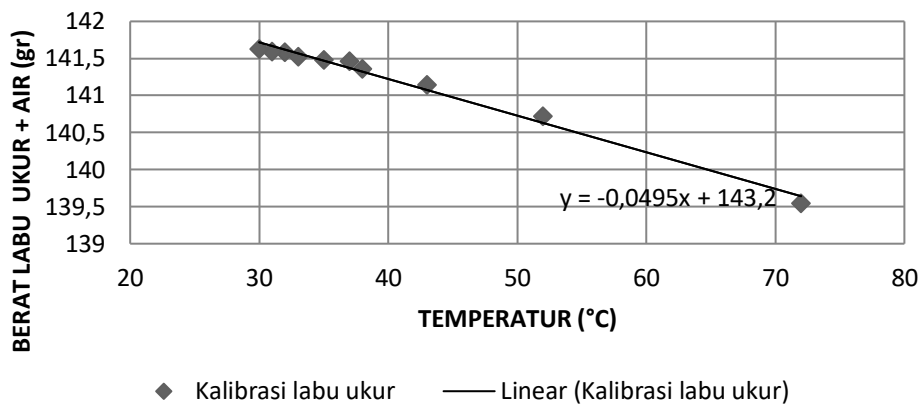
No.	1		2		5	
	Berat Labu Ukur + Air (gram)	temp. (°C)	Berat Labu Ukur + Air (gram)	temp. (°C)	Berat Labu Ukur + Air (gram)	temp. (°C)
1	139,55	72	134,89	76	146,93	74
2	140,72	52	136,35	47	148,56	49
3	141,15	43	136,72	43	148,88	42
4	141,36	38	136,87	38	149,02	35
5	141,47	37	136,98	37	149,09	34
6	141,48	35	137,01	34	149,15	31
7	141,53	33	137,08	33	149,19	31
8	141,59	32	137,1	32	149,20	29
9	141,6	31	137,13	31	149,22	29
10	141,63	30	137,7	30	149,29	28

no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Berat Labu Ukur + Air (gram)	139,6	140,7	141,2	141,4	141,5	141,5	141,5	141,6	141,6	141,6
temperatur (°C)	72	52	43	38	37	35	33	32	31	30

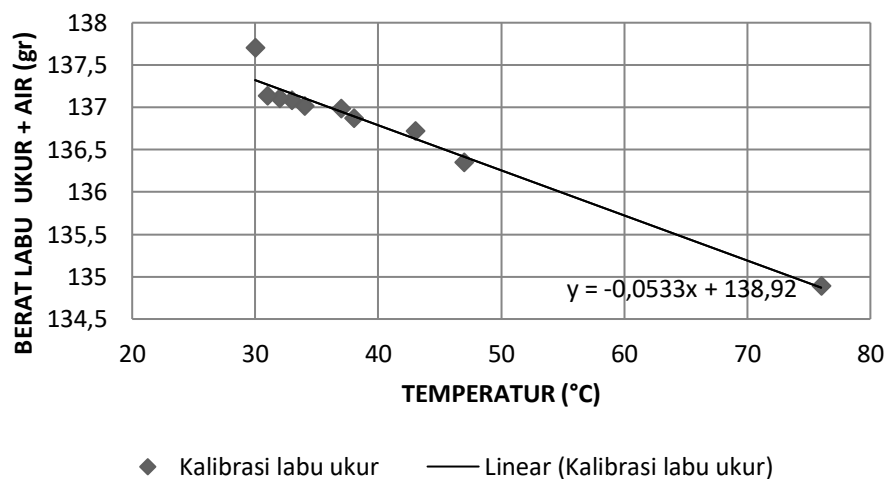
no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Berat Labu Ukur + Air (gram)	134,9	136,4	136,7	136,9	137,0	137,0	137,1	137,1	137,1	137,7
temperatur (°C)	76	47	43	38	37	34	33	32	31	30

no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Berat Labu Ukur + Air (gram)	146,9	148,6	148,9	149,0	149,1	149,2	149,2	149,2	149,2	149,3
temperatur (°C)	74	49	42	35	34	31	31	29	29	28

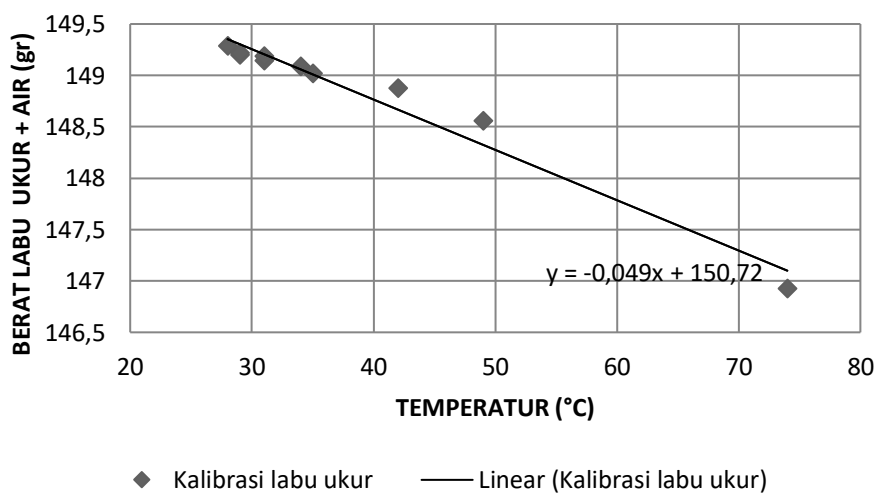
KALIBRASI LABU UKUR No. 1



KALIBRASI LABU UKUR No. 2



KALIBRASI LABU UKUR No. 5



Lampiran 4. Pengujian *Specific Gravity* (Gs)

Labu Ukur	Satuan	1									
Berat Labu Ukur	gr	40,4									
Berat Tanah Kering (Ws)	gr	20									
Berat Labu Ukur + Air + Tanah (W1)	gr	150,68	152,84	153,16	153,39	153,47	153,54	153,57	153,67	153,80	153,83
Suhu	(°C)	55	52	46	40	37	36	34	33	31	30
Berat Labu Ukur + Air (W2)	gr	140,505	140,652	140,946	141,240	141,387	141,436	141,534	141,583	141,681	141,730
Berat jenis Air (Gt)	gr/cm ³	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Berat Jenis Tanah (Gs)	gr/cm ³	2,03562	2,56016	2,56871	2,54777	2,52621	2,53293	2,51130	2,52749	2,53775	2,53165
Rata-Rata Berat Jenis	gr/cm ³	2,48796									

Labu Ukur	Satuan	2									
Berat Labu Ukur	gram	46,3									
Berat Tanah Kering (Ws)	gram	20									
Berat Labu Ukur + Air + Tanah (W1)	gram	148,52	148,70	148,83	148,90	149,02	149,09	149,11	149,18	149,29	149,39
Suhu	(°C)	50	45	42	40	38	36	34	33	31	29
Berat Labu Ukur + Air (W2)	gram	136,250	136,515	136,674	136,780	136,886	136,992	137,098	137,151	137,257	137,363
Berat jenis Air (Gt)	gram/cm ³	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Berat Jenis Tanah (Gs)	gram/cm ³	2,58732	2,55918	2,54972	2,53807	2,54259	2,53100	2,50376	2,50910	2,51036	2,50847
Rata-Rata Berat Jenis	gram/cm ³	2,53396									

Labu Ukur	Satuan	5									
Berat Labu Ukur	gram	43,2									
Berat Tanah Kering (Ws)	gram	20									
Berat Labu Ukur + Air + Tanah (W1)	gram	160,48	160,60	160,81	160,91	160,96	161,03	161,10	161,22	161,36	161,44
Suhu	(°C)	50	45	41	49	37	35	32	31	31	29
Berat Labu Ukur + Air (W2)	gram	148,250	148,495	148,691	148,299	148,887	148,985	149,132	149,181	149,181	149,279
Berat jenis Air (Gt)		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Berat Jenis Tanah (Gs)		2,57400	2,53325	2,53775	2,70673	2,52302	2,51414	2,49004	2,51225	2,55722	2,55135
Rata-Rata Berat Jenis		2,54997									

Gs rata-rata = 2,5240

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

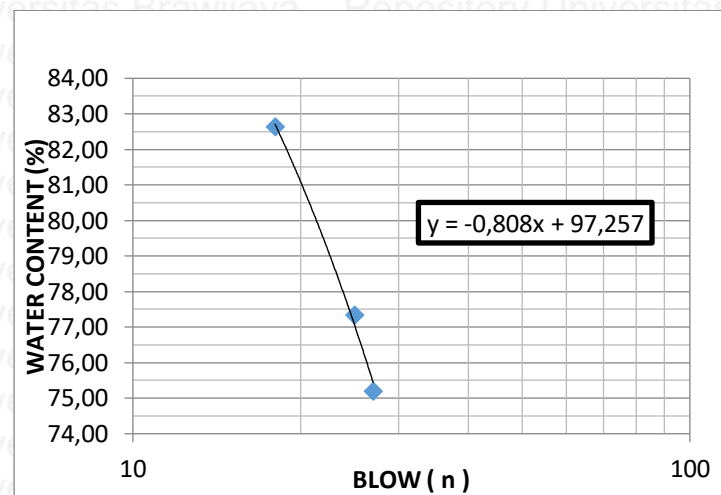
No.	Temperatur, derajat Celcius	Hubungan kerapatan relatif air	Faktor koreksi K
1.	18	0,9986244	1,0004
2.	19	0,9984347	1,0002
3.	20	0,9982343	1,0000
4.	21	0,9980233	0,9998
5.	22	0,9978019	0,9996
6.	23	0,9975702	0,9993
7.	24	0,9973286	0,9991
8.	25	0,9970770	0,9989
9.	26	0,9968156	0,9986
10.	27	0,9965451	0,9983
11.	28	0,9962652	0,9980
12.	29	0,9959761	0,9977
13.	30	0,9956780	0,9974

Sumber: SNI 1964 (2008:4)

Lampiran 6. Pengujian Batas-Batas Atterberg

Pengujian Batas Cair Tanah

Nomor Cawan		I	II	III
Berat Cawan	gram	4,06	8,2	5,7
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	10,27	15,17	14,16
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	7,46	12,13	10,53
Berat Tanah Kering	gram	3,4	3,93	4,83
Berat Air	gram	2,81	3,04	3,63
Kadar Air (Wc)	%	82,65	77,35	75,21
Jumlah Ketukan		18	25	27



Gambar. Pengujian Batas Cair

Perhitungan Nilai Batas Cair (LL):

$$LL = -0,808x + 97,257$$

$$= -0,808(25) + 97,257$$

$$= 77,057\%$$

Pengujian Batas Plastis Tanah

Nomor Cawan		I	II	III
Berat cawan	gram	6,02	6,08	4,13
Berat cawan + tanah basah	gram	10,04	9,04	6,71
Berat cawan + tanah kering	gram	9,12	8,31	6,16
Berat tanah kering	gram	3,1	2,23	2,03
Berat air	gram	0,92	0,73	0,55
kadar air (wc)	%	29,68	32,74	27,09
kadar air rata-rata	%	29,84		

Nilai batas plastis (PL) = 29,84 %

Nilai indeks plastisitas tanah (PI) = LL – PL
 = 77,06 – 29,84 = 47,22 %

Pengujian Batas Susut Tanah

Nomor Cawan		I	II
Berat Cetakan	gram	17,89	18,07
Berat Cawan + Tanah Basah	gram	54,71	55,16
Berat Cawan + Tanah Kering	gram	39,07	39,28
Berat Tanah Basah (m1)	gram	36,82	37,09
Berat air	gram	15,64	15,88
Berat Tanah Kering (m2)	gram	21,18	21,21
Volume Tanah Basah (V)	ml	25	24
Volume Tanah Kering (Vs)	ml	11	10
Kadar Air (wc)	%	73,84	74,87
SL = (wc-((V-Vs)/m2))*100%	%	7,74	8,86
Batas Susut rata-rata	%	8,30	

Nilai batas susut (SL) = 8,30 %

Rekapitulasi Batas-batas Atterberg :

LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
77,06	29,84	8,30	47,22

Lampiran 7. Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli

Diketahui:

Berat cetakan = 6000 gram
 Diameter cetakan = 15,5 cm
 Tinggi cetakan = 11 cm

Kadar air:

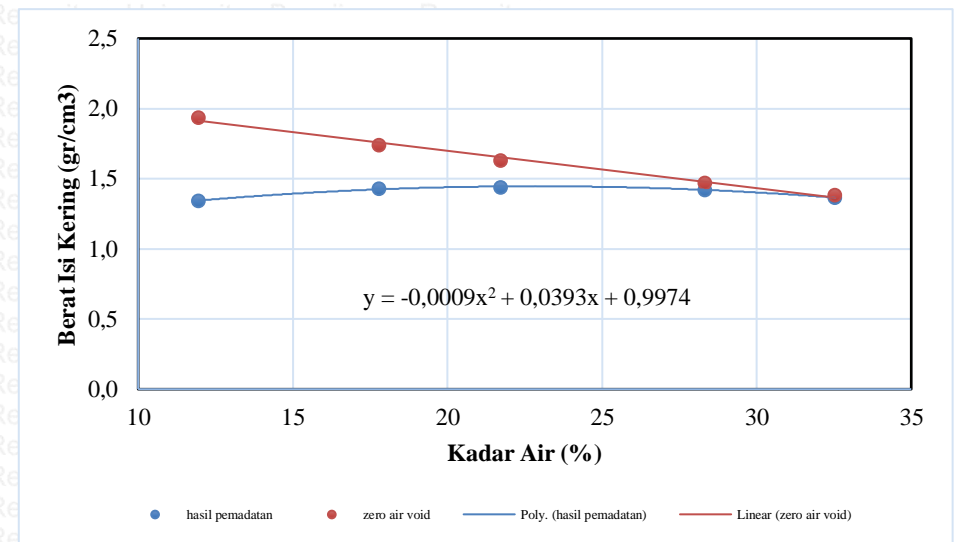
Penambahan Air	ml	500			750			1000			1250			1500		
		Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah
berat cawan	gram	5,81	6,02	4,28	4,23	5,57	5,7	5,57	5,44	5,77	6,08	4,24	5,71	5,93	5,7	5,49
berat cawan + tanah basah	gram	11,83	11,58	10,59	13,34	16,53	15,26	14,67	15,78	17,79	22,09	20,16	26,58	33,23	31,84	25,07
berat cawan + tanah kering	gram	11,17	10,98	9,94	11,97	14,85	13,83	13,04	13,92	15,67	18,56	16,64	21,97	26,43	25,52	20,26
berat air	gram	0,66	0,6	0,65	1,37	1,68	1,43	1,63	1,86	2,12	3,53	3,52	4,61	6,8	6,32	4,81
berat tanah kering	gram	5,36	4,96	5,66	7,74	9,28	8,13	7,47	8,48	9,9	12,48	12,4	16,26	20,5	19,82	14,77
kadar air	%	12,31	12,10	11,48	17,70	18,10	17,59	21,82	21,93	21,41	28,29	28,39	28,35	33,17	31,89	32,57
kadar air rata-rata	%	11,96			17,80			21,72			28,34			32,54		

Berat isi:

penambahan air	ml	500	750	1000	1250	1500
kadar air	%	11,96	17,80	21,72	28,34	32,54
berat mold	gram	6000	6000	6000	6000	6000
berat mold + tanah basah	gram	9120	9500	9640	9780	9760
berat tanah basah	gram	3120	3500	3640	3780	3760
volume mold	cm ³	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61	2075,61
berat isi basah (γ)	gr/cm ³	1,50	1,69	1,75	1,82	1,81
berat isi kering (γ_d)	gr/cm ³	1,34	1,43	1,44	1,42	1,37

Zero Air Void:

penambahan air	ml	500	750	1000	1250	1500
kadar air	%	11,96	17,80	21,72	28,34	32,54
Gs	-	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
Berat jenis air (γ_w)	gr/cm ³	1	1	1	1	1
berat jenis zero air void (γ_{zav})	gr/cm ³	1,94	1,74	1,63	1,47	1,39



Perhitungan berat isi kering maksimum:

$$y = -0,0009x^2 + 0,0393x + 0,9974$$

$$\frac{dy}{dx} = -0,0018x + 0,0393 = 0$$

$$x = 21,833$$

Sehingga,

$$y = -0,0009.(21,833)^2 + 0,0393.(21,833) + 0,9974$$

$$y = 1,4264$$

Maka diperoleh kadar air optimum (OMC) sebesar 21,833% dan berat isi kering maksimum (γ_d) sebesar 1,4264 gr/cm³.

Contoh Perhitungan zero air void:

$$\text{Kadar air (w)} = 21,72\%$$

$$\text{Berat jenis (Gs)} = 2,52$$

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

$$\begin{aligned} \text{Kepadatan kering } \gamma_{zav} (\gamma_{zav}) &= \frac{(Gs \cdot \gamma_w)}{(100 + Gs \cdot w)} \times 100\% \\ &= \frac{(2,52 \times 1)}{(100 + 2,52 \times 21,72)} \times 100\% \\ &= 1,63 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

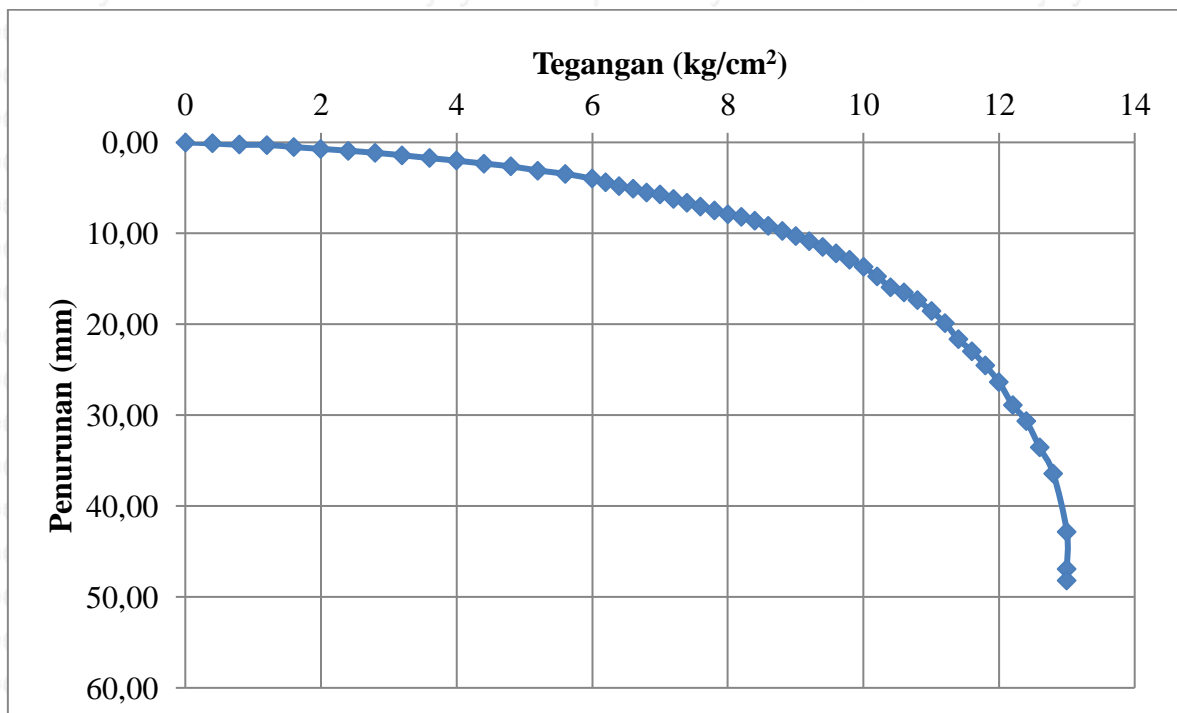
Lampiran 8. Hasil Uji Pembebanan (*Load Test*)

Tabel. Hasil Uji Pembebanan Tanah Asli

Faktor kalibrasi alat = 1

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm ²)
	0	0,00	0,00	0
10	10	0,12	0,12	0,4
10	20	0,26	0,26	0,8
10	30	0,28	0,28	1,2
10	40	0,52	0,52	1,6
10	50	0,72	0,72	2
10	60	0,92	0,92	2,4
10	70	1,15	1,15	2,8
10	80	1,42	1,42	3,2
10	90	1,73	1,73	3,6
10	100	2,01	2,01	4
10	110	2,33	2,33	4,4
10	120	2,64	2,64	4,8
10	130	3,09	3,09	5,2
10	140	3,46	3,46	5,6
10	150	4,01	4,01	6
5	155	4,43	4,43	6,2
5	160	4,80	4,80	6,4
5	165	5,11	5,11	6,6
5	170	5,49	5,49	6,8
5	175	5,75	5,75	7
5	180	6,26	6,26	7,2
5	185	6,67	6,67	7,4
5	190	7,06	7,06	7,6
5	195	7,50	7,50	7,8
5	200	7,91	7,91	8
5	205	8,23	8,23	8,2
5	210	8,65	8,65	8,4
5	215	9,18	9,18	8,6
5	220	9,72	9,72	8,8
5	225	10,28	10,28	9
5	230	10,89	10,89	9,2
5	235	11,54	11,54	9,4

5	240	12,19	12,19	9,6
5	245	12,94	12,94	9,8
5	250	13,73	13,73	10
5	255	14,72	14,72	10,2
5	260	15,97	15,97	10,4
5	265	0,57	16,53	10,6
5	270	1,39	17,36	10,8
5	275	2,58	18,54	11
5	280	3,89	19,86	11,2
5	285	5,70	21,67	11,4
5	290	6,99	22,96	11,6
5	295	8,59	24,55	11,8
5	300	10,42	26,39	12
5	305	12,91	28,88	12,2
5	310	14,67	30,64	12,4
5	315	17,61	33,57	12,6
5	320	20,45	36,42	12,8
5	325	6,42	42,84	13
-	325	10,51	46,93	13
-	325	11,77	48,19	13



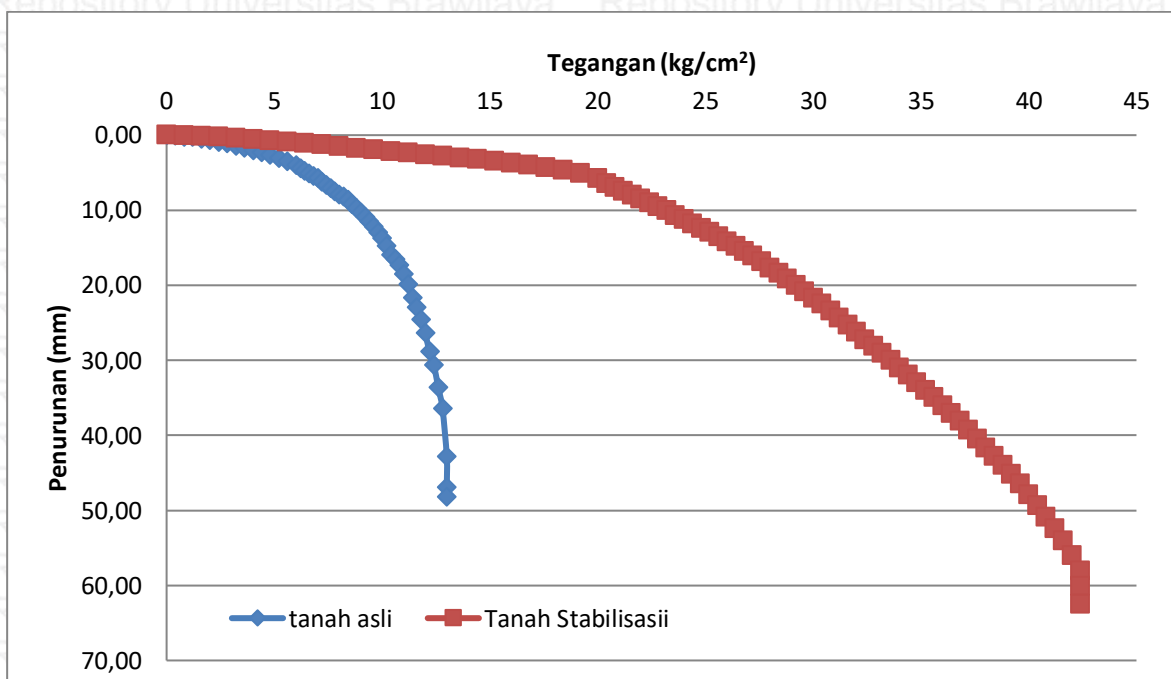
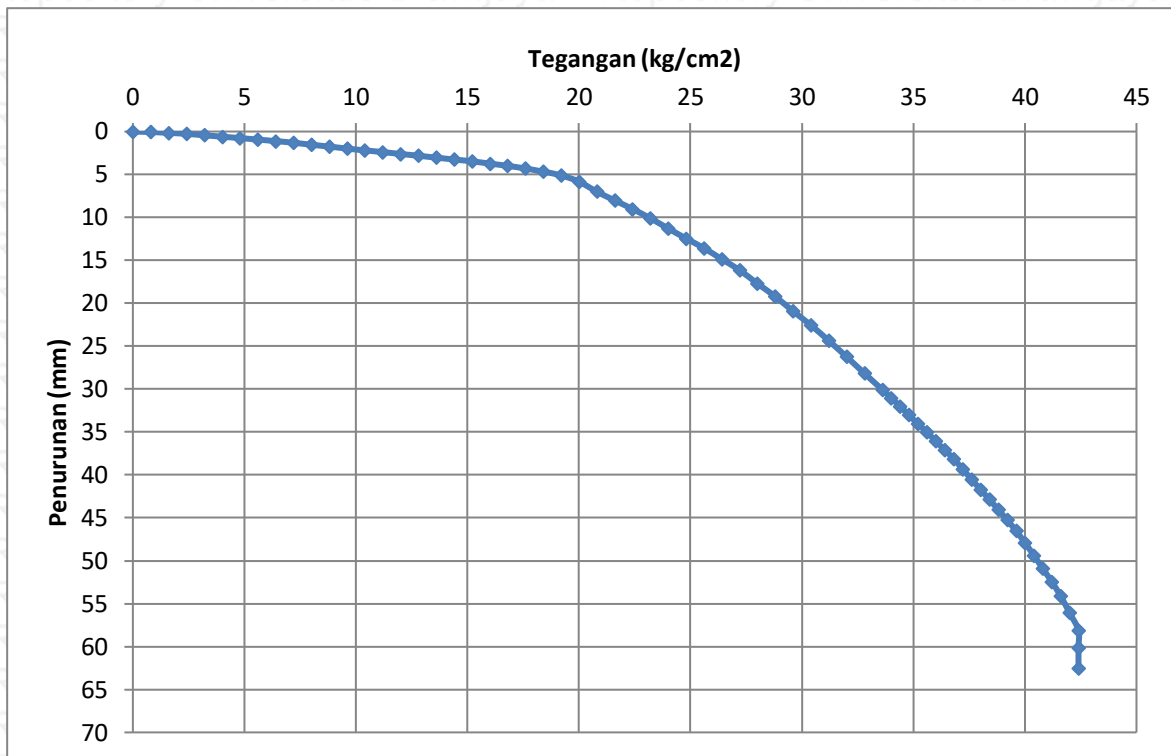
Tabel. Hasil Uji Pembebanan Tanah Stabilisasi 100%

Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm ²)
	0	-4115,00	0,00	0,00
20	20	-4109,00	0,06	0,80
20	40	-4099,50	0,15	1,60
20	60	-4087,00	0,27	2,40
20	80	-4070,50	0,43	3,20
20	100	-4053,00	0,60	4,00
20	120	-4036,67	0,76	4,80
20	140	-4018,67	0,94	5,60
20	160	-4000,33	1,11	6,40
20	180	-3981,00	1,30	7,20
20	200	-3956,67	1,54	8,00
20	220	-3934,67	1,75	8,80
20	240	-3910,67	1,99	9,60
20	260	-3888,67	2,20	10,40
20	280	-3869,00	2,39	11,20
20	300	-3846,00	2,61	12,00
20	320	-3825,00	2,82	12,80
20	340	-3801,67	3,04	13,60
20	360	-3779,67	3,26	14,40
20	380	-3758,00	3,47	15,20
20	400	-3730,33	3,74	16,00
20	420	-3703,67	4,00	16,80
20	440	-3671,67	4,31	17,60
20	460	-3633,67	4,68	18,40
20	480	-3589,33	5,11	19,20
20	500	-3514,67	5,83	20,00
20	520	-3394,67	7,00	20,80
20	540	-3289,33	8,02	21,60
20	560	-3187,00	9,02	22,40
20	580	-3075,33	10,10	23,20
20	600	-2952,67	11,29	24,00
20	620	-2833,33	12,45	24,80
20	640	-2718,00	13,57	25,60
20	660	-2585,33	14,86	26,40
20	680	-2453,67	16,14	27,20

20	700	-2292,33	17,71	28,00
20	720	-2138,00	19,21	28,80
20	740	-1960,67	20,93	29,60
20	760	-1793,33	22,56	30,40
20	780	-1607,33	24,36	31,20
20	800	-1414,67	26,23	32,00
20	820	-1215,33	28,17	32,80
20	840	-1020,33	30,07	33,60
10	850	-920,33	31,04	34,00
10	860	-819,33	32,02	34,40
10	870	-715,33	33,03	34,80
10	880	-609,67	34,06	35,20
10	890	-512,33	35,00	35,60
10	900	-401,67	36,08	36,00
10	910	-297,33	37,09	36,40
10	920	-191,33	38,12	36,80
10	930	-69,00	39,31	37,20
10	940	55,33	40,52	37,60
10	950	176,33	41,69	38,00
10	960	295,67	42,85	38,40
10	970	417,33	44,03	38,80
10	980	543,33	45,26	39,20
10	990	672,00	46,51	39,60
10	1000	816,67	47,91	40,00
10	1010	967,33	49,38	40,40
10	1020	1126,33	50,92	40,80
10	1030	1281,67	52,43	41,20
10	1040	1455,00	54,11	41,60
10	1050	1656,00	56,07	42,00
10	1060	1866,00	58,11	42,40
	1060	2078,00	60,17	42,40
	1060	2322,00	62,54	42,40





Gambar. Hubungan Tegangan dan Penurunan antara tanah asli dengan tanah stabilisasi

100%

Hasil Uji Pembebanan Tanah dengan Stabilisasi Kolom DSM 8% kapur, berpola panels diameter 3,2 cm.

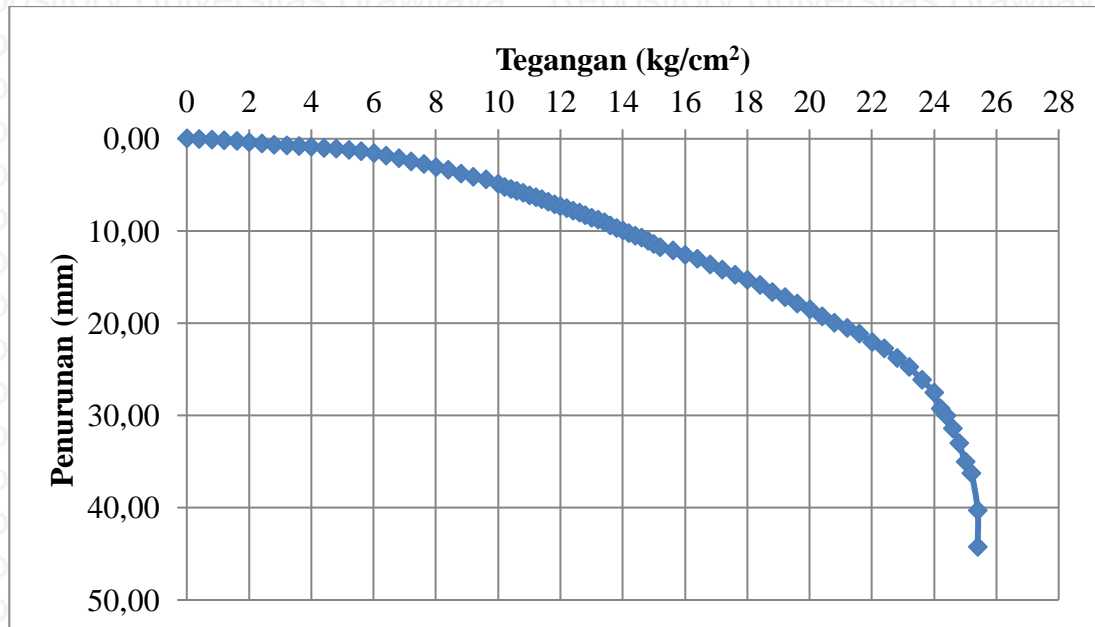
1. Jarak antar kolom (L) = 3,2 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-0,01	0,00	0
10	10	-0,04	0,03	0,4
10	20	-0,08	0,07	0,8
10	30	-0,16	0,15	1,2
10	40	-0,29	0,28	1,6
10	50	-0,41	0,40	2
10	60	-0,55	0,54	2,4
10	70	-0,67	0,66	2,8
10	80	-0,76	0,75	3,2
10	90	-0,84	0,83	3,6
10	100	-0,90	0,89	4
10	110	-0,99	0,98	4,4
10	120	-1,10	1,09	4,8
10	130	-1,21	1,20	5,2
10	140	-1,33	1,32	5,6
10	150	-1,57	1,56	6
10	160	-1,84	1,83	6,4
10	170	-2,11	2,10	6,8
10	180	-2,51	2,50	7,2
10	190	-2,77	2,76	7,6
10	200	-3,09	3,08	8
10	210	-3,36	3,35	8,4
10	220	-3,82	3,81	8,8
10	230	-4,11	4,10	9,2
10	240	-4,42	4,41	9,6
10	250	-4,89	4,88	10
5	255	-5,23	5,22	10,2
5	260	-5,47	5,46	10,4
5	265	-5,67	5,66	10,6
5	270	-5,87	5,86	10,8
5	275	-6,17	6,16	11
5	280	-6,36	6,35	11,2
5	285	-6,58	6,57	11,4
5	290	-6,83	6,82	11,6
5	295	-7,10	7,09	11,8

5	300	-7,31	7,30	12
5	305	-7,55	7,54	12,2
5	310	-7,79	7,78	12,4
5	315	-8,05	8,04	12,6
5	320	-8,32	8,31	12,8
5	325	-8,62	8,61	13
5	330	-8,80	8,79	13,2
5	335	-9,09	9,08	13,4
5	340	-9,38	9,37	13,6
5	345	-9,68	9,67	13,8
5	350	-9,97	9,96	14
5	355	-10,23	10,22	14,2
5	360	-10,50	10,49	14,4
5	365	-10,73	10,72	14,6
5	370	-11,09	11,08	14,8
5	375	-11,40	11,39	15
5	380	-11,76	11,75	15,2
10	390	-12,11	12,10	15,6
10	400	-12,64	12,63	16
10	410	-13,06	13,05	16,4
10	420	-13,63	13,62	16,8
10	430	-14,20	14,19	17,2
10	440	-14,75	14,74	17,6
10	450	-15,32	15,31	18
10	460	-15,88	15,87	18,4
10	470	-16,66	16,65	18,8
10	480	-17,21	17,20	19,2
10	490	-17,88	17,87	19,6
10	500	-18,48	18,47	20
10	510	-19,25	19,24	20,4
10	520	-19,98	19,97	20,8
10	530	-0,51	20,48	21,2
10	540	-1,14	21,12	21,6
10	550	-2,05	22,02	22
10	560	-2,74	22,71	22,4
10	570	-3,82	23,79	22,8
10	580	-4,78	24,76	23,2
10	590	-6,16	26,13	23,6
10	600	-7,54	27,51	24
5	605	-9,29	29,26	24,2



5	610	-10,03	30,00	24,4
5	615	-11,46	31,43	24,6
5	620	-13,01	32,99	24,8
5	625	-15,05	35,02	25
5	630	-16,31	36,28	25,2
5	635	-4,00	40,28	25,4
0	635	-8,00	44,28	25,4



2. Jarak antar kolom (L) = 4 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm

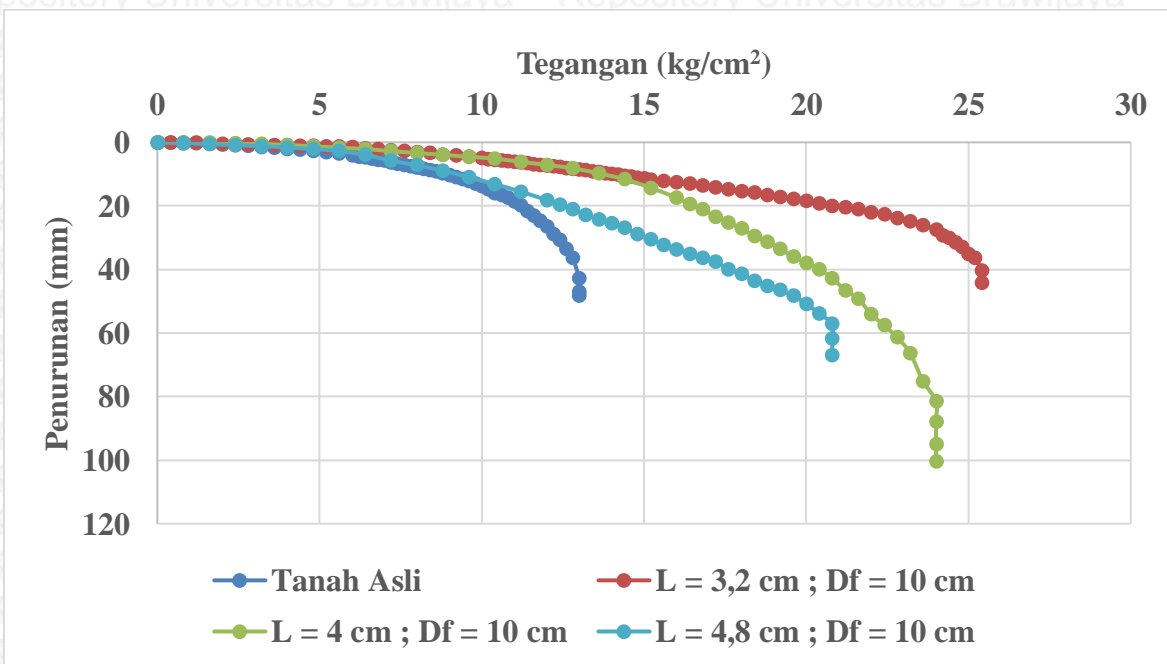
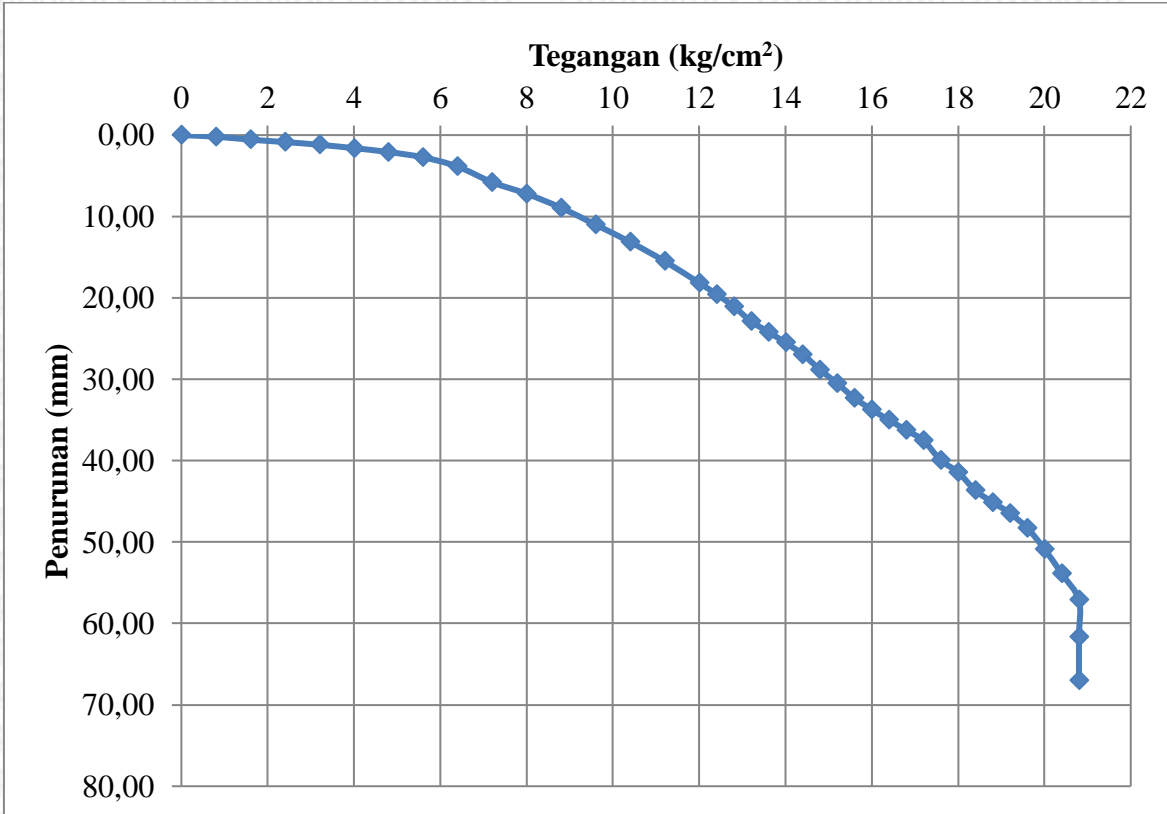
Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-3551,00	0,00	0
20	20	-3547,00	0,04	0,8
20	40	-3539,00	0,12	1,6
20	60	-3524,50	0,26	2,4
20	80	-3501,00	0,49	3,2
20	100	-3464,67	0,84	4
20	120	-3422,00	1,25	4,8
20	140	-3379,33	1,67	5,6
20	160	-3332,67	2,12	6,4
20	180	-3269,67	2,73	7,2
20	200	-3202,67	3,38	8
20	220	-3147,67	3,92	8,8
20	240	-3082,33	4,55	9,6
20	260	-3025,33	5,11	10,4
20	280	-2919,67	6,13	11,2
20	300	-2818,33	7,12	12
20	320	-2710,33	8,17	12,8
20	340	-2546,33	9,76	13,6
20	360	-2359,00	11,58	14,4
20	380	-2080,00	14,29	15,2
20	400	-1757,33	17,43	16
10	410	-1547,33	19,47	16,4
10	420	-1385,67	21,04	16,8
10	430	-1135,00	23,47	17,2
10	440	-950,00	25,27	17,6
10	450	-756,00	27,15	18
10	460	-518,00	29,47	18,4
10	470	-336,00	31,23	18,8
10	480	-104,33	33,49	19,2
10	490	154,33	36,00	19,6
10	500	348,67	37,89	20
10	510	552,67	39,87	20,4
10	520	850,33	42,76	20,8
10	530	1238,00	46,53	21,2
10	540	1506,00	49,13	21,6
10	550	2018,00	54,10	22

3. Jarak antar kolom (L) = 4,8 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	23,39	0,00	0
20	20	23,19	0,20	0,8
20	40	22,82	0,57	1,6
20	60	22,54	0,86	2,4
20	80	22,20	1,20	3,2
20	100	21,79	1,60	4
20	120	21,30	2,09	4,8
20	140	20,66	2,73	5,6
20	160	19,52	3,87	6,4
20	180	17,59	5,80	7,2
20	200	16,18	7,21	8
20	220	14,45	8,94	8,8
20	240	12,37	11,02	9,6
20	260	10,25	13,14	10,4
20	280	7,89	15,50	11,2
20	300	5,23	18,16	12
10	310	20,70	19,56	12,4
10	320	19,19	21,06	12,8
10	330	17,37	22,88	13,2
10	340	16,08	24,17	13,6
10	350	14,75	25,50	14
10	360	13,31	26,94	14,4
10	370	11,43	28,83	14,8
10	380	9,73	30,52	15,2
10	390	7,93	32,32	15,6
10	400	6,52	33,74	16
10	410	18,24	35,02	16,4
10	420	17,00	36,27	16,8
10	430	15,73	37,54	17,2
10	440	13,29	39,98	17,6
10	450	11,85	41,41	18
10	460	9,59	43,68	18,4
10	470	8,17	45,10	18,8
10	480	6,81	46,46	19,2
10	490	5,00	48,26	19,6

10	500	16,94	50,86	20
10	510	13,91	53,89	20,4
10	520	10,66	57,13	20,8
0	520	6,12	61,68	20,8
0	520	14,15	67,01	20,8



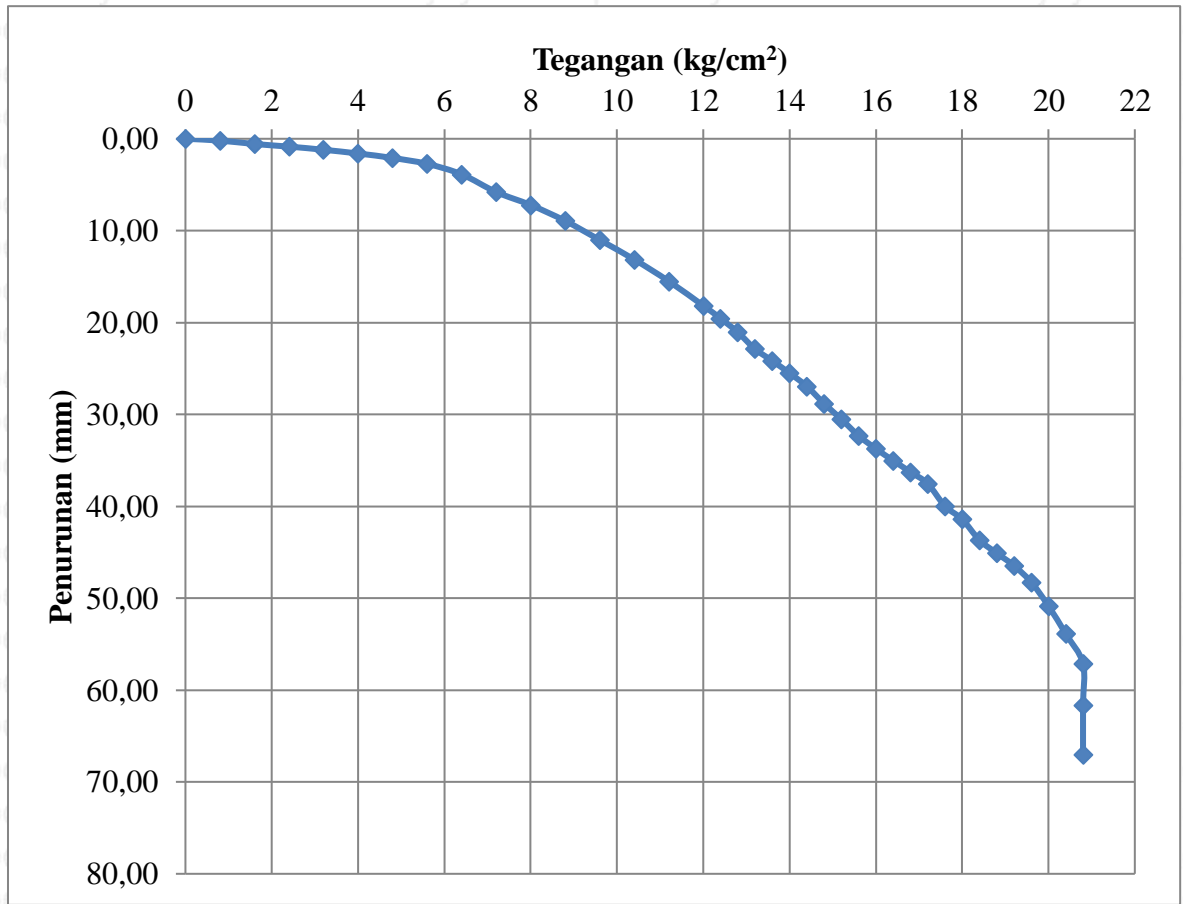
Gambar. Hubungan Tegangan dan Penurunan terhadap kedalaman kolom (D_f) 10 cm

4. Jarak antar kolom (L) = 3,2 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm

Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-4210	0,00	0,00
20	20	-4200	0,09	0,80
20	40	-4188	0,21	1,60
20	60	-4177	0,32	2,40
20	80	-4163	0,46	3,20
20	100	-4149	0,59	4,00
20	120	-4131	0,76	4,80
20	140	-4105	1,02	5,60
20	160	-4057	1,48	6,40
20	180	-4023	1,82	7,20
20	200	-3977	2,26	8,00
20	220	-3940	2,63	8,80
20	240	-3915	2,87	9,60
20	260	-3872	3,29	10,40
20	280	-3825	3,74	11,20
20	300	-3672	5,22	12,00
20	320	-3596	5,96	12,80
20	340	-3522	6,69	13,60
20	360	-3442	7,46	14,40
20	380	-3378	8,09	15,20
20	400	-3290	8,94	16,00
10	410	-3247	9,35	16,40
10	420	-3180	10,01	16,80
10	430	-3125	10,54	17,20
10	440	-3053	11,24	17,60
10	450	-3030	11,46	18,00
10	460	-2984	11,91	18,40
10	470	-2960	12,14	18,80
10	480	-2890	12,82	19,20
10	490	-2871	13,01	19,60
10	500	-2808	13,62	20,00
10	510	-2770	13,99	20,40
10	520	-2702	14,66	20,80
10	530	-2686	14,81	21,20

10	540	-2620	15,45	21,60
10	550	-2597	15,68	22,00
10	560	-2522	16,40	22,40
10	570	-2503	16,59	22,80
10	580	-2441	17,19	23,20
10	590	-2414	17,45	23,60
10	600	-2319	18,38	24,00
10	610	-2296	18,59	24,40
10	620	-2208	19,45	24,80
10	630	-2187	19,66	25,20
10	640	-2115	20,35	25,60
10	650	-2059	20,90	26,00
10	660	-1952	21,94	26,40
10	670	-1909	22,36	26,80
10	680	-1784	23,57	27,20
10	690	-1746	23,94	27,60
10	700	-1649	24,88	28,00
10	710	-1608	25,28	28,40
10	720	-1471	26,61	28,80
10	730	-1400	27,30	29,20
10	740	-1238	28,87	29,60
10	750	-1126	29,96	30,00
10	760	-1049	30,71	30,40
10	770	-891	32,25	30,80
10	780	-725	33,86	31,20
10	790	-551	35,55	31,60
10	800	-368	37,33	32,00
10	810	-176	39,20	32,40
10	820	26	41,16	32,80
10	830	238	43,21	33,20
10	840	460	45,37	33,60
10	850	694	47,64	34,00
10	860	939	50,03	34,40
10	870	1267	53,21	34,80
10	880	1630	56,74	35,20
10	880	1922	59,58	35,20
10	880	2229	62,56	35,20

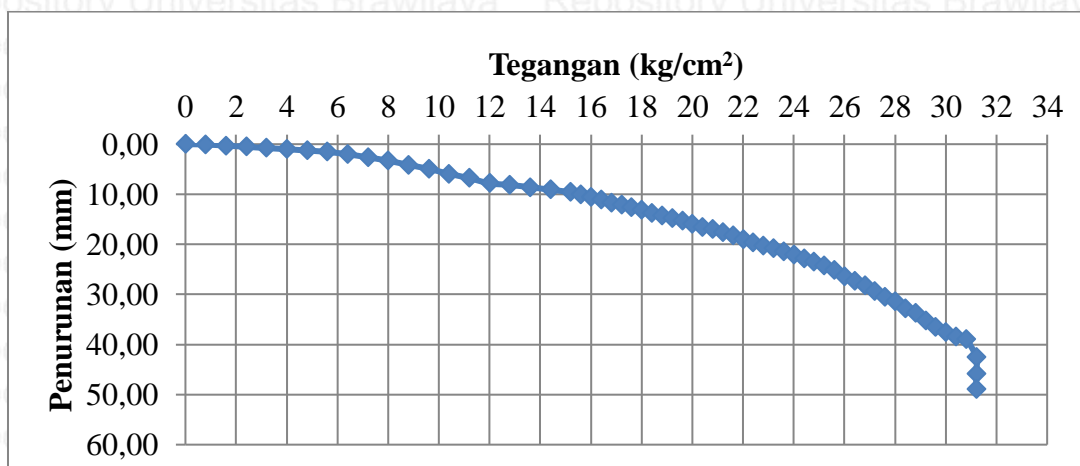


5. Jarak antar kolom (L) = 4 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm

Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	0,00	0,00	0
20	20	-0,07	0,07	0,8
20	40	-0,36	0,29	1,6
20	60	-0,60	0,53	2,4
20	80	-0,85	0,78	3,2
20	100	-1,08	1,01	4
20	120	-1,34	1,27	4,8
20	140	-1,62	1,55	5,6
20	160	-2,09	2,02	6,4
20	180	-2,70	2,63	7,2
20	200	-3,38	3,31	8
20	220	-4,21	4,14	8,8
20	240	-5,01	4,94	9,6
20	260	-5,99	5,92	10,4
20	280	-6,86	6,79	11,2
20	300	-7,90	7,83	12
20	320	-8,21	8,14	12,8
20	340	-8,67	8,60	13,6
20	360	-9,16	9,09	14,4
20	380	-9,68	9,61	15,2
10	390	-10,18	10,11	15,6
10	400	-10,66	10,59	16
10	410	-11,16	11,09	16,4
10	420	-11,75	11,68	16,8
10	430	-12,15	12,08	17,2
10	440	-12,67	12,60	17,6
10	450	-13,21	13,14	18
10	460	-13,86	13,79	18,4
10	470	-14,31	14,24	18,8
10	480	-14,85	14,78	19,2
10	490	-15,38	15,31	19,6
10	500	-15,97	15,90	20
10	510	-16,63	16,56	20,4
10	520	-17,09	17,02	20,8

10	530	-17,70	17,63	21,2
10	540	-18,35	18,28	21,6
10	550	-19,10	19,03	22
10	560	-19,75	19,68	22,4
10	570	-0,08	20,30	22,8
10	580	-0,59	20,81	23,2
10	590	-1,25	21,47	23,6
10	600	-1,83	22,05	24
10	610	-2,57	22,79	24,4
10	620	-3,25	23,47	24,8
10	630	-4,08	24,30	25,2
10	640	-4,99	25,21	25,6
10	650	-6,23	26,45	26
10	660	-7,09	27,31	26,4
10	670	-8,06	28,28	26,8
10	680	-9,10	29,32	27,2
10	690	-10,36	30,58	27,6
10	700	-11,23	31,45	28
10	710	-12,56	32,78	28,4
10	720	-13,55	33,77	28,8
10	730	-15,02	35,24	29,2
10	740	-16,36	36,58	29,6
10	750	-17,33	37,55	30
10	760	-18,22	38,44	30,4
10	770	-18,79	39,01	30,8
10	780	-0,03	42,55	31,2
0	780	-3,35	45,87	31,2
0	780	-9,78	48,98	31,2

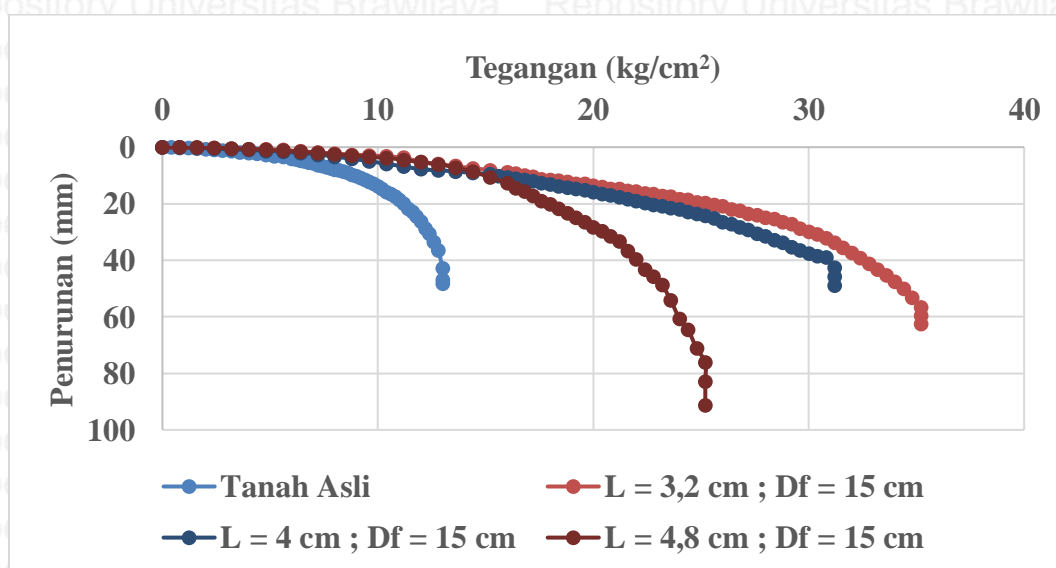
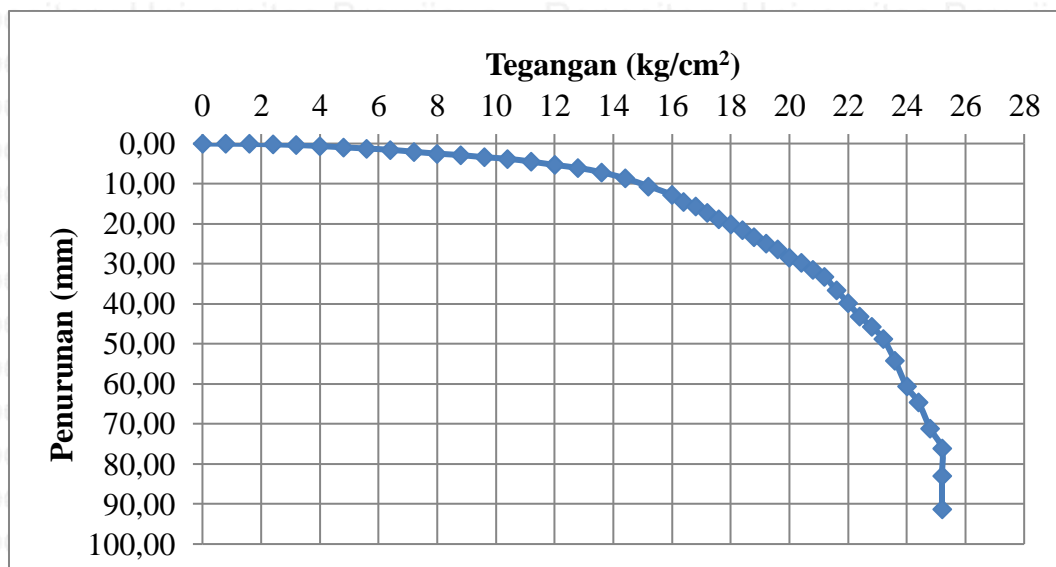


6. Jarak antar kolom (L) = 4,8 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm

Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-4225,00	0,00	0,00
20	20	-4222,02	0,03	0,80
20	40	-4216,18	0,09	1,60
20	60	-4205,13	0,19	2,40
20	80	-4187,75	0,36	3,20
20	100	-4161,55	0,62	4,00
20	120	-4128,25	0,94	4,80
20	140	-4097,11	1,24	5,60
20	160	-4064,53	1,56	6,40
20	180	-4014,00	2,05	7,20
20	200	-3965,49	2,52	8,00
20	220	-3928,55	2,88	8,80
20	240	-3873,50	3,41	9,60
20	260	-3833,38	3,80	10,40
20	280	-3760,97	4,51	11,20
20	300	-3675,50	5,34	12,00
20	320	-3598,70	6,08	12,80
20	340	-3486,57	7,17	13,60
20	360	-3331,00	8,69	14,40
20	380	-3129,11	10,65	15,20
20	400	-2906,66	12,81	16,00
10	410	-2722,25	14,60	16,40
10	420	-2611,83	15,67	16,80
10	430	-2449,24	17,25	17,20
10	440	-2274,25	18,95	17,60
10	450	-2142,73	20,23	18,00
10	460	-1995,75	21,66	18,40
10	470	-1813,75	23,43	18,80
10	480	-1657,23	24,95	19,20
10	490	-1501,58	26,46	19,60
10	500	-1300,25	28,41	20,00
10	510	-1167,77	29,70	20,40
10	520	-990,02	31,43	20,80
10	530	-803,61	33,24	21,20

10	540	-457,54	36,60	21,60
10	550	-131,79	39,77	22,00
10	560	219,25	43,18	22,40
10	570	481,41	45,72	22,80
10	580	792,36	48,75	23,20
10	590	1357,92	54,24	23,60
10	600	2020,58	60,68	24,00
10	610	2426,02	64,62	24,40
10	620	3101,50	71,18	24,80
10	630	3614,36	76,16	25,20
0	630	4319,90	83,02	25,20
0	630	-2011,00	91,32	25,20



Gambar. Hubungan Tegangan dan Penurunan terhadap kedalaman kolom (D_f) 15 cm

7. Jarak antar kolom (L) = 3,2 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm

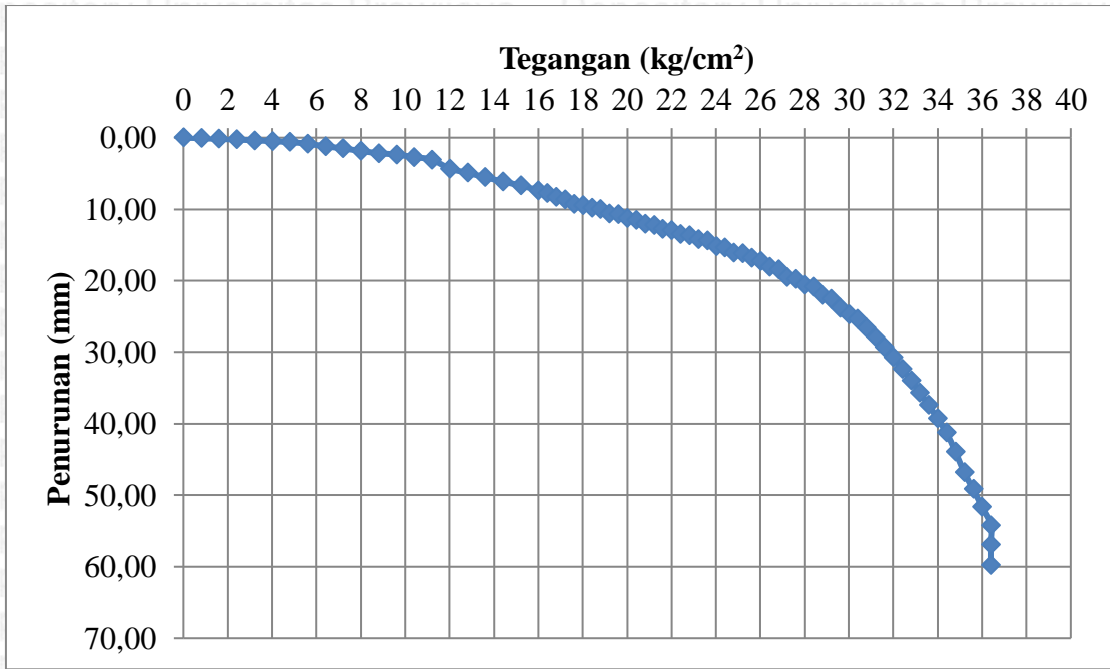
Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-4210	0,00	0,00
20	20	-4202	0,08	0,80
20	40	-4192	0,18	1,60
20	60	-4183	0,26	2,40
20	80	-4171	0,38	3,20
20	100	-4160	0,49	4,00
20	120	-4145	0,63	4,80
20	140	-4123	0,84	5,60
20	160	-4084	1,22	6,40
20	180	-4056	1,50	7,20
20	200	-4018	1,87	8,00
20	220	-3987	2,17	8,80
20	240	-3967	2,37	9,60
20	260	-3931	2,71	10,40
20	280	-3892	3,09	11,20
20	300	-3766	4,31	12,00
20	320	-3703	4,92	12,80
20	340	-3642	5,52	13,60
20	360	-3576	6,16	14,40
20	380	-3523	6,67	15,20
20	400	-3451	7,37	16,00
10	410	-3416	7,72	16,40
10	420	-3360	8,26	16,80
10	430	-3315	8,69	17,20
10	440	-3256	9,27	17,60
10	450	-3237	9,46	18,00
10	460	-3199	9,83	18,40
10	470	-3179	10,02	18,80
10	480	-3121	10,58	19,20
10	490	-3105	10,73	19,60
10	500	-3054	11,23	20,00
10	510	-3022	11,54	20,40
10	520	-2966	12,09	20,80
10	530	-2953	12,22	21,20

10	540	-2898	12,74	21,60
10	550	-2879	12,93	22,00
10	560	-2818	13,53	22,40
10	570	-2801	13,68	22,80
10	580	-2751	14,18	23,20
10	590	-2729	14,39	23,60
10	600	-2650	15,16	24,00
10	610	-2631	15,34	24,40
10	620	-2559	16,04	24,80
10	630	-2541	16,22	25,20
10	640	-2482	16,79	25,60
10	650	-2436	17,24	26,00
10	660	-2347	18,10	26,40
10	670	-2311	18,45	26,80
10	680	-2209	19,45	27,20
10	690	-2177	19,75	27,60
10	700	-2097	20,53	28,00
10	710	-2064	20,85	28,40
10	720	-1950	21,95	28,80
10	730	-1892	22,52	29,20
10	740	-1758	23,82	29,60
10	750	-1666	24,72	30,00
10	760	-1602	25,34	30,40
10	770	-1472	26,60	30,80
10	780	-1335	27,93	31,20
10	790	-1191	29,33	31,60
10	800	-1040	30,80	32,00
10	810	-882	32,34	32,40
10	820	-715	33,95	32,80
10	830	-540	35,65	33,20
10	840	-357	37,43	33,60
10	850	-164	39,31	34,00
10	860	38	41,27	34,40
10	870	308	43,90	34,80
10	880	608	46,81	35,20
10	890	849	49,15	35,60
10	900	1102	51,61	36,00
10	910	1368	54,19	36,40
10	910	1647	56,90	36,40



10	910	1939	59,74	36,40
----	-----	------	-------	-------

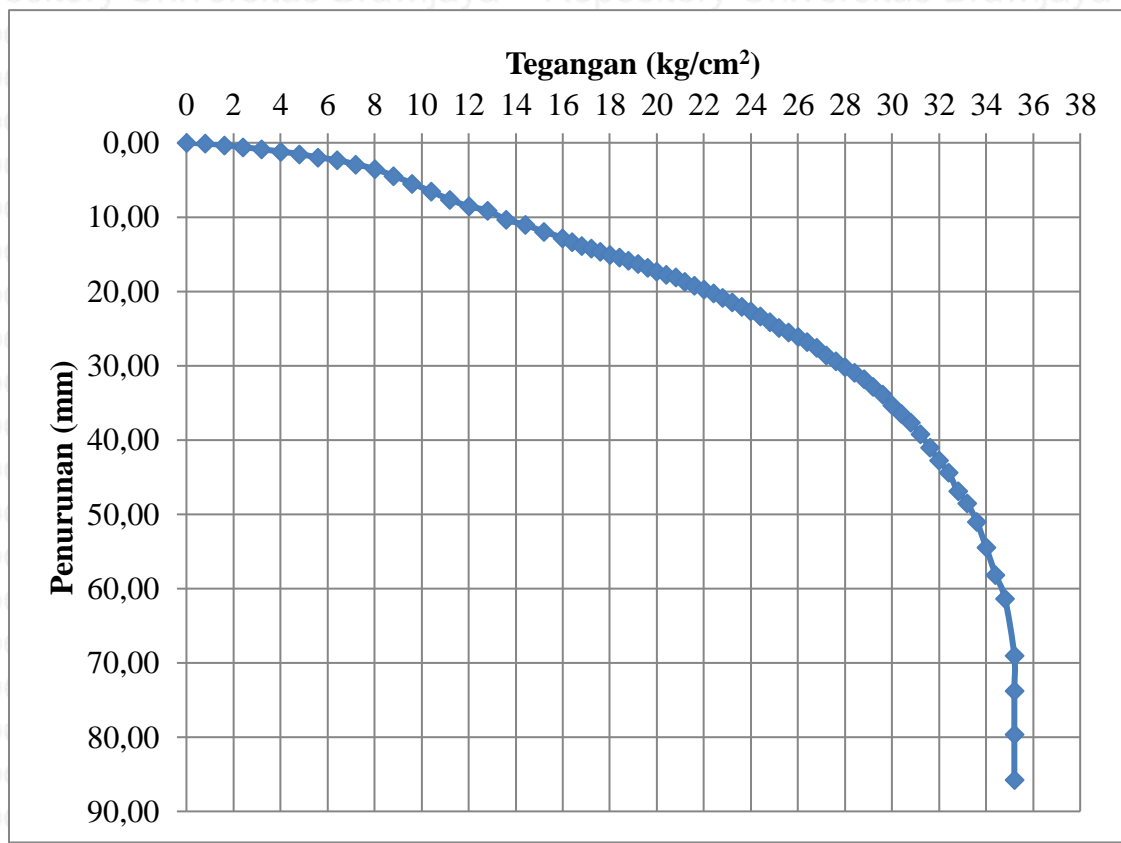


8. Jarak antar kolom (L) = 4 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm

Faktor kalibrasi alat = 0,009715341

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-3593,00	0,00	0
20	20	-3581,50	0,11	0,8
20	40	-3561,00	0,31	1,6
20	60	-3533,00	0,58	2,4
20	80	-3502,50	0,88	3,2
20	100	-3471,67	1,18	4
20	120	-3437,00	1,52	4,8
20	140	-3389,67	1,98	5,6
20	160	-3353,33	2,33	6,4
20	180	-3293,67	2,91	7,2
20	200	-3230,33	3,52	8
20	220	-3135,00	4,45	8,8
20	240	-3030,00	5,47	9,6
20	260	-2917,67	6,56	10,4
20	280	-2806,67	7,64	11,2
20	300	-2711,67	8,56	12
20	320	-2655,00	9,11	12,8
20	340	-2527,33	10,35	13,6
20	360	-2455,67	11,05	14,4
20	380	-2361,67	11,96	15,2
20	400	-2276,33	12,79	16
10	410	-2216,00	13,38	16,4
10	420	-2169,00	13,83	16,8
10	430	-2126,67	14,25	17,2
10	440	-2087,33	14,63	17,6
10	450	-2045,67	15,03	18
10	460	-2003,00	15,45	18,4
10	470	-1961,00	15,86	18,8
10	480	-1916,67	16,29	19,2
10	490	-1867,33	16,77	19,6
10	500	-1814,33	17,28	20
10	510	-1770,67	17,70	20,4
10	520	-1730,00	18,10	20,8
10	530	-1666,33	18,72	21,2

10	540	-1616,00	19,21	21,6
10	550	-1561,00	19,74	22
10	560	-1506,67	20,27	22,4
10	570	-1445,00	20,87	22,8
10	580	-1385,67	21,44	23,2
10	590	-1319,67	22,09	23,6
10	600	-1256,33	22,70	24
10	610	-1186,67	23,38	24,4
10	620	-1113,50	24,09	24,8
10	630	-1033,33	24,87	25,2
10	640	-972,33	25,46	25,6
10	650	-906,00	26,11	26
10	660	-832,67	26,82	26,4
10	670	-757,33	27,55	26,8
10	680	-648,67	28,61	27,2
10	690	-564,67	29,42	27,6
10	700	-485,33	30,19	28
10	710	-406,33	30,96	28,4
10	720	-317,67	31,82	28,8
10	730	-218,33	32,79	29,2
10	740	-108,33	33,85	29,6
10	750	40,33	35,30	30
10	760	161,00	36,47	30,4
10	770	279,00	37,62	30,8
10	780	440,67	39,19	31,2
10	790	631,00	41,04	31,6
10	800	808,67	42,76	32
10	810	972,67	44,36	32,4
10	820	1235,33	46,91	32,8
10	830	1401,67	48,52	33,2
10	840	1653,67	50,97	33,6
10	850	2009,67	54,43	34
10	860	2390,00	58,13	34,4
10	870	2718,00	61,31	34,8
10	880	3513,50	69,04	35,2
0	880	3996,33	73,73	35,2
0	880	4600,67	79,60	35,2
0	880	-1660,00	85,71	35,2

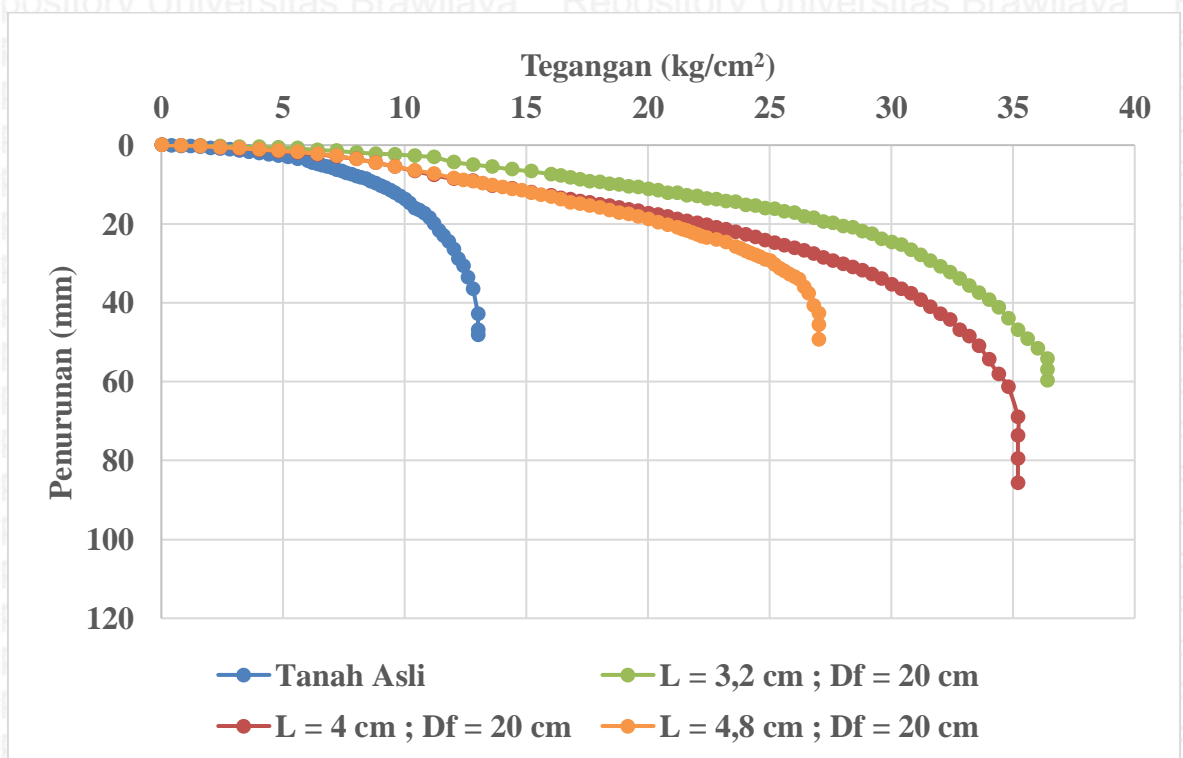
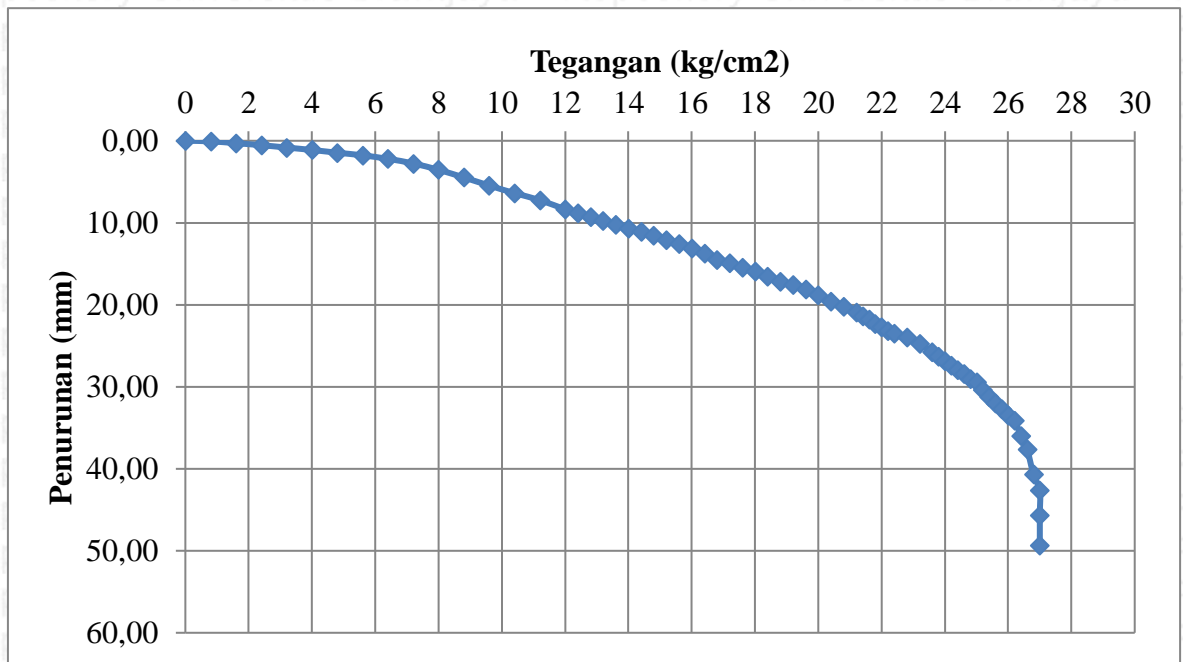


9. Jarak antar kolom (L) = 4,8 cm ; Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm

Interval Beban (kg)	Beban (kg)	Pembacaan LVDT (mm)	Penurunan (mm)	Tegangan (kg/cm^2)
	0	-5,80	0,00	0
20	20	-5,87	0,07	0,8
20	40	-6,10	0,30	1,6
20	60	-6,34	0,54	2,4
20	80	-6,63	0,83	3,2
20	100	-6,92	1,12	4
20	120	-7,26	1,46	4,8
20	140	-7,57	1,77	5,6
20	160	-8,01	2,21	6,4
20	180	-8,57	2,77	7,2
20	200	-9,34	3,54	8
20	220	-10,27	4,47	8,8
20	240	-11,26	5,46	9,6
20	260	-12,18	6,38	10,4
20	280	-13,04	7,24	11,2
20	300	-14,15	8,35	12
10	310	-14,63	8,83	12,4
10	320	-15,05	9,25	12,8
10	330	-15,56	9,76	13,2
10	340	-16,03	10,23	13,6
10	350	-16,48	10,68	14
10	360	-16,91	11,11	14,4
10	370	-17,34	11,54	14,8
10	380	-17,88	12,08	15,2
10	390	-18,36	12,56	15,6
10	400	-18,88	13,08	16
10	410	-19,56	13,76	16,4
10	420	-20,33	14,53	16,8
10	430	-20,68	14,88	17,2
10	440	-21,22	15,42	17,6
10	450	-21,72	15,92	18
10	460	-22,38	16,58	18,4
10	470	-22,94	17,14	18,8
10	480	-7,97	17,53	19,2
10	490	-8,56	18,11	19,6
10	500	-9,28	18,84	20
10	510	-10,04	19,59	20,4

10	520	-10,63	20,19	20,8
10	530	-11,39	20,94	21,2
5	535	-11,80	21,35	21,4
5	540	-12,23	21,79	21,6
5	545	-12,73	22,29	21,8
5	550	-13,17	22,72	22
5	555	-13,59	23,14	22,2
5	560	-13,90	23,46	22,4
10	570	-14,38	23,94	22,8
10	580	-15,16	24,71	23,2
10	590	-16,18	25,73	23,6
5	595	-16,74	26,29	23,8
5	600	-17,29	26,85	24
5	605	-17,83	27,38	24,2
5	610	-18,35	27,91	24,4
5	615	-18,86	28,42	24,6
5	620	-19,52	29,07	24,8
5	625	-19,88	29,43	25
5	630	-20,78	30,34	25,2
5	635	-21,69	31,24	25,4
5	640	-22,44	31,99	25,6
5	645	-23,16	32,71	25,8
5	650	-23,91	33,47	26
5	655	-6,33	34,09	26,2
5	660	-8,20	35,96	26,4
5	665	-9,89	37,65	26,6
5	670	-12,93	40,69	26,8
5	675	-14,89	42,65	27
0	675	-17,90	45,66	27
0	675	-21,60	49,36	27

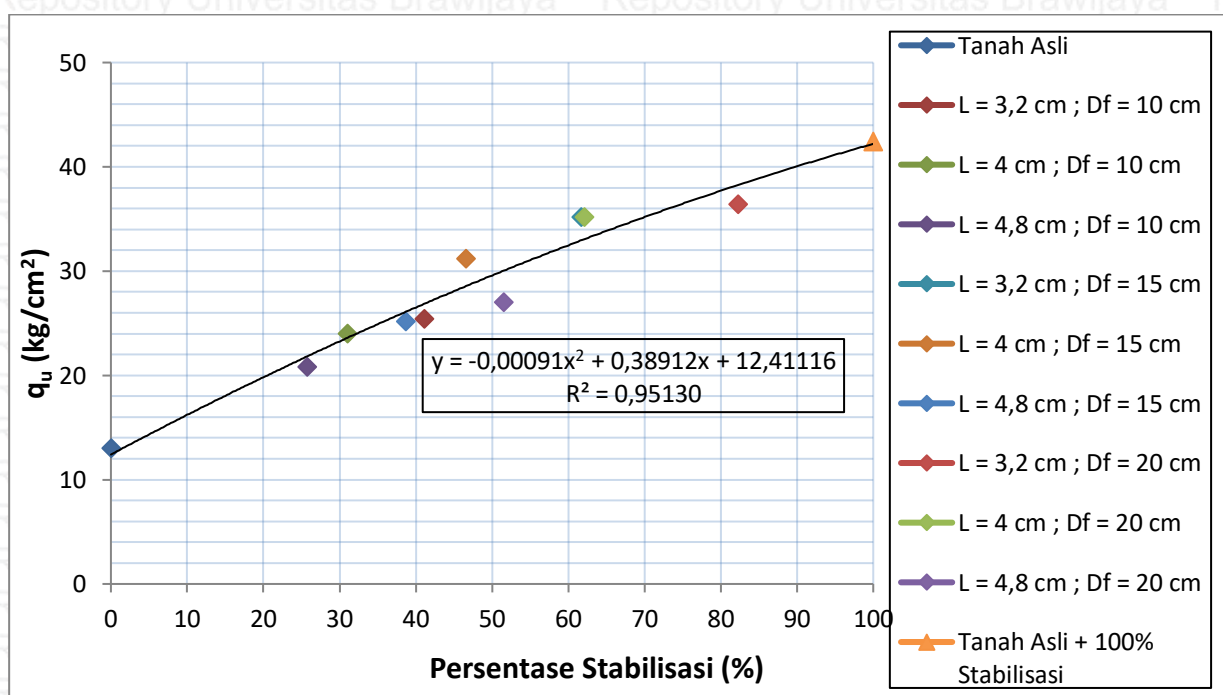




Gambar. Hubungan Tegangan dan Penurunan terhadap kedalaman kolom (D_f) 20 cm

Tabel. Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

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



Gambar. Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

Lampiran 9. Hasil Uji Pengembangan (Swelling)**1. Tanah Asli**

Jumlah Kolom	0
Diameter Kolom	0 cm
Tinggi Sampel	11 cm
Volume Mold	2075,61 cm ³
Volume DSM	0,00 cm ³
Persentase Perbaikan	0,00 %

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0	0
5	50	0,500	0,455
10	87	0,870	0,791
15	116	1,160	1,055
20	139	1,390	1,264
25	156	1,560	1,418
30	172	1,720	1,564
35	187	1,870	1,700
40	201	2,010	1,827
45	215	2,150	1,955
50	228	2,280	2,073
55	237	2,370	2,155
60	247	2,470	2,245
90	296	2,960	2,691
120	331	3,310	3,009
150	366	3,660	3,327
180	401	4,010	3,645
960	533	5,330	4,845
1140	550	5,500	5,000
1500	574	5,740	5,218
1680	610	6,100	5,545
2760	621	6,210	5,645

3120	622,5	6,225	5,659
------	-------	-------	-------

2. Tanah Stabilisasi dengan 7 kolom DSM, diameter kolom 3,2 cm

Jumlah Kolom	7
Diameter Kolom	3,2 cm
Tinggi Sampel	11 cm
Volume Mold	2075,61 cm ³
Volume DSM	619,27 cm ³
Persentase Perbaikan	29,84 %
Jenis Sampel	3 hari

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0	0
5	31	0,314	0,286
10	32	0,325	0,295
15	33	0,332	0,302
20	34	0,344	0,313
25	36	0,356	0,324
30	38	0,378	0,343
35	40	0,395	0,359
40	41	0,409	0,372
45	43	0,427	0,388
50	44	0,441	0,401
55	46	0,462	0,420
60	48	0,482	0,438
65	50	0,499	0,454
70	52	0,515	0,468
75	53	0,533	0,484
80	56	0,556	0,505
85	58	0,582	0,529
90	60	0,600	0,545
120	78	0,776	0,706

960	223	2,234	2,031
1320	235	2,354	2,140
2400	277	2,768	2,516
2760	288	2,876	2,614
3120	296	2,961	2,692

3. Tanah Stabilisasi dengan 6 kolom DSM, diameter kolom 4 cm

Jumlah Kolom	6
Diameter Kolom	4 cm
Tinggi Sampel	11 cm
Volume Mold	2075,61 cm ³
Volume DSM	829,38 cm ³
Persentase Perbaikan	39,96 %
Jenis Sampel	3 hari

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0	0,00
5	4	0,042	0,04
10	6	0,060	0,05
15	8	0,078	0,07
20	9	0,088	0,08
25	10	0,102	0,09
30	11	0,113	0,10
35	13	0,127	0,12
40	14	0,138	0,13
45	15	0,148	0,13
50	16	0,161	0,15
55	17	0,173	0,16
60	18	0,180	0,16
65	19	0,191	0,17
70	20	0,199	0,18
75	21	0,208	0,19

80	22	0,217	0,20
85	23	0,226	0,21
90	23	0,235	0,21
120	28	0,282	0,26
150	33	0,334	0,30
180	38	0,385	0,35
210	45	0,446	0,41
780	179	1,789	1,63
960	189	1,886	1,71
1140	198	1,980	1,80
1320	206	2,061	1,87
2400	235	2,349	2,14
2760	241	2,411	2,19
3120	245	2,448	2,23

4. Tanah Stabilisasi dengan 5 kolom DSM, diameter kolom 4,8 cm

Jumlah Kolom	5
Diameter Kolom	4,8 cm
Tinggi Sampel	11 cm
Volume Mold	2075,61 cm ³
Volume DSM	995,26 cm ³
Persentase Perbaikan	47,95 %
Jenis Sampel	3 hari

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0	0
5	7	0,072	0,066
10	12	0,118	0,107
15	16	0,161	0,146
20	18	0,184	0,167
25	21	0,212	0,193
30	24	0,236	0,215

35	26	0,259	0,236
40	28	0,284	0,258
45	31	0,305	0,278
50	32	0,325	0,295
55	36	0,356	0,324
60	37	0,374	0,340
65	40	0,404	0,367
70	43	0,434	0,395
75	46	0,462	0,420
80	49	0,494	0,449
85	53	0,533	0,484
90	57	0,566	0,515
120	82	0,819	0,744
150	103	1,027	0,934
180	112	1,121	1,019
210	118	1,182	1,075
2760	205	2,054	1,867
3120	214	2,135	1,941

5. Tanah Stabilisasi dengan 7 kolom DSM, diameter kolom 4,8 cm

Jumlah Kolom	7
Diameter Kolom	4,8 cm
Tinggi Sampel	11 cm
Volume Mold	2075,61 cm ³
Volume DSM	1393,36 cm ³
Persentase Perbaikan	67,13 %
Jenis Sampel	3 hari

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0	0
5	9	0,092	0,083
10	15	0,148	0,135

15	19	0,194	0,176
20	23	0,231	0,210
25	26	0,261	0,237
30	29	0,288	0,261
35	31	0,311	0,282
40	33	0,326	0,297
45	34	0,342	0,311
50	35	0,355	0,322
55	37	0,369	0,335
60	38	0,383	0,348
65	39	0,394	0,358
70	41	0,406	0,369
75	42	0,416	0,379
80	43	0,427	0,388
90	45	0,450	0,409
120	52	0,515	0,468
150	58	0,581	0,528
1140	67	0,669	0,608
1320	68	0,683	0,621
1500	70	0,695	0,632
1680	70	0,704	0,640
3120	74	0,741	0,674

6. Tanah Stabilisasi 100%

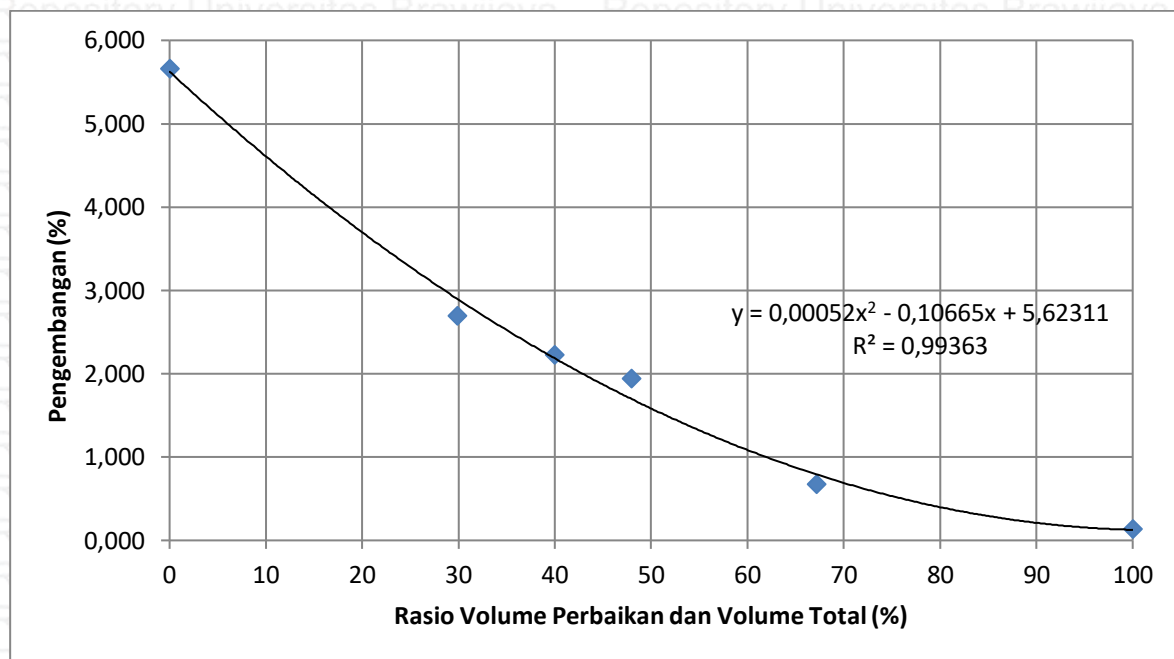
Tinggi Sampel	11	cm
Volume Mold	2075,61	cm ³
Volume DSM	2075.61	cm ³
Persentase Perbaikan	100	%
Jenis Sampel	3	hari

Waktu (menit)	Pembacaan dial	Pengembangan (mm)	Persentase Pengembangan (%)
0	0	0,00	0
5	0	0,00	0,00
10	0	0,00	0,00
15	0	0,00	0,00
20	0	0,00	0,00
25	0,5	0,01	0,00
30	0,5	0,01	0,00
35	1	0,01	0,01
40	1	0,01	0,01
45	2	0,02	0,02
50	2	0,02	0,02
55	2,5	0,03	0,02
60	3	0,03	0,03
90	3	0,03	0,03
120	3,5	0,04	0,03
150	4	0,04	0,04
180	4	0,04	0,04
210	4,5	0,05	0,04
240	5	0,05	0,05
960	7	0,07	0,06
1140	9	0,09	0,08
1500	12	0,12	0,11
1680	13	0,13	0,12
2760	14,5	0,15	0,13
3120	15	0,15	0,14



Tabel Rekapitulasi Hasil Uji Pengembangan (*Swelling*)

Benda Uji	Vol. Benda Uji (V)	Vol. DSM (Vi)	Persentase Perbaikan (Vi/V)	Pengembangan (Swelling)
	cm ³	cm ³	%	%
Tanah Asli	2075,61	0,00	0	5,659
DSM 7 kolom (d=3,2 cm)	2075,61	619,27	29,84	2,692
DSM 6 kolom (d=4 cm)	2075,61	829,38	39,96	2,225
DSM 5 kolom (d=4,8 cm)	2075,61	995,26	47,95	1,941
DSM 7 kolom (d=4,8 cm)	2075,61	1393,36	67,13	0,674
Stabilisasi 100%	2075,61	2075,61	100,00	0,136



Lampiran 10. Dokumentasi Penelitian

Gambar Lokasi Pengambilan Sample Tanah di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro



Gambar Proses Pencampuran Tanah dengan Kapur



Gambar Instalasi Kolom DSM (1)



Gambar Instalasi Kolom DSM (2)



Gambar Instalasi Kolom DSM (3)



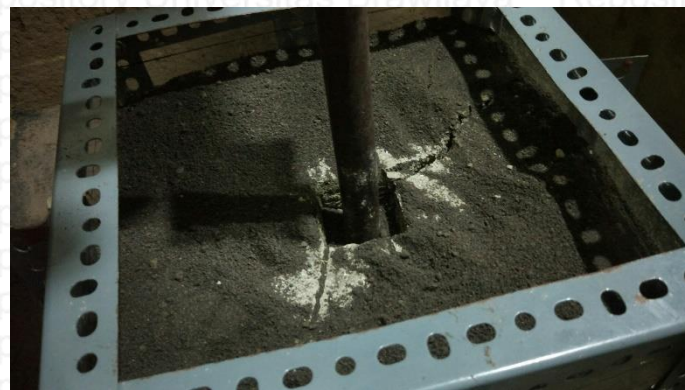
Gambar Instalasi Kolom DSM (5)



Gambar Uji Pembebanan (load test)



Gambar Pembacaan Beban saat Uji Pembebanan



Gambar Kondisi Model Tanah setelah dilakukan Uji Pembebanan (load test)