



**PERBAIKAN TANAH EKSPANSIF (DAYA DUKUNG DAN
PENGEMBANGAN) METODE *DEEP SOIL MIXING* POLA *SINGLE
SQUARE* DIAMETER 4,8 CM DENGAN PENAMBAHAN KAPUR
PADA VARIASI KEDALAMAN DAN JARAK**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



SALWA SAPUTRI

NIM. 135060107111011

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

**LEMBAR PENGESAHAN****PERBAIKAN TANAH EKSPANSIF (DAYA DUKUNG DAN
PENGEMBANGAN) METODE *DEEP SOIL MIXING* POLA *SINGLE
SQUARE* DIAMETER 4,8 CM DENGAN PENAMBAHAN KAPUR
PADA VARIASI KEDALAMAN DAN JARAK****SKRIPSI****TEKNIK SIPIL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**SALWA SAPUTRI****NIM. 135060107111011**

Skrripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 27 Juli 2017

Dosen Pembimbing I**Dosen Pembimbing II**

Dr. Eng Yulvi Zaika, MT
NIP. 19680707 199403 2 002

Ir. Suroso Dipl. HE. M. Eng
NIP. 19520301 197603 1 001

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:

Perbaikan Sifat Tanah Ekspansif (Daya Dukung dan Pengembangan) Metode *Deep Soil*

Mixing Pola Single Square Diameter 4,8 cm dengan Penambahan Kapur pada Variasi

Kedalaman dan Jarak

Nama Mahasiswa : SALWA SAPUTRI

NIM : 135060107111011

Program Studi : Teknik Sipil

Tim Dosen Penguji :

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

Dosen Penguji 2 : Ir. Suroso Dipl. HE. M. Eng

Dosen Penguji 3 : Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D

Tanggal Ujian : Juli 2017

SK Penguji : **824/UN 10. F07/ SK/2017**

LEMBAR ORISINALITAS SKRIPSI

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

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

Malang, 27 Juli 2017

Mahasiswa,

SALWA SAPUTRI

NIM. 135060107111011

RIWAYAT HIDUP

Salwa Saputri lahir di Banyuwangi, 17 Maret 1995, anak ke-2 dari ayah Suharyono Prasetya dan ibu Alwiyah. Menempuh pendidikan SD (Sekolah Dasar) di SDN 1 Kalibaru Kulon, Kalibaru pada tahun 2001. Setelah ini menjalani pendidikan SMP (Sekolah Menengah Pertama) di SMPN 1 Kalibaru lulus tahun 2010, Melanjutkan pendidikan SMA (Sekolah Menengah Atas) di SMA Negeri 2 Jember lulus tahun 2013.

Kemudian, melanjutkan sekolah di Perguruan Tinggi di Universitas Brawijaya Malang, lulus Program Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2017. Selama menjalani kehidupan kampus, ikut berpartisipasi sebagai asisten Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi pada semester 6,7, dan 8, serta aktif dalam organisasi himpunan dalam departemen Amerta selama 3 periode.

Malang, 27 Juli 2017

Penulis



LEMBAR PERUNTUKAN

*Sebagai tanda bakti, hormat dan rasa terima kasih yang tiada terhingga
kupersembahkan karya kecil ini kepada Ibu dan Ayah
yang telah memberikan kasih sayang, segala dukungan dan cinta kasih
yang tiada terhingga yang tiada mungkin dapat kubalas
hanya dengan selembar kertas yang bertuliskan kata cinta dan
persembahan.*

*Semoga ini menjadi langkah awal untuk membuat Ibu dan Ayah bahagia
karena kusadar, selama ini belum bisa berbuat lebih.*

*Untuk Ibu dan Ayah yang selalu membuatku termotivasi dan selalu
menyirami kasih sayang, selalu mendoakanku, selalu menasehatiku
menjadi seseorang yang lebih baik,*

Terima kasih Ibu.. Terima kasih Ayah..

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kami panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa, yang senantiasa memberikan berkat, kekuatan, dan kemudahan kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Perbaikan Tanah Ekspansif (Daya Dukung dan Pengembangan) Metode *Deep Soil Mixing* Pola *Single Square* Diameter 4,8 cm dengan Penambahan Kapur pada Variasi Kedalaman dan Jarak”**.

Skripsi yang disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik ini, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya pengembangan dalam bidang Mekanika Tanah dan Geoteknik. Selain itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

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 sangat membantu dalam kelancaran skripsi ini.
3. Ir. Suroso Dipl. HE., M. Eng. dan Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT. sebagai dosen pembimbing atas segala arahan, masukan dan bimbingan yang telah diberikan.
4. Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D, Dr. Ir. As'ad Munawir, MT, Dr. Ir. Arief Rachmansyah, dan Dr. Ir. Harimurti, MT., sebagai dosen Geoteknik yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
5. Bapak Ibu Dosen Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
6. Ibu, Ayah, Mas Ongki, serta segenap keluarga besar atas doa, dukungan moral serta materi, dan juga nasihat yang membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Pak Ketut, Mbak Indah, Mbak Asmi dan Mbak Meisy yang telah memberikan kemudahan dalam peminjaman dan pemakaian peralatan laboratorium hingga selesainya skripsi ini.
8. Ismiralda, Devina, Afria, Abthal, Gusti, Radius, Adit dan Bayu yang merupakan teman seperjuangan penelitian yang telah bekerja keras dalam menyelesaikan skripsi, banyak membantu dalam penelitian di laboratorium maupun dukungan dalam pengerjaan skripsi.
9. Teman-teman AmerA tercinta yang selalu memberikan dukungan dan doa untuk saya selama ini.



10. Teman-teman asisten Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi yang selalu memberikan saran, semangat serta dukungan dalam pengerjaan skripsi ini sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

11. Miftah Abdul Razaq P., yang membantu saya dalam mencari referensi guna kelancaran saya dalam mengerjakan skripsi ini, serta doa, dukungan dan nasihatnya yang selalu ada.

12. Ilusi, Retno, Mustika, Indira, Khalid, Arif dan Adam atas dukungan semangat dan bantuannya selama saya kuliah di jurusan Teknik Sipil FT-UB.

13. Ayu F dan Nida sebagai teman seperjuangan dalam Treize Team telah memberikan saya arti atas nilai dari sebuah perjuangan dan doa.

14. Tina, Firdaus, Muajib, Fira, Erfinda, Bibil, Ing, dan Okta yang selalu memotivasi untuk segera menyusul kesuksesan kalian.

15. Riza, Frendi, Hilmi, Irwan, Hamdi, Reca, Rizal yang telah berjasa dalam memberi semangat sehingga saya selalu berusaha untuk segera menyelesaikan skripsi ini.

16. Segenap keluarga besar Teknik Sipil Universitas Brawijaya khususnya angkatan 2013 yang membantu selama proses penelitian skripsi ini.

17. Teman-teman Griya Kos Putri Si Merah serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Atas segala keterbatasan kemampuan saya sebagai manusia biasa tentunya skripsi ini jauh dari kata sempurna. Maka dari itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini juga bermanfaat bagi pembaca khususnya untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Malang, 27 Juli 2017

Penyusun



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
RINGKASAN	xv
SUMMARY	xvi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	3
1.3 Rumusan Masalah	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Tujuan Penulisan	5
1.6 Manfaat Penelitian	5
BAB II	7
2.1 Tanah Lempung	7
2.1.1 Pengertian Tanah Ekspansif	8
2.1.2 Karakteristik Tanah Ekspansif	8
2.1.3 Identifikasi Tanah Ekspansif	9
2.2 Mineral Pembentukan Lempung	10
2.2.1. <i>Kaolinite</i> ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot SH_2O$)	10
2.2.2. <i>Illite</i> ($K_2O, MgO, Al_2O_3, SiO_2, H_2O$)	11
2.2.3. <i>Montmorillonite</i> [$(Mg, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$]	12
2.2.4. Sifat-Sifat Fisik Tanah Ekspansif	13
2.3 Stabilisasi Kapur dan Proses Reaksi Lempung-Kapur	14
2.3.1 Stabilisasi Kapur (<i>Lime Stabilization</i>)	15
2.3.2 Proses Reaksi Tanah dan Kapur	17



2.3.3 Manfaat Stabilisasi Kapur terhadap Tanah Lempung	18
2.4 <i>Deep Soil Mixing</i>	19
2.5 Daya Dukung Batas Tanah	25
2.6 Area Pengaruh	26
2.7 <i>Bearing Capacity Improvement (BCI)</i>	27
2.8 Uji Laboratorium	27
2.8.1. Pemodelan <i>Deep Soil Mixing</i> (DSM) Laboratorium	27
2.8.2. Area Stabilisasi Kolom DSM	28
2.8.3. Uji Pembebanan	29
2.8.4. Uji Pengembangan Tanah (<i>Swelling</i>)	31
BAB III	33
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.2 Bahan Penelitian	33
3.3 Peralatan Penelitian	33
3.4 Metode Penelitian	34
3.4.1. Pengujian Pendahuluan	34
3.4.2. Persiapan Benda Uji	35
3.4.3. Uji Pembebanan	38
3.5 Metode Analisa Data	40
3.6 Variabel Penelitian	41
3.7 Rancangan Penelitian	41
3.8 Rancangan Pengujian Pengembangan	43
3.9 Persiapan Benda Uji Pengembangan	43
3.10 Uji Pengembangan	44
3.11 Diagram Alir Penelitian	44
BAB IV	47
4.1. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif Berdasarkan Uji Sifat Fisik Tanah	47
4.2. Penentuan Kadar Air Optimum	49



4.3. Kepadatan Tanah	49
4.4 Analisa Daya Dukung Tanah	50
4.4.1 Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Tanah yang Distabilisasi dengan Kolom DSM	52
4.4.2 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Jarak antar Kolom (L)	53
4.4.3 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)	55
4.5. Analisa Daya Dukung Tanah dengan <i>Tangen Intersection Method</i>	59
4.5.1 Nilai Daya Dukung Tanah yang Distabilisasi Kolom DSM pada Variasi Jarak dengan <i>Tangen Intersection Method</i>	60
4.5.2 Nilai Daya Dukung Tanah yang Distabilisasi Kolom DSM pada Variasi Kedalaman dengan <i>Tangen Intersection Method</i>	61
4.6. Analisis <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCIu) Berdasarkan pada Daya Dukung Batas	62
4.6.1 Perbandingan BCIu pada Variasi Jarak antar Kolom (L)	62
4.6.2 Perbandingan BCI pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)	63
4.7. Analisis <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCIs) <i>Tangen Intersection Method</i>	64
4.7.1 Perbandingan BCIs pada Variasi Jarak antar Kolom (L)	65
4.7.2 Perbandingan BCIs pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)	66
4.8. Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom (L) dan Kedalaman Kolom (Df) terhadap Nilai Daya Dukung Tanah	67
4.9. Pemeriksaan Pengembangan (<i>Swelling</i>)	69
BAB V	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Struktur Penyusun Lempung (a) kaolinite, (b) illite dan (c) montmorillite	7
Gambar 2. Mineral dasar Lempung	10
Gambar 3. (a) Diagram Skematik Struktur Kaolinite (Lambe, 1953)	11
Gambar 4. Diagram Skematik Struktur Illite	11
Gambar 5. (a) Diagram Skematik Struktur Montmorillonite (Lambe, 1953)	12
Gambar 6. Mekanisme Stabilisasi Kapur pada Tanah Lempung	18
Gambar 7. Skema Stabilisasi Massa dan Kolom Stabilisasi	19
Gambar 8. Proses Deep Soil Mixing (DSM)	20
Gambar 9. Hasil Kolom Stabilisasi Metode DSM	21
Gambar 10. Konfigurasi Kolom DSM	21
Gambar 11. Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM	22
Gambar 12. (a) dan (b) Kuat Dukung Tanah	23
Gambar 13. Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $4B = 20$ cm	24
Gambar 14. Perbandingan Peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (D_f)	25
Gambar 15. Penentuan q_u dari Hubungan Beban Persatuan Luas dengan Penurunan	26
Gambar 16. Isobar Tegangan Vertikal di Bawah Suatu Luasan Berbentuk Bujur Sangkar	26
Gambar 17. Sekema Pemodelan Kolom Kapur dalam Box yang Digunakan Muntohar	28
Gambar 18. Tampak Atas Skema Pembebanan terhadap Tanah yang Distabilisasi	28
Gambar 19. Susunan Kolom tipe Square	29
Gambar 20. Skema Uji Pembebanan (Muntohar, 2009)	30
Gambar 21. Hubungan Beban dengan Penurunan	31
Gambar 22. Pemodelan DSM Pola Single Square	37
Gambar 23. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak $1D$	37
Gambar 24. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak $1,25D$	37
Gambar 25. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak $1,5D$	38
Gambar 26. Skema Uji Pembebanan Sampel	38
Gambar 27. Diagram Alir Penelitian	45
Gambar 28. Diagram Alir Uji Pembebanan	45
Gambar 29. Diagram Alir Uji Pengembangan	46
Gambar 30. Distribusi Butiran Hasil Uji Analisa Saringan dan Hydrometer	47
Gambar 31. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem <i>Unified</i>	48



Gambar 32. Hasil Pemadatan Tanah Asli	49
Gambar 33. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Tanah Asli	51
Gambar 34. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Tanah Stabilisasi 100%	51
Gambar 35. Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi	52
Gambar 36. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak antar Kolom.....	53
Gambar 37. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm. 54	
Gambar 38. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm. 54	
Gambar 39. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (D_f) = 20 cm. 55	
Gambar 40. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman	56
Gambar 41. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom $1D = 4,8$ cm . 57	
Gambar 42. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom $1,25D = 6$ cm 57	
Gambar 43. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom $1,5D = 7,2$ cm 58	
Gambar 44. Desain Perkerasan Jalan	58
Gambar 45. Hubungan Daya Dukung dengan Variasi Jarak <i>tangen intersection method</i> .. 60	
Gambar 46. Hubungan Daya Dukung dengan Variasi Jarak <i>tangen intersection method</i> .. 62	
Gambar 47. Hubungan Variasi Jarak antar Kolom terhadap nilai BCI_u	63
Gambar 48. Hubungan Variasi Kedalaman Kolom terhadap nilai BCI	64
Gambar 49. Hubungan Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom terhadap Nilai BCI_s	65
Gambar 50. Hubungan Pengaruh Variasi Kedalaman Kolom terhadap Nilai BCI_s	66
Gambar 51. Grafik Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi	69
Gambar 52. Kalibrasi Labu Ukur No. 1	82
Gambar 53. Kalibrasi Labu Ukur No. 2	82
Gambar 54. Kalibrasi Labu Ukur No. 5	82
Gambar 55. Distribusi Butiran Hasil Uji Analisa Saringan dan Hydrometer	84
Gambar 56. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem <i>Unifed</i>	84
Gambar 57. Hubungan Kadar Air dengan Jumlah Ketukan	85
Gambar 58. Hubungan Berat Isi Kering dengan Kadar Air.....	88
Gambar 59. Desain Perkerasan dan Lapis Pondasi Kelas Jalan I	90
Gambar 60. Beban T Lantai Kendaraan.....	91
Gambar 61. Penyebaran Beban Roda	91

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Hubungan Mineral Tanah dengan Besarnya Aktifitas	8
Tabel 2. Hubungan % Lolos Saringan No. 200 terhadap Potensi Pengembangan.....	8
Tabel 3. Hubungan Batas Susut dengan Tingkat Pengembangan	9
Tabel 4. Hubungan antara Indeks Plastis terhadap Potensial Pengembangan	9
Tabel 5. Hubungan Persentase Pengembangan terhadap Tingkat Pengembangan	10
Tabel 6. Rentang Pertukaran Kation dalam Mineral Tanah Ekspansif	13
Tabel 7. Ukuran Butiran Maksium Kelas A, B dan C.....	16
Tabel 8. Persyaratan Kimia Kapur Tipe I	16
Tabel 9. Persyaratan Kimia Kapur Tipe II.....	17
Tabel 10. Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (Df)	24
Tabel 11. Pembacaan <i>Load Cell</i> dan <i>Dial LVDT</i>	40
Tabel 12. Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom DSM	41
Tabel 13. Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM	42
Tabel 14. <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) untuk Variasi Jarak.....	42
Tabel 15. <i>Bearing capacity Improvement</i> (BCI) untuk Variasi Kedalaman	43
Tabel 16. Rancangan Penelitian untuk Uji Pengembangan	43
Tabel 17. Hasil Uji Sifat Fisik Tanah (<i>Physical Properties</i>)	47
Tabel 18. Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Tingkat PI.....	48
Tabel 19. Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah	52
Tabel 20. Nilai Daya Dukung pada Variasi Jarak antar Kolom terhadap Kedalaman.....	53
Tabel 21. Nilai Daya Dukung pada Variasi Kedalaman Kolom terhadap Jarak.....	56
Tabel 22. Nilai Daya Dukung Ijin.....	59
Tabel 23. Nilai Daya Dukung pada Penurunan yang sama pada Variasi Jarak	60
Tabel 24. Nilai Daya Dukung pada Penurunan yang sama pada Variasi Kedalaman	61
Tabel 25. Nilai BCIu pada Variasi Jarak antar Kolom (L)	63
Tabel 26. Nilai BCI pada Kedalaman Kolom (Df)	64
Tabel 27. Nilai BCIs pada Variasi Jarak antar Kolom.....	65
Tabel 28. Nilai BCIs pada Variasi Kedalaman Kolom	66
Tabel 29. Perbandingan Peningkatan BCIu pada Variasi Jarak dan Kedalaman.....	68
Tabel 30. Perbandingan Peningkatan BCIs pada Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom	68
Tabel 31. Hasil Uji Pengembangan.....	69
Tabel 32. Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi	70

**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. Pengujian Kadar Air Tanah Asli (<i>Undisturbed Sample</i>)	77
Lampiran 2. Pengujian Berat Isi Tanah (<i>Undisturbed Sample</i>).....	78
Lampiran 3. Pengujian Berat Jenis Tanah Asli (<i>Specific Gravity</i>).....	79
Lampiran 4. Kalibrasi Labu Ukur	81
Lampiran 5. Analisa Saringan dan Hydrometer	83
Lampiran 6. Pengujian Batas-batas <i>Atterberg</i>	85
Lampiran 7. Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli.....	87
Lampiran 8. Perhitungan Beban Luar.....	90
Lampiran 9. Hasil Uji Pembebanan Tanah Asli.....	93
Lampiran 10. Hasil Uji Pembebanan Tanah Stabilisasi 100%	95
Lampiran 11. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 10 cm	97
Lampiran 12. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 10 cm	99
Lampiran 13. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 10 cm	101
Lampiran 14. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 15 cm	103
Lampiran 15. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 15 cm	105
Lampiran 16. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 15 cm	107
Lampiran 17. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 20 cm	109
Lampiran 18. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 20 cm	112
Lampiran 19. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 20 cm	114
Lampiran 20. Pengujian Pengembangan (<i>Swelling</i>).....	116
Lampiran 21. Dokumentasi Kegiatan Penelitian.....	123

RINGKASAN

Salwa Saputri, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2017, *Perbaikan Tanah Ekspansif (Daya Dukung dan Pengembangan) Metode Deep Soil Mixing Pola Single Square Diameter 4,8 cm dengan Penambahan Kapur pada Variasi Kedalaman dan Jarak*, Dosen Pembimbing: Yulvi Zaika dan Suroso.

Terdapat banyak karakteristik tanah yang dapat merugikan bagi pembangunan konstruksi apabila tidak segera ditangani, misalnya yaitu tanah ekspansif khususnya di Desa Jelu Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur. Tanah ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai sifat kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air, hal ini tentunya akan berpengaruh terhadap daya dukung dari tanah tersebut.

Stabilisasi tanah adalah usaha untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu. Jenis stabilisasi tanah yang banyak digunakan adalah menggunakan stabilisasi tanah permukaan yang biasa disebut metode pencampuran dangkal, namun apabila tanah yang membutuhkan perbaikan berada pada kedalaman lebih dari 1,5 meter, maka perlu menggunakan metode *Deep Soil Mixing*. Adapun dalam penelitian ini menggunakan metode *Deep Soil Mixing* pola *Single Square* dengan penambahan kapur 8% yang dilakukan dengan cara membuat kolom-kolom tanah stabilisasi dengan variasi jarak dan kedalaman tertentu.

Metode yang dilakukan yaitu membuat benda uji pada *box* akrilik berukuran $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ dengan volume tanah $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$. Pada lapisan bawah diisi dengan pasir kering setebal 3 cm dengan berat 3,15 kg, instalasi kolom DSM berdiameter 4,8 cm terbagi dalam beberapa variasi jarak antar kolom yaitu 1D, 1,25D dan 1,5D serta variasi kedalaman kolom yaitu 10 cm, 15 cm dan 20cm, kemudian pada lapisan atas diisi oleh pasir kering setebal 1 cm dengan berat 1,05 kg. Uji pembebanan dilakukan pada titik pusat permukaan benda uji dengan meletakkan pelat baja berukuran $5 \times 5 \times 2 \text{ cm}^2$ yang dibebani oleh dongkrak hidrolik, besarnya beban yang terjadi ditunjukkan dengan *load cell* dan besarnya penurunan di tunjukkan oleh pembacaan LVDT. Guna mendapatkan beban maksimum dilakukan pembacaan beban hingga tiga kali sama untuk menghasilkan daya dukung batas tanah.

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis didapatkan daya dukung tanah asli adalah 13 kg/cm^2 , sedangkan ketika dilakukan stabilisasi metode *Deep Soil Mixing* dengan penambahan kapur 8% terjadi peningkatan daya dukung pada jarak antar kolom 4,8 cm kedalaman 20 cm sebesar $38,4 \text{ kg/cm}^2$. Selain itu juga pada jarak dan kedalaman kolom yang sama terbukti dapat menurunkan persentase pengembangan menjadi 0,627% dari persentase pengembangan tanah asli yang sebesar 5,66%.

Kata-kata kunci: Tanah Ekspansif, Stabilisasi Tanah, Kapur, *Deep Soil Mixing*, Jarak, Kedalaman, Daya Dukung, *Swelling*.

SUMMARY

Salwa Saputri, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, in July 2017, *Improvement of Expansive Soil (Bearing Capacity and Swelling) with Lime by Single Square Pattern of Deep Soil Mixing (Diameter 4,8 cm) with Depth and Space Variation*, Academic Supervisor: Yulvi Zaika and Suroso.

There are many characteristics of soil which can be detemeton to the structur, such as expansive soil in the Jelu Village, Ngasem District, Bojonegoro, East Java. Expansive soil is composed of clay minerals that have high shrinkage properties in case of changes in water content, this will certainly affect the bearing capacity of the soil.

Soil stabilization is an attempt to improve the mechanical properties of the soil in order to meet certain technical requirements. The type of soil stabilization that is widely used is using surface soil stabilization, commonly called shallow soil mixing, but if the soil that have deep active layer which is more than 1.5 meter, it is necessary to use Deep Soil Mixing Method. This research used single square of Deep Soil Mixing Method with addition of 8% lime which is done by making the column of soil stabilization with depth and space variation.

This research will be focused to determine the effect of variation depth and space stabilization of column soil bearing capacity and the pertage of swelling expansive soil. Expansive soil stabilization process using lime content 8% with deep soil mixing (DSM). Stabilization soil conducted in the laboratory, small scale model use the box size (30x30x30) cm for a test load (load test). In the process DSM's installation column, variations space between the columns (L) = 1D, 1,25D, 1,5D and variations in the depth stabilization (Df) = 10 cm, 15 cm, and 20 cm. after modeling carried out test sampels, and curing sampels test for 3 days prior before loading test.

Based on the results of research, the untreated soil have bearing capacity 13 kg/cm², when stabilized soil by Deep Soil Mixing Method with of 8% lime 38.4 kg/cm² at the space of columns 4.8 cm and depth of 20 cm . At the same distance and depth it can be proved to decrease the percentage of swelling to 0.627% from the percentage swelling of the untreated soil is 5.66%.

Keywords: *Expansive Soil, Soil Stabilization, Lime Deep Soil Mixing, Distance, Length, Bearing Capacity, Swelling*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material dasar yang sangat penting dalam bidang konstruksi adalah tanah, karena pada tanah inilah suatu konstruksi bertumpu. Namun, tidak semua tanah yang ada memiliki kondisi yang baik untuk digunakan sebagai penumpu konstruksi, hal ini disebabkan terdapat beberapa jenis tanah dasar yang bermasalah baik dari segi daya dukungnya maupun dari segi pengembangan (*swelling*) tanahnya. Maka dari itu, dalam perencanaan suatu konstruksi harus dilakukan penyelidikan terhadap karakteristik dan kekuatan tanah terutama sifat-sifat tanah yang mempengaruhi daya dukung tanah dalam menahan beban konstruksi yang ada di atasnya. Terdapat banyak karakteristik tanah yang dapat merugikan bagi pembangunan konstruksi apabila tidak segera ditangani, misalnya yaitu tanah ekspansif. Salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki karakteristik tanah ekspansif yaitu di Desa Jelu Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur. Hal tersebut dapat membuat pemerataan pembangunan di wilayah tersebut sedikit terganggu apabila tidak segera diatasi. Chen (1975) menyatakan bahwa kenaikan kadar air dari tanah lempung mengakibatkan pengembangan volume pada tanah ekspansif, baik pada arah vertikal maupun horizontal. Perubahan volume tanah yang besar ini dapat membahayakan konstruksi yang didirikan di atas tanah ekspansif. Tanah ekspansif tersusun dari mineral lempung yang mempunyai karakter kembang susut yang besar apabila terjadi perubahan kadar air. Tanah akan mengembang (*swelling*) pada kondisi basah dan akan menyusut (*shrinkage*) dalam kondisi kering. Sifat kembang susut pada lempung ekspansif dipengaruhi oleh material *montmorillonite* dari tanah lempung itu sendiri. Mineralogi ini mempunyai karakteristik menyerap dan menyimpan air yang sangat tinggi. Hardiyatmo (2006) menyatakan bahwa tanah lempung yang mengandung mineral *montmorillonite* sangat mudah mengembang akibat dari kenaikan kadar air. Sifat pengembangan dan penyusutan yang fluktuatif dapat mengakibatkan pengaruh yang besar terhadap konstruksi di atasnya, salah satu contohnya yaitu kenaikan (*heave*) atau retak-retak (*cracking*) pada perkerasan jalan.

Walaupun sampai saat ini jumlah kerugian dari kerusakan rumah dan infrastruktur yang diakibatkan oleh sifat kembang susut lempung ekspansif belum tercatat lebih khusus, namun hasil survey dan penelitian yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan Departemen Pekerjaan Umum dan pihak Bina Marga, dilaporkan bahwa kerusakan di beberapa ruas jalan di pulau Jawa, banyak disebabkan oleh sifat kembang susut lempung ekspansif (Mochtar, 1994). Sehingga perlu dilakukan stabilisasi untuk meningkatkan daya dukung tanah pada area tersebut.

Stabilisasi tanah merupakan pencampuran tanah dengan bahan tertentu yang berguna untuk memperbaiki karakteristik tanah teknis tanah, atau dapat pula, stabilisasi tanah adalah usaha untuk merubah atau memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu (Hardiyatmo, 2010). Usaha-usaha untuk memperbaiki sifat-sifat fisis dan mekanis tanah yang kurang baik misalnya tanah lempung telah banyak dilakukan dengan cara seperti: cara fisis, mekanis dan kimiawi. Menurut (Suryolelono, 1999) cara fisis yaitu dengan cara mencampur tanah lempung dengan tanah bergradasi atau menambah serat fiber, sedangkan cara mekanis adalah dengan memberi kekuatan bahan sintesis yang terbuat dari bahan polimerisasi minyak bumi pada tanah lempung, dan cara kimiawi yaitu dengan cara menambahkan zat aditif misalnya berupa semen, kapur, abu terbang (*fly ash*), abu sekam padi serta bahan kimia lainnya. Ranggaesa, R.A. (2016) melakukan penelitian mengenai stabilisasi tanah ekspansif menggunakan campuran kapur 0%, 6%, 8%, 9%, dan 10% lama pemeraman 3 hari dengan menggunakan persentase kadar kapur yang paling stabil pada persentase 8%. Peningkatan nilai CBR keadaan *unsoaked* hingga 22,52% dari 14,76% dan nilai CBR *soaked* dari 4,66% meningkat sebesar 12,04%. Sedangkan nilai kembang (*swelling*) tanah lempung dengan bertambahnya persentase kadar kapur maka nilai kembang semakin kecil.

Jenis stabilisasi tanah yang banyak digunakan adalah menggunakan stabilisasi tanah permukaan yang biasa disebut metode pencampuran dangkal (*shallow soil mixing*). Namun apabila tanah yang membutuhkan perbaikan berada pada tanah dalam atau berada di kedalaman lebih dari 1,5 m, maka perlu menggunakan jenis stabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). *Deep Soil Mixing* (DSM) merupakan salah satu metode stabilisasi tanah dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah yang memiliki karakteristik yang kurang baik dengan kedalaman tertentu menggunakan bantuan *crane* dilengkapi dengan hidrolis dan *augers*.

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Frangky (2016) mengenai *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan penambahan kapur sebesar 10% berpola *single square* dengan diameter kolom 3,8 cm dan panjang 20 cm pada tanah ekspansif dapat meningkatkan daya dukung tanah sebesar 173,3% yaitu dari semula hanya 7,04 kg/cm² meningkat menjadi 19,24 kg/cm². Hubungan tegangan dan regangan tanah memperlihatkan bahwa tanah yang sudah distabilisasi sangat kaku.

Laras, A.W (2016) melakukan penelitian mengenai penambahan 8% kapur dengan lama waktu perawatan terhadap kekuatan dan pengembangan tanah ekspansif hasil dari penelitian menunjukkan bahwa lama waktu perawatan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kenaikan CBR.

Apabila ditinjau dari bidang ketekniksipilan, perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai stabilisasi tanah lempung ekspansif, mengingat banyak kerusakan-kerusakan infrastruktur yang ditimbulkan apabila tidak segera ditangani. Dengan adanya beberapa referensi dan hasil penelitian terdahulu maka diperlukan adanya pengembangan penelitian dan penerapan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) secara praktis. Sehingga penulis melakukan penelitian mengenai pengaruh kedalaman dan jarak pada metode DSM dengan penambahan 8% kapur menggunakan pola *single square* untuk mengetahui besarnya daya dukung tanah akibat dari beban vertikal, yang nantinya diharapkan dapat menjadi referensi atau pertimbangan dalam memilih metode perbaikan tanah ekspansif secara tepat dan praktis khususnya di daerah Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

1.2 Identifikasi Masalah

Beragaman permasalahan yang muncul akibat dari karakteristik tanah ekspansif yang kurang baik yaitu sifat kembang susut tinggi dan daya dukung yang rendah, sehingga perlu adanya penanganan khusus dalam memperbaiki tanah ekspansif tersebut. Stabilisasi tanah ekspansif dengan penambahan bahan aditif seperti kapur adalah merupakan salah satu cara praktis yang dapat diterapkan di lapangan. Pada umumnya di Indonesia stabilisasi ini menggunakan metode pencampuran dangkal, sedangkan apabila kedalaman tanah yang membutuhkan stabilisasi mencapai 1,5 m menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) adalah pilihan alternatif yang paling tepat dan praktis. Namun masih sedikit pengetahuan mengenai metode DSM ini, khususnya di daerah Ngasem, Bojonegoro.

Berdasarkan latar belakang permasalahan tersebut, sehingga perlu dilakukan pengembangan inovasi terhadap penelitian sebelumnya, untuk mengetahui besarnya nilai daya dukung tanah lempung ekspansif. Metode DSM ini dipengaruhi oleh variasi jarak dan kedalaman kolom serta bentuk konfigurasi dengan penambahan zat aditif berupa 8% kapur diharapkan dapat memberikan solusi terhadap permasalahan tanah ekspansif.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan daya dukung dan pengembangan tanah tanpa perbaikan dan 100% perbaikan?
2. Bagaimana perubahan daya dukung bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom?
3. Bagaimana perubahan *swelling* bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom?
4. Berapa jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi daya dukung yang diijinkan di daerah Bojonegoro?
5. Berapa jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi *swelling* yang diijinkan di daerah Bojonegoro?

1.4 Batasan Masalah

Mengingat banyaknya permasalahan yang mencakup pada penelitian ini, sehingga diterapkan beberapa batasan masalah yaitu sebagai berikut:

1. Sampel tanah yang digunakan adalah sampel tanah lempung ekspansif dari Desa Jelu Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Jenis kapur yang digunakan merupakan kapur yang telah terhidrasi atau kapur padam yang umum dijual di toko kawasan Kota Malang.
3. Jenis pasir yang digunakan merupakan pasir yang umum dijual di toko bangunan kawasan Kota Malang.
4. Penelitian ini tidak membahas tentang reaksi kimia dan analisis ekonomi.
5. Metode pencampuran yang digunakan adalah *slurry mixing*. Pemodelan dilakukan di dalam box berukuran (30x30x30) cm dengan volume tanah lempung ekspansif (30x30x20) cm serta penambahan pasir dilapisan atas setebal 1 cm dan lapisan bawah dengan tebal 3 cm.

6. Waktu perawatan (*curing*) sebelum pengujian adalah 3 hari.
7. Variasi jarak antar kolom 1D, 1,25D dan 1,5D sedangkan variasi panjang kolom (kedalaman kolom) adalah 0,5Df, 0,75Df dan 1Df dimana D adalah diameter kolom 4.8 cm dan Df adalah kedalaman pondasi sebesar 20 cm yang merupakan ketebalan tanah lempung ekspansif.
8. Pengujian laboratorium yang dilakukan adalah uji beban hidrolis (*loading test*). Beban uji terbuat dari pelat baja berukuran (5x5x2) cm, sebagai penyalur beban yang merupakan pemodelan dari beban pondasi. Proses pembebanan ini akan dilakukan terus menerus dan berhenti bila tanah sudah mencapai batas runtuh, yaitu ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali beban sama pada penurunan tanah yang berbeda.

1.5 Tujuan Penulisan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui perubahan daya dukung dan pengembangan tanah tanpa perbaikan dan 100% perbaikan.
2. Untuk mengetahui perubahan daya dukung bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom
3. Untuk mengetahui perubahan *swelling* bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* berpola *single square* dengan variasi jarak dan kedalaman kolom
4. Untuk mengetahui jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi daya dukung yang diijinkan di daerah Bojonegoro
5. Untuk mengetahui jarak dan kedalaman kolom dengan pola *single square* yang memberi *swelling* yang diijinkan di daerah Bojonegoro

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini diantaranya yaitu:

1. Untuk kelompok akademisi hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan rujukan atau referensi untuk pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai stabilisasi tanah lempung ekspansif metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan penambahan zat aditif khususnya kapur.



2. Untuk kalangan praktisi hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai sumber informasi atau pertimbangan dalam merancang atau merencanakan sebuah struktur bangunan di atas tanah ekspansif, khususnya di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.



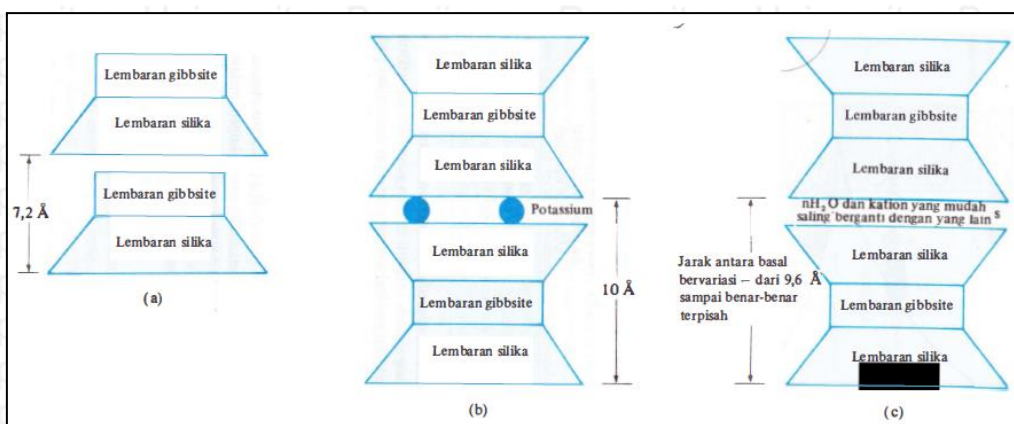
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lempung

Menurut Terzaghi dan Peck (1967) tanah lempung terdiri atas partikel-partikel berukuran mikroskopik dan sub mikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusunan batuan dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Permasalahan yang sering terjadi akibat dari karakteristik tanah lempung yaitu kembang susut yang besar, mengembang pada musim hujan dan menyusut pada musim kemarau. Dampak dari permasalahan tersebut ialah adanya kerugian yang cukup besar dari pengembangan tanah adanya kenaikan (*heave*) dan retak (*cracking*) pada permukaan jalan raya, kelebihan tegangan lateral pada dinding penahan tanah, *heave* dan *bucking* pada *slab* lantai maupun pada dinding penahan serta berkurangnya daya dukung dan kuat geser tanah.

Berdasarkan ASTM D-653 secara fisik batasan ukuran partikel lempung antara 0,002 mm sampai dengan 0,005 mm. selain digolongkan berdasarkan ukuran butir, tanah lempung juga dapat digolongkan berdasarkan kandungan mineralnya. Berdasarkan dari segi materialnya, tanah lempung mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang “Menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah apabila dicampur dengan air” (Grim, 1953 dalam Das, 1995). Terdapat tiga jenis kelompok material penyusun lempung yaitu *kaolinite*, *illite* dan *montmorillite* (Das, 1995).



Gambar 1. Struktur Penyusun Lempung (a) *kaolinite*, (b) *illite* dan (c) *montmorillite*

2.1.1 Pengertian Tanah Ekspansif

Pengertian tanah ekspansif menurut Buku Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan Departemen Pekerjaan Umum tahun 2005, yang dimaksud dengan tanah ekspansif adalah tanah atau batuan yang kandungan lempungnya memiliki potensi kembang susut tinggi akibat perubahan kadar air. Mineral tanah lempung ekspansif memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air, hal ini dipicu pula oleh adanya kandungan *montmorillonite* yang merupakan salah satu mineral dengan aktifitas yang tinggi.

Tabel 1
Hubungan Mineral Tanah dengan Besarnya Aktifitas

Mineral	Aktifitas
<i>Kaolinite</i>	0,33-0,46
<i>Illite</i>	0,9
<i>Montmorillonite</i> (Ca)	1.5
<i>Montmorillonite</i> (Na)	7.2

Sumber: Chen, F.H. (1975)

2.1.2 Karakteristik Tanah Ekspansif

Berdasarkan penelitian Chen (1975) sifat-sifat fisis tanah yang mempengaruhi pengembangan tanah ekspansif diantaranya yaitu kadar air, kepadatan kering (dry density) dan indeks properties. Adanya korelasi yang baik untuk menunjukkan sifat tanah ekspansif berdasarkan dari persentase tanah lempung, batas cair dan tahanan penurunan di lapangan seperti yang terlihat pada tabel berikut.

Tabel 2
Hubungan % Lolos Saringan No. 200 terhadap Potensi Pengembangan

Data Laboratorium dan Lapangan			Kemungkinan Pengembangan % total Perubahan Volume	Tekanan Pengembangan (ksf)	Potensi Pengembangan
% Lolos no. 200	Batas Cair %	Tahanan Penurunan Standar (blow/ft)			
>95	>60	>30	>10	>20	Sangat tinggi
60-95	40-60	20-30	3-10	5-20	Tinggi
30-60	30-40	10-20	1-5	3-5	Sedang
<30	<30	<10	<1	1	Rendah

Sumber: Chen, F.H. (1975)

Tabel 2 diatas digunakan untuk memprediksi kemungkinan perubahan volume pada tanah ekspansif. Kemudian indeks plastis juga ikut mempengaruhi tingkat pengembangan yang disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3
Hubungan Batas Susut dengan Tingkat Pengembangan

% Koloid	IP	Batas Susut	Kemungkinan Pengembangan (% Perubahan Volume)	Tingkat Pengembangan
>28	>35	>11	>39	Sangat tinggi
20-31	25-41	7-12	39-50	Tinggi
13-23	15-28	10-16	50-63	Sedang
<15	<18	<15	<63	Rendah

Sumber: Chen, F.H. (1975)

2.1.3 Identifikasi Tanah Ekspansif

Menurut Chen (1975) terdapat beberapa cara untuk mengetahui apakah tanah tersebut termasuk ke dalam kategori tanah ekspansif atau tidak dan seberapa besar potensi pengembangan, diantaranya:

- Identifikasi mineralogy dengan cara:
Difraksi sinar-X, analisa diferensial termal, analisa kimia dan mikroskop electron.
- Cara tidak langsung:
Tanah ekspansif dapat diidentifikasi berdasarkan nilai indeks plastis seperti terlihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4
Hubungan antara Indeks Plastis terhadap Potensial Pengembangan

Indeks Plastisitas (%)	Potensi Pengembangan
0-15	Rendah
15-35	Sedang
20-55	Tinggi
>55	Sangat tinggi

Sumber : Chen, F.H. (1975)

- Cara langsung
Cara langsung dalam menentukan penentuan pengembangan tanah ekspansif dilakukan menggunakan alat konsolidasi satu dimensi, guna mengetahui angka prosentase pengembangan. Untuk mengetahui tingkat pengembangan suatu tanah ekspansif dapat dilihat pada tabel 5.

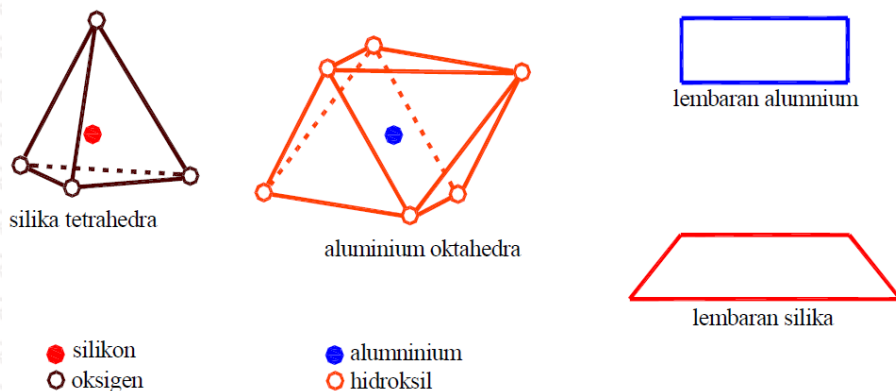
Tabel 5
Hubungan Persentase Pengembangan terhadap Tingkat Pengembangan

Persentase Pengembangan	Tingkat pengembangan
>100%	Kritis
50%-100%	Batas
>50%	Aman

Sumber: Chen, F.H. (1975)

2.2 Mineral Pembentukan Lempung

Mineral pembentuk lempung sebagian besar terdiri dari dua mineral dasar yaitu *silicon tetrahedron* dan *aluminium octahedron*. Lembaran yang berbentuk tetrahedral merupakan kombinasi dari silika tetrahedron yang terdiri dari atom Si yang dikelilingi oleh ion oksigen pada keempat ujung-ujungnya. Sedangkan untuk lembaran yang berbentuk oktahedral merupakan kombinasi dari alumina octahedron yang terdiri dari atom Al yang dikelilingi oleh hidroksil yang dapat berupa ion aluminium, magnesium, besi dan atom lainnya. (Holtz and Kovacs, 1981).

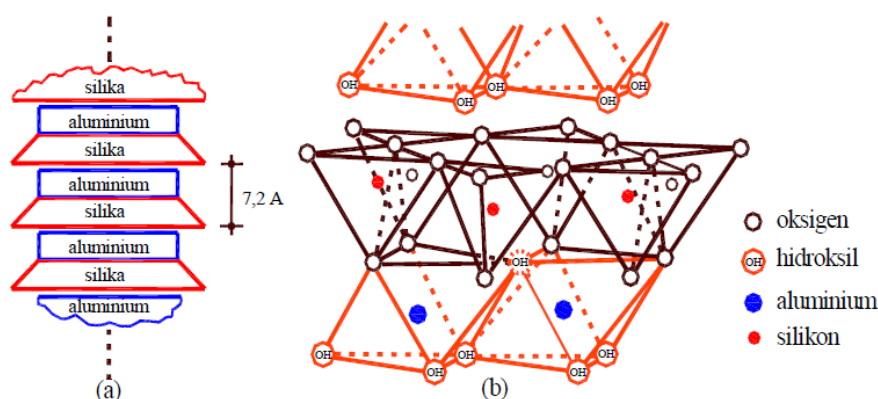


Gambar 2. Mineral dasar Lempung

2.2.1. Kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot SH_2O$)

Menurut Lashari (2000), *kaolinite* tersusun dari satu lembar silika tetrahedral dengan satu lembar alumina octahedral, keduanya terikat oleh ikatan hidrogen. Setiap lapis yang terdiri dari satu lembar silika tetrahedral dan satu lembar alumina octahedral. Satuan struktur *kaolinite* terdiri dari rangkaian rantai hydrogen, 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 kedalamnya. 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).

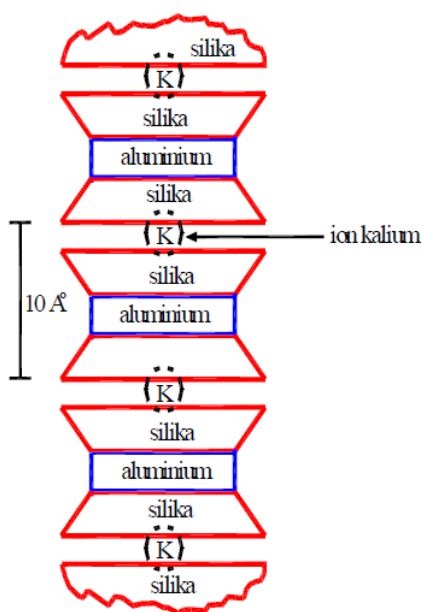


Gambar 3. (a) Diagram Skematik Struktur *Kaolinite* (Lambe, 1953)

(b) Struktur Atom *Kaolinite* (Grim, 1959)

2.2.2. *Illite* (K_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O)

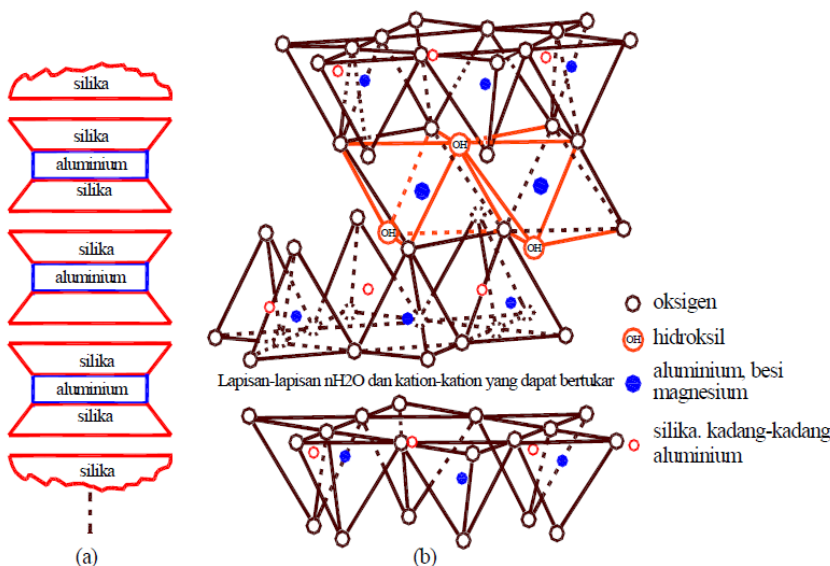
Mineral *illite* terdiri dari sebuah lembaran aluminium oktahedral yang terikat diantara dua lembaran silika tetrahedral, dalam lembaran oktahedral terdapat substitusi parsial aluminium oleh magnesium dan besi, dan dalam lembaran tetrahedral terdapat pula substitusi silikon oleh aluminium. Struktur *illite* 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 4. Diagram Skematik Struktur *Illite*

2.2.3. *Montmorillonite* [(Mg,Ca)O-Al₂O₃-5SiO₂-nH₂O]

Montmorillonite yang kadang-kadang disebut *smectite* dalam satu lapis tersusun dua lembar silica mengapit satu lembar alumina (*gibbsite*). Ujung tetrahedral tercampur dengan hidroksil dari ujung oktahedral sehingga menjadikan ikatan menyatu. Karena gaya ikatan yang lemah diantara ujung lembaran silica dan terdapat kekurangan muatan negative pada ujung oktahedral, maka air dan ion yang berpindah-pindah dapat masuk dan membuat lapis terpisah, sehingga kristal *montmorillonite* dapat sangat kecil tetapi dalam waktu sama dapat menarik air dengan kuat. Dari sifat ini, tanah yang mengandung *montmorillonite* mengalami kembang susut yang besar. Struktur *montmorillonite* serupa dengan *strukturillite*, tetapi ion pemisahannya berupa H₂O yang sangat mudah lepas. Mineral ini dapat dikatakan tidak stabil karena rekatan antara lapisan terutama diakibatkan oleh gaya *Van der Waals*, dan area tersebut 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 oktahedral. Perubahan-perubahan tersebut mengakibatkan terjadinya daya *negative netto* yang relatif tidak seimbang 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 5. (a) Diagram Skematik Struktur *Montmorillonite* (Lambe, 1953)

(b) Struktur Atom *Montmorillonite* (Grim, 1959)

Luas permukaan spesifik, mengidentifikasi besarnya kemampuan dalam pertukaran kation tanah *ekspansif*, semakin besar luas permukaan spesifik akan memperbanyak terjadinya pertukaran kation. Mineral *montmorillonite* adalah jenis mineral yang mempunyai luas permukaan spesifik terbesar dengan kapasitas pertukaran kation terbesar dari kelompok mineralnya, disusul berturut-turut mineral *illite* dan *kaolinite*. Banyaknya pertukaran kation pada jenis mineral dan luas permukaan spesifik jenis mineral dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6

Rentang Pertukaran Kation dalam Mineral Tanah Ekspansif

Parameter	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Tebal	(0,5-2) μm	(0,003-0,1) μm	<9,5 A°
Diameter	(0,5-4) μm	(0,5-10) μm	(0,05-10) μm
Luas spesifik (m^2/gr)	10-20	65-180	50-840
Pertukaran kation (miliekivalen per 100 gr)	3-15	10-40	70-80

Keterangan: 1 A° (angstrom) = 0,1 μm

Sumber: Chen, F.H. (1975)

2.2.4. Sifat-Sifat Fisik Tanah Ekspansif

Terdapat beberapa sifat fisik tanah ekspansif yang perlu diperhatikan, karena hal ini mempengaruhi terhadap karakteristik tanah ekspansif tersebut. Sifat-sifat fisik tanah ekspansif tersebut yaitu:

a. Kadar Air (*Moisture Content*)

Apabila kadar air dari suatu tanah ekspansif tidak berubah berarti tidak ada perubahan volume dan struktur yang ada di atas lempung tidak akan terjadi pergerakan yang diakibatkan oleh pengangkatan (*heaving*). Tetapi apabila terjadi penambahan kadar air maka akan terjadi pengembangan volume (*expansion*) dengan arah vertikal dan horizontal. Menurut Holtz dan Seed dalam Chen, F.H (1975) menyatakan bahwa tanah lempung dengan kadar air alami dibawah 15% biasanya menunjukkan indikasi berbahaya. Lempung akan mudah menyerap air sampai kadar air 35% dan mengakibatkan kerusakan struktur akibat pemuaian tanah. Sebaiknya apabila tanah lempung tersebut mempunyai kadar air diatas 30%, itu berarti bahwa pemuaian tanah terjadi dan pemuaian lebih lanjut akan kecil sekali.

b. Berat Jenis Kering (*Dry Density*)

Berat jenis lempung merupakan indikasi lain dari ekspansifitas tanah. Tanah dengan berat jenis kering lebih dari 110 pcf (1,762 gr/cm³) menunjukkan potensi pengembangan yang tinggi. Apabila dalam penggalian tanah dijumpai kesulitan yang menyangkut kondisi tanah yang keras seperti batu, hal ini merupakan indikasi bahwa tanah tersebut mempunyai sifat tanah ekspansif. Berat jenis kering lempung juga dapat dilihat dari hasil tes *standart penetration resistance*-nya. Lempung dengan *penetration resistance* lebih dari 15 biasanya menunjukkan adanya potensi *swelling*.

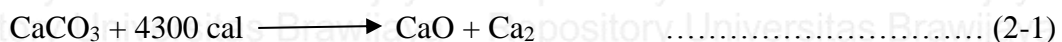
c. Kelelahan Pengembangan (*Fatigue of Swelling*)

Tanda-tanda *fatigue of swelling* telah diselidiki dengan cara penelitian siklus / pengulangan pembasahan dan pengeringan yang berulang. Hasil penelitian menunjukkan pemuai tanah pada siklus pertama lebih besar daripada siklus berikutnya. Kelelahan pemuai tanah diindikasikan sebagai jawaban yang melingkupi hasil penelitian tersebut. Sehingga dapat disimpulkan bahwa suatu pavement yang ditempatkan pada tanah ekspansif yang mengalami siklus iklim yang menyebabkan terjadinya pengeringan dan pembasahan secara berulang mempunyai tendensi untuk mencapai suatu stabilitas setelah beberapa tahun atau beberapa kali siklus basah-kering.

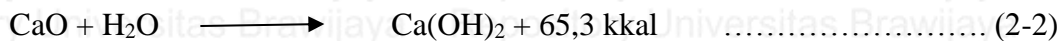
2.3 Stabilisasi Kapur dan Proses Reaksi Lempung-Kapur

Istilah kapur pada umumnya memiliki tiga pengertian yaitu kalsium karbonat (CaCO₃) untuk keperluan penelitian, kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) yang terhidrasi atau kapur padam (*slake lime*) dan kalsium oksida (CaO) yang disebut kapur hidup atau *quick lime*. Sebagai bahan stabilisasi biasanya digunakan kapur mati (*slake lime*) atau kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) dan kapur hidup atau kalsium oksida (CaO). Kalsium oksida lebih efektif pada kasus-kasus tertentu, kapur jenis ini mempunyai kelemahan dalam pelaksanaannya yaitu dapat dengan mudah membuat alat-alat menjadi berkarat. Dari kekurangan tersebut maka kapur padam (Ca(OH)₂) lebih sering digunakan dalam proses stabilisasi tanah.

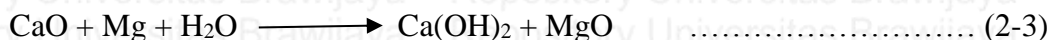
Kapur diperoleh dari hasil pembakaran kalsium karbonat (batu kapur alami) sampai semua karbondioksida terbakar. Reaksi pembentukan kalsium oksida (*quick lime*) adalah sebagai berikut:



Dalam persamaan 2.1 merupakan reaksi proses pembakaran kapur menjadi kalsium oksida. Proses tersebut pada dasarnya endotermis, secara teoritis 4300 kalori panas diperlukan untuk mengurai 1 mol CaCO_3 menjadi kalsium oksida (CaO). Kalsium oksida dapat dihidrasi berdasarkan reaksi berikut:



Proses tersebut sangat sulit jika menggunakan MgO dan terjadi di bawah tekanan. Pada keadaan normal terjadi reaksi sebagaiberikut:



Hasil produksi adalah kapur dolomit monohidrat dan senyawa $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$ yang terbentuk dibawah tekanan. Dengan demikian kalsium hidroksida sekali lagi ditransformasikan dan reaksinya adalah:



Asam karbonat diproduksi dari kandungan karbon dioksida pada tanah dan air bebas. Apabila tercampur dengan struktur tanah terjadi transformasi dan penggumpalan partikel-partikel lempung, sehingga membentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar. Akibat kejadian ini akan mengubah batas-batas Atterberg dan sifat pemadatan. (Lashari, 2000).

2.3.1 Stabilisasi Kapur (*Lime Stabilization*)

Proses pencampuran tanah dengan kapur berarti suatu stabilisasi kimia dengan bahan tambahan dalam bentuk kalsium oksida atau kalsium hidroksida dengan suatu proses pemadatan dengan kandungan air tertentu. Akibat penambahan kalsium maka akan mereduksi plastisitas tanah, meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah, mengurangi penyerapan air dan volume pengembangan (*swelling potential*) yang diakibatkan oleh air.

Berdasarkan proses yang telah diuraikan, maka kapur akan mempengaruhi sifat-sifat fisik dan mekanik tanah. Pengaruh sifat mekanis tanah campur kapur sangat bervariasi tergantung pada: jenis tanah, jenis dan kadar kapur, masa tunggu perawatan (*curing*) dan faktor-faktor lain seperti variasi penggunaan air.

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

1. Kapur berbentuk butiran halus.
2. Jenis kapur yang digunakan sebagai bahan stabilisasi adalah kapur padam dan kapur tohor.

3. Spesifikasi ini mencakup persyaratan kapur tipe I dan II, yang masing-masing tipe terisi dari kelas A, B, C. kapur tipe I adalah kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi, dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4% berat. Kapur tipe II adalah kapur magnesium atau dolomite yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan paling tinggi 36% berat. Sedangkan ukuran butiran maksimum kelas A, B dan C dapat dilihat pada tabel 7. Untuk persyaratan kimia kapur tipe I dan II dapat dilihat pada tabel 8 dan tabel 9.

Tabel 7
Ukuran Butiran Maksium Kelas A, B dan C

No	Bahan	Kelas		
		A	B	C
1	Butiran kapur yang tertahan di atas saringan Nomor 30 (0,6 mm)	2%	3%	4%
2	Butiran kapur yang tertahan di atas saringan Nomor 200 (0,075 mm)	12%	14%	18%

Tabel 8
Persyaratan Kimia Kapur Tipe I

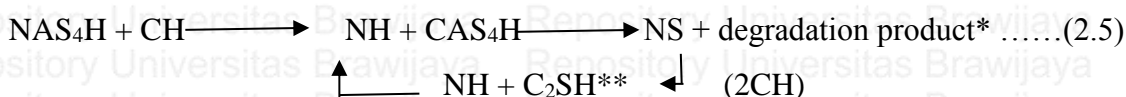
No	Senyawa	Kelas		
		A	B	C
1	Hydrate Alkalinity CA(OH) ₂ .	90%	85%	75%
2	Kalsium Oksida Anhidrat (CO) Maksimum.	7%	8%	9%
3	Kadar Air Bebas Maksimum	3%	3%	2%

Tabel 9
Persyaratan Kimia Kapur Tipe II

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%

2.3.2 Proses Reaksi Tanah dan Kapur

Menurut Ingles dan Matcalf (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 dalam pelaksanaan pemadatan. Proses reaksi kimia stabilisasi tanah lempung menggunakan kapur adalah sebagai berikut:



Keterangan: S = SiO₂

H = H₂O

A = Al₂O₃

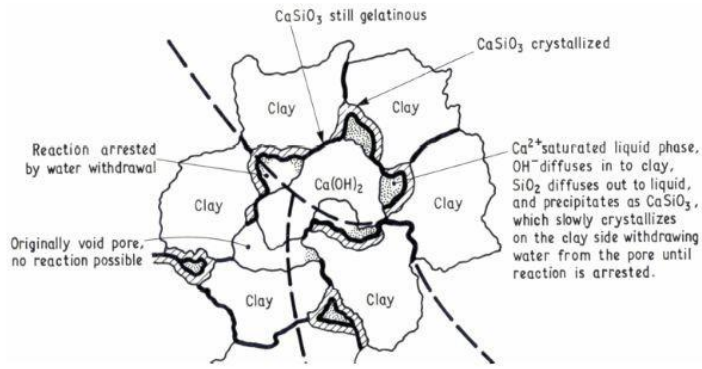
C = CaO

N = Na₂O

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

**atau CSH

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



Gambar 6. Mekanisme Stabilisasi Kapur pada Tanah Lempung

Stabilisasi tanah dengan campuran kapur mampu meningkatkan kekuaran (*strength*) disebabkan oleh tiga reaksi yang terjadi, yaitu:

1. Reaksi flokulasi yaitu pengikatan mineral lempung akibat terjadinya pertukaran ion dari tanah Na^+ dan H^+ dengan ion Ca^{++} dari kapur
2. Cementation (pengerasan) / reaksi pozzolan (*pozzolanic reaction*) antara kalsium dari kapur dengan SiO_2 , Al_2O_3 dan FeO_3 dari tanah.
3. Reaksi penyerapan air (*hydration of soil*)

2.3.3 Manfaat Stabilisasi Kapur terhadap Tanah Lempung

Kapur merubah sifat fisik secara besar pada tanah lempung pada tingkat yang bervariasi (Nastional Lime Association, 1982) dalam Siti Hardiyanti, 2003.

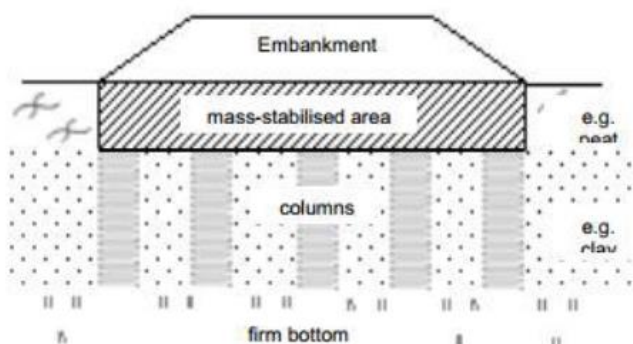
1. Nilai indeks plastisitas (PI) turun tajam secara umum batas cair (LL) berkurang dan batas plastis tanah (PL) bertambah.
2. Tanah merupakan suatu gumpalan pada prinsip mengurai butiran pengikat (*binder*) pada tanah.
3. Kapur dan air mempercepat penghancuran gumpalan lempung selama *mixing* sebagai hasil dari *point* dua dan *point* tiga tanah menjadi lepas sehingga mudah dikerjakan.
4. Kapur membuat tanah basah menjadi cepat kering sehingga mempercepat pelaksanaan pemadatan.
5. Sifat mengembang dan menyusut tanah lempung berkurang secara menyolok
6. Nilai *Unconfined Compressive Strength* diperkirakan meningkat setelah pemeraman dalam beberapa kasus sekitar kelipatan 14 hari.
7. Terjadi kenaikan nilai CBR maupun regangan dan nilai kohesi.

Ingels dan Metchalf (1972) menunjukkan nilai indeks plastisitas yang menurun tajam dengan penambahan kapur. Hal tersebut menyebabkan peningkatan dari batas plastisnya. Pengaruh penambahan kapur pada tanah akan mempengaruhi berkurangnya perubahan volume serta spesifik pengembangannya. Salah satu yang penting akibat stabilisasi kapur adalah peningkatan kekuatan walaupun pengaruh ini juga tergantung hal-hal lain

2.4 Deep Soil Mixing

Salah satu teknologi perbaikan tanah di lapangan langsung (*in situ soil treatment technology*) dimana tanah dicampur dengan bahan aditif dengan kedalaman tertentu menggunakan bantuan *crane* dilengkapi dengan hidrolis dan *augers* adalah stabilisasi tanah dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Menurut Moseley (2000) sejak tahun 1970-an, telah ditemukan metode baru mengenai stabilisasi tanah, yaitu metode *Deep Soil Mixing* (DSM) yang dikembangkan di Jepang. Metode ini dilakukan untuk perbaikan sifat teknis tanah dari tanah lunak berkohepsi pada kedalaman mencapai 50 m. metode ini merupakan stabilisasi tanah dalam dengan bahan pencampur aditif seperti halnya stabilisasi di tanah permukaan. Dalam bukunya juga (Moseley, 2000) menjelaskan bahwa dengan metode DSM kuat geser dan CBR tanah dapat mengalami peningkatan dan penurunan struktur di tempat dapat berkurang.

Pengikatan antara bahan aditif dengan tanah pada metode ini biasanya akan membentuk kolom tanah stabil atau dengan menstabilkan seluruh volume tanah yang biasa disebut sebagai stabilisasi massa seperti dilihat pada Gambar 7. Menurut (Euro Soil Stab, 2002) biasanya dengan peralatan yang ada, tanah dapat distabilkan dengan kedalaman sekitar 25 m ketika menggunakan kolom stabilisasi, sedangkan stabilisasi massa dapat digunakan untuk kedalaman sekitar 5 m.

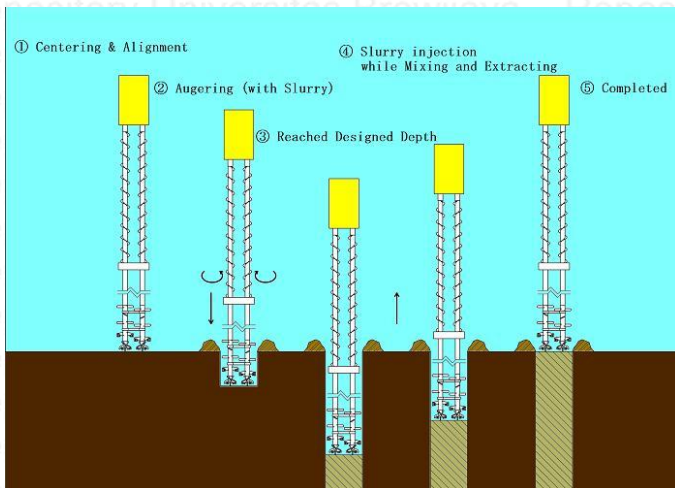


Gambar 7. Skema Stabilisasi Massa dan Kolom Stabilisasi

Penerapan di lapangan, pada umumnya diameter lubang berkisar antara 15 cm sampai dengan 30 cm dengan jarak antar titik tengah 1,2 m sampai dengan 1,5 m. metode injeksi dilakukan dengan cara memasukkan kapur encer atau zat aditif lainnya ke dalam tanah lempung dengan menggunakan tekanan, sehingga air kapur dapat bereaksi dengan tanah. (Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan DPU, 2005)

Dalam pelaksanaan *Deep Soil Mixing (DSM)* terbagi menjadi dua yaitu metode basah (*DeepWet Mixing*) dan metode kering (*Deep Dry Mixing*). Pada metode basah bahan aditif dicampurkan dalam keadaan basah seperti pasta kemudian diinjeksikan pada tanah untuk dicampur. Metode pencampuran basah merupakan metode yang paling umum digunakan untuk pencampuran tanah dalam. Pada metode basah kondisi muka air tanah tidak berpengaruh sehingga metode ini cocok untuk berbagai kondisi tanah. Agar tanah tidak melekat pada pisau poros berputar (auger) maka alat pencampuran biasanya dilengkapi dengan baling-baling anti-rotasi.

Selain metode basah dalam teknik perbaikan tanah dalam terdapat juga metode kering (*Deep Dry Mixing*). Pada metode kering tanah dicampur dengan bahan aditif dalam kondisi kering (berbentuk serbuk) dengan menggunakan tekanan udara. Teknik pencampuran kering biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi kempresibilitas tanah lempung yang sangat lembut. Pada pencampuran metode kering harus diperhatikan kondisi kadar air tanah asli yaitu minimal 20% karena tidak ditambahkan air pada bahan aditif untuk reaksi hidrasi. Namun karena pencampuran metode kering menggunakan tekanan udara metode ini rentan mengalami masalah munculnya lubang kawat akibat proses disperse yang rumit dan kurang efektifnya pengikat sehingga metode kering memiliki kedalaman yang terbatas yaitu hanya kedalaman maksimum 33 m. (Fiorotto, 2014)

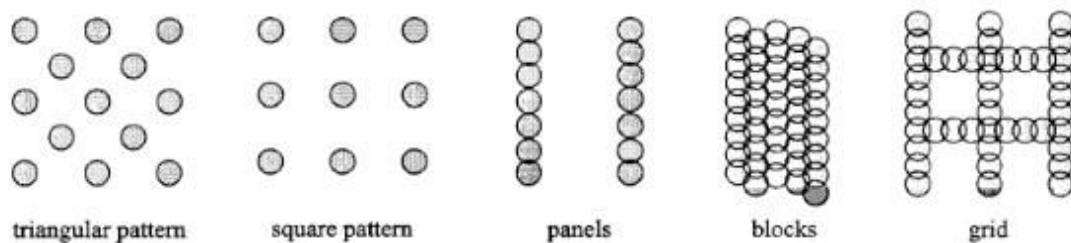


Gambar 8. Proses Deep Soil Mixing (DSM)



Gambar 9. Hasil Kolom Stabilisasi Metode DSM

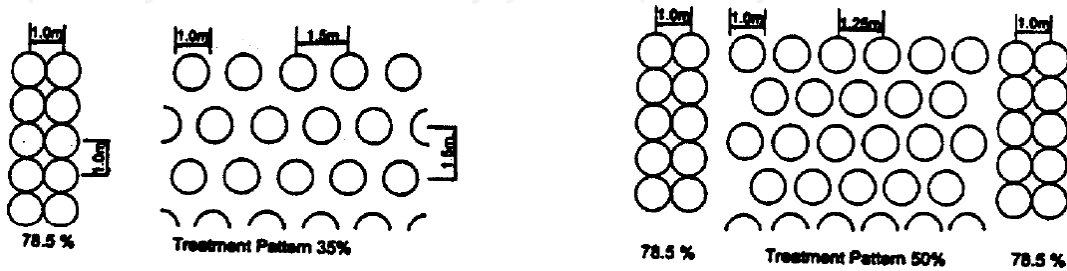
Dalam Pelaksanaan di lapangan, diameter kolom stabilisasi pada metode DSM ini berkisar antara 0,6 m sampai dengan 1,5 m dengan kedalaman sampai 40 m. (U.S. Departement of Transportation, 2000). Metode *Deep Soil Mixing* ini memiliki beberapa konfigurasi bentuk atau tipe dari kolom stabilisasi. Konfigurasi ini didapat dengan melihat spesifikasi dari proyek, nilai ekonomis dan spesifikasi lainnya. Beberapa bentuk konfigurasi kolom stabilisasi tersebut ditampilkan seperti pada gambar 10,



Gambar 10. Konfigurasi Kolom DSM

Sumber: Mirja (2004)

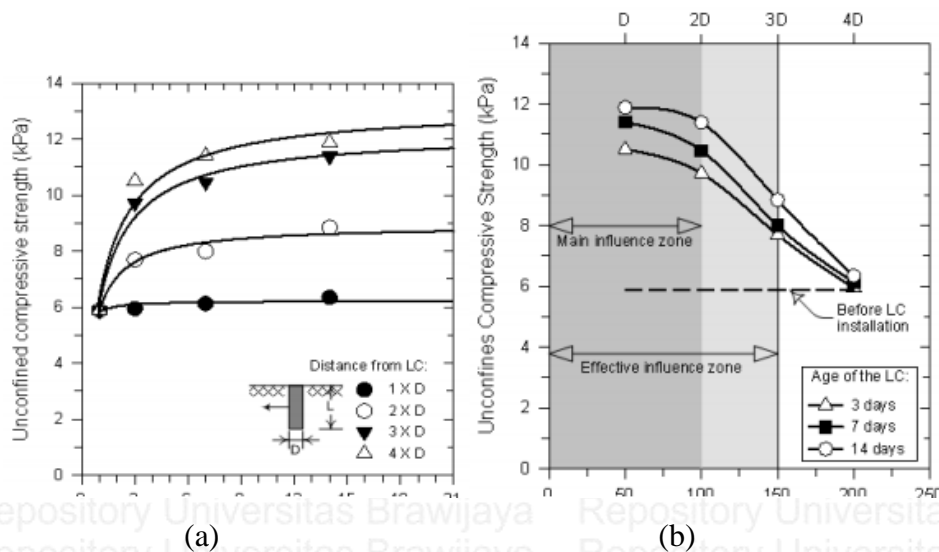
Konfigurasi bentuk tersebut tentu pula berhubungan dengan jarak antar kolom. Variasi jarak tersebut tentunya akan mempengaruhi perilaku dari konfigurasi kolom stabilisasi tersebut. Dalam sebuah panduan manual pernah digunakan suatu variasi jarak untuk metode ini dengan jarak antar kolom sebesar $1D$, $1,25D$ dan $1,5D$ seperti pada gambar 11. Variasi ini pernah dilakukan pada proyek *Tomei Freeway* di Jepang.

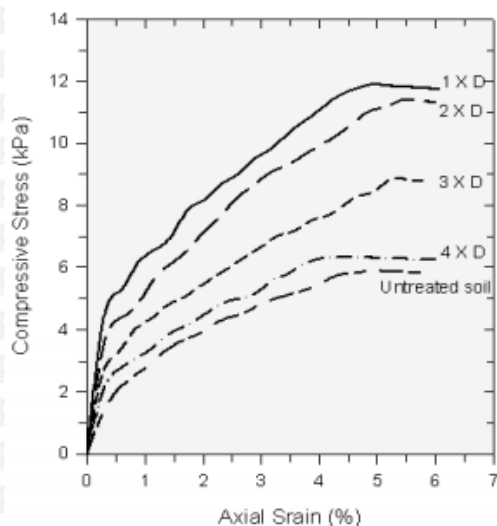


Gambar 11. Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM

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

1. Pada tahun 2010 Muntohar, Agus S. tela melakukan penelitian laboratorium mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak di wilayah Bantul- Yogyakarta. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Dalam penelitian Setyo M. (2009) kolom kapur yang digunakan merupakan kolom tunggal dengan diameter 50 mm dengan kedalaman 200 mm dan diletakkan dalam kontak baja berukuran 1,2 m x 1,2 m dan tinggi 1 m. hasil dari penelitian tersebut yaitu seiring dengan penambahan kadar kapur, daya dukung tanah meningkat sebesar 0,23 kN tanpa menggunakan kolom kapur menjadi 5,2 kN dengan kolom kapur. Penambahan kolom kapur meningkatkan daya dukung tanah baik pada arah vertikal maupun arah radial hingga mencapai 3 kali ukuran diameter dari pusat kolomkapur. Berikut ini adlaah grafik hasil pengujian pembebanan kolom kapur dan kurva tegangan-regangan tanah:





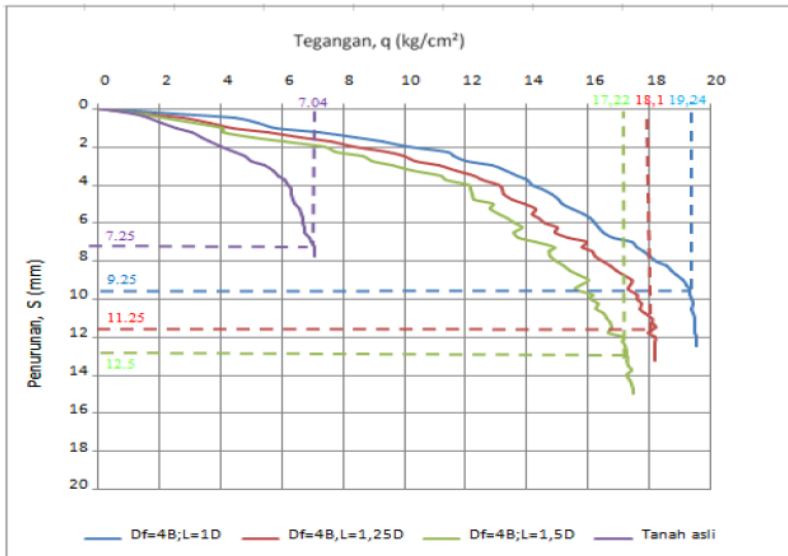
(c)

Gambar 12. (a) dan (b) Kuat Dukung Tanah

(c) Tegangan-Regangan Tanah dari hasil Uji UCS

Sumber: Muntohar (2010)

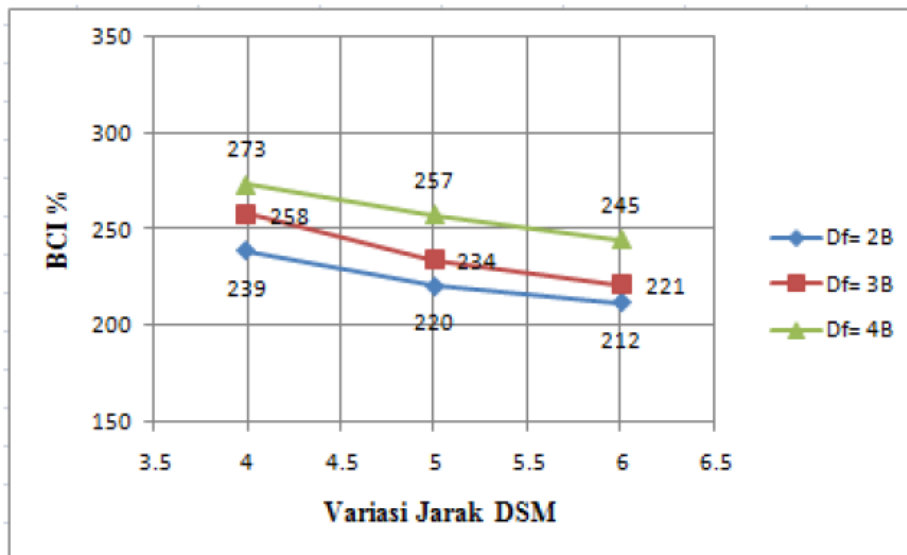
- Frangky. (2015) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mixing* (DSM) 10% kapur diameter 4 cm berpola *single square* terhadap daya dukung tanah ekspansif di Bojonegoro menunjukkan daya dukung terbesar pada variasi jarak antar kolom 1D dan panjang kolom 4B sebesar $19,24\text{kg/cm}^2$ dengan penurunan sebesar 9,25 mm. semakin rapat jarak antar kolom dan panjang DSM maka semakin besar nilai daya dukung tanah. Berdasarkan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI), daya dukung maksimum terjadi pada DSM jarak terdekat 1D dan panjang kolom 4B dengan peningkatan daya dukung tanah hingga 273% dari daya dukung tanah asli. Stabilisasi dengan bahan aditif 10% kapur pada metode DSM berpola *single square* dapat mengurangi nilai pengembangan (*swelling*) seiring dengan meningkatkan volume tanah yang di stabilisasi. Nilai pengembangan (*swelling*) minimum yaitu 0,7955% dengan peningkatan rasio volume tanah yang distabilisasi sebesar 78,54% dari tanah asli.



Gambar 13. Hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang kolom (D_f) $4B = 20$ cm

Tabel 10
Nilai BCI untuk Variasi Panjang DSM (D_f)

No	Panjang DSM (D_f)	Jarak DSM (L)	q_u tanah asli (kg/cm^2)	q_u dengan DSM (kg/cm^2)	BCI (%)	Peningkatan Daya Dukung (%)
1		$2B = 10$ cm	7,04	16,8	239	139
2	$1D = 4$ cm	$3B = 15$ cm	7,04	18,14	258	158
3		$4B = 20$ cm	7,04	19,24	273	173
4		$2B = 10$ cm	7,04	15,52	220	120
5	$1,25D = 5$ cm	$3B = 15$ cm	7,04	16,46	234	134
6		$4B = 20$ cm	7,04	18,1	257	157
7		$2B = 10$ cm	7,04	14,92	212	112
8	$1,5D = 6$ cm	$3B = 15$ cm	7,04	15,56	221	121
9		$4B = 20$ cm	7,04	17,22	245	145



Gambar 14. Perbandingan Peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

2.5 Daya Dukung Batas Tanah

Hubungan antara beban dan penurunan akan mendapatkan besarnya beban maksimum yang mampu diterima oleh tanah hingga pada titik runtuhnya. Kondisi ini diimplementasikan terhadap nilai daya dukung tanah (q_u). Daya dukung tanah merupakan suatu kekuatan tanah dalam menahan beban yang terjadi yang biasanya disalurkan melalui pondasi.

Daya dukung batas (ultimate bearing capacity) merupakan beban maksimum persatuan luas dimana tanah masih dapat memikul beban. Persamaan yang digunakan dalam penentuan daya dukung batas seperti yang disajikan pada persamaan (2-6).

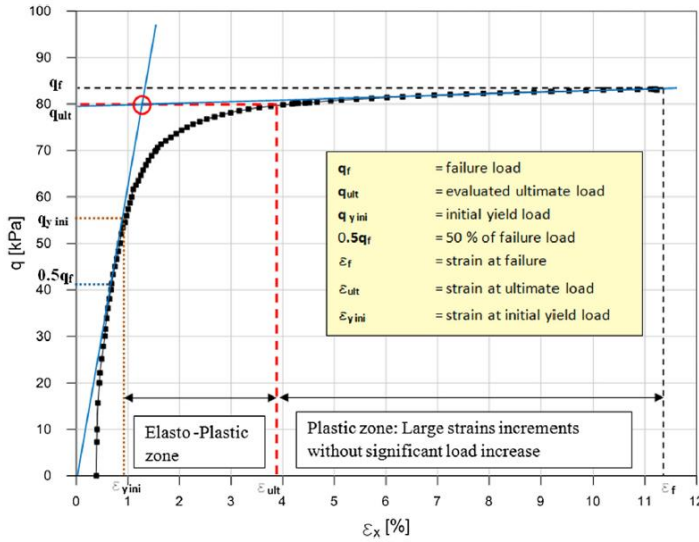
$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

Keterangan: q_u = daya dukung batas (kg/cm^2)

P_u = beban batas (kg)

A = luas pondasi (cm^2)

Pada gambar hubungan beban dengan penurunan dapat diketahui daya dukung batas yang terjadi, dimana daya dukung batas diakibatkan oleh beban batas persatuan luas. Penentuan daya dukung batas (q_u) dari sebuah gambar dapat ditentukan dengan cara seperti pada gambar 15.

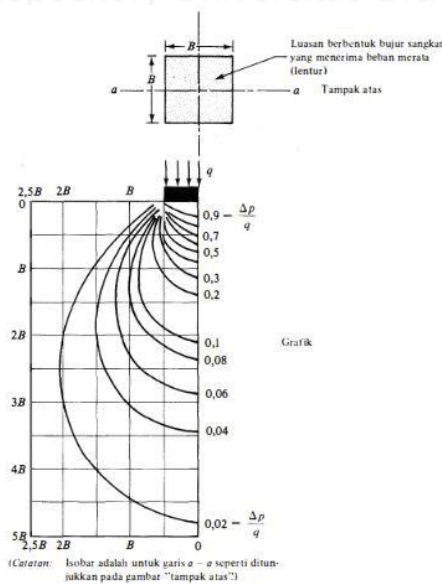


Gambar 15. Penentuan q_u dari Hubungan Beban Persatuan Luas dengan Penurunan

Sumber: Razvan Ignat (2015)

2.6 Area Pengaruh

Pada tanah yang harus mendukung pondasi dengan berbagai bentuk umumnya terjadi kenaikan tegangan. Kenaikan tegangan pada tanah tersebut tergantung pada beban persatuan 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 Gambar 16.



Gambar 16. Isobar Tegangan Vertikal di Bawah Suatu Luasan Berbentuk Bujur Sangkar

Sumber: Das (1995:165)

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.

2.7 Bearing Capacity Improvement (BCI)

BCI merupakan suatu metode yang menggambarkan perbandingan daya dukung tanah yang dilakukan perbaikan terhadap daya dukung tanah tanpa perlakuan perbaikan. Penentuan nilai BCI dapat dilakukan pada dua kondisi yaitu daya dukung pada saat beban ultimate dan kondisi pada saat daya dukung dengan penurunan yang sama. Persamaan yang dilakukan untuk mendapatkan BCI disajikan pada persamaan (2-7).

$$BCI = \frac{quI}{qu} \dots\dots\dots(2-7)$$

Keterangan: BCI = perbandingan daya dukung
 qu = daya dukung tanah dengan stabilisasi (kg/cm²)
 q = daya dukung tanpa stabilisasi (kg/cm²)

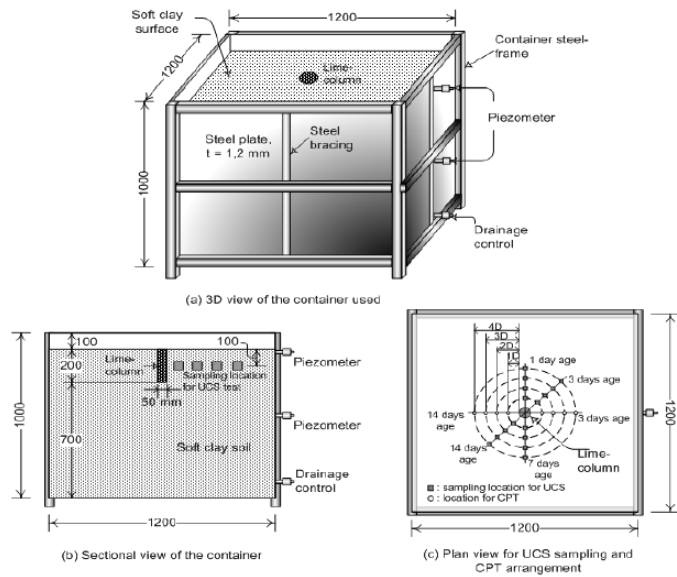
Dari perhitungan BCI ini maka akan diketahui besarnya pengaruh peningkatan daya dukung tanah yang distabilisasi terhadap tanah tanpa stabilisasi.

2.8 Uji Laboratorium

2.8.1. Pemodelan *Deep Soil Mixing* (DSM) Laboratorium

Ada beberapa metode untuk menyiapkan benda uji pada metode DSM. Tidak ada prosedur standar yang harus dilakukan pada pengujian laboratorium. Namun, beberapa penelitian yang pernah dilakukan dapat menjadi referensi dalam perlakuan pemodelan DSM.

Muntohar (2009) 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.

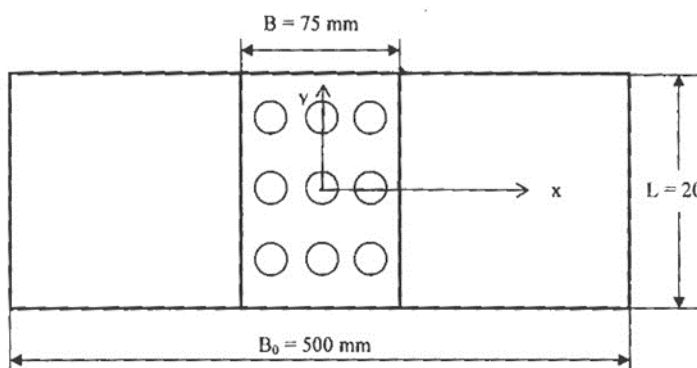


Gambar 17. Sekema Pemodelan Kolom Kapur dalam Box yang Digunakan Muntohar

Sumber: Muntohar (2009)

2.8.2. Area Stabilisasi Kolom 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 18 berikut.

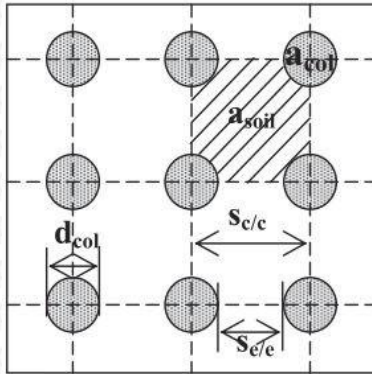


Gambar 18. Tampak Atas Skema Pembebanan terhadap Tanah yang Distabilisasi

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

Seperti tampak pada gambar rigid plate dengan panjang 200 mm dan 75 mm diletakkan di atas 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 19 berikut.



Gambar 19. Susunan Kolom tipe Square

Sumber: Madhyannapu dan Puppala (2014)

Dari gambar 19 tersebut, area stabilisasi dapat dihitung dengan rumus pada persamaan sebagai berikut:

$$ar = \frac{a_{col}}{a_{soil} + a_{col}} \quad \dots \dots \dots (2-8)$$

atau

$$ar = \frac{\pi d_{col}^2 / 4}{S_{cc} \cdot S_{cc}} \quad \dots \dots \dots (2-9)$$

Keterangan: ar = area ratio (rasio luas)

a_{col} = area of column DSM (luas kolom DSM)

a_{soil} = area of soil (luas tanah)

d_{col} = diameter of column DSM (diameter kolom DSM)

S_{cc} = Space between 2 column (jarak antar kolom)

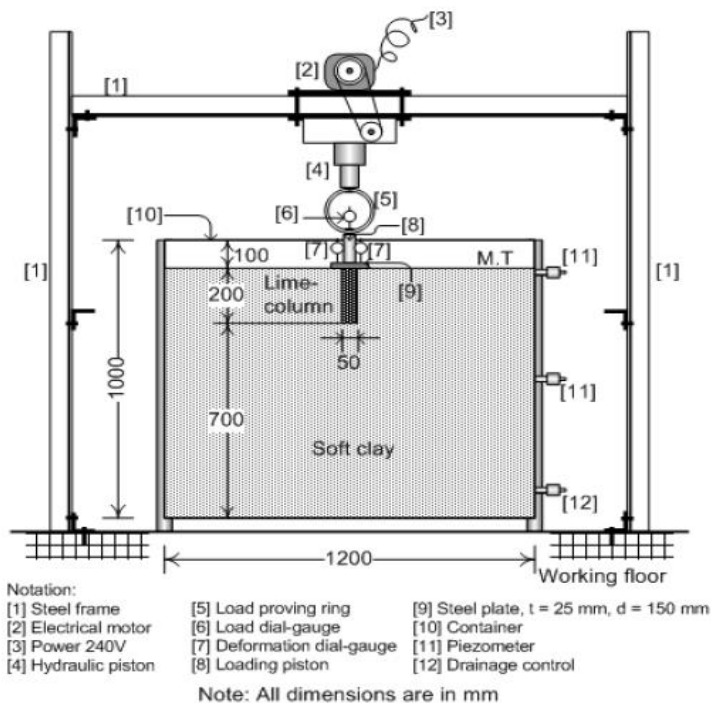
2.8.3. Uji Pembebanan

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

Kondisi lapangan metode DSM ini banyak digunakan pada konstruksi jalan, namun ada juga digunakan pada konstruksi bangunan gedung. Pada konstruksi jalan biasanya di atas tanah yang di stabilisasikan masih ada lagi yang namanya tanah timbunan tersebut akan dipasang konstruksi perkerasan jalan. Pada konstruksi bangunan, di atas tanah yang distabilisasikan akan dipasang konstruksi pondasi. Keduanya sama-sama memberikan kontribusi beban yang dipikul oleh tanah yang distabilisasi.

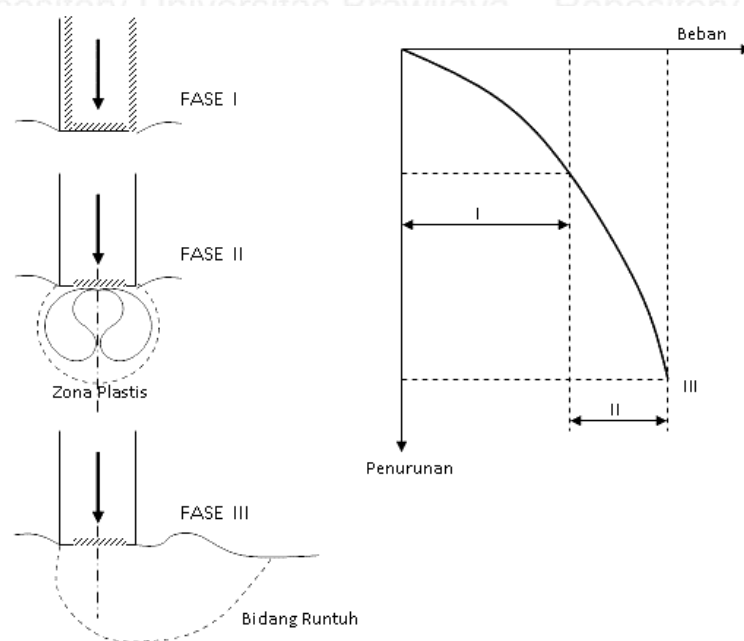
Konstruksi pondasi maupun timbunan tanah, keduanya memiliki dua perilaku yang berbeda jika dilihat sebagai beban di atas tanah stabilisasi. Beban tanah timbunan berperilaku fleksibel sedangkan beban pondasi berperilaku kaku (rigid). Namun pada intinya beban tersebut akan memberikan tegangan terhadap tanah stabilisasi di bawahnya dan dapat mengakibatkan terjadinya penurunan pada tanah.

Asumsi penggunaan beban pondasi kaku memberikan kemudahan tersendiri dalam pelaksanaan uji pembebanan di laboratorium. Dalam penelitian terdahulu, (Muntohar, 2009) menggunakan beban pelat pondasi pada simulasi pembebanan untuk studi laboratorium terhadap stabilisasi tanah dengan penggunaan bahan pencampur kapur pada metode kolom kapur. Gambaran penggunaan pondasi pada uji pembebanan disajikan pada gambar 20,



Gambar 20. Skema Uji Pembebanan (Muntohar, 2009)

Uji pembebanan akan menghasilkan suatu gambar hubungan antara beban dengan penurunan. Pada awal pembebanan, penurunan yang terjadi akan sebanding dengan beban yang terjadi. Keadaan ini termasuk dalam keseimbangan elastis yang menyebabkan tanah dalam kondisi tertekan (kompresi) yang membuat tegangan geser naik dan meningkatkan daya dukung tanah. Jika digambarkan maka kondisi itu akan membentuk garis linier antara beban dengan penurunan. Apabila beban terus bertambah maka akan menyebabkan penurunan plastis pada tanah dan daya dukung terus berkembang. Kondisi plastis ini menyebabkan penurunan yang terjadi mulai tidak sebanding dengan besarnya beban yang terjadi dan akan membentuk garis lengkung pada gambar. Jika beban terus ditambahkan maka kondisi penurunan plastis tidak akan kembali pada keadaan elastis sehingga akan menyebabkan penurunan yang berlanjut dimana kondisi ini menyebabkan keruntuhan pada tanah. Skema gambar hubungan antara beban dengan penurunan ini disajikan pada gambar 21 berikut.



Gambar 21. Hubungan Beban dengan Penurunan

2.8.4. Uji Pengembangan Tanah (*Swelling*)

Tes pengembangan tanah dilakukan dengan menggunakan alat konsolidasi (*Oedometer*) pada tiap-tiap benda uji. Fungsi dari tes pengembangan ini yaitu untuk mengetahui besarnya volume pengembangan pada tanah dalam waktu tertentu. Benda uji tes pengembangan ini didapatkan dari hasil uji proctor tes yang dipotong sesuai dengan ukuran cincin dari alat konsolidasi, yaitu dengan tinggi 1,6 cm dan diameter 5,2 cm. uji

ini hanya untuk satu arah (pengembangan arah samping ditahan oleh ring), tanah dibiarkan mengembang sambil menyerap air dengan beban kecil tertentu yaitu (1 Psi ~ 6,9 Kpa atau menggunakan 0,1 kg/cm² ~ 10 Kpa). Uji ini selesai bila tanah berhenti mengembang.

Waktu yang dibutuhkan untuk pengamatan jarum potensi pengembangan tanah adalah 8 jam, 16 jam, 24 jam, 48 jam, 72 jam, 96 jam, 120 jam, 144 jam, 168 jam, dan 192 jam apabila dalam 192 jam tanah masih mengembang, maka pengamatan jarum potensi pengembangan tanah diteruskan/ditambah sampai pengembangan tanah berhenti atau sudah tidak berarti lagi. Besarnya *swelling* (*Swell Potential*) dapat dicari dengan menggunakan rumus dalam persamaan (2-10).

$$SP = \frac{H_i - H_f}{H_i} \times 100\% \dots\dots\dots (2-10)$$

Keterangan: Hi = Tinggi awal benda uji
Hf = Tinggi akhir benda uji



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan pada bulan Maret hingga bulan Agustus 2017. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.2 Bahan Penelitian

Penelitian Bahan-bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Tanah lempung ekspansif, khususnya berasal dari Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Kapur yang digunakan adalah kapur yang telah terhidrasi atau kapur padam yang umum dijual di daerah Kota Malang.
3. Pasir yang umum dijual di toko bangunan daerah Kota Malang.

3.3 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan guna menunjang proses penelitian yaitu antara lain:

1. Kotak (*box*) terbuat dari *fiberglass* yang berfungsi agar perilaku benda uji dapat diamati, berbentuk kubus berdimensi (30x30x30) cm dengan ketebalan 5 mm serta dilengkapi dengan profil siku 30x30x3 pada ujung-ujung sisinya sebagai pengaku.
2. Pipa besi berdiameter 4,8 cm yang digunakan untuk instalasi kolom *Deep Soil Mixing* (DSM).
3. *Mold* dan *Proctor* sesuai metode B ASTM D-698; AASHTO T-99.
4. Alat pemadat *Deep Soil Mixing* memiliki berat 4,5 kg dan diameter 4,5 cm.
5. Alat uji beban vertikal berupa pompa hidrolik, dongkrak hidrolik.
6. Pelat baja 5x5 cm² dan tebal 2 cm.
7. *Load cell* dan Dial LVDT
8. *Frame* pembebanan (portal)
9. *Waterpass* dan penggaris
10. *Ring density*

11. Saringan No.4
12. Gelas ukur
13. Alat timbang digital
14. Palu
15. Bak pencampur
16. Kantong plastik
17. Karung goni
18. Botol penyemprot air.

3.4 Metode Penelitian

3.4.1. Pengujian Pendahuluan

Guna mendukung penelitian DSM menggunakan 8% kapur, maka perlu dilakukan penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang nantinya akan diuji merupakan tanah lempung ekspansif. Penelitian pendahuluan yang dilakukan yaitu diantaranya:

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

Setelah klasifikasi diketahui benar adanya bahwa merupakan jenis tanah lempung ekspansif melalui percobaan *specific gravity*, *atterberg limit* dan klasifikasi tanah dengan metode USCS, maka percobaan selanjutnya adalah pengujian proctor standar.

Pengujian proctor standar adalah untuk mendapatkan besarnya nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering tanah (γ_d) yang kemudian nilai tersebut digunakan sebagai acuan untuk tahap pengujian selanjutnya. Pada pengujian proctor standar dihasilkan berat isi kering tanah (γ_d) sebesar 1,367 gr/cm³ dan kadar air optimum (OMC) sebesar 19,8%.

Percobaan pemadatan dalam *box* dilakukan dengan menggunakan alat pemadat seberat 4,5 kg dan ukuran 12,5x12,5 cm². Pemadatan ini dilakukan pada setiap layer dengan ketinggian 5 cm. Guna mendapatkan jumlah tumbukan dan berat isi relatif, digunakan metode *trial and error* yaitu dengan cara melakukan percobaan secara berulang-ulang hingga mendapatkan berat isi kering relatif dalam *box* yang dapat

dilaksanakan hingga ditetapkan jumlah tumbukan yang diperlukan. Apabila berat isi kering relatif dan jumlah tumbukan telah diperoleh, maka selanjutnya dilakukan pembuatan sampel pada *box* uji. Selain kepadatan tanah dalam *box* ditetapkan, kepadatan tanah *Deep Soil Mixing* juga perlu ditentukan. Untuk mendapatkan berat isi kering tanah dengan pencampuran kapur sebanyak 8% sebesar $1,367 \text{ gr/cm}^3$ perlu dilakukan control ketinggian tiap 5 cm dengan penumbuk

3.4.2. Persiapan Benda Uji

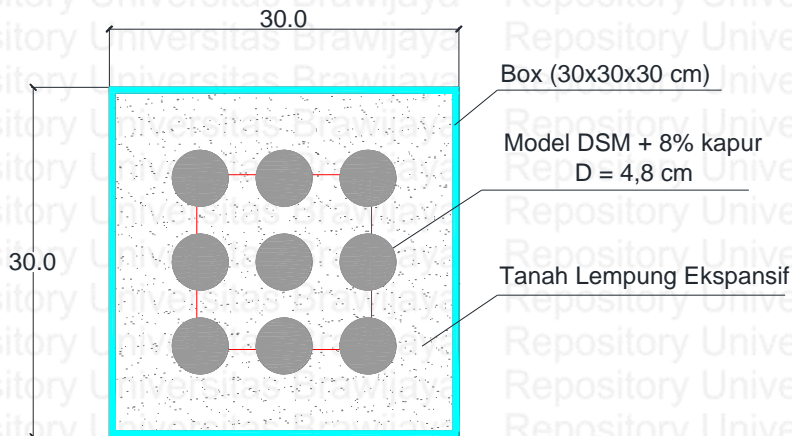
Sebelum menyiapkan benda uji yang dilakukan terlebih dahulu adalah pengambilan tanah sampel. Tanah sampel yang digunakan adalah tanah lempung ekspansif yang berlokasi di Desa Jelu, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro. Kemudian setelah menyiapkan sampel tanah langkah selanjutnya adalah menyiapkan bahan aditif berupa kapur. Kapur yang digunakan adalah kapur yang dijual bebas di toko daerah Kota Malang. Adapun kemudian persiapan-persiapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Sampel tanah dikeringkan dengan cara dijemur atau dioven hingga sampel tanah cukup kering sehingga gumpalan tanah mudah untuk dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak lolos saringan No. 4
3. Dalam proses pembuatan benda uji dibagi dalam 3 kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa adanya stabilisasi, tanah dengan stabilisasi 8% kapur dan tanah yang telah distabilisasi menggunakan penambahan kapur sebanyak 8% dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) tipe *single square*.
4. Untuk benda uji pertama sampel tanah yang lolos saringan No. 4, kemudian ditambahkan air dengan kadar air optimum (OMC) yang digunakan sebagai tanah dasar atau tanah asli. Pencampuran dilakukan sampai semua merata pada seluruh bagian, kemudian sampel dijenuhkan di dalam kantong plastik selama 24 jam agar homogen.
5. Sebelum memadatkan tanah asli kedalam *box*, dipadatkan terlebih dahulu pasir setebal 3 cm sebagai lapisan dasar yang fungsi sebagai lapisan drainase. Kemudian tanah lempung di padatkan kedalam *box* hingga ketebalan 20 cm, lalu ditambahkan lapisan pasir setebal 1 cm
6. Apabila pembuatan benda uji tanah asli telah selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan uji pembebanan.
7. Untuk benda uji kedua langkahnya sama dengan langkah no. 4 namun ditambahkan pencampuran kapur sebanyak 8%. Kemudian setelah benda uji

homogen dilanjutkan tahap selanjutnya sama dengan langkah no. 5 namun sebelum dilakukan pengujian, dilakukan pemeraman dahulu selama 3 hari. Setelah masa pemeraman telah selesai tahap selanjutnya dilakukan proses pengujian.

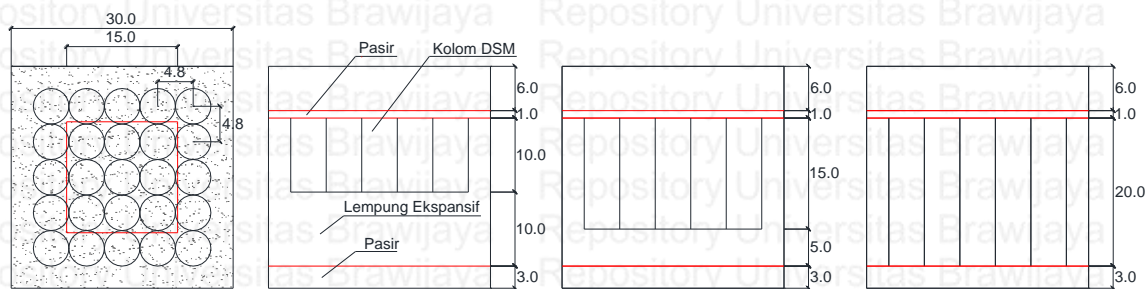
8. Untuk benda uji ketiga yaitu tanah di stabilisasi dengan 8% kapur dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM), langkahnya sama dengan langkah no. 4 setelah benda uji homogen dilanjutkan tahap selanjutnya sama dengan langkah no. 5 setelah tanah dipadatkan kemudian dilanjutkan dengan pembuatan lubang kolom diameter 4,8 cm dengan jarak dan kedalaman sesuai dengan variasi yang ditinjau.
9. Langkah selanjutnya adalah melakukan pencampuran tanah dengan 8% kapur. Setelah tercampur secara homogen, tanah campuran 8% kapur tersebut dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan variasi jarak dan kedalamannya (lihat Tabel 11). langkah-langkah instalasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:
 - a. Pipa besi dengan diameter 4,8 cm dikeluarkan dari tanah sehingga membentuk lubang-lubang kolom yang diinginkan.
 - b. Tanah campuran 8% kapur dimasukan ke dalam lubang dengan membagi beberapa lapisan, dimana untuk kedalaman $0,5D_f = 10$ cm dibagi menjadi 2 lapisan, $0,75D_f = 15$ cm dibagi menjadi 3 lapisan, dan $D_f = 20$ cm dibagi menjadi 4 lapisan.
 - c. Setiap lapisan dipadatkan dengan kepadatan kering maksimum (γ_d) pada kondisi OMC campuran kapur. Guna tercapainya kepadatan yang sesuai, setiap lapis harus dicek dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
10. Setelah tahap ke-8 telah selesai, langkah selanjutnya adalah dilakukan pemeraman benda uji selama 3 hari.
11. Kemudian setelah pemeraman selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan uji pembebanan.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan kedalaman pada konfigurasi kolom DSM (lihat Gambar 22). Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan kedalaman terhadap perilaku daya dukung (q_u) tanah. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi dengan tipe *single square* dengan diameter (D) 4,8 cm. Adapun sketsa pemodelan konfigurasi tersebut dapat dilihat pada gambar 22.

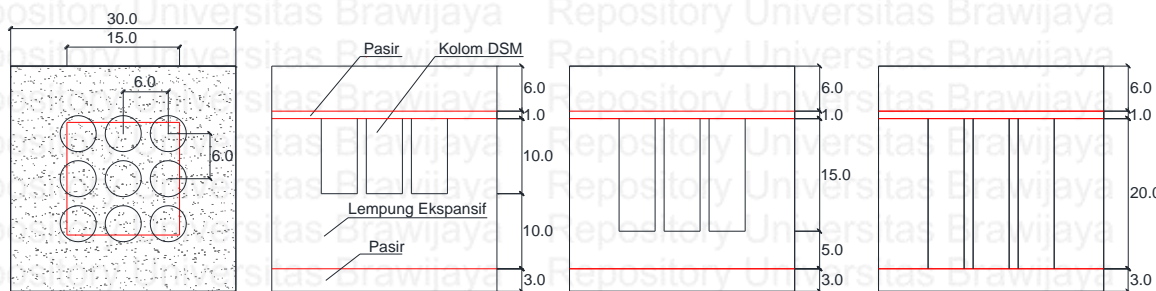


Gambar 22. Pemodelan DSM Pola *Single Square*

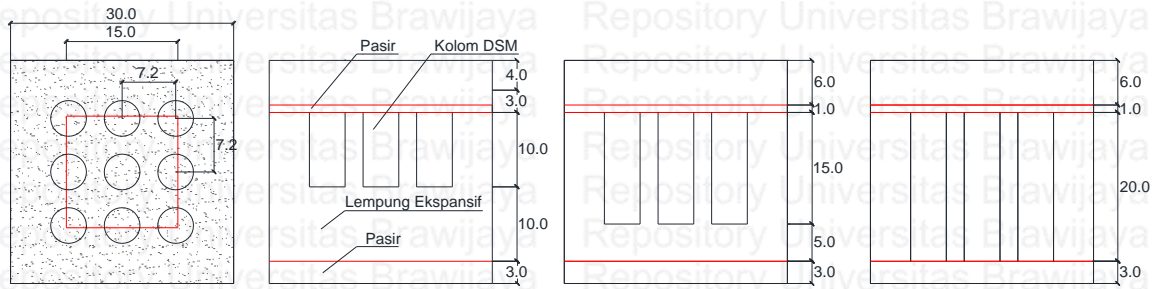
Adapun variasi jarak dan kedalaman kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) tipe *Single Square* dijelaskan dalam gambar sebagai berikut



Gambar 23. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak 1D



Gambar 24. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak 1,25D

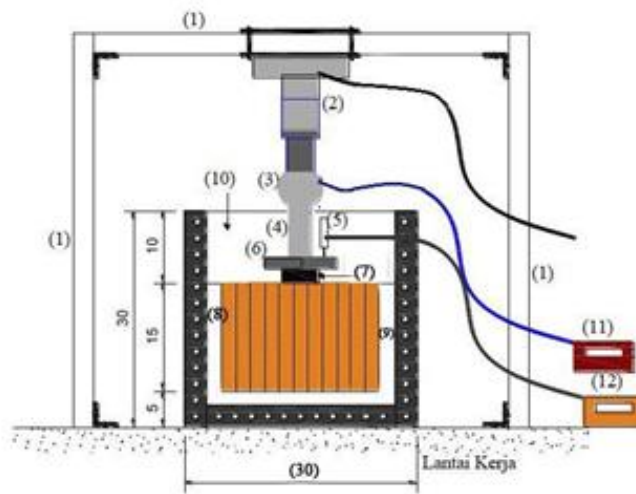


Gambar 25. Variasi Kedalaman Kolom dengan Jarak 1,5D

3.4.3. Uji Pembebanan

Alat yang digunakan dalam pengujian pembebanan adalah dongkrak hidrolik. Untuk alat pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton, serta digunakan alat *LVDT* untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi.

Langkah pertama yaitu dengan menghubungkan dongkrak hidrolik ke piston yang terhubung dengan batang portal (*freme*) yang terbuat dari baja profil. Secara manual dongkrak hidrolik dilakukan pemompaan yang nantinya akan memberikan tekanan pada piston, nantinya akan disalurkan melalui *load cell* agar terbaca besar beban yang diberikan. Kemudian *load cell* di hubungkan ke piston bantuan yang nantinya memberikan tekanan pada 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. Peletakan pelat baja sendiri harus terpasang tepat simetris di atas permukaan benda uji. Skema uji pembebanan dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. Skema Uji Pembebanan Sampel

Keterangan:

- | | | |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. Portal baja | 6. Pelat silinder | 11. Alat pembaca <i>load cell</i> |
| 2. Piston hydraulic | 7. Pelat baja (5x5x2) cm | 12. Alat pembaca <i>lvdt</i> |
| 3. <i>Load cell</i> | 8. Kolom stabilisasi DSM | |
| 4. Piston besi | 9. Tanah dasar/asli | |
| 5. <i>Lvdt</i> | 10. Box (30x30x30) cm | |

Tanah asli yang belum distabilisasi dengan penambahan 8% kapur dilakukan pengujian pembebanan yang pertama kali, hal ini dilakukan untuk mengetahui daya dukung awal dari tanah asli tersebut yang nantinya sebagai pembanding dengan tanah yang telah di stabilisasi dengan metode DSM penambahan 8% kapur. Apabila daya dukung tanah asli telah diketahui, selanjutnya adalah melakukan pengujian pembebanan terhadap 9 sampel dengan variasi jarak dan kedalaman kolom yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku terhadap daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan kedalaman kolom yang optimum guna memberikan pengaruh besar pada daya dukung tanah ekspansif.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan 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 dengan ukuran 5x5 cm pada titik tengah permukaan yang telah diukur sebelumnya.
5. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan seperti terlihat pada Gambar 26.
6. Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolik
7. Pembebanan dilakukan bertahap dengan interval dial *LVDT* 50 dan kemudian pembebanan dihentikan ketika pada alat pembaca menunjukkan 3 kali beban sama namun penurunan tetap terjadi
8. Mencatat beban dan penurunan yang terjadi sesuai dengan format Tabel 11.

Tabel 11
Pembacaan *Load Cell* dan *Dial LVDT*

Pembacaan <i>LVDT</i>	Interval Δ	Luas Pelat (A) (cm^2)	Penurunan $S = \Delta x$ 0,005 (mm)	Pembacaan Beban (P) (kg)	Tegangan $Q = P/A$ (Kg/cm^2)
	0	25			
	50	25			
	100	25			
	150	25			
	200	25			
	250	25			
	dst	25			

3.5 Metode Analisa Data

Dengan bantuan *software Microsoft Excel* semua data yang telah dicatat hasil pembacaan uji pembebanan diolah melalui persamaan yang ada. Dari hasil penelitian di dapatkan nilai beban dan penurunan yang terjadi akibat beban vertikal. Dari beban tersebut maka dapat diketahui besarnya daya dukung dari tanah yang diuji berdasarkan luas pondasi model. Kemudian dibuat grafik perilaku tegangan dan penurunan tanah lempung ekspansif asli maupun distabilisasi dengan 8% kapur metode *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah (q_u) hasil pengujian beban vertikal pondasi. Dengan adanya variasi jarak dan kedalaman kolom kapur akan diketahui peningkatan daya dukung tanah lempung ekspansif. Perhitungan daya dukung menggunakan rumus pada persamaan (2-6).

Pengolahan data selanjutnya adalah menganalisis perbandingan daya dukung tanah asli dengan tanah yang sudah distabilisasi dengan analisis BCI (*Bearing Capacity Improvement*). Perhitungan BCI menggunakan rumus pada persamaan (2-7).

Hasil dari perhitungan BCI akan diketahui besarnya persentase peningkatan daya dukung yang terjadi pada tanah asli sebelum di stabilisasi dengan tanah yang sudah distabilisasi seperti terlihat perbandingannya pada Tabel 14 dan Tabel 15. Dari perhitungan ini pula dapat diketahui pengaruh variasi jarak dan kedalaman kolom yang memberikan perubahan nilai daya dukung secara signifikan terhadap tanah asli.

3.6 Variabel Penelitian

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

a. Variabel bebas, terdiri dari:

- Konfigurasi
- Diameter
- Kedalaman
- Jarak

b. Variabel terikat, terdiri dari:

- Tegangan
- Pengembangan (*Swelling*)

3.7 Rancangan Penelitian

Terdapat tiga jenis benda uji dalam penelitian ini, yaitu benda uji berupa tanah asli sebelum distabilisasi, tanah lempung eskpansif dengan stabilisasi menggunakan tanah yang telah distabilisasi dengan campuran 8% kapur dan tanah lempung dengan stabilisasi menggunakan campuran 8% kapur metode *Deep Soil Mixing (DSM)* tipe *single square*. Nantinya akan diperoleh perilaku tegangan-penurunan tanah sebelum dan sesudah distabilisasi sesuai dengan variasi jarak dan kedalaman kolom yang telah ditentukan sebelumnya. Rancangan penelitian ditampilkan dalam Tabel 12

Tabel 12
Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom DSM

Jenis Sampel	Jarak DSM (cm)	Kedalaman DSM (cm)	Penurunan (cm)	Beban Maksimum (kg)	Daya Dukung (kg/cm ²)
Tanah asli					
Tanah + 8% kapur		0,5Df = 10			
	1D = 4,8	0,75Df = 15			
		1Df = 20			
Tanah + 8% Kapur + DSM		0,5Df = 10			
	1,25D = 6,0	0,75Df = 15			
		1Df = 20			
		0,5Df = 10			
	1,5D = 7,2	0,75Df = 15			
		1Df = 20			

Tabel 13
Daya Dukung dengan Variasi Jarak DSM

No	Kedalaman DSM (cm)	Jarak DSM (cm)	Penurunan (cm)	Beban Maksimum (kg)	Daya Dukung (kg/cm ²)
1		1D = 4,8			
2	0,5Df = 10	1,25D = 6,0			
3		1,5D = 7,2			
4		1D = 4,8			
5	0,75Df = 15	1,25D = 6,0			
6		1,5D = 7,2			
7		1D = 4,8			
8	1Df = 20	1,25D = 6,0			
9		1,5D = 7,2			

Untuk mengetahui pengaruh jarak dan kedalaman kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) guna meningkatkan daya dukung tanah dilakukan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI). Hasil analisis BCI disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 14
Bearing Capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Jarak

No	Jarak DSM (cm)	Kedalaman DSM (cm)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		0,5Df = 10			
2	1D = 4,8	0,75Df = 15			
3		1Df = 20			
4		0,5Df = 10			
5	1,25D = 6,0	0,75Df = 15			
6		1Df = 20			
7		0,5Df = 10			
8	1,5D = 7,2	0,75Df = 15			
9		1Df = 20			

Tabel 15
Bearing capacity Improvement (BCI) untuk Variasi Kedalaman

No	Kedalaman DSM (cm)	Jarak DSM (cm)	qu tanah asli (kg/cm ²)	qu dengan DSM (kg/cm ²)	BCI (%)
1		1D = 4,8			
2	0,5Df = 10	1,25D = 6,0			
3		1,5D = 7,2			
4		1D = 4,8			
5	0,75Df = 15	1,25D = 6,0			
6		1,5D = 7,2			
7		1D = 4,8			
8	1Df = 20	1,25D = 6,0			
9		1,5D = 7,2			

3.8 Rancangan Pengujian Pengembangan

Pengujian pengembangan menggunakan 5 buah benda uji, yaitu 1 buah benda uji berupa tanah asli dan 4 buah benda uji berupa tanah yang distabilisasi dengan DSM, adapun variasi benda uji untuk tanah yang distabilisasi dapat dilihat pada tabel 16.

Tabel 16
 Rancangan Penelitian untuk Uji Pengembangan

Benda Uji	Waktu	Pembacaan	Pengembangan (%)
Tanah Asli			
DSM 7 kolom (D=3,2 cm)			
DSM 6 kolom (D=4 cm)			
DSM 5 kolom (D=4,8 cm)			
DSM 7 kolom (D=4,8 cm)			
Stabilisasi 100%			

3.9 Persiapan Benda Uji Pengembangan

Persiapan benda uji pengembangan meliputi tahapan sebagai berikut:

1. Sampel tanah dijemur atau dioven hingga sampel tanah cukup kering sehingga gumpalan tanah mudah dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak dengan saringan No. 4.
3. Sampel tanah yang lolos saringan No. 4 ditambah air sebesar kadar air optimum (OMC).

4. Sampel tanah dicetak pada mold seperti uji pemadatan standar berdasarkan ASTM D-698 (Metode B).
5. Dibuat 5 buah benda uji sesuai Tabel 16.
6. Benda uji berupa tanah asli dapat langsung dilakukan uji pengembangan, sedangkan untuk benda uji dengan kolom stabilisasi dilakukan *curing* selama 3 hari.
7. Setelah *curing* benda uji dilakukan uji pengembangan (*swelling*).

3.10 Uji Pengembangan

Uji pengembangan dilakukan pada lima jenis benda uji, yaitu

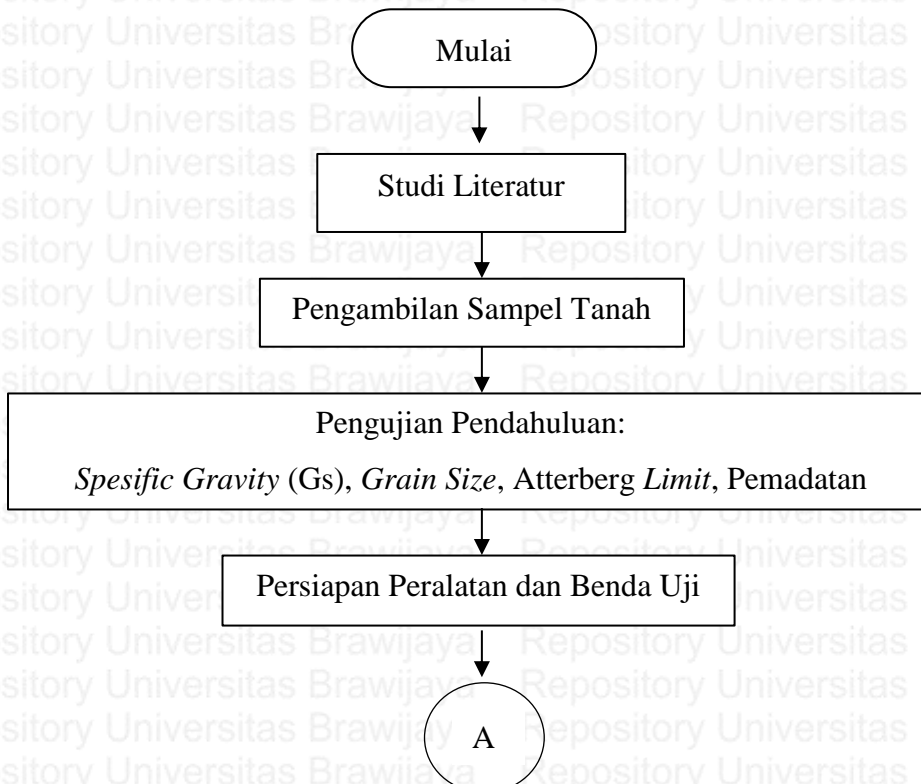
1. Benda uji tanah asli.
2. Benda uji dengan 7 kolom stabilisasi berdiameter 3,2 cm.
3. Benda uji dengan 6 kolom stabilisasi berdiameter 3 cm.
4. Benda uji dengan 5 kolom stabilisasi berdiameter 3,8 cm.
5. Benda uji dengan 7 kolom stabilisasi berdiameter 3,8 cm.
6. Benda uji dengan stabilisasi 100%

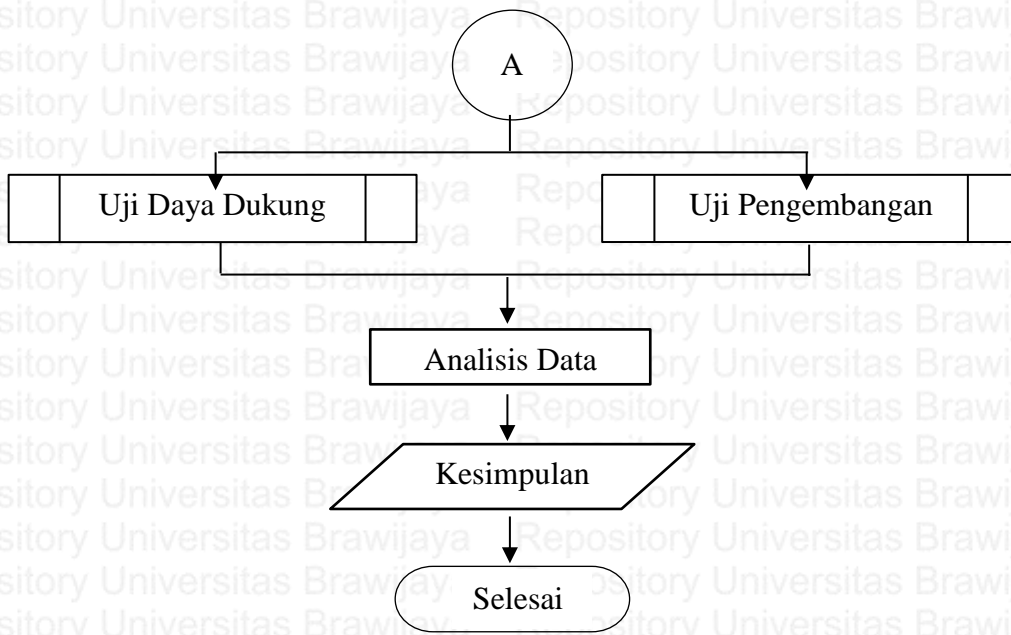
Hasil uji pengembangan dicatat dalam Tabel 16.

3.11 Diagram Alir Penelitian

Guna mempermudah tahap-tahap penelitian disajikan dalam diagram alir sebagai berikut:

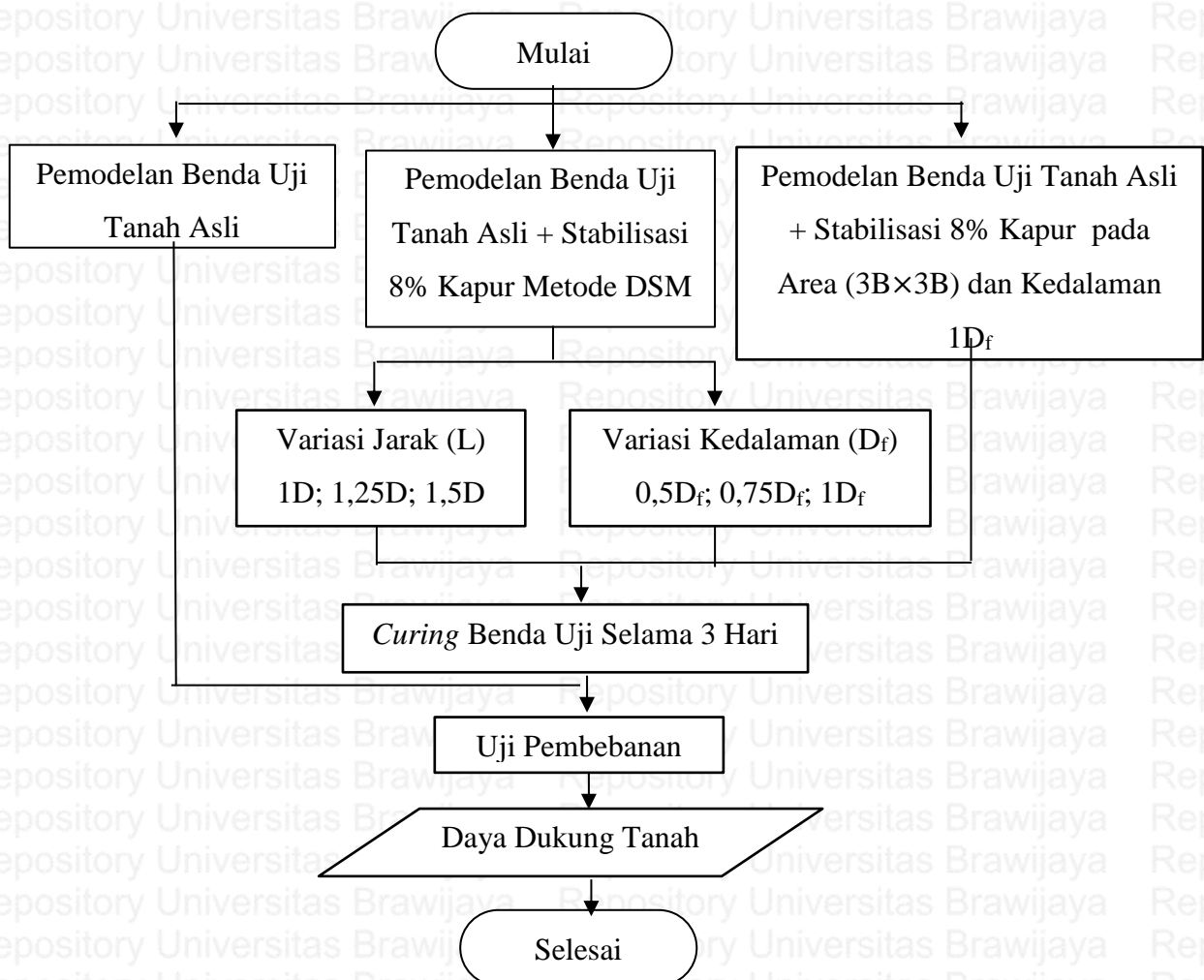
3.11.1. Diagram Alir Penelitian





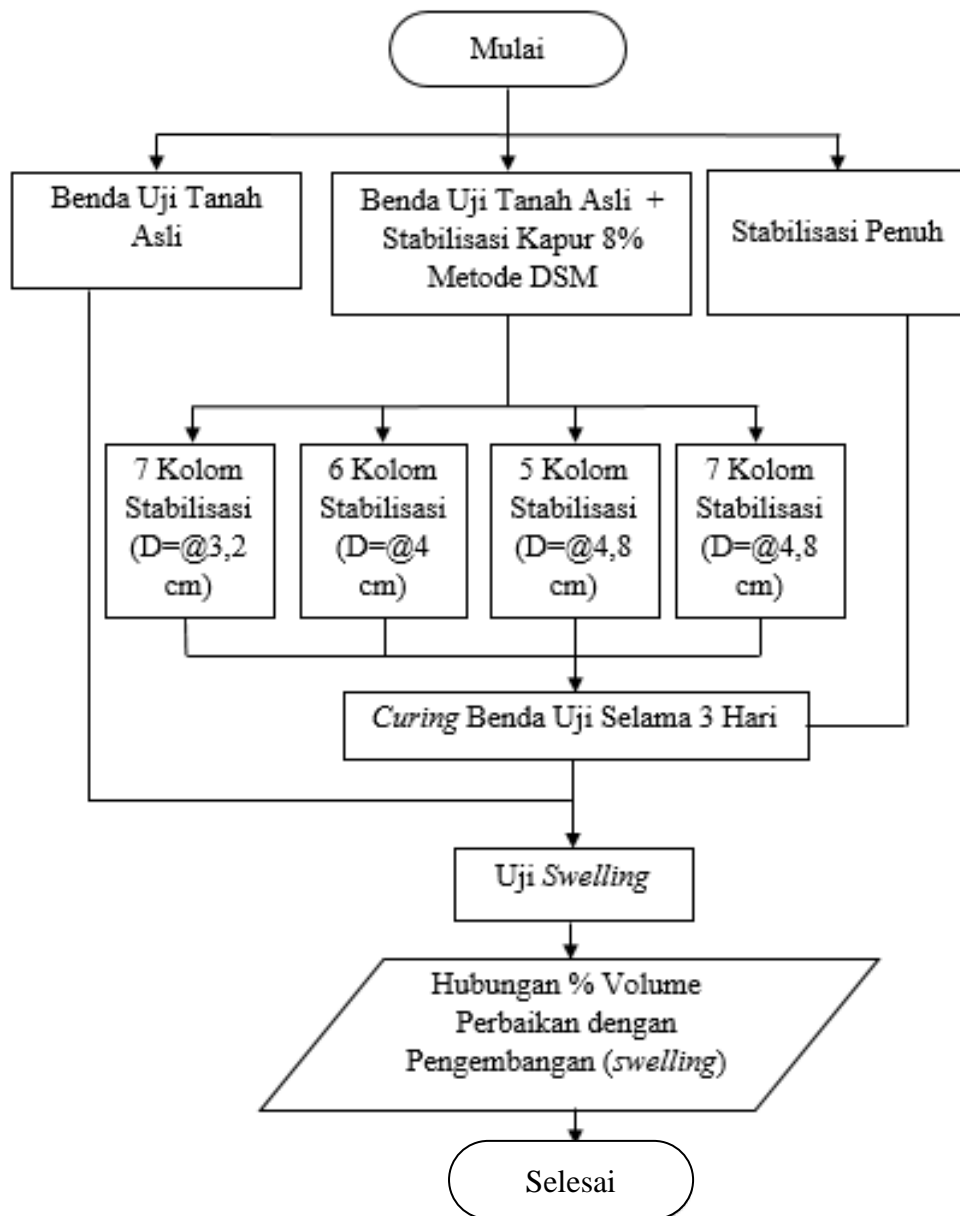
Gambar 27. Diagram Alir Penelitian

3.11.2. Diagram Alir Uji Pembebanan



Gambar 28. Diagram Alir Uji Pembebanan

3.11.3. Diagram Alir Uji Pengembangan



Gambar 29. Diagram Alir Uji Pengembangan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif Berdasarkan Uji Sifat Fisik Tanah

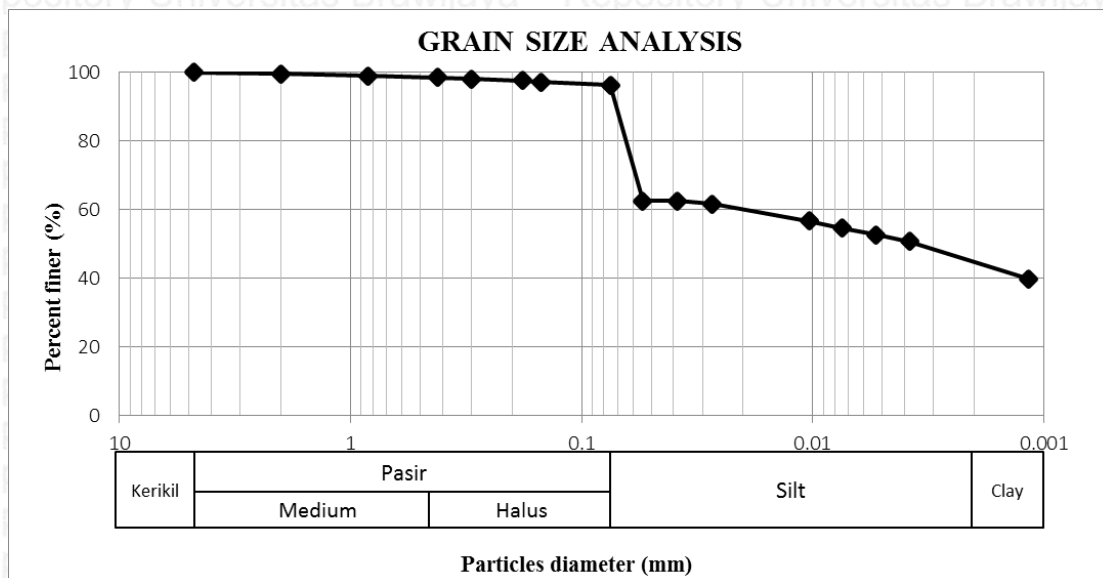
Identifikasi awal tanah lempung ekspansif menggunakan uji sifat fisik tanah (*physical properties*) menghasilkan data-data yang disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 17

Hasil Uji Sifat Fisik Tanah (*Physical Properties*)

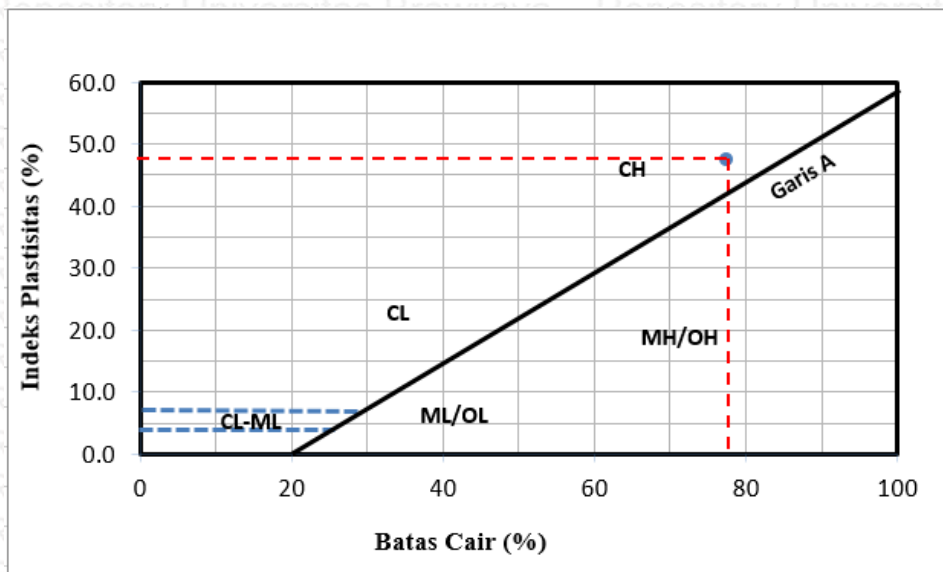
Jenis Percobaan	Satuan	Nilai
Kadar Air (w)	%	44,96
Specific Gravity (Gs)	-	2,524
Berat Volume	gr/cm ³	1,69
Batas Cair (LL)	%	77,057
Batas Plastis (PL)	%	29,84
Batas Susut (SL)	%	8,30
Indeks Plastisitas (PI)	%	47,22

Hasil pengujian pendahuluan yang terdiri dari uji specific gravity, kadar air (*water content*), dan atterberg limit tersebut selengkapnya sebagaimana terlampir pada Lampiran. Sedangkan hasil uji klasifikasi tanah yang dilakukan yaitu analisis saringan dan analisis hydrometer. Hasil pengujian tersebut ditunjukkan dalam gambar grafik berikut ini.



Gambar 30. Distribusi Butiran Hasil Uji Analisa Saringan dan Hydrometer

Berdasarkan hasil uji analisa saringan dan hydrometer menunjukkan bahwa sampel uji memiliki persentase lolos saringan no. 200 sebesar 97,03% dan menurut klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) tergolong dalam jenis tanah berbutir halus. Sedangkan apabila menggunakan kalsifikasi *Unifed* dikarenakan 97,03% (lebih dari 50%) dari total tanah ternyata lolos ayakan no. 200 (diameter 0,075 mm) sehingga juga termasuk kedalam tanah berbutir halus. Berdasarkan hasil dari uji atteberg limit didapatkan besar nilai batas cair (LL) sebesar 77,057% dan indeks plastisitas 47,22%, apabila digambarkan dalam grafik plastisitas, harga-harga tersebut masuk dalam klasifikasi tanah CH (lempung anorganis dengan plastisitas sangat tinggi).



Gambar 31. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unifed*

Metode selanjutnya dalam mengidentifikasi tanah lempung ekspansif yaitu menggunakan nilai indeks plastisitas sebagai berikut.

Tabel 18

Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Tingkat PI

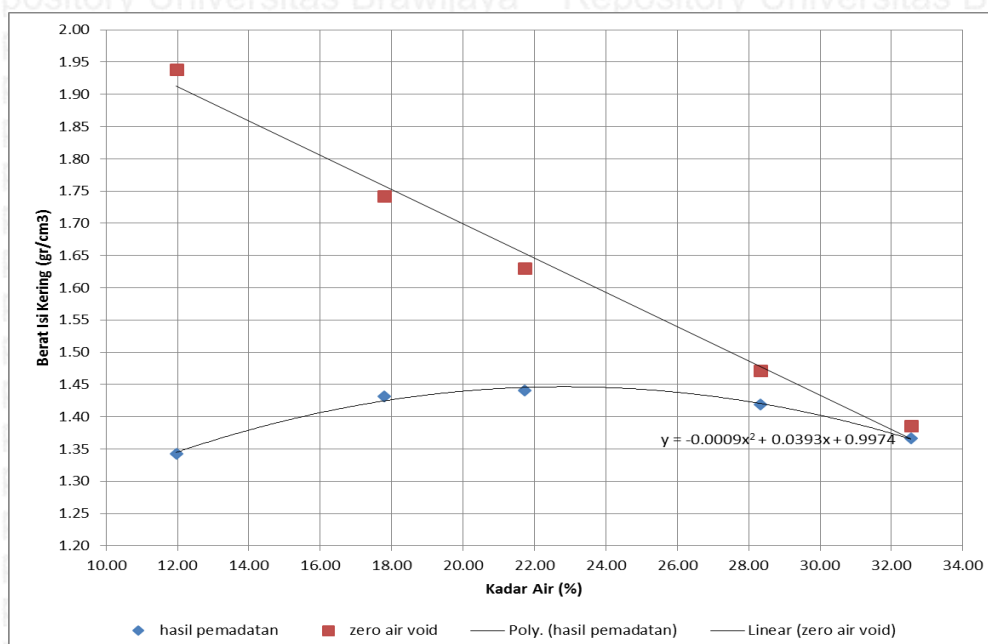
Klasifikasi Tanah Ekspansif		
Hubungan PI dengan Tingkat Pengembangan		
Chen, 1967	PI (%)	Tingkat Pengembangan
	0-15	Rendah
	10-35	Sedang
	20-55	Tinggi
	>35	Sangat Tinggi
Nilai sampel uji	47,22	
Kesimpulan	Potensi mengembang sangat tinggi	

4.2. Penentuan Kadar Air Optimum

Penentuan kadar air optimum (OMC) diketahui berdasarkan dari pengujian pemadatan standar. Selain itu juga untuk mengetahui berat isi kering maksimum (γ_d maks) dari tanah yang akan digunakan sebagai benda uji sesuai dengan metode ASTM-698 Metode B. Dalam pemeriksaan pemadatan standar tersebut hanya dilakukan untuk tanah asli dengan bahan sebagai berikut:

- Diameter cetakan (*Mold*) 156 mm (6")
- Bahan lolos saringan No. 4 (4,75 mm)
- Berat alat pemukul (*proctor*) 2,5 kg (5,5 lbs) dengan tinggi jatuh 30,48 cm (12")

Hasil dari pengujian pemadatan standar untuk tanah asli disajikan dalam grafik berikut ini.



Gambar 32. Hasil Pemadatan Tanah Asli

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 32 di atas diperoleh kadar air optimum (OMC) adalah 21,8% dan untuk berat isi kering maksimum (γ_d maks) adalah 1,43 gr/cm³.

4.3. Kepadatan Tanah

Pengujian kepadatan tanah dilakukan karena pemodelan sampel uji ke dalam box cukup sulit dikerjakan. Selain cukup sulit untuk mencapai kepadatan kering rencana (γ_d maks) sebesar 1,43 gr/cm³, kondisi box pun tidak akan mampu menahan ketika kepadatan tanah sebesar tersebut dipaksakan. Maka dari itu didalam penelitian ini untuk pemodelan tanah asli, digunakan berat isi kering sebesar 1,17 gr/cm³ dimana nilai tersebut didapat dari *trial and error*.

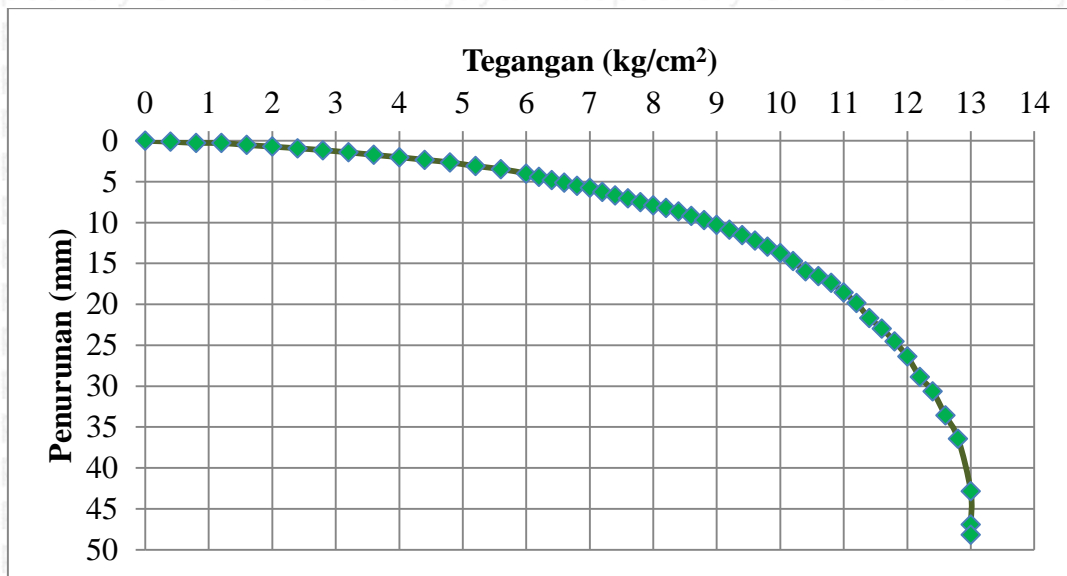
Hasil dari *trial and error* tersebut distandardisasi pada seluruh sampel uji. Dengan diketahuinya berat isi kering dan kadar air serta volume tanah, maka dapat dihitung pula kebutuhan jumlah sampel tanah dan air untuk pemodelan benda uji. Agar kepadatan yang direncanakan tercapai, pemadatan tanah dikontrol tiap-tiap lapisan yaitu untuk berat tanah dengan OMC seberat 6 kg untuk satu lapisan setebal 5 cm. Hal tersebut dilakukan agar tercapai keseragaman kepadatan pada seluruh sampel uji. Sedangkan lapisan pasir dalam penelitian ini dalam kondisi kering, untuk lapisan bawah dengan ketebalan 3 cm dengan berat 3,15 kg, sedangkan lapisan atas digunakan seberat 1,05 kg dengan ketebalan 1 cm.

Untuk pemodelan kolom DSM stabilisasi kapur 8% menggunakan kadar air 21,8% dan berat isi kering maksimum $1,43 \text{ gr/cm}^3$. Pemodelan ini dibuat dengan variasi jarak dan kedalaman yang telah ditentukan sebelumnya. Untuk mengkontrol kepadatan pemodelan kolom DSM tiap-tiap lapisan cara yang digunakan sama seperti saat pembuatan benda uji tanah asli. Tiap lapisan dipadatkan dengan kepadatan yang sesudah ditentukan sebelumnya, yaitu dengan memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai dengan volume tiap lapisan. Semua perlakuan distandardisasi, guna tercapainya keseragaman kepadatan untuk seluruh sampel uji.

4.4 Analisa Daya Dukung Tanah

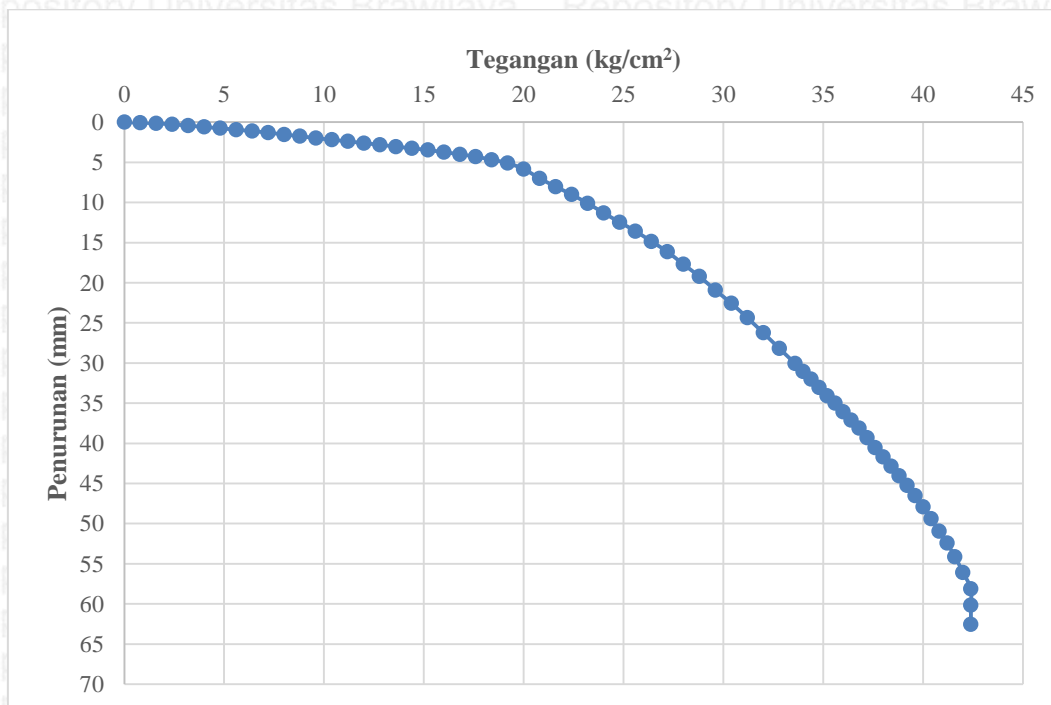
Penelitian mengenai *Deep Soil Mixing* dalam hal metode analisis daya dukung yang digunakan adalah metode eksperimen yang diperoleh langsung dari data hasil uji pembebanan. Metode analitik tidak dilakukan karena dalam percobaan laboratorium yang menghasilkan data-data pendukung perencanaan seperti kohesi (C) dan sudut geser (ϕ) tidak dilakukan. Analisis daya dukung dilakukan pada masing-masing variasi jarak antar kolom dan panjang kolom. Hal ini guna mengetahui variasi manakah yang paling berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah.

Sebelum pengujian daya dukung terhadap tanah stabilisasi, terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap benda uji tanah asli. Pengujian tanah asli dilakukan pada uji beban vertikal dimana hasil yang didapat nantinya berupa data penurunan dari hasil pembacaan LVDT dan besarnya beban disetiap penurunan dari pembacaan *Load Cell*. Beban maksimum (P_u) yang dapat ditahan oleh tanah asli adalah 325 kg dengan penurunan pada saat beban maksimum sebesar 42,84 mm. Luas alas plat diketahui sebesar 25 cm^2 dengan menggunakan persamaan (2-6), maka didapat besarnya daya dukung tanah (q_u) sebesar 13 kg/cm^2 . Grafik hubungan tegangan dan penurunan pada tanah asli adalah sebagai berikut.



Gambar 33. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Tanah Asli

Tanah dengan stabilisasi 100% dibuat dengan cara perbaikan penuh pada area pengaruh 15 x 15 cm dan kedalaman stabilisasi 20 cm, area tersebut diisi oleh campuran tanah dengan 8% kapur dari berat isi kering (γ_d). Metode pengujian sama dengan benda uji lainnya yaitu dilakukan dengan uji beban vertikal dengan luas pelat (fondasi) 25 cm². Grafik uji pembebanan terhadap tanah stabilisasi 100% ditampilkan dalam gambar berikut ini.



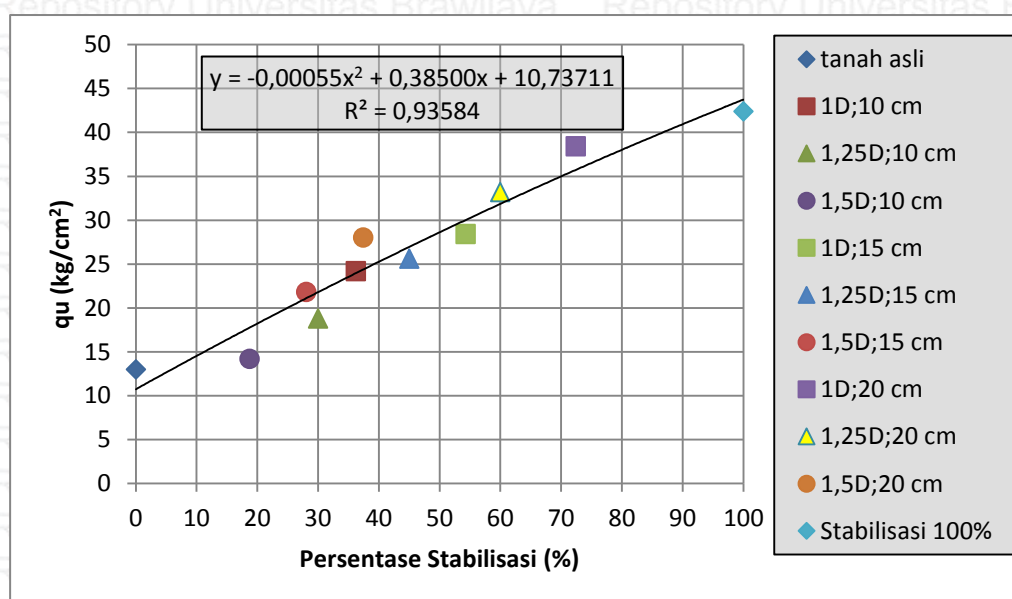
Gambar 34. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Tanah Stabilisasi 100%

4.4.1 Nilai Daya Dukung Tanah terhadap Persentase Tanah yang Distabilisasi dengan Kolom DSM

Persentase tanah yang distabilisasi pada penelitian ini diperoleh berdasarkan luasan daerah pengaruh yaitu sebesar 15x15 cm, sehingga area stabilisasi dikali dengan tinggi yang kemudian menghasilkan volume tanah stabilisasi dibandingkan dengan volume tanah pada area pengaruh menghasilkan rasio persentase tanah stabilisasi kolom *Deep Soil Mixing*. Hasil pengujian daya dukung terhadap persentase tanah stabilisasi ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 19
Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi Tanah

Jenis Benda Uji	Kedalaman	Jarak	Persentase Stabilisasi	Pu	qu
	(cm)	(cm)	(%)	(kg)	(kg/cm ²)
Tanah Asli	20	-	0	325	13
Tanah Asli + 100% stabilisasi	20	-	100	1060	42,4
	10	4.8	36,19	605	24,2
	10	6	29,99	470	18,8
	10	7.2	18,72	355	14,2
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	15	4.8	54,29	710	28,4
	15	6	44,99	640	25,6
	15	7.2	28,08	545	21,8
	20	4.8	72,38	960	38,4
	20	6	59,99	830	33,2
	20	7.2	37,44	700	28



Gambar 35. Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Persentase Stabilisasi

Seperti yang terlihat dalam gambar 35, didapat suatu persamaan pengaruh persentase stabilisasi terhadap nilai daya dukung tanah. Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa nilai daya dukung mengalami peningkatan dengan dilakukannya stabilisasi.

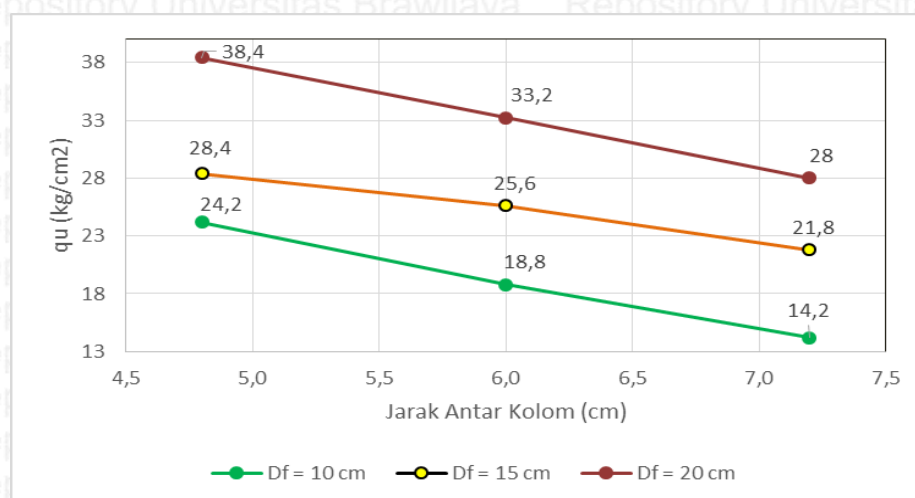
4.4.2 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Data hasil pengujian eksperimen terhadap nilai daya dukung tanah dengan variasi jarak antar kolom ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 20

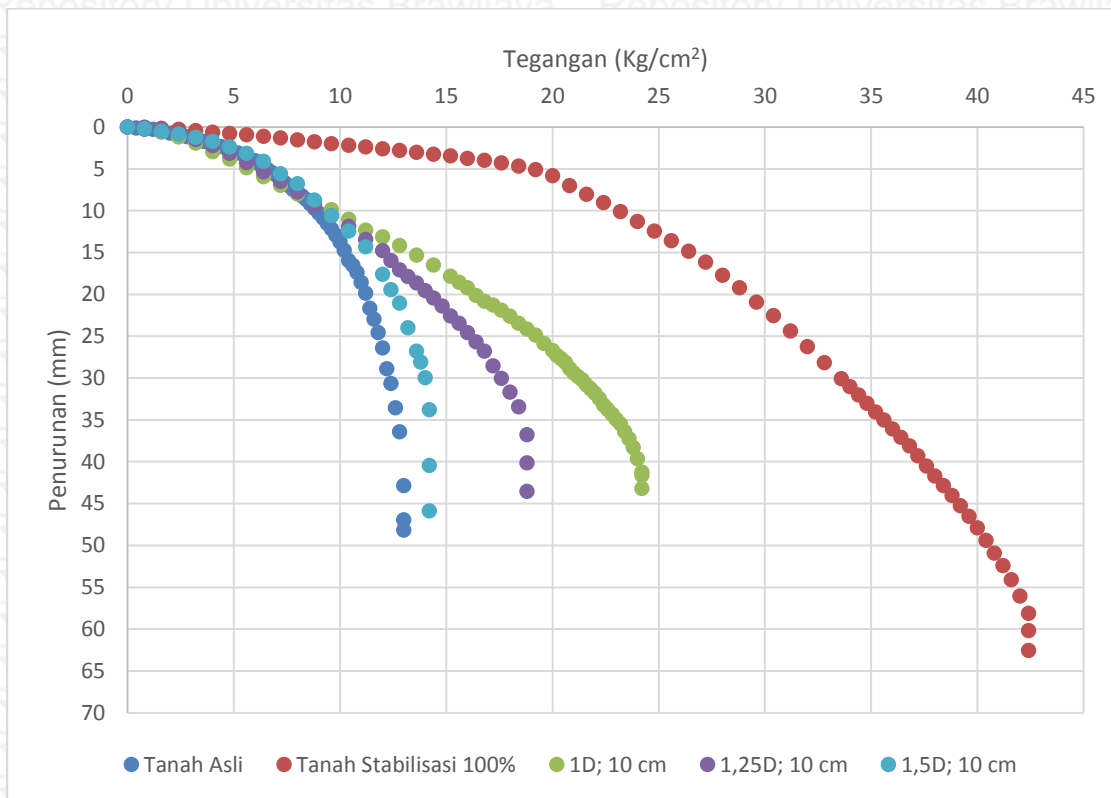
Nilai Daya Dukung pada Variasi Jarak antar Kolom terhadap Kedalaman

Jenis Benda Uji	Kedalaman	Jarak DSM	Pu	qu
	DSM	(cm)	(kg)	(kg/cm ²)
Tanah Asli	-	-	325	13
Tanah Asli + 100% stabilisasi	20	-	1060	42,4
		1D = 4,8	605	24,2
		10	1,25D = 6,0	470
	15	1,5D = 7,2	355	14,2
		1D = 4,8	710	28,4
		15	1,25D = 6,0	640
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	15	1,5D = 7,2	545	21,8
		1D = 4,8	960	38,4
		20	1,25D = 6,0	830
	20	1,5D = 7,2	700	28

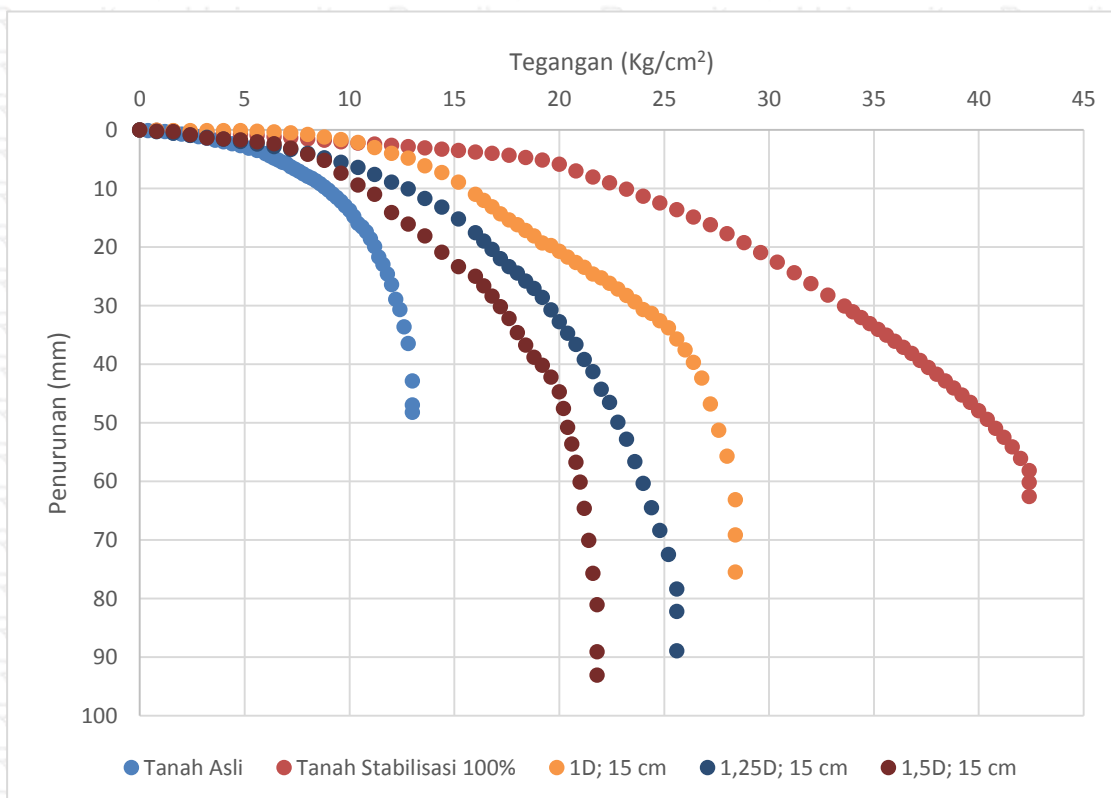


Gambar 36. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Jarak antar Kolom

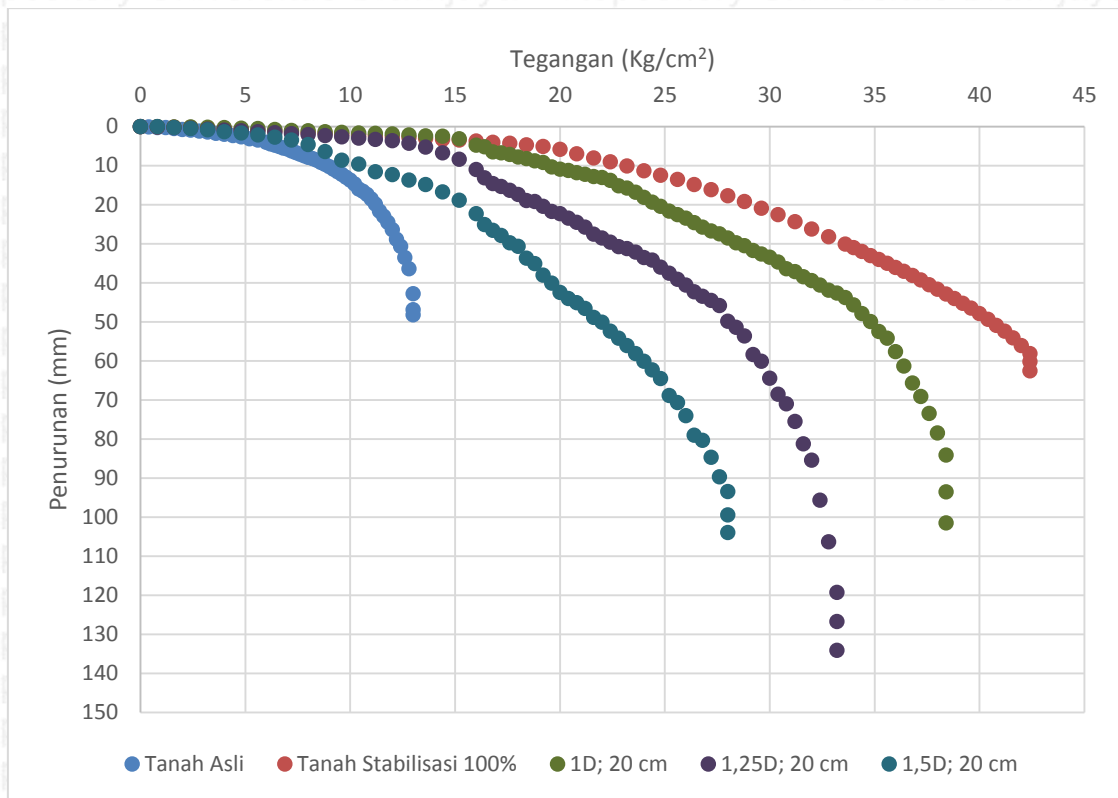
Berikut adalah grafik hubungan tegangan dan penurunan pada variasi jarak terhadap kedalaman kolom.



Gambar 37. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (D_f) = 10 cm



Gambar 38. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (D_f) = 15 cm



Gambar 39. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Kedalaman Kolom (Df) = 20 cm

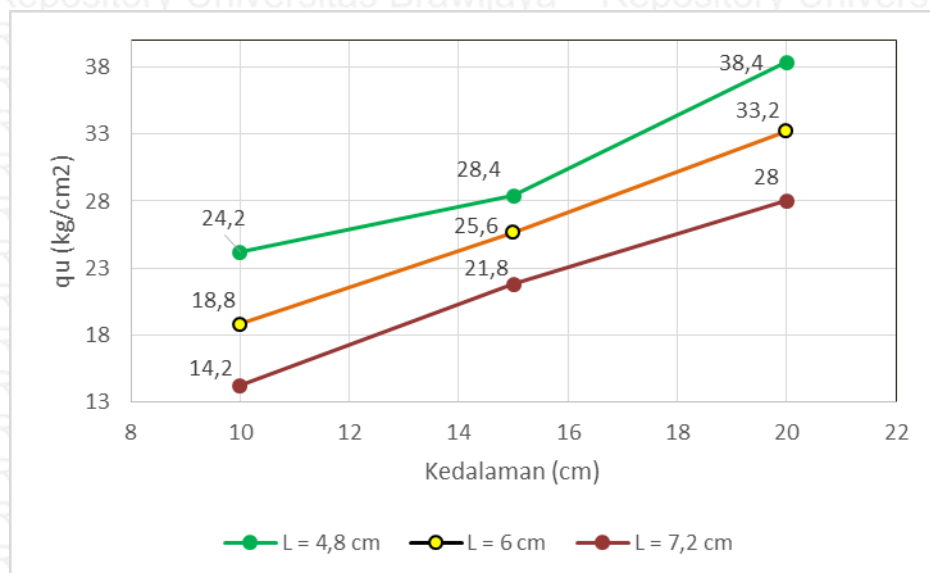
Dengan adanya stabilisasi menggunakan kolom DSM nilai q_u mengalami peningkatan seiring dengan semakin rapat jarak antar kolom dilihat pada kedalaman yang sama. Nilai daya dukung paling tinggi pada kedalaman terjadi pada variasi jarak 4,8 cm (1D). hal tersebut terjadi karena, luasan tanah terstabilisasi yang diterima plat beban menjadi lebih besar. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh kepadatan tanah disekitar kolom yang meningkat, sehingga nilai daya dukungnya menjadi lebih besar.

4.4.3 Nilai Daya Dukung Tanah pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)

Hasil penelitian dan analisis terhadap besarnya beban ultimit dan nilai daya dukung tanah pada variasi kedalaman kolom DSM (Df), dimana dalam jarak kolom yang sama terdapat 3 variasi kedalaman kolom yaitu pada Df = 10 cm, Df = 15 cm dan Df = 20 cm. Besarnya beban dan daya dukung batas yang terjadi, ditampilkan dalam tabel berikut ini.

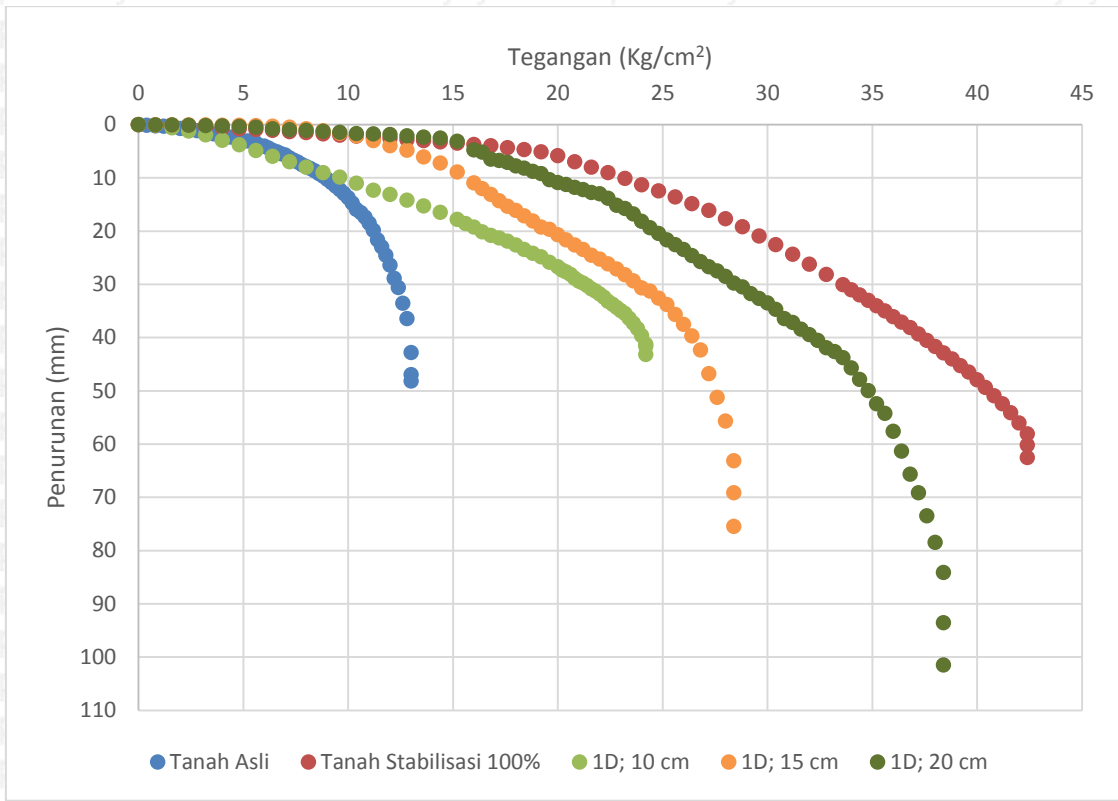
Tabel 21
 Nilai Daya Dukung pada Variasi Kedalaman Kolom terhadap Jarak

Jenis Benda Uji	Jarak (cm)	Kedalaman (cm)	Pu (kg)	qu (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	-	325	13
Tanah Asli + 100% stabilisasi	-	20	1060	42,4
	-	10	605	24,2
	4,8	15	710	28,4
	-	20	960	38,4
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	-	10	470	18,8
	6	15	640	25,6
	-	20	830	33,2
	-	10	355	14,2
	7,2	15	545	21,8
	-	20	700	28

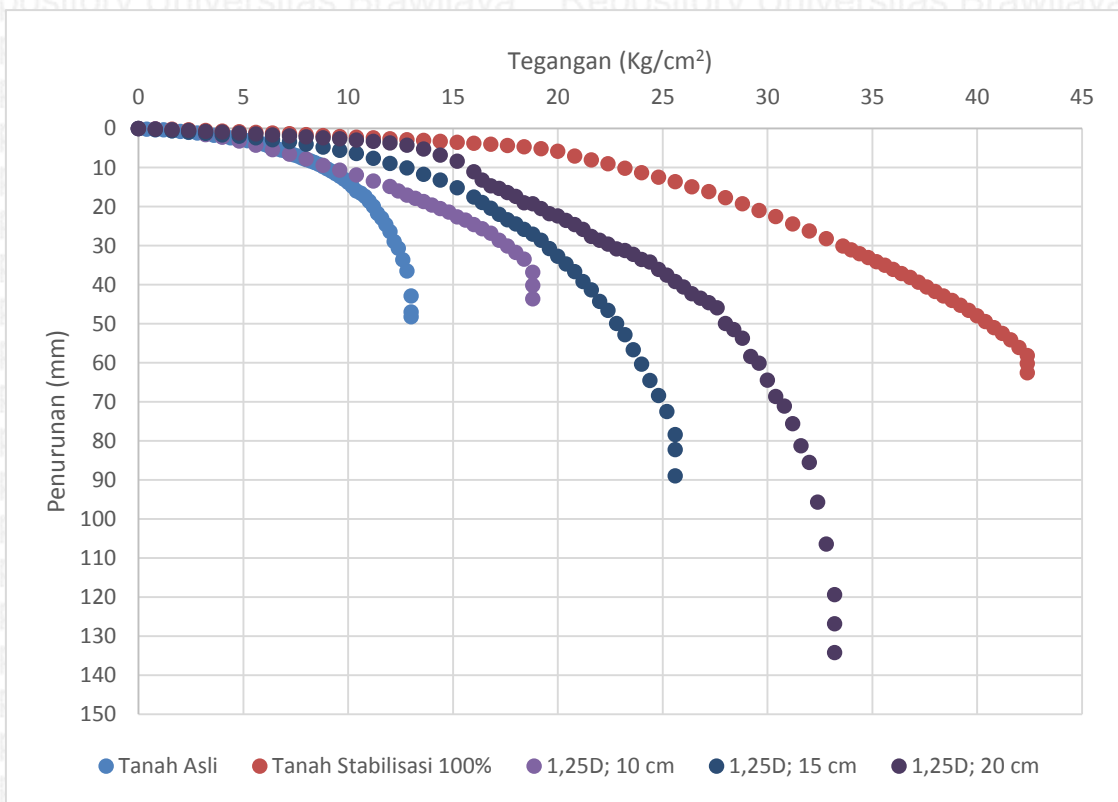


Gambar 40. Perbandingan Nilai Daya Dukung dengan Variasi Kedalaman

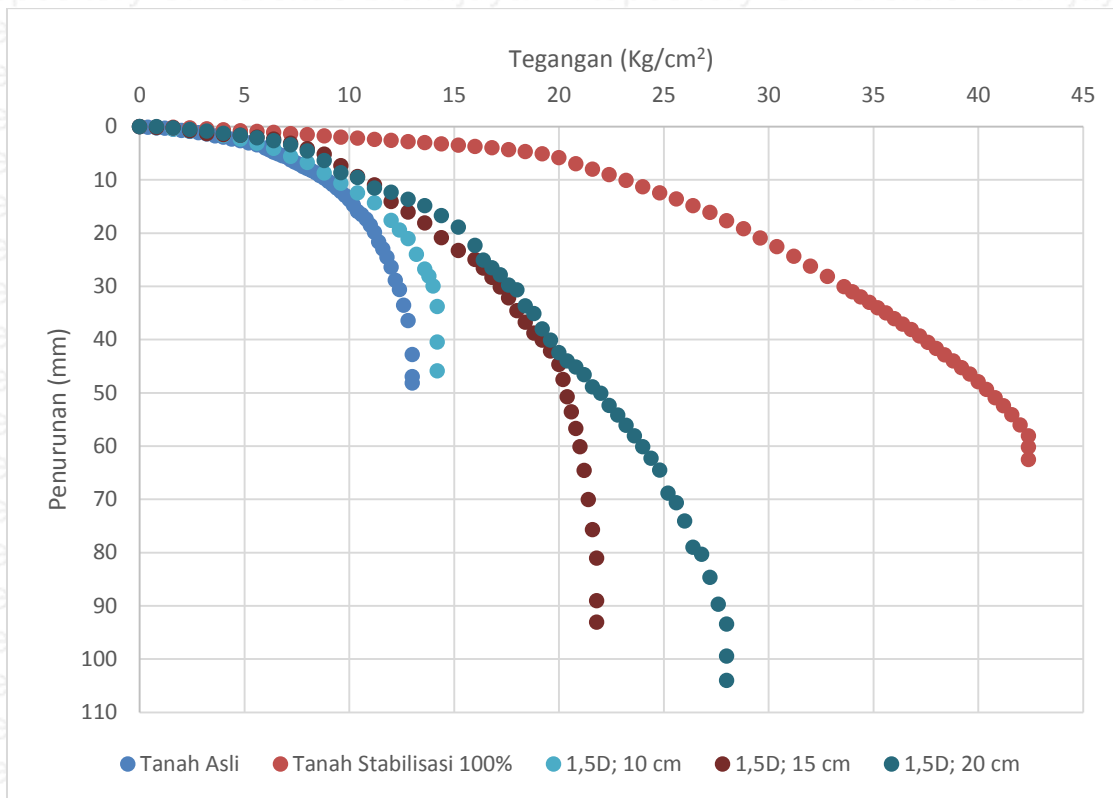
Berikut adalah grafik hubungan tegangan dan penurunan pada variasi kedalaman kolom DSM terhadap jarak antar kolom.



Gambar 41. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom 1D = 4,8 cm



Gambar 42. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom 1,25D = 6 cm



Gambar 43. Hubungan Tegangan dan Penurunan pada Jarak Antar Kolom 1,5D= 7,2 cm

Perbandingan nilai daya dukung dengan variasi kedalaman terhadap jarak antar kolom menunjukkan bahwa q_u mengalami peningkatan dengan seiring bertambahnya kedalaman kolom. Dalam grafik tersebut terlihat bahwa nilai daya dukung (q_u) yang terbesar berada pada variasi kedalaman 20 cm.

Apabila desain perkerasan direncanakan untuk jalan kelas I dengan keterangan tebal lapisan perkerasan seperti pada gambar 44. Maka hasil didapat daya dukung berdasarkan beban luar adalah sebagai berikut.

AC - WC	5 cm
AC - BW	8 cm
AC - BASE	12 cm
LPA	15 cm
LPB	20 cm

Gambar 44. Desain Perkerasan Jalan

Berdasarkan PP no. 43 th. 1993 pasal 11, muatan sumbu terberat (MST) kendaraan yang diijinkan melewati jalan kelas I (jalan arteri) adalah sebesar 10 ton. Perhitungan beban kendaraan sebagai beban “T” serta perhitungan beban perkerasan dijelaskan lebih lanjut dalam lampiran, menghasilkan beban total persatuan luas yaitu sebesar 2,521 kg/cm².

Tabel 22
Nilai Daya Dukung Ijin

Kedalaman	Jarak	Persentase Stabilisasi	Pu	qu	qu/FS
(cm)	(cm)	(%)	(kg)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
20	-	0	325	13	9,29
20	-	100	1060	42,4	30,29
10	4,8	36,19	605	24,2	17,29
10	6	29,99	470	18,8	13,43
10	7,2	18,72	355	14,2	10,14
15	4,8	54,29	710	28,4	20,29
15	6	44,99	640	25,6	18,29
15	7,2	28,08	545	21,8	15,57
20	4,8	72,38	960	38,4	27,43
20	6	59,99	830	33,2	23,71
20	7,2	37,44	700	28	20,00

Dari tabel diatas nilai daya dukung ijin adalah daya dukung dibagi dengan *factor of safety* (FS) yang besarnya 1,4 untuk desain jalan diatas tanah ekspansif berdasarkan Pd T-10-2005-B. Hasil daya dukung ijin semua variasi melebihi dari daya dukung beban luar sebesar 2,521 kg/cm², sehingga semua variasi stabilisasi layak dan mampu untuk digunakan atau diterapkan untuk desain jalan tipe I.

4.5. Analisa Daya Dukung Tanah dengan *Tangen Intersection Method*

Dalam pengujian yang dilakukan terhadap benda uji dihasilkan pembacaan daya dukung dan penurunan. Salah satu metode mencari nilai daya dukung adalah dengan *tangen intersection method* (Kulhawy, 1988). Nilai daya dukung didapatkan dari perpotongan garis tangensial yang ditarik dari atas dan bawah. Metode ini dapat menentukan nilai daya dukung pada penurunan masing-masing benda uji dengan variasi jarak dan kedalaman.

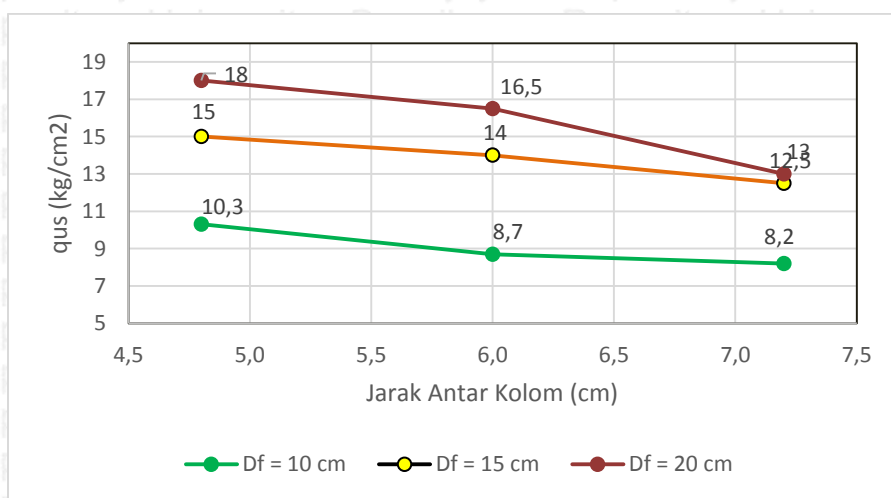
4.5.1 Nilai Daya Dukung Tanah yang Distabilisasi Kolom DSM pada Variasi Jarak dengan *Tangen Intersection Method*

Setelah dilakukan pengujian pembebanan pada benda uji tanah asli, langkah selanjutnya adalah uji pembebanan pada benda uji dengan stabilisasi kolom DSM 8% kapur. Guna mengetahui besarnya nilai daya dukung tanah pada masing-masing variasi maka peninjauan dilakukan dengan *tangen intersection method*. Berikut adalah analisis grafik hubungan daya dukung dengan *tangen intersection method*.

Tabel 23

Nilai Daya Dukung pada Penurunan yang sama pada Variasi Jarak

Jenis Benda Uji	Kedalaman	Jarak	Penurunan	q_{us} (kg/cm ²)
	(cm)	(cm)	mm	
Tanah Asli	20	-	3	5,4
Tanah Asli + 100% stabilisasi	20	-	5	22,8
	10	4,8	5,5	10,3
	10	6	5,5	8,7
	10	7,2	4,5	8,2
	15	4,8	5	15
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	15	6	5	14
	15	7,2	4,8	12,5
	20	4,8	4,9	18
	20	6	4,9	16,5
	20	7,2	4,8	13



Gambar 45. Hubungan Daya Dukung dengan Variasi Jarak *tangen intersection method*

Tabel 23 dan Gambar 48 menjelaskan bahwa variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh pada peningkatan daya dukung tanah. Pada kedalaman yang sama yaitu (Df) 10 cm, (Df) 15 cm, dan (Df) 20 cm, semakin kecil jarak kolom maka daya dukung tanah semakin meningkat. Pada kedalaman 10 cm ke 15 cm peningkatan nilai daya dukung cukup kecil, dapat disebabkan karena kepadatan kolom yang tidak sama. Kontrol kepadatan pada kolom tidak dilakukan dengan uji *density*, melainkan dengan berat tanah tiap lapis.

Peningkatan daya dukung tanah pada variasi jarak antar kolom tidak cukup signifikan dibandingkan pada variasi kedalaman. Tetapi nilai daya dukung tanah stabilisasi mengalami peningkatan dari tanah asli. Nilai daya dukung terbesar yaitu 18 kg/cm² pada jarak 4,8 cm dengan kedalaman kolom 20 cm.

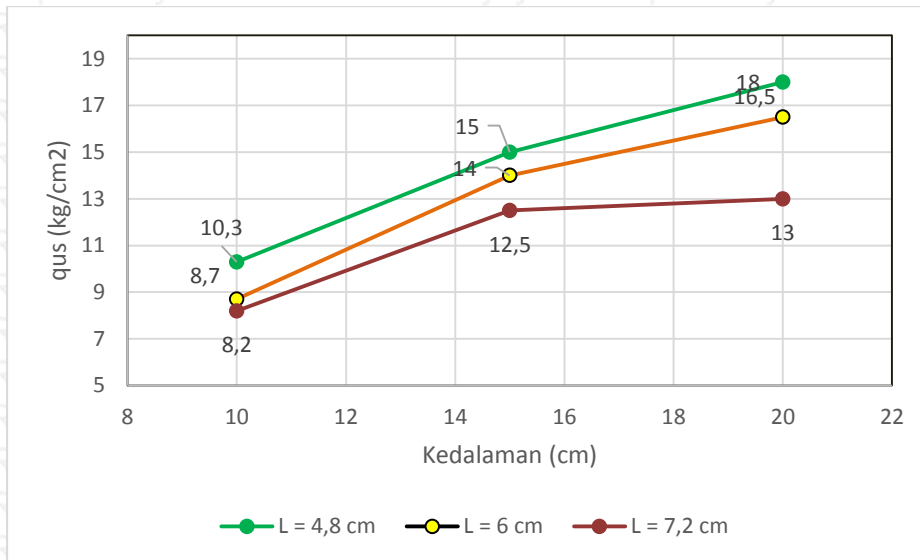
4.5.2 Nilai Daya Dukung Tanah yang Distabilisasi Kolom DSM pada Variasi Kedalaman dengan *Tangen Intersection Method*

Analisis daya dukung tanah dengan menggunakan *tangen intersection method* tidak hanya ditinjau dari variasi jarak antar kolom, tetapi terhadap variasi kedalaman kolom juga. Adapun hasil analisis dengan metode tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 24

Nilai Daya Dukung pada Penurunan yang sama pada Variasi Kedalaman

Jenis Benda Uji	Jarak (cm)	Kedalaman (cm)	Penurunan (mm)	qu _s (kg/cm ²)
Tanah Asli	-	20	3	5,4
Tanah Asli + 100% stabilisasi	-	20	5	22,8
	4,8	10	5,5	10,3
	4,8	15	5	15
	4,8	20	4,9	18
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	6	10	5,5	8,7
	6	15	5	14
	6	20	4,9	16,5
	7,2	10	4,5	8,2
	7,2	15	4,8	12,5
	7,2	20	4,8	13



Gambar 46. Hubungan Daya Dukung dengan Variasi Jarak *tangent intersection method*

Tabel 24 dan Gambar 52 menjelaskan bahwa variasi kedalaman memberikan pengaruh pada peningkatan daya dukung tanah. Pada jarak yang sama yaitu (L) 4,8 cm, (L) 6 cm, dan (L) 7,2 cm, daya dukung tanah semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman kolom. Nilai daya dukung tanah yang telah distabilisasi dengan kolom DSM mengalami peningkatan terhadap daya dukung tanah asli. Nilai daya dukung terbesar yaitu 18 kg/cm² pada jarak 4,8 cm dengan kedalaman kolom 20 cm.

4.6. Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCIu) Berdasarkan pada Daya Dukung Batas

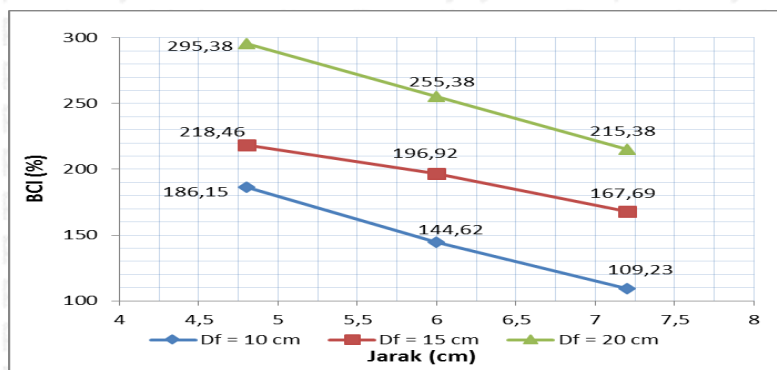
Suatu analisis perbandingan antara daya dukung batas saat tanah distabilisasi kolom DSM 8% kapur dengan tanah tanpa stabilisasi merupakan definisi dari analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCIu). Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui besarnya peningkatan nilai daya dukung yang terjadi akibat adanya stabilisasi kolom DSM dengan variasi jarak antar kolom dan kedalaman kolom.

4.6.1 Perbandingan BCIu pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Perhitungan *Bearing Capacity Improvement* (BCIu) dilakukan dengan menggunakan rumus (2-7). Besarnya pengaruh variasi jarak dapat diketahui berdasarkan besarnya nilai BCIu, semakin besar nilai BCIu maka semakin besar pengaruh jarak kolom terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah. Dari hasil daya dukung yang telah dilakukan pada masing-masing variasi jarak antar kolom, maka nilai BCI dapat dihitung yang ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 25
Nilai BCIu pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Kedalaman Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	q_{ul} Stabilisasi	q_u Tanah Asli	BCIu (%)	Peningkatan BCIu (%)
10	4,8	24,2	13	186,15	41,54
	6	18,8	13	144,62	
	7,2	14,2	13	109,23	
15	4,8	28,4	13	218,46	21,54
	6	25,6	13	196,92	
	7,2	21,8	13	167,69	
20	4,8	38,4	13	295,38	40,00
	6	33,2	13	255,38	
	7,2	28	13	215,38	



Gambar 47. Hubungan Variasi Jarak antar Kolom terhadap nilai BCIu

Dari Tabel 25 terlihat bahwa variasi jarak pada perbaikan tanah ekspansif dengan stabilisasi DSM mengakibatkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah, hal ini terlihat dari nilai daya dukung setelah perbaikan (q_{ul}) yang lebih tinggi daripada nilai daya dukung tanpa perbaikan (q_u) atau dengan kata lain BCI lebih dari 100%. Berdasarkan Gambar 45 dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai daya dukung (BCIu) terbesar terdapat pada jarak kolom yang paling dekat yaitu 4,8 cm (1D) lalu diikuti oleh jarak kolom 6 cm (1,25D), dan 7,2 cm (1,5D).

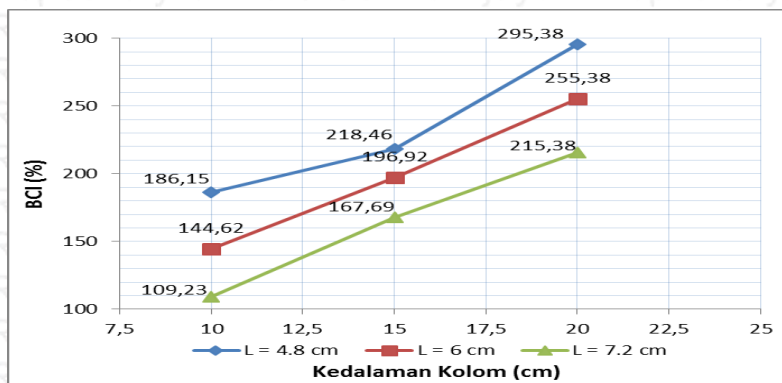
4.6.2 Perbandingan BCI pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)

Pengaruh dari variasi kedalaman kolom terhadap nilai BCI dapat dilihat pada gambar 45. Dari hasil daya dukung yang telah dilakukan pada masing-masing variasi

kedalaman kolom, maka nilai BCI dapat dihitung dengan ditampilkan pada tabel berikut ini.

Tabel 26
Nilai BCI pada Kedalaman Kolom (Df)

Jarak Kolom (L) cm	Kedalaman Kolom (Df) cm	q_{ul} Stabilisasi kg/cm ²	q_u Tanah Asli kg/cm ²	BCI (%)	Peningkatan BCI (%)
4,8	10	24,2	13	186,15	32,31
	15	28,4	13	218,46	
	20	38,4	13	295,38	
6	10	18,8	13	144,62	52,31
	15	25,6	13	196,92	
	20	33,2	13	255,38	
7,2	10	14,2	13	109,23	58,46
	15	21,8	13	167,69	
	20	28	13	215,38	



Gambar 48. Hubungan Variasi Kedalaman Kolom terhadap nilai BCI

Dari Tabel 26 terlihat bahwa variasi kedalaman pada perbaikan tanah ekspansif dengan stabilisasi DSM mengakibatkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah, hal ini terlihat dari nilai daya dukung setelah perbaikan (q_{ul}) yang lebih tinggi daripada nilai daya dukung tanpa perbaikan (q_u) atau dengan kata lain BCI lebih dari 100%. Berdasarkan Gambar 46 dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai daya dukung (BCI) terbesar terdapat pada kedalaman kolom yang paling besar yaitu 20 cm lalu diikuti oleh kedalaman kolom 15 cm, dan 10 cm.

4.7. Analisis Bearing Capacity Improvement (BCIs) Tangen Intersection Method

Pada analisis ini sama seperti analisis BCI pada q_u , menggunakan perbandingan antara daya dukung sebelum perbaikan dan daya dukung setelah perbaikan menggunakan

kolom DSM tipe *triangular*. Namun untuk perhitungan tidak digunakan q_u , melainkan menggunakan q_s yang didapatkan pada saat menggunakan *Tangen Intersection Method*.

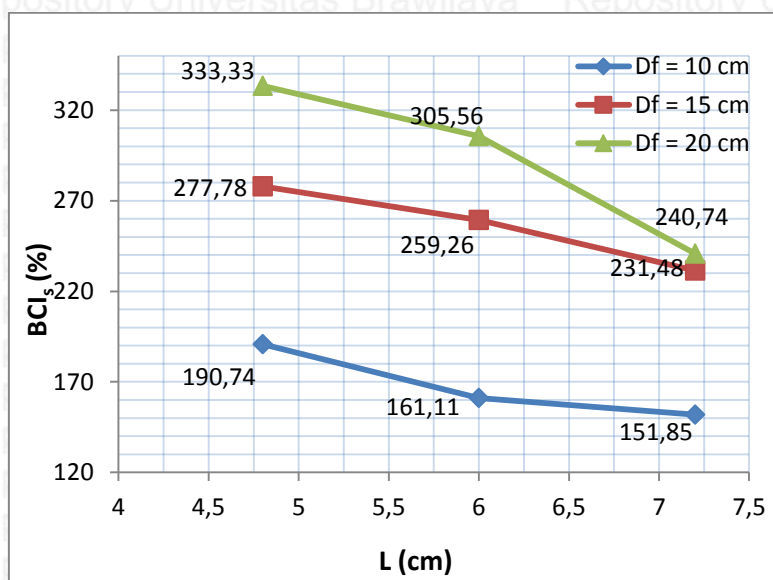
4.7.1 Perbandingan BCIs pada Variasi Jarak antar Kolom (L)

Pada analisis ini juga dilakukan analisis pada variasi jarak dan panjang kolom, untuk mengetahui perubahan daya dukung TIM pada saat sebelum perbaikan dan setelah perbaikan menggunakan BCI.

Tabel 27

Nilai BCIs pada Variasi Jarak antar Kolom

D _f	L	q	q tanah sebelum distabilisasi	BCIs	Peningkatan BCIs
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)
10	4,8	10,3	5,4	190,74	29,63
	6	8,7	5,4	161,11	
	7,2	8,2	5,4	151,85	
15	4,8	15,0	5,4	277,78	18,52
	6	14,0	5,4	259,26	
	7,2	12,5	5,4	231,48	
20	4,8	18,0	5,4	333,33	27,78
	6	16,5	5,4	305,56	
	7,2	13,0	5,4	240,74	



Gambar 49. Hubungan Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom terhadap Nilai BCIs

Berdasarkan data tersebut, semua nilai BCIs mengalami peningkatan terhadap nilai BCIs tanah asli. Sama halnya dengan analisa BCIu sebelumnya, semakin kecil jarak antar

kolom (L) akan meningkatkan nilai BCIs. Peningkatan nilai BCIs paling besar terjadi pada kedalaman kolom (Df) 20 cm untuk variasi jarak antar kolom 4,8 cm yaitu meningkat sebesar 233,33%. Sedangkan pada variasi jarak antar kolom 7,2 cm, BCIs meningkat 1430,74% terhadap BCIs tanah asli. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi jarak memiliki pengaruh terhadap nilai daya dukung tanah.

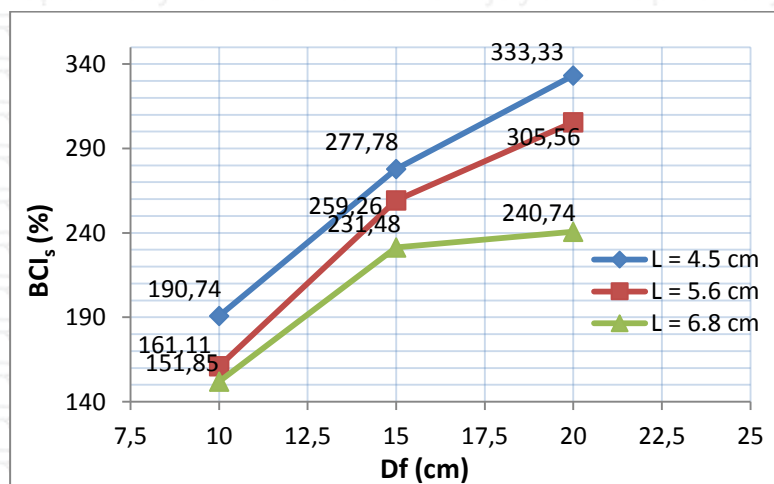
4.7.2 Perbandingan BCIs pada Variasi Kedalaman Kolom (Df)

Pengaruh dari variasi kedalaman kolom terhadap nilai BCIs dapat dilihat pada gambar berikut ini. Dari hasil daya dukung yang telah dilakukan pada masing-masing variasi kedalaman kolom, maka nilai BCIs dapat dihitung yang ditampilkan pada Tabel berikut.

Tabel 28

Nilai BCIs pada Variasi Kedalaman Kolom

L	Df	q	q tanah sebelum distabilisasi	BCIs	Peningkatan BCIs
cm	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	(%)	(%)
4,8	10	10,3	5,4	190,74	87,04
	15	15,0	5,4	277,78	55,56
	20	18,0	5,4	333,33	
6	10	8,7	5,4	161,11	98,15
	15	14,0	5,4	259,26	46,30
	20	16,5	5,4	305,56	
7,2	10	8,2	5,4	151,85	79,63
	15	12,5	5,4	231,48	9,26
	20	13,0	5,4	240,74	



Gambar 50. Hubungan Pengaruh Variasi Kedalaman Kolom terhadap Nilai BCIs

Berdasarkan pada tabel 28 dan gambar 50, dapat diketahui bahwa bertambah dalamnya kolom (Df) akan meningkatkan nilai BCIs. Dari grafik yang disajikan pada gambar tersebut, peningkatan BCIs yang paling besar terdapat pada kedalaman kolom 20 cm sebesar 233,33%. Berdasarkan data tersebut, seiring bertambah dalamnya kolom stabilisasi maka akan meningkatkan kekuatan tanah asli disekitar luasan yang terstabilisasi. Sehingga hal tersebut yang mempengaruhi peningkatan nilai BCIs, pada kedalaman kolom DSM yang lebih panjang.

4.8. Pengaruh Variasi Jarak antar Kolom (L) dan Kedalaman Kolom (Df) terhadap Nilai Daya Dukung Tanah

Guna mengetahui seberapa besar pengaruh variasi jarak antar kolom dan kedalaman kolom stabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* terhadap nilai daya dukung tanah, merupakan salah satu tujuan dari penelitian ini.

Secara umum, stabilisasi tanah ekspansif metode *Deep Soil Mixing* dengan penambahan 8% kapur terbukti dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh penambahan nilai kepadatan tanah akibat reaksi dari bahan stabilisasi tersebut dalam hal ini berupa penambahan kapur. Adapun variasi jarak dan kedalaman kolom memberikan hasil peningkatan daya dukung yang berbeda-beda pula. Hal ini terjadi karena dari variasi-variasi tersebut menghasilkan besarnya persentase tanah yang distabilisasi.

Berdasarkan penjelasan pada sub bab 4.4.1, dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung dengan persentase tanah stabilisasi dengan kolom *Deep Soil Mixing* adalah berbanding lurus. Semakin besar persentase tanah yang distabilisasi, maka semakin besar pula nilai daya dukung yang dihasilkan.

Dari hasil pengujian dan analisis, diperoleh persentase terbesar tanah yang distabilisasi yaitu 72,38%, dengan nilai daya dukung batas (q_u) sebesar 38,4 kg/cm². Hasil tersebut terletak pada variasi jarak antar kolom (L) terkecil yaitu 4,8 cm dan kedalaman kolom (Df) terbesar yaitu 20 cm. Untuk mengetahui variasi manakah yang lebih berpengaruh untuk meningkatkan daya dukung tanah, dapat dilihat dari perbandingan peningkatan nilai daya dukung pada tabel berikut ini.

Tabel 29
Perbandingan Peningkatan BCIu pada Variasi Jarak dan Kedalaman

Variasi Jarak (VL)		Peningkatan BCI		Variasi Kedalaman (VDf)		Peningkatan BCI		Keterangan
Df	L	%	%	L	Df	%	%	
cm	cm			cm	cm			
10	4,8	41,54		4,8	10	32,31		VL > VDf
	6				15			76,92
	7,2	35,38	20					
15	4,8	21,54		6	10	52,31		VL < VDf
	6				15			58,46
	7,2	29,23	20					
20	4,8	40,00		7,2	10	58,46		VL < VDf
	6				15			47,69
	7,2	40,00	20					

Dari tabel 29 tersebut dapat disimpulkan bahwa variasi kedalaman lebih berpengaruh pada metode stabilisasi *Deep Soil Mixing* pola *single square* diameter 4,8 cm. hal ini dibuktikan dengan lebih besarnya peningkatan BCI yang terjadi yaitu terbesar 76,92% pada variasi kedalaman dibandingkan dengan variasi jarak antar kolom. Sedangkan untuk mengetahui variasi yang lebih berpengaruh terhadap peningkatan BCIs, dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 30
Perbandingan Peningkatan BCIs pada Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom

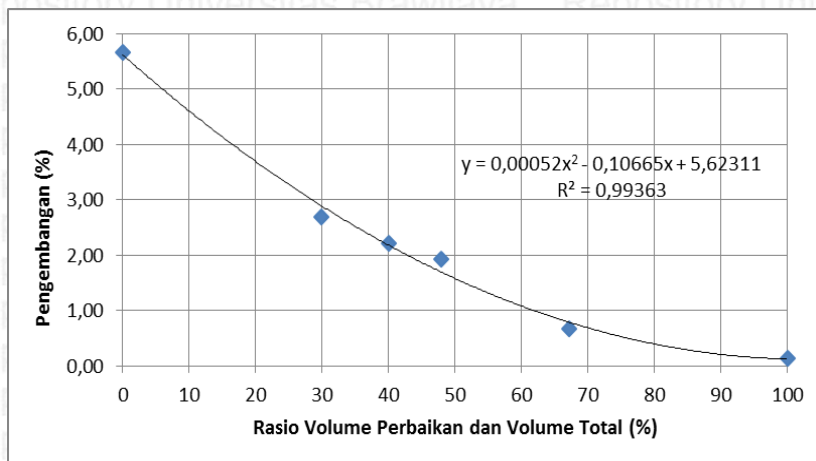
Variasi Jarak (VL)		Peningkatan BCIs		Variasi Kedalaman (VDf)		Peningkatan BCIs		Keterangan
Df	L	%	%	L	Df	%	%	
cm	cm			cm	cm			
10	4,8	29,63		4,8	10	87,04		VL < VDf
	6				15			55,56
	7,2	9,26	20					
15	4,8	18,52		6	10	98,15		VL < VDf
	6				15			46,30
	7,2	27,78	20					
20	4,8	27,78		7,2	10	79,63		VL < VDf
	6				15			9,26
	7,2	64,81	20					

Dari tabel 30 dapat disimpulkan sama halnya dengan hasil dari perbandingan peningkatan BCIu bahwa variasi kedalaman lebih berpengaruh pada metode stabilisasi

Deep Soil Mixing pola *single square* diameter 4,8 cm. hal ini dibuktikan dengan peningkatan BCIs terbesar terjadi pada variasi kedalaman yaitu sebesar 98,15%.

4.9. Pemeriksaan Pengembangan (*Swelling*)

Pemeriksaan uji pengembangan dilakukan dengan kadar air optimum (OMC) dengan variasi jumlah kolom DSM yang berguna untuk mengetahui pengaruh persentase yang distabilisasi terhadap nilai pengembangan (*swelling*). Hasil pemeriksaan pengembangan ditampilkan pada grafik berikut ini.



Gambar 51. Grafik Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Berdasarkan grafik hubungan nilai pengembangan tanah terhadap persentase stabilisasi dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya persentase tanah yang distabilisasi maka persentase pengembangan mengalami penurunan yang cukup signifikan. Hasil uji pengembangan terhadap persentase tanah stabilisasi ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 31
Hasil Uji Pengembangan

Benda Uji	Volume Benda Uji (V)	Volume DSM (Vi)	Persentase Perbaikan (Vi/V)	Pengembangan (Swelling)
	cm ³	cm ³	%	%
Tanah Asli	2075,61	0,00	0	5,66
DSM dengan 7 kolom (D=3,2 cm)	2075,61	619,27	29,84	2,69
DSM dengan 6 kolom (D=4 cm)	2075,61	829,38	39,96	2,23
DSM dengan 5 kolom (D=4,8 cm)	2075,61	995,26	47,95	1,94
DSM dengan 7 kolom (D=4,8 cm)	2075,61	1393,36	67,13	0,67
Stabilisasi 100%	2075,61	2075,61	100,00	0,14

Berdasarkan persamaan yang terdapat dalam grafik hubungan persentase pengembangan dengan persentase stabilisasi yaitu $y = 0,00052x^2 - 0,10665x + 5,6231$, maka nilai pengembangan pada benda uji yang dimodelkan di dalam *box* dapat diketahui besarnya. Dengan memasukkan nilai variabel x dengan besarnya persentase stabilisasi, maka akan didapat besarnya nilai persentase pengembangan. Hasil perhitungan persentase pengembangan terhadap stabilisasi kolom DSM di dalam *box* ditampilkan dalam tabel berikut ini.

Tabel 32
Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Kedalaman (cm)	Jarak (cm)	Persentase Stabilisasi (%)	Persentase Pengembangan %	Penurunan Pengembangan %
Tanah Asli	20	-	0	5,66	0
Tanah Asli + 100% stabilisasi	20	-	100	0,14	97,59
	10	4,8	36,19	2,44	56,81
	10	6	29,99	2,89	48,90
	10	7,2	18,72	3,81	32,69
Tanah Asli + Kolom DSM dengan 8% Kapur	15	4,8	54,29	1,37	75,86
	15	6	44,99	1,88	66,83
	15	7,2	28,08	3,04	46,31
	20	4,8	72,38	0,63	88,90
	20	6	59,99	1,10	80,62
	20	7,2	37,44	2,36	58,31

Dari tabel tersebut terlihat bahwa tanah yang distabilisasi kolom DSM dengan kedalaman 20 cm dan jarak antar kolom 4,8 cm memiliki nilai pengembangan yang kecil yaitu sebesar 0,63% dan penurunan pengembangan sebesar 88,90% dari tanah sebelum distabilisasi. Dari hasil tersebut, stabilisasi kolom DSM menghasilkan penurunan nilai pengembangan yang cukup besar.

Menurut Madhyannapu dan Puppala (2014), toleransi besar pengembangan tanah yang diijinkan adalah 12 mm untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm untuk struktur *rigid pavement*. Rata-rata tanah lempung ekspansif di daerah Bojonegoro memiliki kedalaman hingga 1,5 meter, hal ini menunjukkan bahwa persentase mengembang maksimum yang diijinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8% dan 1,2% untuk

rigid pavement. Adapun dari analisa uji pengembangan terhadap pemodelan laboratorium yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi model DSM yang memenuhi batas maksimum persentase mengembang untuk struktur *flexible pavement* dan struktur *rigid pavement* adalah konfigurasi jarak (L) = 4,8 cm dan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm. Sedangkan konfigurasi DSM pada jarak (L) = 6 cm dan kedalaman kolom (D_f) = 20 cm memiliki nilai pengembangan 1,096% hanya memenuhi untuk struktur *rigid pavement*.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis pembahasan yang telah dilakukan. Mengenai perbaikan sifat tanah ekspansif (daya dukung dan pengembangan) dengan penambahan kapur metode *Deep Soil Mixing* pola *square* diameter 4,8 cm pada variasi kedalaman dan jarak, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya daya dukung tanah tanpa perbaikan didapatkan 13 kg/cm^2 dan besarnya pengembangan sebesar 5,659%. Terjadi perubahan nilai daya dukung ketika dilakukan 100% perbaikan, yaitu meningkat menjadi $42,4 \text{ kg/cm}^2$ serta persentase pengembangan menurun menjadi 0,136%.
2. Berdasarkan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI), terjadi peningkatan daya dukung tanah bila distabilisasi dengan metode *Deep Soil Mixing* pola *Single Square* diameter 4,8 cm pada variasi jarak dan kedalaman. Nilai BCI terbesar yaitu 295,38% pada jarak 4,8 cm kedalaman 20 cm, hal ini membuktikan bahwa nilai daya dukung setelah perbaikan lebih tinggi yaitu sebesar $38,4 \text{ kg/cm}^2$. Berdasarkan perbandingan peningkatan BCIu dihasilkan variasi kedalaman lebih berpengaruh, terbukti dengan peningkatan BCIu terbesar yang terjadi pada variasi kedalaman yaitu 76,92%. Dan berdasarkan BCIs variasi kedalaman lebih berpengaruh terbukti nilai BCIs terbesar pada variasi kedalaman yaitu 98,15%.
3. Stabilisasi tanah ekspansif dengan metode DSM 8% kapur, terbukti dapat menurunkan persentase pengembangan. Penurunan persentase mengembang tanah dapat turun secara signifikan seiring dengan bertambahnya persentase perbaikan. Variasi DSM dengan kedalaman kolom 20 cm dan jarak antar kolom 4,8 cm memiliki nilai pengembangan paling kecil yaitu 0,627%, hal ini menunjukkan penurunan pengembangan 88,9% dari tanah tanpa stabilisasi.
4. Berdasarkan perhitungan beban luar dan daya dukung ijin, diketahui bahwa besarnya beban luar persatuan luas untuk tipe jalan kelas I adalah sebesar $2,521 \text{ kg/cm}^2$. Besarnya daya dukung ijin semua variasi menghasilkan nilai lebih besar dari beban luar tersebut, sehingga semua variasi stabilisasi layak dan mampu untuk digunakan atau diterapkan untuk desain jalan tipe I.

5. Rata-rata kedalaman tanah lempung ekspansif di daerah Bojonegoro adalah 1,5 meter, sehingga persentase mengembang maksimum yang diijinkan untuk *flexible pavement* adalah sebesar 0,8%, pada dan 1,2% untuk *rigid pavement*. Sehingga variasi DSM 8% kapur pada jarak 4,8 cm dan kedalaman kolom 20 cm dengan nilai pengembangan 0,627% memenuhi untuk struktur *flexible pavement* dan *rigid pavement*. Sedangkan pada jarak 6 cm dan kedalaman kolom DSM 20 cm memiliki nilai pengembangan 1,096% hanya memenuhi untuk struktur *rigid pavement*.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan kepadatan lapisan pasir di atas dan di bawah lapisan tanah benda uji yang mendekati dengan kondisi lapangan agar diperoleh data yang lebih mendekati dengan kondisi lapangan.
2. Perlu digunakan *box* dengan material yang lebih kuat, sehingga *box* tidak mudah mengalami pecah atau rusak.

DAFTAR PUSTAKA

- 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. E. 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils (Second Edition)*. New York: Mcgraw-Hill College.
- Chen, F. H. 1975. *Foundations on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. 1993. *Mekanika Tanah, Jilid II*. Cetakan I. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Surabaya: Institut Teknologi 10 November.
- Das, B. M. 1995. *Mekanika Tanah, Jilid I*. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1994. *Peraturan SK SNI S-01-1994-03*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Frangky. 2016. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Deep Soil Mixing (DSM) 10% Kapur Diameter 4 cm Berpola Single Square Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif Di Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. C. 2006. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ingles, O. G. dan Metcalf, J. B. 1972. *Soil Stabilization Principles and Practice*. Melbourne: Butterworths Pty. Limited.
- Kosche, M. 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, A.W. 2017. Pengaruh Penambahan Kapur dengan Lamanya Waktu Perawatan (Curing) terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Tanah Lempung Ekspansif. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- 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, R.A. 2017. Pengaruh Penambahan Kapur terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Seed, H. B., Wood Ward, R. J. dan Lundgren, R. 1962. Prediction of Swelling Potensial

for Compacted Clay. *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*. 88 (SM4):107-131. American Society of Civil Engineers.

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.

Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Wahana Teknik Sipil*. 14 (1):38-45. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.





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	gram	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	
Berat jenis (Gs)	-	2,52	
volume tanah kering	cm ³	4,85	5,19
Isi pori	cm ³	6,06	5,61
Derajat kejenuhan (Sr)	%	99,71	94,79
Porositas (n)	%	55,52	51,95

Lampiran 3. Pengujian Berat Jenis Tanah Asli (*Specific Gravity*)

Labu Ukur	Satuan	1									
Berat Labu Ukur	gram	40,4									
Berat Tanah Kering (Ws)	gram	20									
Berat Labu Ukur + Air + Tanah (W1)	gram	150,68	152,84	153,16	153,39	153,47	153,54	153,57	153,67	153,80	153,83
Suhu	(⁰ C)	55	52	46	40	37	36	34	33	31	30
Berat Labu Ukur + Air (W2)	gram	140,505	140,652	140,946	141,240	141,387	141,436	141,534	141,583	141,681	141,730
Berat jenis Air (Gt)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Berat Jenis Tanah (Gs)		2,036	2,560	2,569	2,548	2,526	2,533	2,511	2,527	2,538	2,532
Rata-Rata Berat Jenis		2,488									

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	(⁰ 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)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Berat Jenis Tanah (Gs)		2,587	2,559	2,549	2,538	2,543	2,531	2,504	2,509	2,510	2,508
Rata-Rata Berat Jenis		2,534									

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	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Berat Jenis Tanah (Gs)		2,574	2,533	2,538	2,707	2,523	2,514	2,490	2,512	2,557	2,551
Rata-Rata Berat Jenis		2,549									

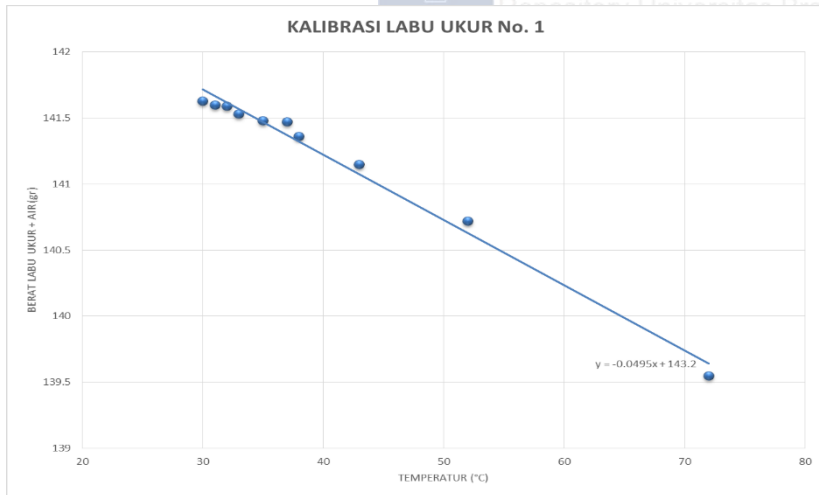
Sehingga Rata-rata Berat Jenis (Gs) = 2.524

Lampiran 4. Kalibrasi Labu Ukur

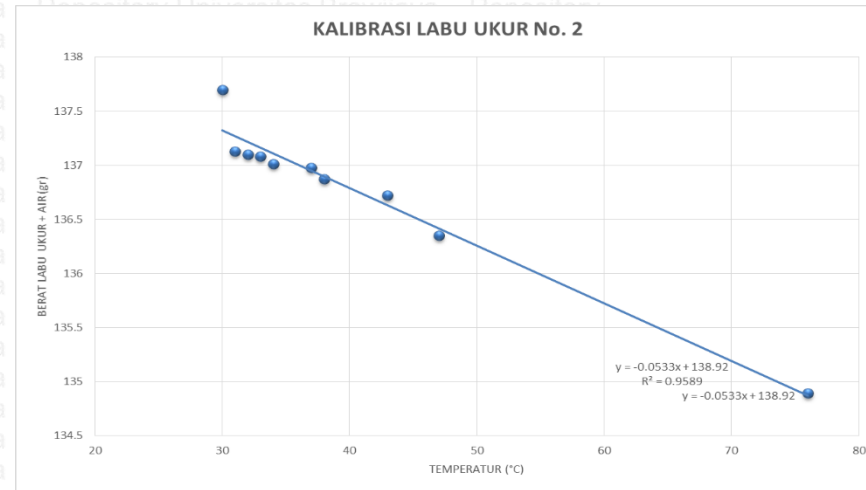
no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Berat Labu Ukur + Air (gram)	139,6	140,7	141,2	141,4	141,5	141,5	141,5	141,6	141,6	141,6
temperatur (°C)	72	52	43	38	37	35	33	32	31	30

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

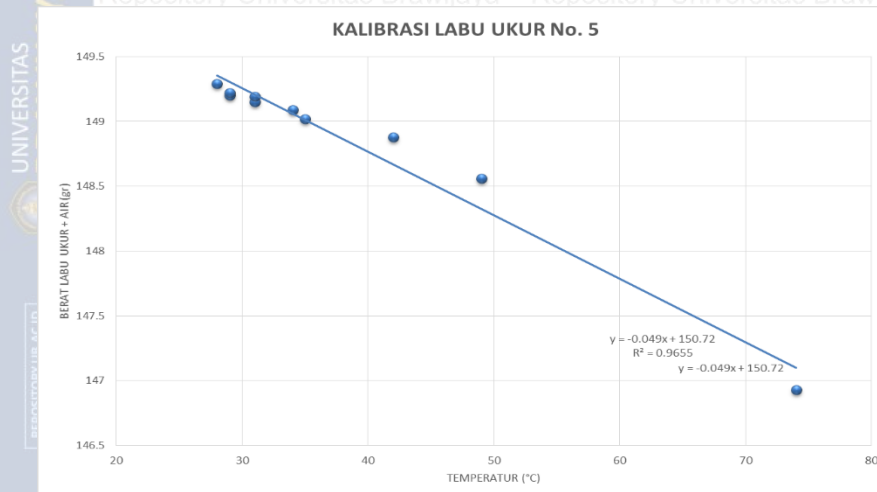
no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Berat Labu Ukur + Air (gram)	146,9	148,6	148,9	149,0	149,1	149,2	149,2	149,2	149,2	149,3
temperatur (°C)	74	49	42	35	34	31	31	29	29	28



Gambar 52. Kalibrasi Labu Ukur No. 1



Gambar 53. Kalibrasi Labu Ukur No. 2



Gambar 54. Kalibrasi Labu Ukur No. 5



Lampiran 5. Analisa Saringan dan Hydrometer

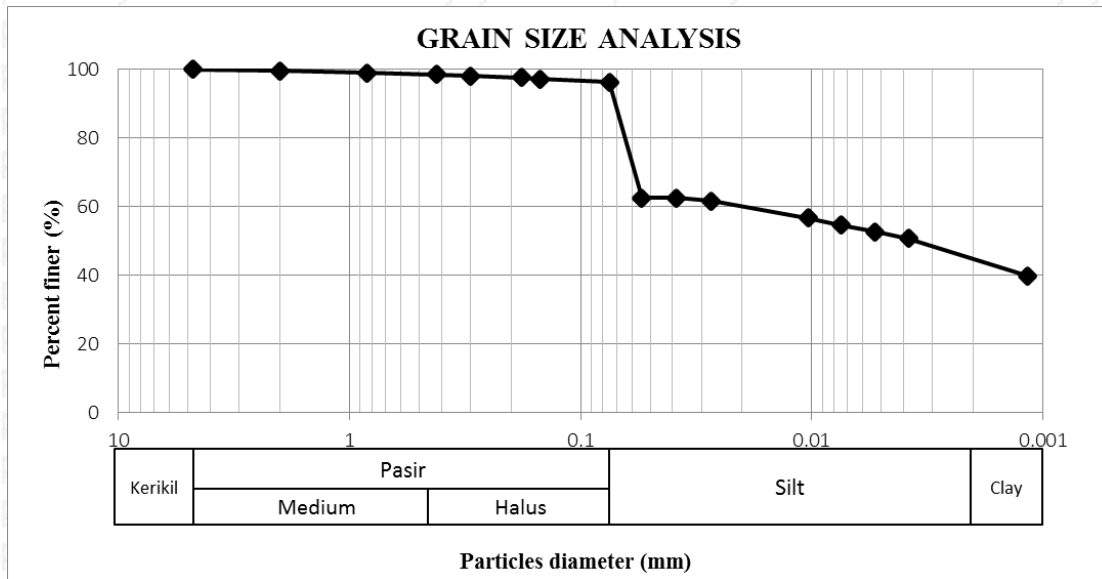
Analisa Saringan (*Grain Size*)

Sieve		Indiv. WT Retained (gram)	Acc. WT Retained (gram)	Retained (%)	Finer (%)
Sieve No.	Diameter (mm)				
4	4,75	0	0	0,0	100
10	2	0,72	0,72	0,36	99,64
20	0,84	1,18	1,90	0,95	99,05
40	0,42	1,06	2,96	1,48	98,52
50	0,3	0,77	3,73	1,87	98,13
80	0,18	1,06	4,79	2,40	97,60
100	0,15	0,75	5,54	2,77	97,23
200	0,075	1,97	7,51	3,76	96,24
Pan		192,41	199,92	100	0,00

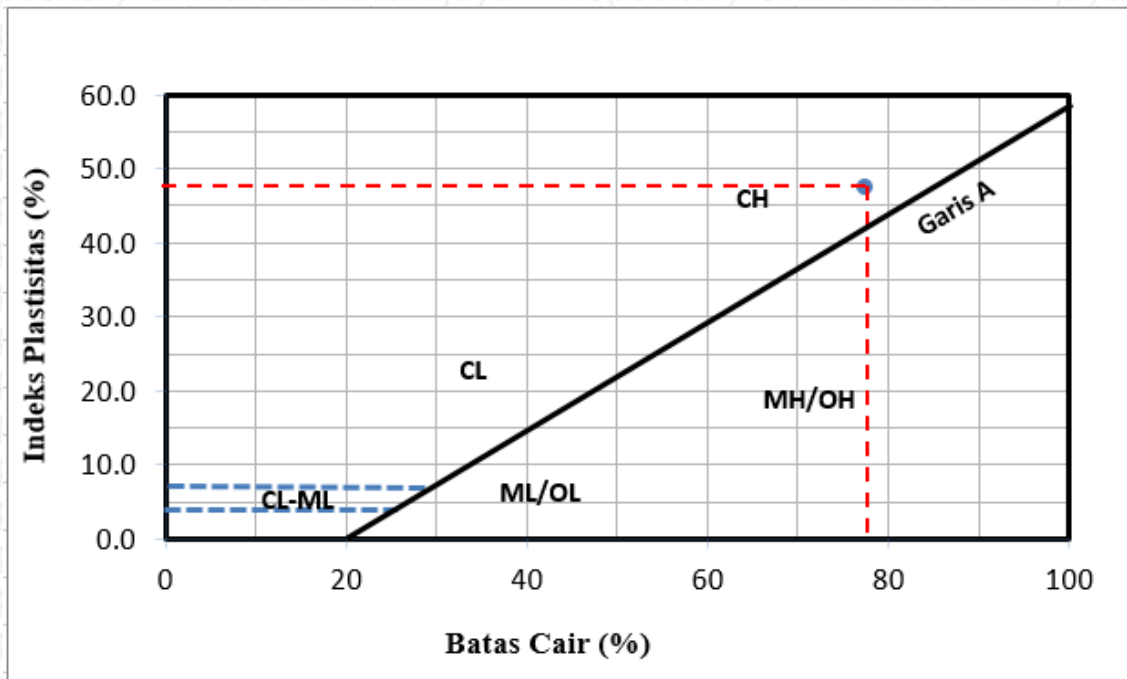
Analisa Hydrometer

Tipe hydrometer	:	151 H	Gs	:	2,524
Berat contoh tanah	:	50 gr	Ct 29	:	0,00305
Koreksi meniscus	:	0,001	a	:	1,031
Koreksi nol hydrometer	:	-0,0005			

Elapsed time	Temp.	Actual Hyd. Reading (Ra)	Hyd. Correction Reading	Finer	Meniscus Correction (R)	Effective Depth (L)	V = L/t	K From table	Diameter (D)	Acc. Finer
(min)	(°C)			(%)		(cm)			(mm)	(%)
0	29	1,028	1,0316	65,07	1,029	8,9	-	-	-	62,62
0,5	29	1,028	1,0316	65,07	1,029	8,9	17,8	0,0129	0,0544	62,62
1	29	1,028	1,0316	65,07	1,029	8,9	8,9	0,0129	0,0385	62,62
2	29	1,028	1,0311	64,04	1,029	8,9	4,45	0,0129	0,0272	61,63
15	29	1,025	1,0286	58,88	1,026	9,7	0,6467	0,0129	0,0104	56,67
30	29	1,024	1,0276	56,82	1,025	10	0,3333	0,0129	0,0074	54,68
60	29	1,023	1,0266	54,76	1,024	10,2	0,1700	0,0129	0,0053	52,70
120	29	1,022	1,0256	52,69	1,023	10,5	0,0875	0,0129	0,0038	50,71
1440	29	1,017	1,0201	41,35	1,018	11,8	0,0082	0,0129	0,0012	39,80



Gambar 55. Distribusi Butiran Hasil Uji Analisa Saringan dan Hydrometer



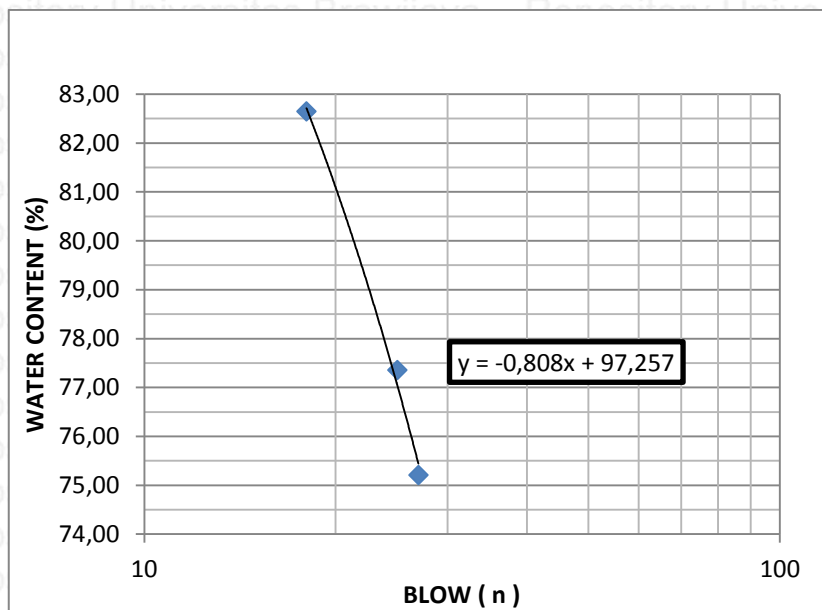
Gambar 56. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

Berdasarkan pembacaan grafik tersebut, tanah ini termasuk dalam jenis lempung anorganik dengan plastisitas sangat tinggi (CH).

Lampiran 6. Pengujian Batas-batas *Atterberg*

Pengujian Batas Cair Tanah (LL)

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
banyak pukulan		18	25	27



Gambar 57. Hubungan Kadar Air dengan Jumlah Ketukan

$$\begin{aligned}
 \text{Nilai batas cair (LL)} &= -0,808x + 97,257 \\
 &= -0,808(25) + 97,257 \\
 &= 77,057\%
 \end{aligned}$$

Pengujian Batas Plastis

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
 = 77,057% - 29,84% = 47,22 %

Pengujian Batas Susut Tanah (SL)

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*:

Batas Cair (LL)	77,057 %
Batas Plastis (PL)	29,84 %
Batas Susut (SL)	8,30 %
Indeks Plastisitas (PI)	47,22 %

Lampiran 7. Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli

Diketahui :

berat mold 6000 gram
 diameter mold 15,5 cm
 tinggi mold 11 cm
 volume mold 2075,61 cm³

Perhitungan kadar air :

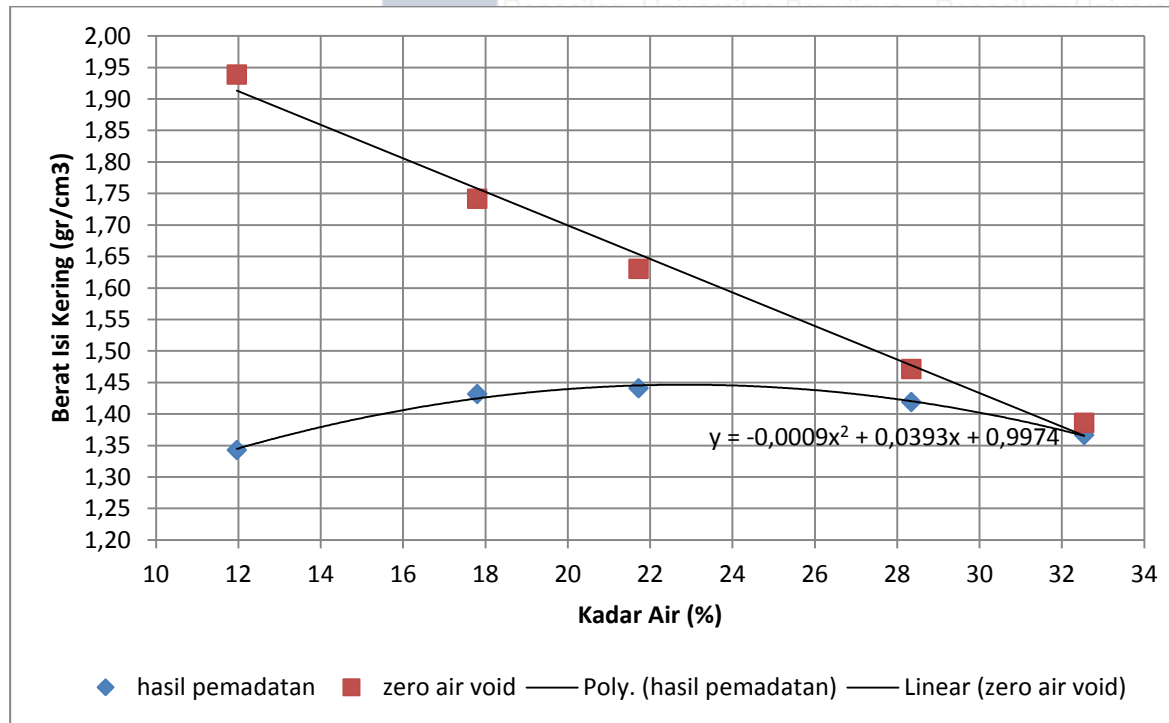
penambahan air	ml	500			750			1000			1250			1500		
		atas	tengah	bawah	atas	tengah	bawah	atas	tengah	bawah	atas	tengah	bawah	atas	tengah	bawah
berat cawan	gram	5.81	6.02	4.28	4.23	5.57	5.7	5.57	5.44	5.77	6.08	4.24	5.71	5.93	5.7	5.49
berat cawan + tanah basah	gram	11.83	11.58	10.59	13.34	16.53	15.26	14.67	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		

Perhitungan berat isi (γ) :

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



Gambar 58. Hubungan Berat Isi Kering dengan Kadar Air



Perhitungan berat isi kering maksimum:

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

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

$$x = 21,8$$

Sehingga,

$$y = -0,0009(21,8)^2 + 0,0393(21,8) + 0,9974$$

$$y = 1,43$$

Jadi diperoleh kadar air optimum (OMC) sebesar 21,8% dan berat isi kering maksimum (γ_d) sebesar 1,43 gr/cm³.

Perhitungan zero air void :

$$\text{Kadar air (w)} = 11,96 \%$$

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

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

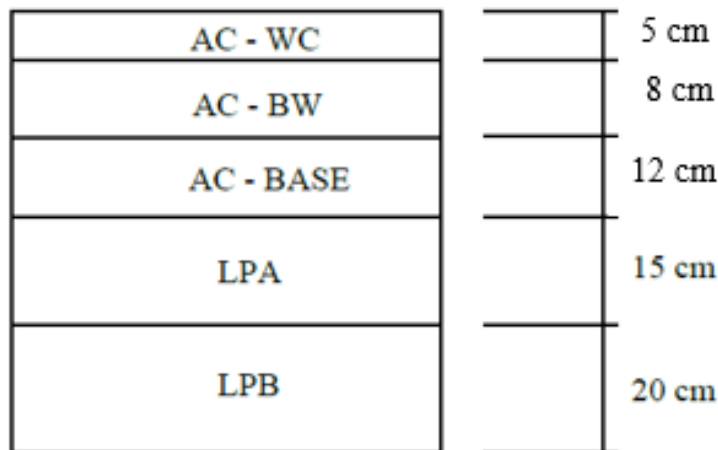
$$\begin{aligned} \text{Kepadatan Kering } z_{av} (\gamma_{zav}) &= \frac{(G_s \cdot \gamma_w)}{(100 + G_s \cdot w)} \times 100\% \\ &= \frac{(2,52 \times 1)}{(100 + (2,52 \times 11,96))} \times 100\% \\ &= 1,94 \text{ gr/cm}^3. \end{aligned}$$

Lampiran 8. Perhitungan Beban Luar

Berdasarkan manual desain perkerasan tahun 2013 tentang tebal lapis perkerasan halaman 65, di tampilkan dalam tabel berikut ini.

Bahan	Tebal Yang Diperlukan (mm)	Dijinkan penghamparan dalam beberapa lapis
HRS WC	Min. 30	tidak
HRS Base	Min. 35	ya
AC WC	Min. 40	tidak
AC BC	60 -80	ya
AC - Base	75 – 120	ya
Lapis Pondasi Agregat Kelas A 40 (gradasi dng ukuran maks. 40 mm)	150 -200	ya
Lapis Pondasi Agregat Kelas A 30 (gradasi dng ukuran maks 30 mm) (disarankan)	120 - 150	ya
Lapis Pondasi Agregat Kelas A 25 (gradasi dng ukuran maks 25 mm) (disarankan)	100 - 125	ya
Lapis Pondasi Agregat Kelas B (gradasi dng ukuran maks 50 mm)	200	ya
Lapis Pondasi Agregat Kelas B (gradasi dng ukuran maks 40 mm) (disarankan)	150 – 200	ya
CTB (gradasi dng ukuran maks 30 mm) atau LMC	150 – 200	tidak
Stabilisasi tanah atau kerikil alam	150 – 200	tidak
Kerikil alam	100 – 200	ya

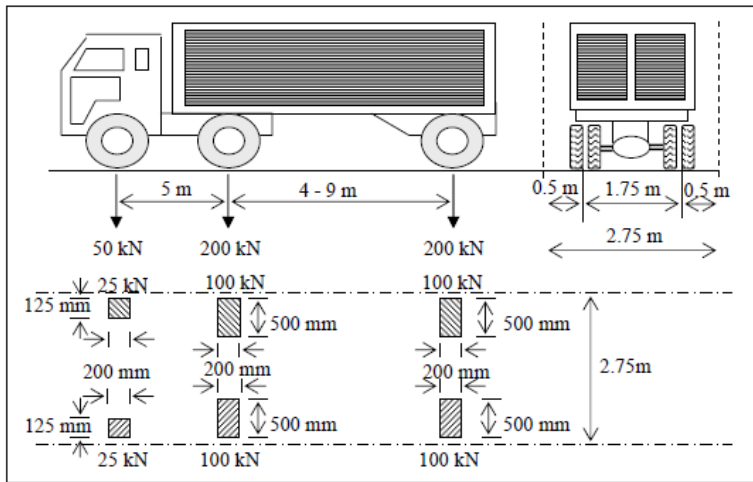
Apabila didesain untuk jalan kelas I dengan detail lapisan sebagai berikut:



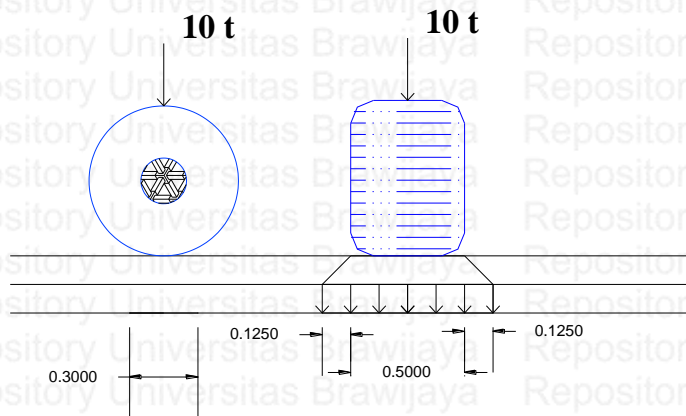
Gambar 59. Desain Perkerasan dan Lapis Pondasi Kelas Jalan I

1. Beban kendaraan

Berdasarkan PP no. 43 th. 1993 pasal 11, muatan sumbu terberat (MST) kendaraan yang diijinkan melewati jalan kelas I (jalan arteri) adalah sebesar 10 ton.



Gambar 60. Beban T Lantai Kendaraan



Gambar 61. Penyebaran Beban Roda

Luas bidang penyebaran :

$$p = 0,5 + 0,125 + 0,125 = 0,75 \text{ m}$$

$$l = 0,3 + 0,125 + 0,125 = 0,55 \text{ m}$$

$$A = p \times l = 0,75 \times 0,55 = 0,4125 \text{ m}^2$$

Beban merata akibat beban "T" (beban roda)

$$q = \frac{10000}{0,4125} = 24242,424 \text{ kg/m}^2 = 2,42 \text{ kg/cm}^2$$

2. Beban lapisan perkerasan

$$\gamma_{aspal} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$q = \gamma_{aspal} \times t \text{ perkerasan}$$

$$= 1600 \times (0,05 + 0,08 + 0,12)$$

$$= 400 \text{ kg/m}^2 = 0,04 \text{ kg/cm}^2$$

3. Beban lapisan pondasi

$$\gamma LPA = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma LPB = 1800 \text{ kg/m}^3$$

$$q = \gamma LPA \times t LPA$$

$$= 1700 \times 0,15$$

$$= 255 \text{ kg/m}^2 = 0,0255 \text{ kg/cm}^2$$

$$q = \gamma LPB \times t LPB$$

$$= 1800 \times 0,2$$

$$= 360 \text{ kg/m}^2 = 0,036 \text{ kg/cm}^2$$

Sehingga Beban Luar Total

$$q \text{ total} = q \text{ beban "T"} + q \text{ perkerasan} + q \text{ lapis pondasi}$$

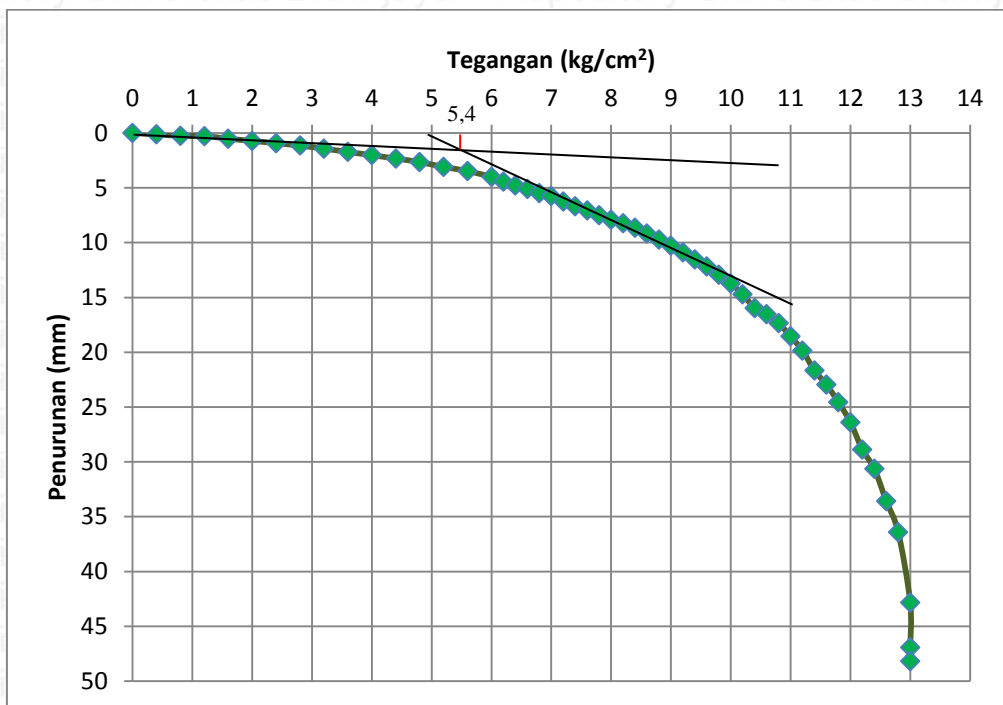
$$= 2,42 + 0,04 + 0,0255 + 0,036$$

$$= 2,5215 \text{ kg/cm}^2$$

Lampiran 9. Hasil Uji Pembebanan Tanah Asli

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	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



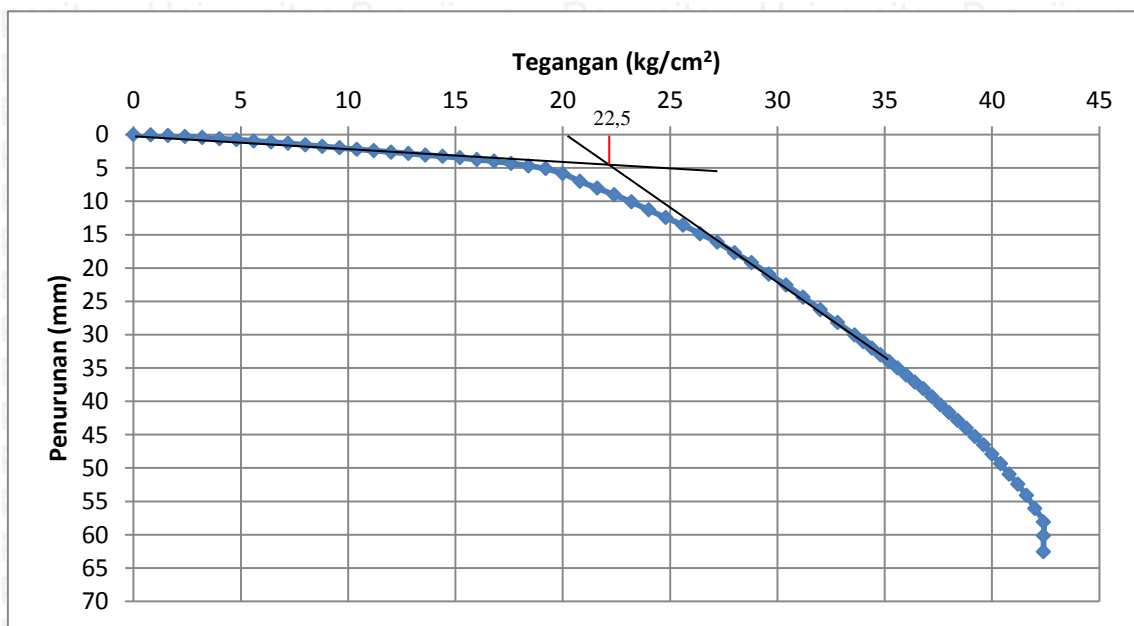
Lampiran 10. Hasil Uji Pembebanan Tanah Stabilisasi 100%

Kalibrasi LVDT 1 digit = 0,0097153

Pembacaan awal ke-2 = -4141

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	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



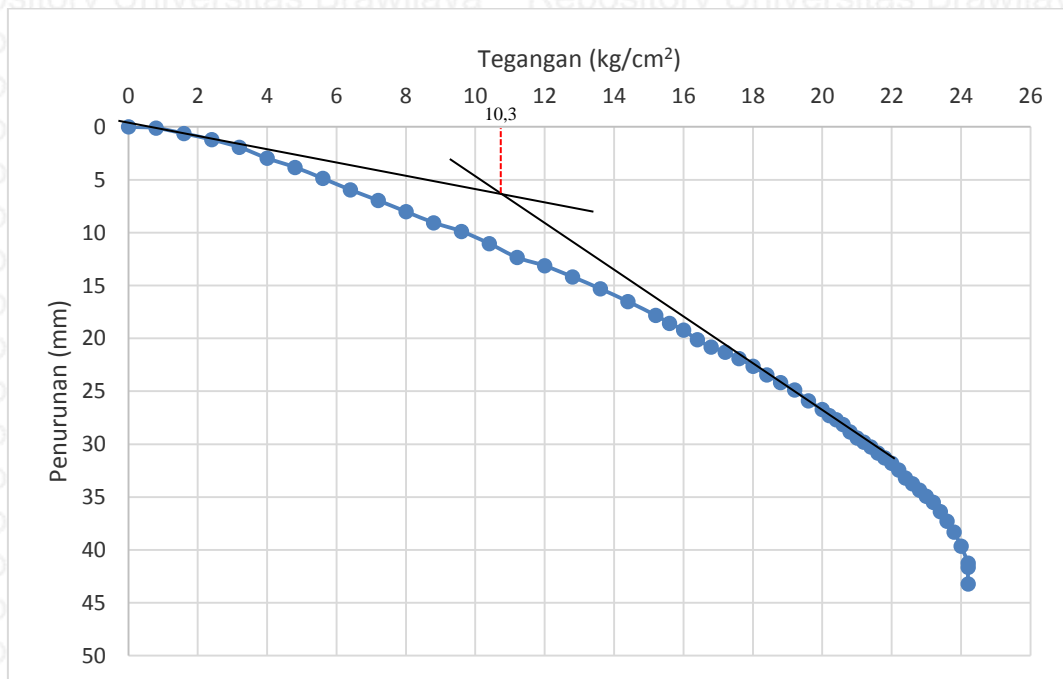
Lampiran 11. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 10 cm

Pembacaan awal ke-2 = 21,92

Pembacaan awal ke-3 = 16,79

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	26,63	0,00	0
20	20	26,52	0,11	0,8
20	40	26,01	0,62	1,6
20	60	25,43	1,20	2,4
20	80	24,71	1,93	3,2
20	100	23,67	2,96	4
20	120	22,81	3,82	4,8
20	140	21,77	4,86	5,6
20	160	20,68	5,95	6,4
20	180	19,68	6,95	7,2
20	200	18,62	8,01	8
20	220	17,58	9,05	8,8
20	240	16,75	9,88	9,6
20	260	15,61	11,02	10,4
20	280	14,29	12,34	11,2
20	300	13,50	13,13	12
20	320	12,46	14,17	12,8
20	340	11,33	15,30	13,6
20	360	10,12	16,51	14,4
20	380	8,81	17,82	15,2
10	390	8,07	18,56	15,6
10	400	7,41	19,22	16
10	410	6,50	20,13	16,4
10	420	5,82	20,81	16,8
10	430	21,44	21,29	17,2
10	440	20,84	21,89	17,6
10	450	20,11	22,62	18
10	460	19,27	23,45	18,4
10	470	18,57	24,16	18,8
10	480	17,86	24,86	19,2
10	490	16,84	25,88	19,6
10	500	16,00	26,72	20
5	505	15,44	27,28	20,2
5	510	15,04	27,68	20,4
5	515	14,59	28,14	20,6
5	520	13,89	28,84	20,8
5	525	13,33	29,40	21
5	530	12,94	29,79	21,2

5	535	12,48	30,24	21,4
5	540	11,89	30,83	21,6
5	545	11,44	31,29	21,8
5	550	10,94	31,79	22
5	555	10,29	32,44	22,2
5	560	9,53	33,20	22,4
5	565	9,00	33,73	22,6
5	570	8,40	34,33	22,8
5	575	7,80	34,92	23
5	580	7,25	35,47	23,2
5	585	6,35	36,38	23,4
5	590	5,46	37,27	23,6
5	595	4,41	38,31	23,8
5	600	15,48	39,63	24
5	605	13,86	41,25	24,2
-	605	13,48	41,62	24,2
-	605	11,91	43,19	24,2

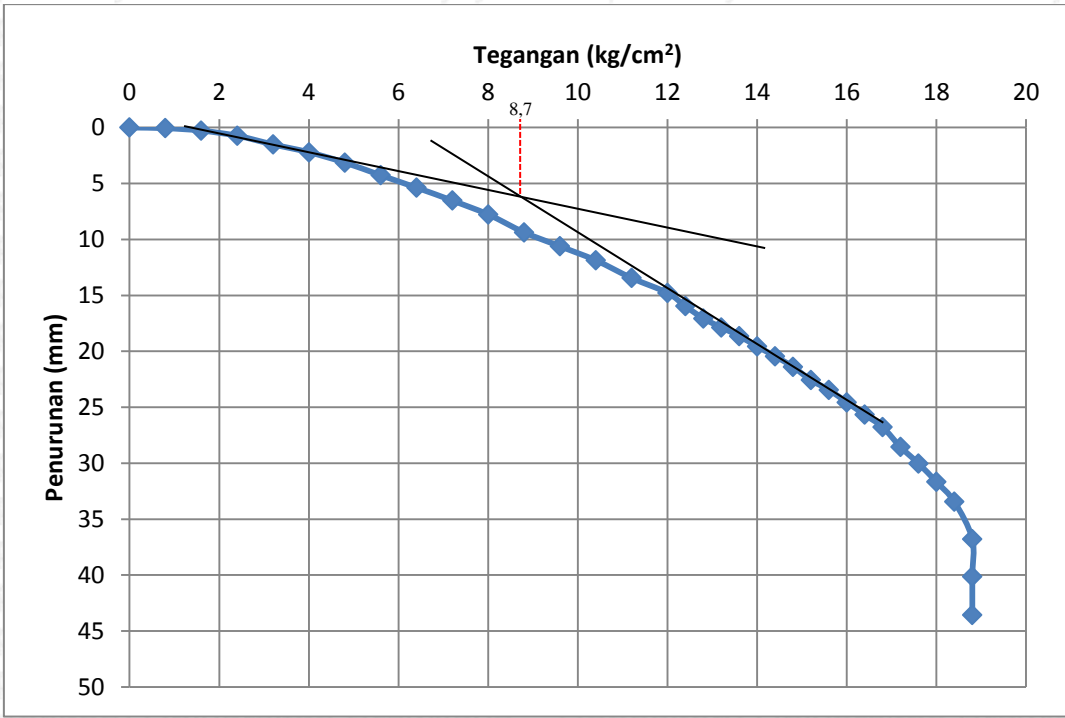


Lampiran 12. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 10 cm

Pembacaan awal ke-2 = 20,23

Pembacaan awal ke-3 = 19,24

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	24,23	0,00	0
20	20	24,17	0,06	0,8
20	40	23,96	0,28	1,6
20	60	23,50	0,74	2,4
20	80	22,72	1,51	3,2
20	100	22,02	2,21	4
20	120	21,10	3,13	4,8
20	140	19,97	4,26	5,6
20	160	18,86	5,37	6,4
20	180	17,70	6,53	7,2
20	200	16,46	7,77	8
20	220	14,87	9,36	8,8
20	240	13,62	10,61	9,6
20	260	12,36	11,87	10,4
20	280	10,78	13,45	11,2
20	300	9,45	14,78	12
10	310	8,26	15,97	12,4
10	320	7,17	17,06	12,8
10	330	6,36	17,87	13,2
10	340	5,59	18,64	13,6
10	350	19,30	19,57	14
10	360	18,43	20,44	14,4
10	370	17,48	21,39	14,8
10	380	16,29	22,58	15,2
10	390	15,42	23,45	15,6
10	400	14,31	24,56	16
10	410	13,20	25,67	16,4
10	420	12,09	26,78	16,8
10	430	10,31	28,56	17,2
10	440	8,84	30,03	17,6
10	450	7,20	31,67	18
10	460	5,42	33,45	18,4
10	470	15,91	36,78	18,8
-	470	12,56	40,13	18,8
-	470	9,13	43,56	18,8



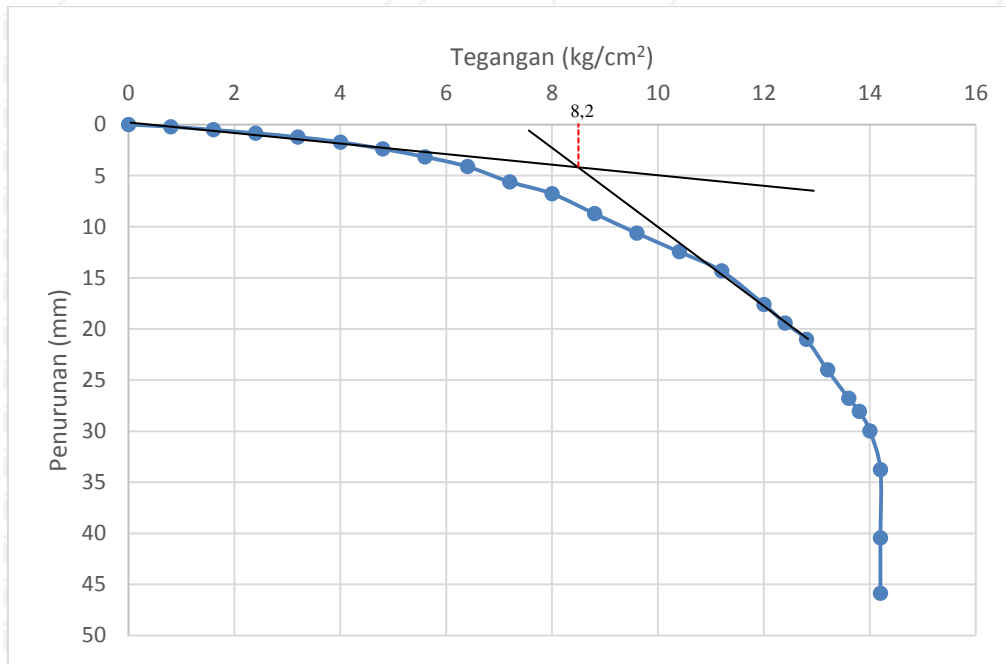
Lampiran 13. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 10 cm

Pembacaan awal ke-2 = 20,34

Pembacaan awal ke-3 = 14

Pembacaan awal ke-4 = 15,1

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	18,72	0,00	0
20	20	18,51	0,21	0,8
20	40	18,21	0,52	1,6
20	60	17,88	0,84	2,4
20	80	17,50	1,23	3,2
20	100	17,00	1,72	4
20	120	16,34	2,38	4,8
20	140	15,56	3,16	5,6
20	160	14,61	4,11	6,4
20	180	13,12	5,60	7,2
20	200	11,95	6,77	8
20	220	10,01	8,71	8,8
20	240	8,10	10,62	9,6
20	260	6,27	12,45	10,4
20	280	18,46	14,33	11,2
20	300	15,18	17,61	12
10	310	13,36	19,43	12,4
10	320	11,76	21,03	12,8
10	330	8,78	24,01	13,2
10	340	6,01	26,78	13,6
5	345	12,71	28,07	13,8
5	350	10,81	29,97	14
5	355	7,00	33,78	14,2
-	355	8,43	40,45	14,2
-	355	3,01	45,87	14,2

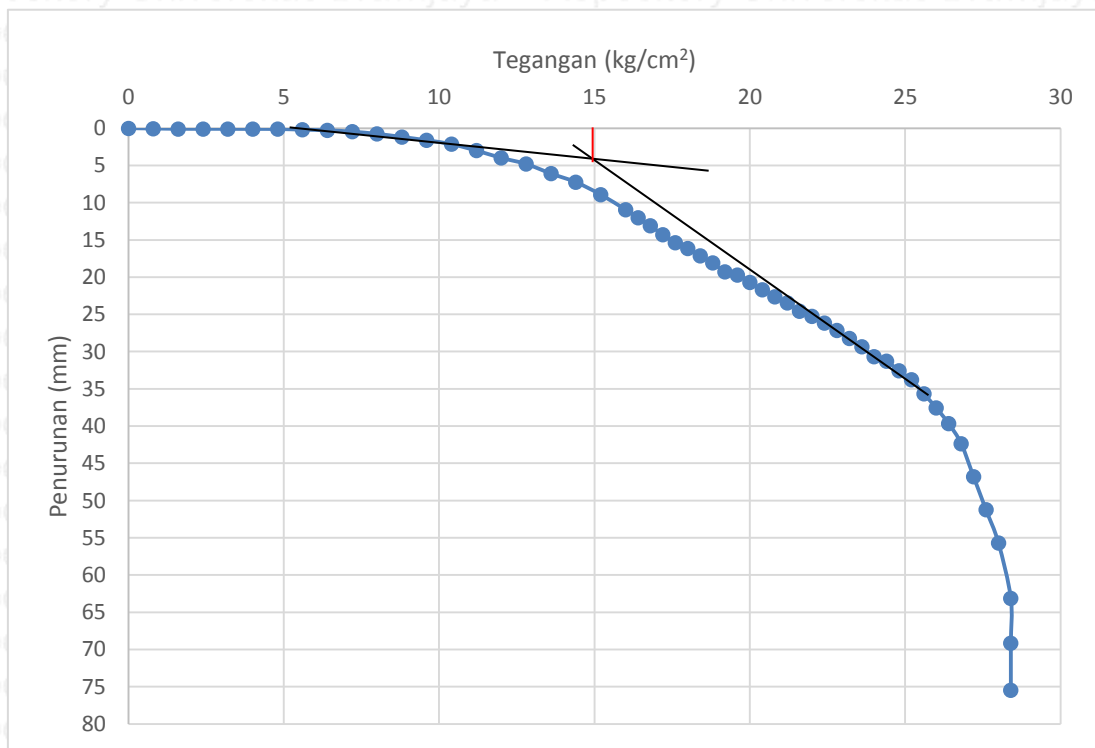


Lampiran 14. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 15 cm

Pembacaan awal ke-2 = -3101

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	selisih pembacaan	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	-3127,00	0,00	0,00	0
20	20	-3122,59	4,41	0,04	0,8
20	40	-3118,17	8,83	0,09	1,6
20	60	-3118,04	8,96	0,09	2,4
20	80	-3117,52	9,48	0,09	3,2
20	100	-3116,40	10,61	0,10	4
20	120	-3115,39	11,61	0,11	4,8
20	140	-3106,72	20,28	0,20	5,6
20	160	-3097,72	29,28	0,28	6,4
20	180	-3079,71	47,29	0,46	7,2
20	200	-3048,04	78,96	0,77	8
20	220	-3006,04	120,96	1,18	8,8
20	240	-2959,37	167,63	1,63	9,6
20	260	-2906,70	220,30	2,14	10,4
20	280	-2817,69	309,31	3,01	11,2
20	300	-2716,36	410,64	3,99	12
20	320	-2632,35	494,65	4,81	12,8
20	340	-2500,35	626,65	6,09	13,6
20	360	-2381,01	745,99	7,25	14,4
20	380	-2209,34	917,66	8,92	15,2
20	400	-2000,67	1126,33	10,94	16
10	410	-1891,00	1236,00	12,01	16,4
10	420	-1779,00	1348,00	13,10	16,8
10	430	-1654,33	1472,67	14,31	17,2
10	440	-1547,32	1579,68	15,35	17,6
10	450	-1465,99	1661,01	16,14	18
10	460	-1364,65	1762,35	17,12	18,4
10	470	-1265,98	1861,02	18,08	18,8
10	480	-1144,64	1982,36	19,26	19,2
10	490	-1099,90	2027,10	19,69	19,6
10	500	-995,83	2131,17	20,71	20
10	510	-896,42	2230,58	21,67	20,4
10	520	-799,35	2327,65	22,61	20,8
10	530	-714,32	2412,68	23,44	21,2
10	540	-599,04	2527,96	24,56	21,6
10	550	-530,08	2596,92	25,23	22
10	560	-433,32	2693,68	26,17	22,4
10	570	-334,51	2792,49	27,13	22,8
10	580	-222,32	2904,68	28,22	23,2

10	590	-107,03	3019,97	29,34	23,6
10	600	29,86	3156,86	30,67	24
10	610	93,68	3220,68	31,29	24,4
10	620	225,43	3352,43	32,57	24,8
10	630	349,98	3476,98	33,78	25,2
10	640	544,51	3671,51	35,67	25,6
10	650	738,02	3865,02	37,55	26
10	660	956,23	4083,23	39,67	26,4
10	670	1231,06	4358,06	42,34	26,8
10	680	1688,07	4815,07	46,78	27,2
10	690	2146,10	5273,10	51,23	27,6
10	700	2603,11	5730,11	55,67	28
10	710	3369,94	6496,94	63,12	28,4
-	710	3987,52	7114,52	69,12	28,4
-	710	4639,07	7766,07	75,45	28,4

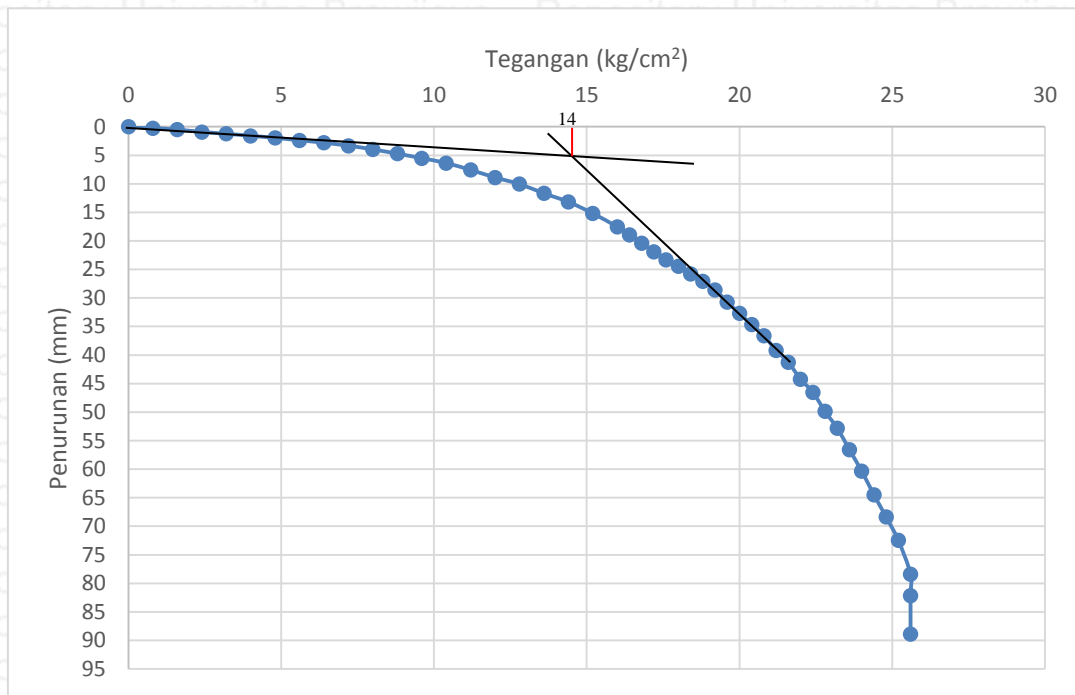


Lampiran 15. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 15 cm

Pembacaan awal ke-2 = -3101

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	selisih pembacaan	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	-3020,00	0,00	0,00	0
20	20	-2995,00	25,00	0,24	0,8
20	40	-2968,00	52,00	0,51	1,6
20	60	-2926,50	93,50	0,91	2,4
20	80	-2893,00	127,00	1,23	3,2
20	100	-2857,00	163,00	1,58	4
20	120	-2819,00	201,00	1,95	4,8
20	140	-2775,33	244,67	2,38	5,6
20	160	-2731,33	288,67	2,80	6,4
20	180	-2678,33	341,67	3,32	7,2
20	200	-2611,67	408,33	3,97	8
20	220	-2534,67	485,33	4,72	8,8
20	240	-2453,00	567,00	5,51	9,6
20	260	-2365,33	654,67	6,36	10,4
20	280	-2241,33	778,67	7,57	11,2
20	300	-2105,00	915,00	8,89	12
20	320	-1986,00	1034,00	10,05	12,8
20	340	-1819,00	1201,00	11,67	13,6
20	360	-1664,67	1355,33	13,17	14,4
20	380	-1458,00	1562,00	15,18	15,2
20	400	-1214,33	1805,67	17,54	16
10	410	-1069,67	1950,33	18,95	16,4
10	420	-922,67	2097,33	20,38	16,8
10	430	-763,00	2257,00	21,93	17,2
10	440	-621,00	2399,00	23,31	17,6
10	450	-504,67	2515,33	24,44	18
10	460	-368,33	2651,67	25,76	18,4
10	470	-234,67	2785,33	27,06	18,8
10	480	-78,33	2941,67	28,58	19,2
10	490	139,33	3159,33	30,69	19,6
10	500	346,33	3366,33	32,71	20
10	510	548,67	3568,67	34,67	20,4
10	520	748,67	3768,67	36,61	20,8
10	530	1011,67	4031,67	39,17	21,2
10	540	1226,33	4246,33	41,25	21,6
10	550	1534,00	4554,00	44,24	22
10	560	1767,00	4787,00	46,51	22,4
10	570	2112,33	5132,33	49,86	22,8
10	580	2415,00	5435,00	52,80	23,2

10	590	2805,00	5825,00	56,59	23,6
10	600	3188,33	6208,33	60,32	24
10	610	3616,00	6636,00	64,47	24,4
10	620	4016,33	7036,33	68,36	24,8
10	630	-2389,00	7748,33	75,28	25,2
10	640	-2071,00	8066,33	78,37	25,6
-	640	-1681,00	8456,33	82,16	25,6
-	640	-987,00	9150,33	88,90	25,6



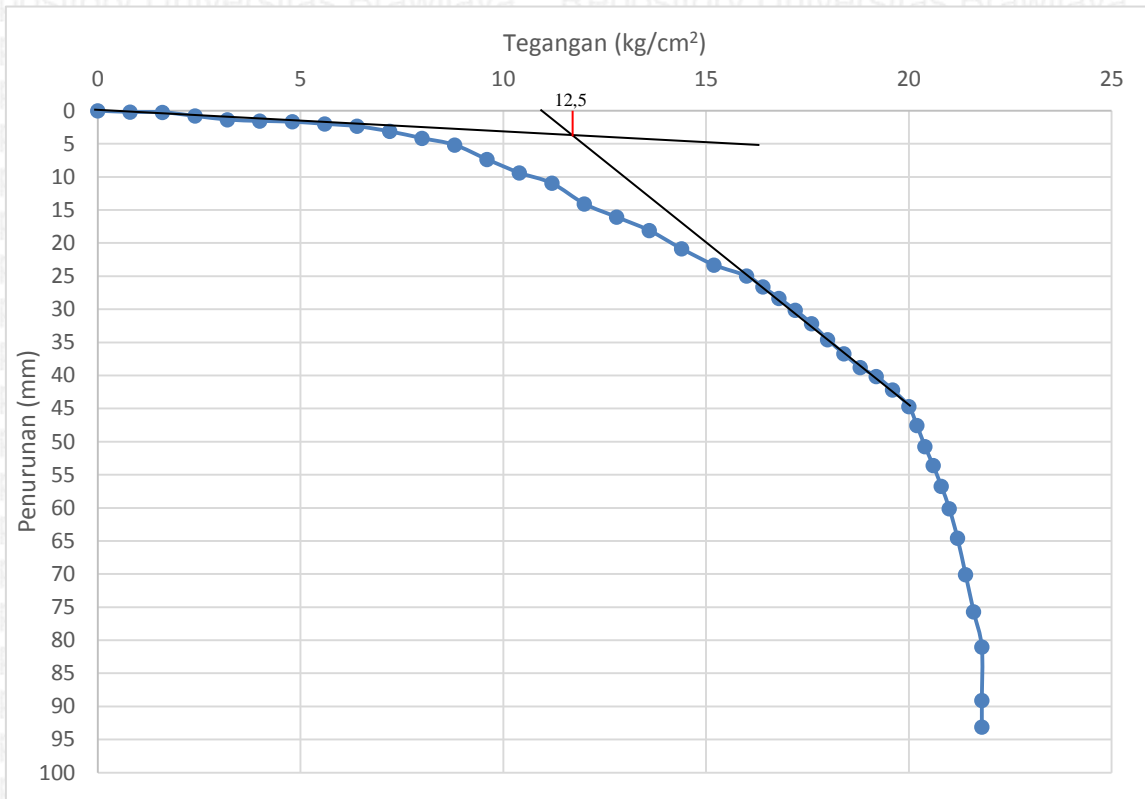
Lampiran 16. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 15 cm

Pembacaan awal ke-2 = -2783

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	selisih pembacaan	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	-2374,00	0,00	0	0
20	20	-2355,47	18,53	0,18	0,8
20	40	-2350,33	23,67	0,23	1,6
20	60	-2293,71	80,29	0,78	2,4
20	80	-2236,07	137,93	1,34	3,2
20	100	-2215,49	158,51	1,54	4
20	120	-2203,14	170,86	1,66	4,8
20	140	-2170,20	203,80	1,98	5,6
20	160	-2133,14	240,86	2,34	6,4
20	180	-2052,86	321,14	3,12	7,2
20	200	-1946,84	427,16	4,15	8
20	220	-1842,88	531,12	5,16	8,8
20	240	-1618,49	755,51	7,34	9,6
20	260	-1408,52	965,48	9,38	10,4
20	280	-1246,92	1127,08	10,95	11,2
20	300	-926,80	1447,20	14,06	12
20	320	-719,91	1654,09	16,07	12,8
20	340	-512,00	1862,00	18,09	13,6
20	360	-227,91	2146,09	20,85	14,4
20	380	24,27	2398,27	23,3	15,2
20	400	194,10	2568,10	24,95	16
10	410	363,94	2737,94	26,6	16,4
10	420	542,01	2916,01	28,33	16,8
10	430	727,28	3101,28	30,13	17,2
10	440	936,23	3310,23	32,16	17,6
10	450	1183,26	3557,26	34,56	18
10	460	1406,62	3780,62	36,73	18,4
10	470	1617,63	3991,63	38,78	18,8
10	480	1756,58	4130,58	40,13	19,2
10	490	1965,53	4339,53	42,16	19,6
10	500	2224,91	4598,91	44,68	20
5	505	2518,26	4892,26	47,53	20,2
5	510	2848,67	5222,67	50,74	20,4
5	515	3139,96	5513,96	53,57	20,6
5	520	3463,16	5837,16	56,71	20,8
5	525	3813,12	6187,12	60,11	21
5	530	-2324,96	6645,16	64,56	21,2
5	535	-1757,82	7212,31	70,07	21,4
5	540	-1179,35	7790,77	75,69	21,6



5	545	-630,73	8339,39	81,02	21,8
-	545	197,85	9167,98	89,07	21,8
-	545	610,60	9580,72	93,08	21,8

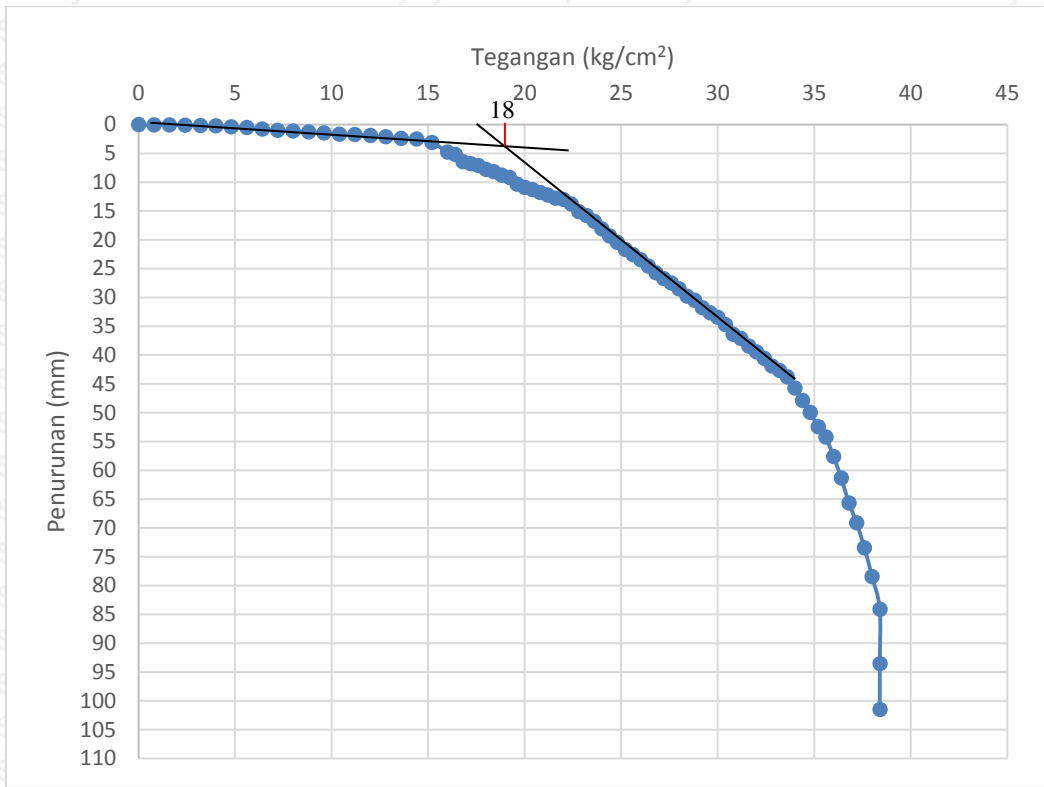


Lampiran 17. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 4,8 cm dan Df = 20 cm

Pembacaan awal ke-2 = 1325,83

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	selisih pembacaan	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	-4218,00	0,00	0,00	0
20	20	-4212,85	5,15	0,05	0,8
20	40	-4208,74	9,26	0,09	1,6
20	60	-4206,68	11,32	0,11	2,4
20	80	-4199,47	18,53	0,18	3,2
20	100	-4192,27	25,73	0,25	4
20	120	-4177,86	40,14	0,39	4,8
20	140	-4165,51	52,49	0,51	5,6
20	160	-4137,71	80,29	0,78	6,4
20	180	-4117,13	100,87	0,98	7,2
20	200	-4103,75	114,25	1,11	8
20	220	-4085,22	132,78	1,29	8,8
20	240	-4068,75	149,25	1,45	9,6
20	260	-4044,05	173,95	1,69	10,4
20	280	-4038,90	179,10	1,74	11,2
20	300	-4023,46	194,54	1,89	12
20	320	-3998,76	219,24	2,13	12,8
20	340	-3973,03	244,97	2,38	13,6
20	360	-3959,65	258,35	2,51	14,4
20	380	-3896,86	321,14	3,12	15,2
20	400	-3728,05	489,95	4,76	16
10	410	-3686,88	531,12	5,16	16,4
10	420	-3551,01	666,99	6,48	16,8
10	430	-3521,16	696,84	6,77	17,2
10	440	-3485,14	732,86	7,12	17,6
10	450	-3416,18	801,82	7,79	18
10	460	-3376,03	841,97	8,18	18,4
10	470	-3313,25	904,75	8,79	18,8
10	480	-3273,10	944,90	9,18	19,2
10	490	-3154,73	1063,27	10,33	19,6
10	500	-3097,09	1120,91	10,89	20
10	510	-3057,98	1160,02	11,27	20,4
10	520	-3002,40	1215,60	11,81	20,8
10	530	-2960,20	1257,80	12,22	21,2
10	540	-2903,58	1314,42	12,77	21,6
10	550	-2878,88	1339,12	13,01	22
10	560	-2796,54	1421,46	13,81	22,4
10	570	-2659,64	1558,36	15,14	22,8
10	580	-2593,76	1624,24	15,78	23,2

10	590	-2490,83	1727,17	16,78	23,6
10	600	-2350,85	1867,15	18,14	24
10	610	-2227,33	1990,67	19,34	24,4
10	620	-2114,11	2103,89	20,44	24,8
10	630	-1987,51	2230,49	21,67	25,2
10	640	-1896,93	2321,07	22,55	25,6
10	650	-1802,23	2415,77	23,47	26
10	660	-1686,95	2531,05	24,59	26,4
10	670	-1570,64	2647,36	25,72	26,8
10	680	-1466,68	2751,32	26,73	27,2
10	690	-1388,45	2829,55	27,49	27,6
10	700	-1283,47	2934,53	28,51	28
10	710	-1154,80	3063,20	29,76	28,4
10	720	-1077,61	3140,39	30,51	28,8
10	730	-947,91	3270,09	31,77	29,2
10	740	-855,28	3362,72	32,67	29,6
10	750	-771,90	3446,10	33,48	30
10	760	-645,30	3572,70	34,71	30,4
10	770	-470,32	3747,68	36,41	30,8
10	780	-395,18	3822,82	37,14	31,2
10	790	-262,40	3955,60	38,43	31,6
10	800	-158,44	4059,56	39,44	32
10	810	-44,19	4173,81	40,55	32,4
10	820	93,74	4311,74	41,89	32,8
10	830	171,96	4389,96	42,65	33,2
10	840	288,28	4506,28	43,78	33,6
10	850	486,93	4704,93	45,71	34
10	860	711,32	4929,32	47,89	34,4
10	870	925,41	5143,41	49,97	34,8
10	880	1180,68	5398,68	52,45	35,2
10	890	1363,89	5581,89	54,23	35,6
10	900	1711,80	5929,80	57,61	36
10	910	2095,73	6313,73	61,34	36,4
10	920	2540,38	6758,38	65,66	36,8
10	930	2896,52	7114,52	69,12	37,2
10	940	3342,21	7560,21	73,45	37,6
10	950	3855,83	8073,83	78,44	38
10	960	7332,64	8658,47	84,12	38,4
-	960	8303,27	9629,10	93,55	38,4
-	960	9121,57	10447,40	101,50	38,4

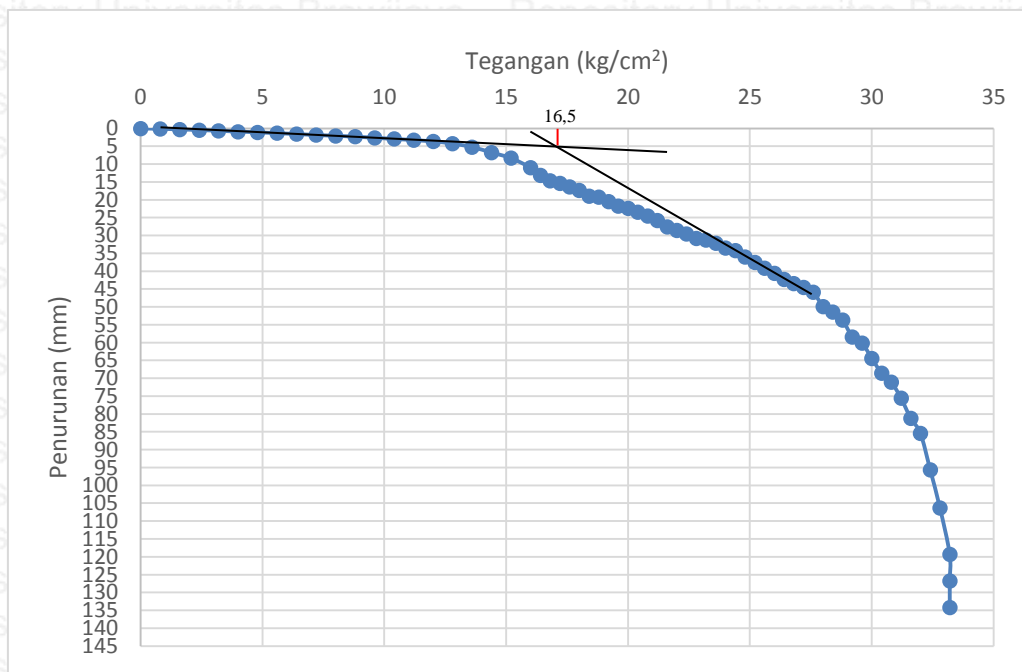


Lampiran 18. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 6 cm dan Df = 20 cm

Pembacaan awal ke-2 = -2270

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	selisih pembacaan	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	-4218,00	0,00	0,00	0
20	20	-4205,00	13,00	0,13	0,8
20	40	-4189,50	28,50	0,28	1,6
20	60	-4170,50	47,50	0,46	2,4
20	80	-4149,00	69,00	0,67	3,2
20	100	-4125,67	92,33	0,90	4
20	120	-4103,67	114,33	1,11	4,8
20	140	-4080,67	137,33	1,33	5,6
20	160	-4054,33	163,67	1,59	6,4
20	180	-4027,67	190,33	1,85	7,2
20	200	-4004,33	213,67	2,08	8
20	220	-3979,33	238,67	2,32	8,8
20	240	-3946,67	271,33	2,64	9,6
20	260	-3915,00	303,00	2,94	10,4
20	280	-3879,67	338,33	3,29	11,2
20	300	-3842,00	376,00	3,65	12
20	320	-3780,00	438,00	4,26	12,8
20	340	-3679,67	538,33	5,23	13,6
20	360	-3521,33	696,67	6,77	14,4
20	380	-3360,33	857,67	8,33	15,2
20	400	-3085,67	1132,33	11,00	16
10	410	-2864,00	1354,00	13,15	16,4
10	420	-2713,33	1504,67	14,62	16,8
10	430	-2639,05	1578,95	15,34	17,2
10	440	-2536,12	1681,88	16,34	17,6
10	450	-2430,67	1787,33	17,36	18
10	460	-2264,33	1953,67	18,98	18,4
10	470	-2238,66	1979,34	19,23	18,8
10	480	-2113,00	2105,00	20,45	19,2
10	490	-1978,67	2239,33	21,76	19,6
10	500	-1918,54	2299,46	22,34	20
10	510	-1802,23	2415,77	23,47	20,4
10	520	-1690,04	2527,96	24,56	20,8
10	530	-1563,44	2654,56	25,79	21,2
10	540	-1381,25	2836,75	27,56	21,6
10	550	-1278,32	2939,68	28,56	22
10	560	-1173,33	3044,67	29,58	22,4
10	570	-1049,81	3168,19	30,78	22,8
10	580	-1003,50	3214,50	31,23	23,2

10	590	-907,77	3310,23	32,16	23,6
10	600	-768,82	3449,18	33,51	24
10	610	-699,85	3518,15	34,18	24,4
10	620	-511,49	3706,51	36,01	24,8
10	630	-352,98	3865,02	37,55	25,2
10	640	-190,35	4027,65	39,13	25,6
10	650	-43,16	4174,84	40,56	26
10	660	136,97	4354,97	42,31	26,4
10	670	253,28	4471,28	43,44	26,8
10	680	368,56	4586,56	44,56	27,2
10	690	501,34	4719,34	45,85	27,6
10	700	915,12	5133,12	49,87	28
10	710	1077,75	5295,75	51,45	28,4
10	720	1305,22	5523,22	53,66	28,8
10	730	1791,05	6009,05	58,38	29,2
10	740	1967,06	6185,06	60,09	29,6
10	750	2411,33	6629,33	64,41	30
10	760	2838,33	7056,33	68,55	30,4
10	770	3092,09	7310,09	71,02	30,8
10	780	3557,67	7775,67	75,54	31,2
10	790	-1684,66	8361,00	81,23	31,6
10	800	-1250,30	8795,37	85,45	32
10	810	-198,35	9847,31	95,67	32,4
10	820	899,91	10945,58	106,34	32,8
10	830	2236,97	12282,64	119,33	33,2
-	830	3003,80	13049,47	126,78	33,2
-	830	3763,42	13809,09	134,16	33,2



Lampiran 19. Hasil Uji Pembebanan Variasi L = 7,2 cm dan Df = 20 cm

Pembacaan awal ke-2 = 18,36

Pembacaan awal ke-3 = 17,45

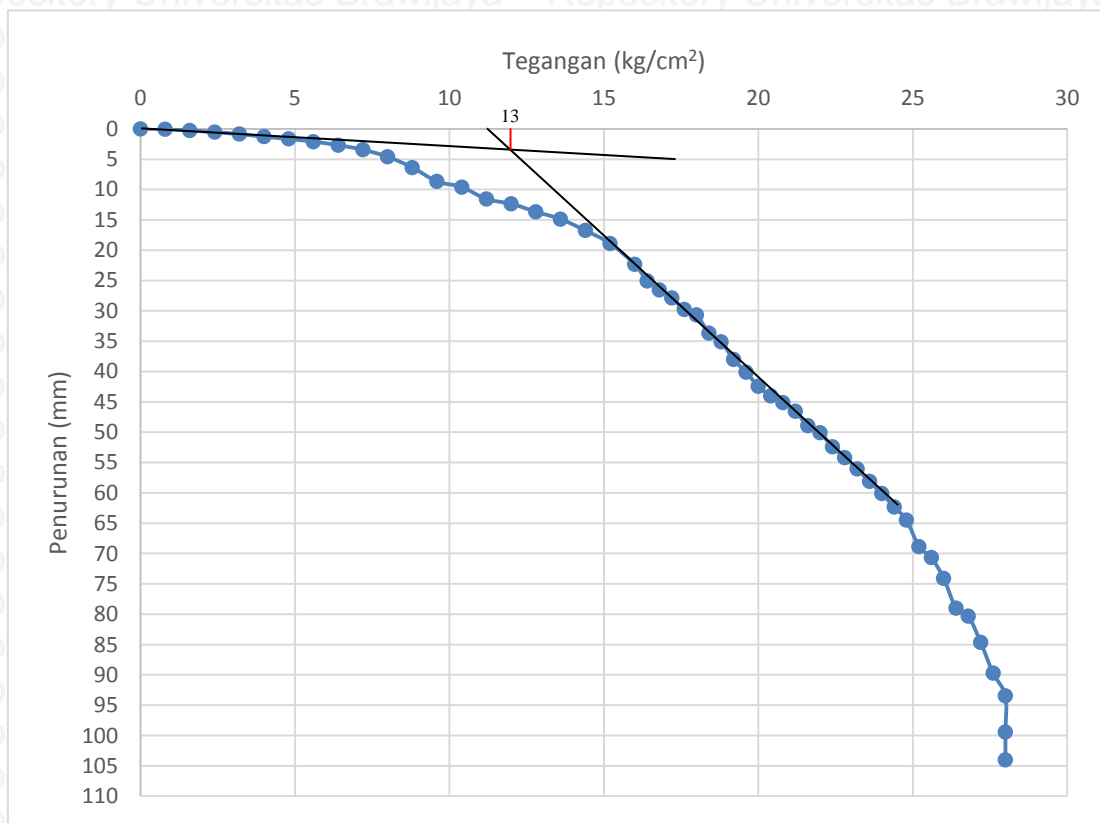
Pembacaan awal ke-4 = 18,23

Pembacaan awal ke-5 = 19,6

Pembacaan awal ke-5 = 25,15

interval beban	beban (kg)	rata-rata pembacaan LVDT	penurunan (mm)	tegangan (kg/cm ²)
	0	25,87	0,00	0
20	20	25,84	0,04	0,8
20	40	25,61	0,27	1,6
20	60	25,34	0,54	2,4
20	80	25,01	0,86	3,2
20	100	24,58	1,29	4
20	120	24,21	1,66	4,8
20	140	23,76	2,11	5,6
20	160	23,19	2,68	6,4
20	180	22,43	3,44	7,2
20	200	21,28	4,59	8
20	220	19,50	6,37	8,8
20	240	17,21	8,66	9,6
20	260	16,28	9,59	10,4
20	280	14,30	11,57	11,2
20	300	13,53	12,34	12
20	320	12,20	13,67	12,8
20	340	11,00	14,87	13,6
20	360	9,12	16,75	14,4
20	380	6,99	18,88	15,2
20	400	3,54	22,33	16
10	410	15,63	25,06	16,4
10	420	14,15	26,54	16,8
10	430	12,82	27,87	17,2
10	440	10,91	29,78	17,6
10	450	10,02	30,67	18
10	460	7,02	33,67	18,4
10	470	5,57	35,12	18,8
10	480	2,68	38,01	19,2
10	490	15,37	40,09	19,6
10	500	13,02	42,44	20
10	510	11,43	44,03	20,4
10	520	10,33	45,13	20,8
10	530	8,89	46,57	21,2
10	540	6,55	48,91	21,6
10	550	5,35	50,11	22

10	560	3,07	52,39	22,4
10	570	16,44	54,18	22,8
10	580	14,55	56,07	23,2
10	590	12,51	58,11	23,6
10	600	10,51	60,11	24
10	610	8,31	62,31	24,4
10	620	6,11	64,51	24,8
10	630	15,25	68,86	25,2
10	640	13,45	70,66	25,6
10	650	10,04	74,07	26
10	660	5,10	79,01	26,4
10	670	3,77	80,34	26,8
10	680	20,82	84,67	27,2
10	690	15,78	89,71	27,6
10	700	12,04	93,45	28
-	700	6,05	99,44	28
-	700	1,49	104,00	28



**Lampiran 20. Pengujian Pengembangan (Swelling)**

Jumlah kolom	0
Diameter kolom	0 cm
Tinggi sampel	11 cm
Volume mold	2075,61 cm ³

waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses 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

Jumlah kolom	7
Diameter kolom	3,2 Cm
Tinggi sampel	11 Cm
Volume mold	2075,61 cm ³

waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses 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

Jumlah kolom	6
Diameter kolom	4 Cm
Tinggi sampel	11 Cm
Volume mold	2075,61 cm ³

waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses 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

Jumlah kolom	5
Diameter kolom	4,8 cm
Tinggi sampel	11 cm
Volume mold	2075,61 cm ³

waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses 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



120

Jumlah kolom	7
Diameter kolom	4,8 cm
Tinggi sampel	11 cm
Volume mold	2075,61 cm ³

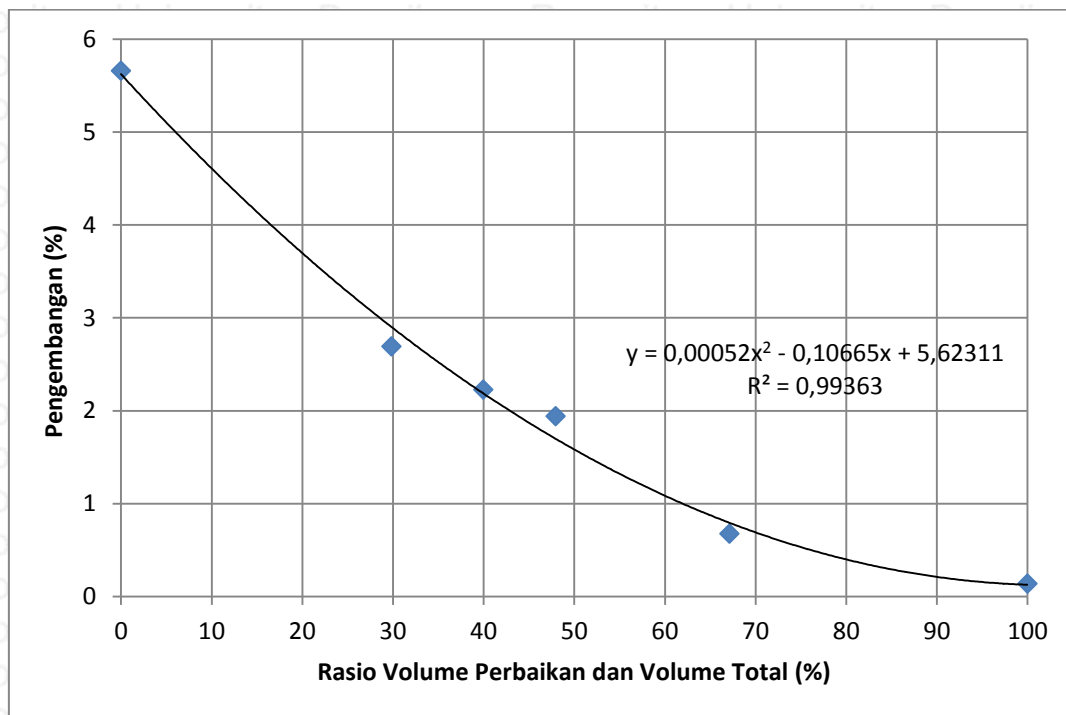
waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses pengembangan (%)
0	0	0	0
5	9	0,092	0,083
10	15	0,148	0,135
15	19	0,194	0,176
20	23	0,231	0,210
25	26	0,261	0,237
30	29	0,288	0,261
35	31	0,311	0,282
40	33	0,326	0,297
45	34	0,342	0,311
50	35	0,355	0,322
55	37	0,369	0,335
60	38	0,383	0,348
65	39	0,394	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

Jumlah kolom	-	
Diameter kolom	-	cm
Tinggi sampel	11	cm
Volume mold	2075,61	cm ³

waktu (menit)	pembacaan dial	pengembangan (mm)	proses 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

Rekapitulasi Nilai Pengembangan Tanah terhadap Persentase Perbaikan

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



Lampiran 21. Dokumentasi Kegiatan Penelitian



1. Pengambilan Sampel di Bojonegoro



2. Proses Penjemuran Tanah



3. Proses Pencampuran Tanah OMC



4. Proses Pencampuran 8% Kapur



5. Instalasi Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM)



6. Kolom DSM



7. Uji Pembebanan



8. Uji *Swelling*

