

**PENGARUH JARAK DAN PANJANG KOLOM *DEEP SOIL MIXING*
(DSM) BERPOLA *SINGLE SQUARE* DIAMETER 4,5 CM TERHADAP
DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AMALIA FATICHA

NIM. 125060100111052

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH JARAK DAN PANJANG KOLOM *DEEP SOIL MIXING* (DSM)
BERPOLA *SINGLE SQUARE* DIAMETER 4,5 CM TERHADAP DAYA DUKUNG
TANAH EKSPANSIF**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**AMALIA FATICHA
NIM. 125060100111052**

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

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT
NIP. 19511211 198103 2 001

Dr. Ir. Arif Rachmansyah
NIP. 201102 840705 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng.
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

Judul Skripsi:

Interaksi Kekuatan Lentur dan Berat Volume Pelat Beton Ringan Tumpuan Sederhana Bertulangan Bambu

Nama Mahasiswa : Amalia Faticha

NIM. : 125060100111052

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Geoteknik

Tim Dosen Penguji :

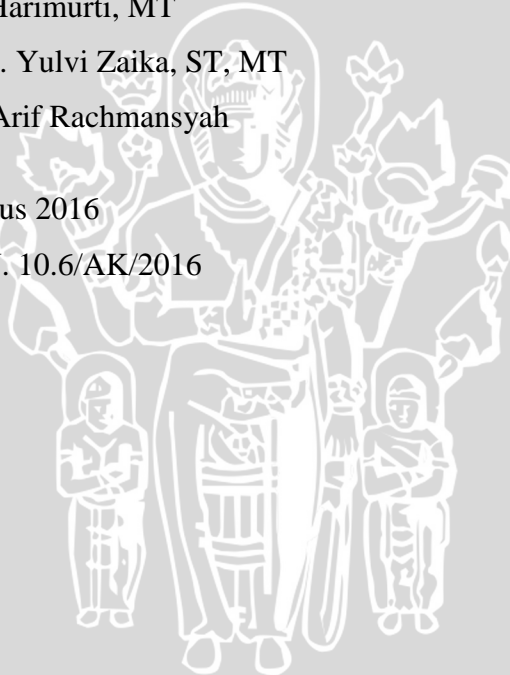
Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Harimurti, MT

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT

Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Arif Rachmansyah

Tanggal Ujian : 3 Agustus 2016

SK Penguji : 294/UN.10.6/AK/2016



LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di 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 yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 11 Agustus 2016

Mahasiswa,

Amalia Faticha

NIM. 125060100111052



RIWAYAT HIDUP

Amalia Fatica, kelahiran Kediri, 14 Mei 1994, merupakan putri bungsu dari ayah Alm. Moch. Sohib dan ibu Wiwik Widodo. Mulai mengenyam bangku pendidikan AYAH selama mengenyam pendidikan dasar di SDN Damarwulan II Kabupaten Kediri sejak tahun 2000 dan lulus pada tahun 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Kepung II pada tahun 2009. Selanjutnya menempuh bangku sekolah atas di SMAN 1 PARE program Ilmu Pengetahuan Alam dan lulus tahun 2012.

Malang, Agustus 2016

Penyusun



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



*Teriring ucapan Terima Kasih kepada:
Alm Ayahanda dan Ibunda yang terkasih
Semua pihak-pihak tanpa terkecuali yang membantu dalam penulisan skripsi ini*



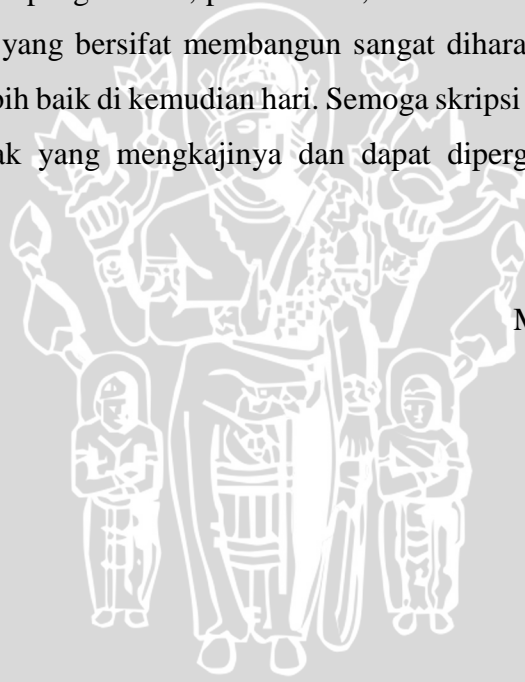
KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas berkat dan hidayah-Nya sehingga skripsi dengan judul “Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) Diameter 4,5 cm Berpola *Single Square* Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif” dapat terselesaikan. Skripsi yang disusun untuk memenuhi persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya pengembangan akademisi maupun praktisi dalam bidang Mekanika Tanah dan Geoteknik

Disadari bahwa penyusunan naskah skripsi ini masih terdapat kekurangan. Hal ini disebabkan masih terbatasnya pengetahuan, pemahaman, dan kemampuan penyusun. Oleh karena itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan sebagai koreksi guna mencapai hasil yang lebih baik di kemudian hari. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang mengkajinya dan dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Malang, Agustus 2016

Penyusun



UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga naskah skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar. Selain itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

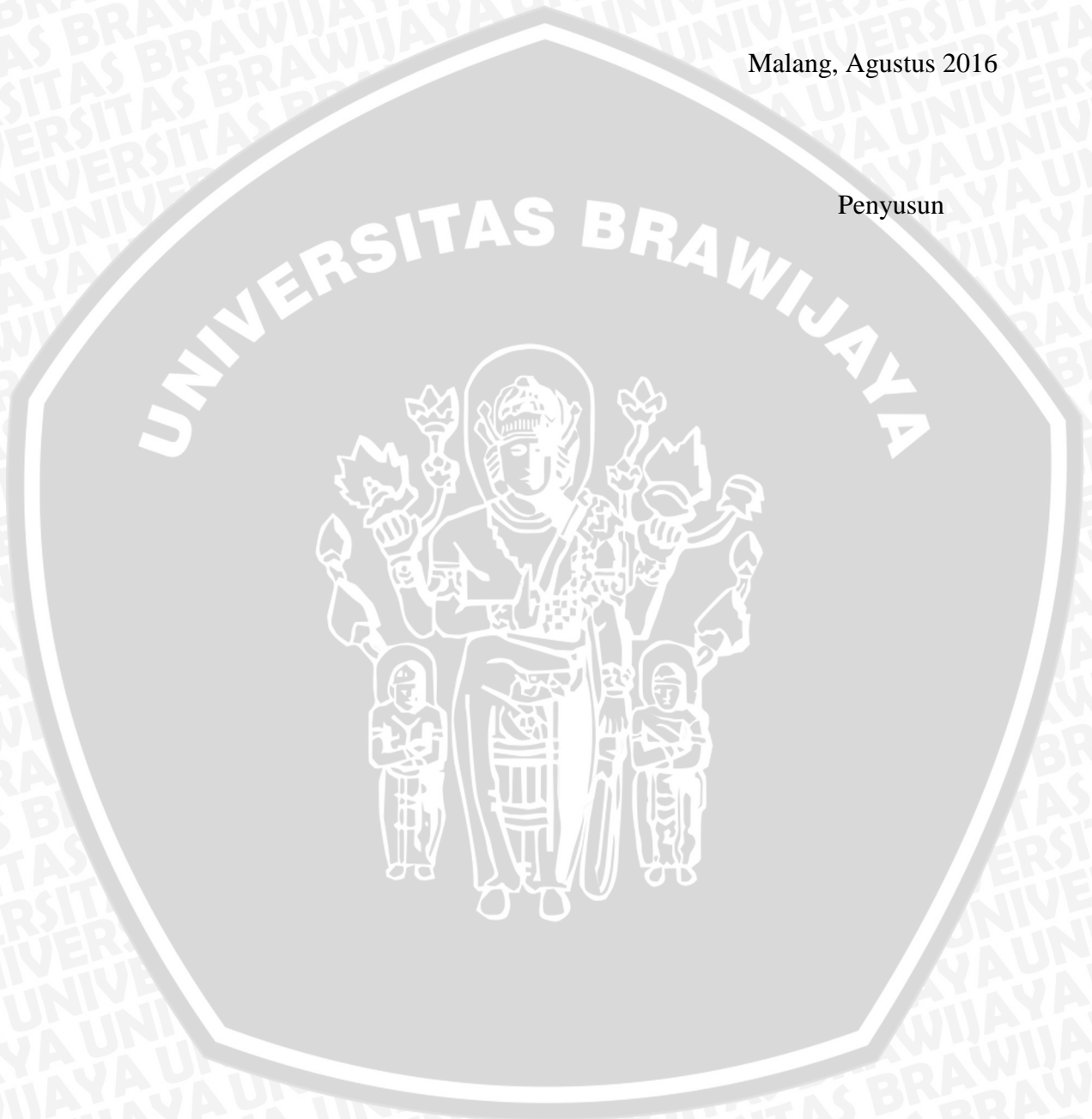
1. Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST, MT dan Dr. Ir. Arif Rachmansyah , sebagai dosen pembimbing atas segala arahan, masukan dan bimbingan yang telah diberikan pada skripsi ini.
2. Segenap dosen Mekanika Tanah dan Geoteknik yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
3. Ir. Sugeng P. Budio, MS. dan Ir. Siti Nurlina, MT. selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang membantu kelancaran skripsi ini.
4. Dr. Eng. Indradi Wijatmiko ST. M. Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil yang membantu dalam kelancaran skripsi ini.
5. Bapak Ibu Dosen Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
6. Pak Ketut sebagai Teknisi Mekanika Tanah yang telah membantu pada penelitian ini.
7. Mbak Indah dan Mbak Asmi sebagai Admin Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberi bantuan untuk kelancaran penelitian.
8. Alm Bapak yang sangat saya cintai dan banggakan yang menjadi panutan dalam hidup saya dan Ibuku tercinta yang tidak hentinya memberi dukungan untuk bisa menyelesaikan skripsi ini.
9. VAIGT *team* (Viki, Adel, Ismail, dan Tika) yang merupakan teman seperjuangan, teman sepenenderitaan, teman spenanggungan yang selalu memberikan *support*, bantuan, dukungan atas kesedihan, kejengkelan dan keceriaan yang telah bekerja keras, berkeringat dan berotot dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Om Nursahit yang sudah seperti ayah sendiri, yang membiayai biaya kuliah saya dan selalu membantu saya sampai saya bisa menyelesaikan skripsi ini.
11. Galih Karno Putro partner terbaik yang selalu memberikan dukungan, bantuan dalam segala urusan
12. Dan teman-teman sipil angkatan 2012 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

repository.ub.ac.id

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

Malang, Agustus 2016

Penyusun



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
UCAPAN TERIMA KASIH	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN	ii
SUMMARY	iii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Batasan Penelitian.....	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tanah Lempung.....	7
2.2.1 Struktur Mineral Penyusun Tanah Lempung.....	7
2.2.2 Interaksi Air Dengan Mineral Lempung.....	9
2.2.3 Klasifikasi Tanah <i>Unified Soil Classification System</i> (USCS).....	11
2.2.4 Pengertian Tanah Lempung Ekspansif.....	12
2.2.5 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif.....	13
2.2 Sifat-Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan.....	16
2.3 Daya Dukung Tanah.....	17
2.4 Stabilisasi Tanah.....	21
2.5 Stabilisasi Kimiawi dengan Kapur.....	22
2.6 Stabilisasi Tanah dengan DSM (<i>deep soil mixing</i>).....	25
2.6.1 Metode pencampuran basah (<i>wet mixing method</i>).....	25
2.6.2 Metode Pencampuran kering (<i>dry mixing method</i>).....	26
2.7 Penelitian Terdahulu tentang Stabilisasi Lempung dengan Kolom Kapur.....	27
2.8 Uji Pembebanan (<i>Loading Test</i>).....	29
2.9 Uji Potensi Mengembang (<i>Swelling</i>).....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	31
3.2 Bahan Penelitian	31
3.3 Peralatan Penelitian.....	31
3.4 Rancangan Penelitian.....	32
3.5 Variabel Penelitian.....	33
3.6 Metode Penelitian	33
3.6.1 Persiapan Benda Uji	33
3.6.2 Uji Pembebanan	36
3.7 Metode Analisis Data.....	38
3.8 Diagram Alir Penelitian	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
4.1 Pemeriksaan Specific Gravity.....	40
4.2 Pemeriksaan Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sifat Fisik Tanah	40
4.2.1 Analisis Mekanis Tanah (<i>Mechanical Grain Size</i>).....	40
4.2.2 Pemeriksaan Batas – Batas Atterberg (<i>Atterberg Limit</i>)	41
4.2.3 Klasifikasi Berdasarkan Sistem <i>Unified</i>	42
4.2.4 Kriteria Tanah Lempung Ekspansif.....	42
4.3 Pemeriksaan Pemadatan Tanah.....	43
4.3.1 Penentuan Kadar Air untuk Campuran DSM.....	43
4.3.2 Usaha Pemadatan Tanah Model	45
4.4 Hasil Uji Beban (<i>Load Test</i>) di Laboratorium	46
4.4.1 Hasil Uji beban pada Tanah Asli.....	47
4.4.2 Nilai q_u Berdasarkan Prosentase Tanah yang Distabilisasi dengan kolom DSM.....	48
4.4.3 Hasil Uji Beban Sampel Tanah dengan Stabilisasi Kolom DSM.....	49
4.4.3.1 Perbandingan Hasil Uji Beban Tanah Asli Dengan Tanah Stabilisasi Pada Variasi Jarak Terhadap Panjang Kolom Konstan.....	49
4.4.3.2 Perbandingan Hasil Uji Beban Tanah Asli Dan Tanah Stabilisasi Pada Variasi Panjang Terhadap Jarak Kolom Konstan.....	52
4.4.4 Perbandingan Daya Dukung pada Penurunan yang Sama	55
4.4.4.1 Perbandingan Daya Dukung pada Variasi Jarak Kolom (L) terhadap Panjang Kolom (Df).....	55
4.4.4.2 Perbandingan Daya Dukung pada Variasi Panjang Kolom (Df) terhadap Jarak Kolom Konstan (L).....	57

4.5 Analisis BCI.....	58
4.5.1 Analisis BC _{Iu}	58
4.5.2 Analisis BC _{Is}	59
4.5 Pemeriksaan Potensi Mengembang (<i>Swelling</i>).....	63
BAB V PENUTUP.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN.....	69



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Simbol Untuk Klasifikasi USCS.....	11
Tabel 2.2	Nilai indeks plastisitas dan macam tanah	12
Tabel 2.3	Hubungan <i>swelling</i> dengan indeks plastis	14
Tabel 2.4	Hubungan aktivitas dengan mineral.....	15
Tabel 2.5	Tipikal Klasifikasi Tanah Ekspansif Didasarkan Pada Uji Beban Pengembangan Pada Tekanan Overdurden di Tempat.....	30
Tabel 3.1	Rancangan Penelitian dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom.....	32
Tabel 3.2	Variasi Jarak dan Panjang Tipe Single Square Berdiameter 4,5 cm.....	35
Tabel 3.3	Pembacaan Beban dan Penurunan Uji Beban (<i>Load Test</i>)	37
Tabel 3.4	<i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI).....	38
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Specific Gravity Tanah Asli	40
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Batas –Batas <i>Atterberg</i>	41
Tabel 4.3	Perbandingan Nilai CBR Tanah Stabilisasi	44
Tabel 4.4	Uji <i>Density</i> Pada Tanah Model.....	46
Tabel 4.5	Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah.....	48
Tabel 4.6	Prosentase Peningkatan Nilai q_u dengan Variasi Jarak terhadap Panjang Kolom.....	51
Tabel 4.7	Prosentase Peningkatan Nilai q_u dengan Variasi Panjang Kolom terhadap Jarak	54
Tabel 4.8	Nilai BCIu Pada Variasi Panjang Kolom (Df).....	59
Tabel 4.9	Nilai BCIu Pada Variasi Jarak Kolom (L).....	60
Tabel 4.10	Nilai BCIs Pada Variasi Panjang Kolom (Df).....	61
Tabel 4.11	Nilai BCIu Pada Variasi Jarak Kolom (L).....	62
Tabel 4.12	Nilai Potensi Pengembangan Berdasarkan Prosentase Stabilisasi.....	64

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Mineral – mineral lempung	7
Gambar 2.2	(a)Struktur Kaolinite, (b)Struktur Atom Kaolinite	8
Gambar 2.3	Struktur Mineral Illite	8
Gambar 2.4	(a)Struktur Mineral Montmorillonite, (b)Struktur Atom Montmorillonite	9
Gambar 2.5	Kation dan anion pada partikel lempung	10
Gambar 2.6	Sifat dipolar air	10
Gambar 2.7	Molekul air dipolar dalam lapisan ganda	11
Gambar 2.8	Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah USCS.....	12
Gambar 2.9	Grafik hubungan antara beban (P) dan defleksi (Δ)	13
Gambar 2.10	Indeks pengembangan terhadap potensi perubahan volume	14
Gambar 2.11	Grafik klasifikasi potensi mengembang	16
Gambar 2.12	Pengaruh pemadatan pada susunan tanah.....	17
Gambar 2.13	(a) Model pondasi, (b) Kurva hubungan antara beban dan penurunan	18
Gambar 2.14	Grafik perbandingan beban dan lendutan benda uji rasio minimum (ρ_{min}) kondisi elastis	20
Gambar 2.15	Isobar tegangan vertikal di bawah luasan berbentuk bujur sangkar yang menerima beban terbagi rata.....	21
Gambar 2.16	Grafik hubungan prosentase penambahan kapur dan pasir dengan kadar air optimum.....	23
Gambar 2.17	Grafik hubungan prosentase penambahan kapur dan pasir dengan berat isi kering maksimum	24
Gambar 2.18	Grafik hubungan prosentase kapur dengan CBR	24
Gambar 2.19	Pola khas dari <i>Deep Soil Mixing</i>	25
Gambar 2.20	Alat pencampuran basah	26
Gambar 2.21	Peyemburan pengikat kering dari alat pencampur	26
Gambar 2.22	Model 3D kotak baja untuk uji pemodelan kolom kapur	27
Gambar 2.23	Hubungan kuat tekan bebas dengan waktu curing.....	28
Gambar 2.24	Hubungan kuat tekan bebas dengan jarak dari kolom kapur.....	28
Gambar 2.25	Hubungan beban dan penurunan dengan laju beban konstan.....	29
Gambar 2.26	Grafik Hubungan antara Beban dan Penurunan	30

Gambar 2.27	Alat pengujian swelling.....	30
Gambar 3.1	Pemodelan Kolom DSM.....	35
Gambar 3.2	Skema uji pembebanan sampel.....	36
Gambar 4.1	Gabungan analisis saringan dan hydrometer.....	41
Gambar 4.2	Grafik plastisitas sistem klasifikasi <i>Unified</i>	42
Gambar 4.3	Grafik klasifikasi berdasarkan potensi mengembang.....	43
Gambar 4.4	Pemadatan standart tanah asli.....	44
Gambar 4.5	Grafik pemadatan dan CBR tanah stabilisasi.....	45
Gambar 4.6	Hubungan beban dengan penurunan pada tanah asli.....	47
Gambar 4.7	Hubungan daya dukung dengan penurunan pada tanah asli.....	47
Gambar 4.8	Perbandingan nilai daya dukung terhadap prosentase stabilisasi tanah.....	48
Gambar 4.9	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 2B.....	49
Gambar 4.10	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 3B.....	49
Gambar 4.11	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 4B.....	50
Gambar 4.12	Perbandingan prosentase peningkatan q_u pada variasi jarak (L) terhadap panjang kolom(D_f).....	51
Gambar 4.13	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1D$	52
Gambar 4.14	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,25D$	53
Gambar 4.15	Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,5D$	53
Gambar 4.16	Perbandingan prosentase peningkatan q_u pada variasi panjang kolom terhadap jarak kolom(L).....	54
Gambar 4.17	Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 2B.....	55
Gambar 4.18	Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 3B.....	56
Gambar 4.19	Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 4B.....	56

Gambar 4.20 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak 1D.....57

Gambar 4.21 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak 1,25D.....57

Gambar 4.22 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak 1,5D.....58

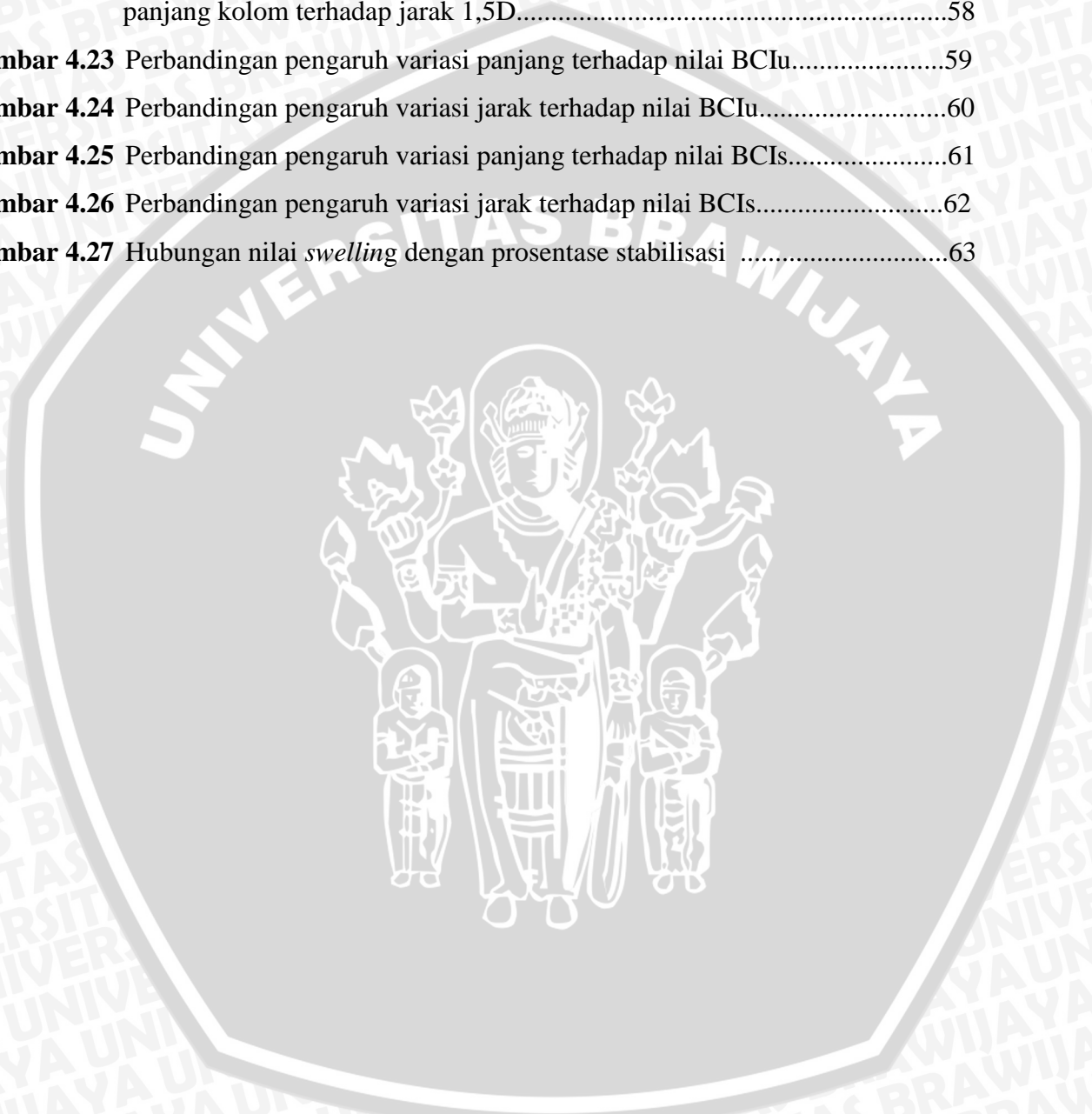
Gambar 4.23 Perbandingan pengaruh variasi panjang terhadap nilai BC_{Iu}.....59

Gambar 4.24 Perbandingan pengaruh variasi jarak terhadap nilai BC_{Iu}.....60

Gambar 4.25 Perbandingan pengaruh variasi panjang terhadap nilai BC_Is.....61

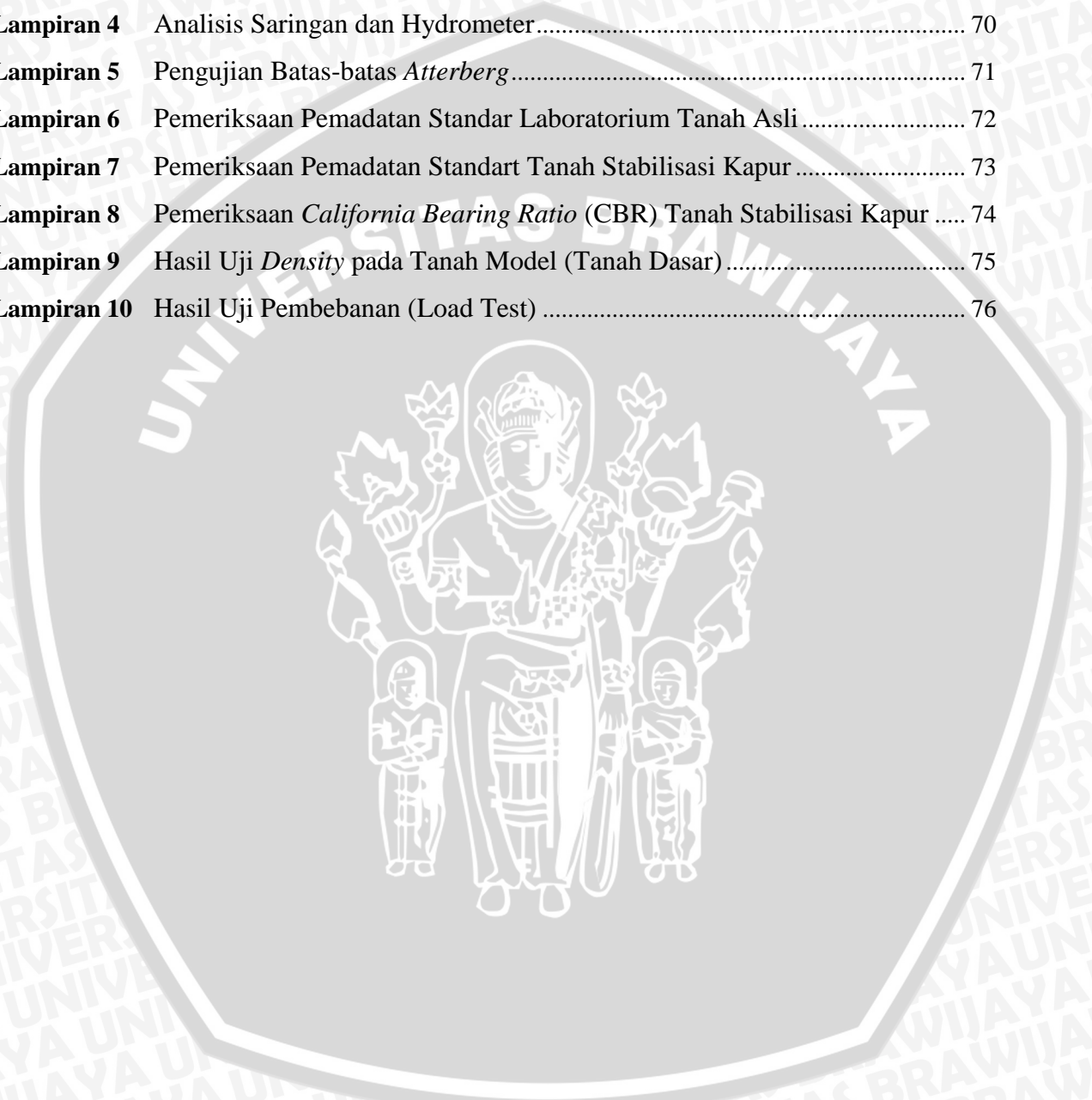
Gambar 4.26 Perbandingan pengaruh variasi jarak terhadap nilai BC_Is.....62

Gambar 4.27 Hubungan nilai *swelling* dengan prosentase stabilisasi63



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Pengujian Kadar Air Tanah Asli (<i>Undisturbed Sample</i>)	65
Lampiran 2	Pengujian Berat Isi Tanah (<i>Undisturbed Sample</i>)	66
Lampiran 3	Pengujian Berat Jenis Tanah Asli (<i>Specific Gravity</i>).....	68
Lampiran 4	Analisis Saringan dan Hydrometer.....	70
Lampiran 5	Pengujian Batas-batas <i>Atterberg</i>	71
Lampiran 6	Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli.....	72
Lampiran 7	Pemeriksaan Pemadatan Standart Tanah Stabilisasi Kapur	73
Lampiran 8	Pemeriksaan <i>California Bearing Ratio</i> (CBR) Tanah Stabilisasi Kapur	74
Lampiran 9	Hasil Uji <i>Density</i> pada Tanah Model (Tanah Dasar).....	75
Lampiran 10	Hasil Uji Pembebanan (Load Test)	76



RINGKASAN

Amalia Faticha, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2016, Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom *Deep Soil Mixing* (DSM) Berpola *Single Square* Diameter 4,5 cm Terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif, Dosen Pembimbing : Yulvi Zaika dan Arief Rachmansyah.

Salah satu jenis tanah yang memiliki karakteristik kurang baik karena nilai daya dukung yang rendah dan potensi kembang susut yang tinggi adalah tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif dapat menimbulkan kerusakan dan membahayakan konstruksi di atasnya karena sifat yang sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Saat musim penghujan atau kadar air tinggi, tanah akan mengembang dan menyebabkan konstruksi di atasnya terangkat. Sebaliknya pada saat musim kemarau kadar airnya turun, tanah akan menyusut dan menyebabkan penurunan bangunan (*settlement*). Tanah yang berasal dari Kec. Ngasem, Kab. Bojonegoro tergolong tanah ekspansif. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya untuk memperbaiki sifat-sifat tanah yang kurang baik sehingga menjadi lebih stabil dan dapat meningkatkan nilai daya dukung tanahnya.

Pada penelitian kali ini, tanah lempung ekspansif dari daerah Bojonegoro akan distabilisasi menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) dengan campuran 10% kapur dengan diameter kolom 4,5 cm berpola *single square*. Variasi jarak antar kolom yaitu 1D, 1,25D, dan 1,5D dimana adalah diameter kolom. Sedangkan panjang kolom adalah 2B, 3B, dan 4B dimana B adalah lebar plat beban (5cm). Benda uji terdiri dari dua jenis, yaitu tanah asli sebelum distabilisasi dan tanah yang telah distabilisasi dengan kolom DSM. Kemudian dilakukan uji beban (*load test*) untuk mengetahui daya dukung ultimitnya. Sampel penelitian ini dilakukan di dalam boks ukuran 30 x 30 x 30 cm dengan tinggi sampel tanah 20 cm.

Berdasarkan hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak antar kolom dan semakin panjang kolom DSM maka nilai daya dukung akan semakin meningkat. Nilai Daya dukung maksimum berada pada jarak 1D dan panjang kolom 4B yaitu sebesar 20,02 kg/cm² meningkat 184,38% dari tanah asli. Selain dapat meningkatkan daya dukung, kolom DSM juga dapat menurunkan nilai *swelling*. Semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi maka nilai *swelling* akan semakin menurun. Nilai *swelling* terkecil sebesar 0,8% yaitu pada jarak kolom 1d dan panjang kolom 4B.

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

SUMMARY

Amalia Faticha, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, Juli 2016, The Effect of Spacing and Length of Deep Soil Mixing (DSM) Column with Single Square Arrangement Diameter 4,5 cm on The Bearing Capacity of Expansive Soil, Academic Supervisor: Yulvi Zaika and Arief Rachmansyah.

Not all types of soils in Indonesia has characteristic that supporting a construction on it. One of the soil that having poor characteristics because has low bearing capacity and high potential swelling and shrinkage is a expansive clay. Expansive clay can be causing damage and dangerous for construction on it, because the characteristic that very sensitive with the changes of the moisture content. When the rainy season or high water levels, soil will expand and causing construction on it lifted up. Otherwise, when the dry season that the water levels down, soil will be shrinking and causing a decrease in building (settlement). Soil it comes from Kec. Ngasem, Kab. Bojonegoro classified in expansive clay. So, it takes an effort to improve poor characteristics of soil it becomes more stable and can increase the bearing capacity.

In this research, the expansive clay from Bojonegoro was stabilized using deep soil mixing method (DSM) with a mixture of 10% lime in diameter column 4,5 cm with single square arrangement. Variations of column spacing is 1D, 1,25D, and 1,5D where D is diameter of the column. While the column length is 2B, 3B, and 4B whereas B is wide of load plate (5cm). Object test are original soil before stabilized and soil that had been stabilized with DSM columns. Then load test was done to determined ultimate bearing capacity. The sample was done inside the box 30 x 30 x 30 cm with heights of soil samples are 20 cm.

Based on the results and discussions, it can be concluded that the closer of spacing between each column and the longer of the DSM column it will be increasing the bearing capacity. Maximum bearing capacity value being at a spacing 1D and length column 4B is 20.02 kg/cm² increased 184.38% from the original soil. In addition to increasing bearing capacity, DSM column can also lower the value of the swelling potential. The greater percentage of stabilization soil then the swelling will be declining. The lowest of the swelling value is f 0.8% at a spacing and length column are 1D and 4B.

Key words : expansive clays, limestone, Deep Soil Mixing, spacing and length of columns, bearing capacity



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara tropis yang memiliki karakteristik tanah yang beranekaragam baik dari jenis, sifat, maupun prilakunya. Kondisi tanah yang berbeda-beda di tiap daerah terjadi akibat berbagai faktor, antara lain faktor topografi, geologi, morfologi, iklim dan lingkungan. Salah satu jenis tanah yang banyak terdapat di Indonesia yaitu tanah lempung. Berdasarkan penelitian, diungkapkan bahwa sekitar 90% tanah di pulau Jawa berpotensi ekspansif sangat tinggi dan tinggi. Dan Jawa timur sebagai penyumbang terbesar disusul Jawa barat dan Jawa tengah. Salah satunya terdapat pada tanah di kecamatan Ngasem, kabupaten Bojonegoro. Dilihat dari perilaku mineral pembentuknya, tanah lempung dibagi menjadi dua macam, yaitu tanah lempung ekspansif dan non-ekspansif. Tanah lempung ekspansif seperti yang terdapat pada Kec. Ngasem, Kab. Bojonegoro memiliki karakteristik yang kurang baik karena nilai daya dukung yang rendah dan potensi kembang susut yang tinggi.

Tanah lempung ekspansif mengandung mineral lempung *monmorillonite* yang memiliki luas permukaan lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah banyak, sehingga sangat peka terhadap perubahan kadar air dan mudah mengembang. Hal ini menyebabkan volume tanahnya berubah-ubah. Pada saat musim penghujan kadar air tinggi, sehingga tanah akan mengembang dan menyebabkan konstruksi di atasnya terangkat. Sebaliknya pada saat musim kemarau kadar airnya turun, tanah akan menyusut dan menyebabkan penurunan bangunan (*settlement*). Kondisi ini dapat menimbulkan kerusakan parah dan membahayakan konstruksi yang didirikan di atasnya.

Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya untuk memperbaiki sifat-sifat tanah yang kurang baik sehingga menjadi lebih stabil dan dapat meningkatkan nilai daya dukung tanahnya. Upaya yang dapat ditempuh yaitu dengan metode stabilisasi tanah. Stabilisasi merupakan suatu upaya yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas tanah sehingga diharapkan mampu untuk mendukung konstruksi di atasnya. Stabilisasi dilakukan untuk meningkatkan sifat-sifat teknis tanah, seperti daya dukung, permeabilitas, kompresibilitas, dan potensi pengembangan. Banyak sekali metode stabilisasi tanah yang disesuaikan dengan kondisi lapangan, salah satunya yaitu dengan cara mekanis maupun dengan pencampuran bahan aditif/stabilisasi kimiawi. Stabilisasi kimia dilakukan dengan

penambahan *stabilizing agents* pada tanah dasar yang akan ditingkatkan mutunya. Dari sekian banyak *stabilizing agents* salah satunya yaitu kapur yang diyakini mampu meningkatkan kekuatan tanah. Kapur memiliki kemampuan untuk mengurangi sifat plastis dan kembang pada tanah ekspansif. Metode stabilisasi dengan pencampuran bahan aditif di lapangan langsung (*in situ stablization*) dibedakan menjadi pencampuran di tanah dangkal atau permukaan (*shallow mixing*) dan pencampuran pada tanah dalam (*deep soil mixing*).

Sudah banyak penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pencampuran bahan aditif pada tanah ekspansif ternyata mampu meningkatkan kemampuan daya dukungnya dan memperbaiki sifat-sifat tanah yang kurang baik. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Warsiti (2009) pada sampel tanah dasar (*subgrade*) dari jalan di daerah Sendang Mulyo. Jalan pada daerah ini sering mengalami kerusakan meskipun sering dilakukan perbaikan pada permukaan (*lap surface*). Dari permasalahan yang terjadi, mendorong peneliti untuk melakukan pengujian pengaruh stabilisasi dengan kapur terhadap nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dan *swelling* (kembang susut). Dari hasil penelitian yang pernah dilakukan, tanah di daerah Sendang Mulyo termasuk jenis tanah lempung dan mempunyai (γ_d) maksimum 1,483964 t/m³, pada persentase kapur optimum = 10,80769% dengan kadar air = 19% (Warsiti, 1998). Dari pengujian sifat fisik tanah asli didapatkan hasil bahwa sampel tanah tergolong tanah dengan plastisitas tinggi dengan nilai LL = 57,95 %, PI = 33,47 %, PL = 24,48%, SL = 18,52%. Berdasarkan pengujian mekanis metode standar tanah asli memiliki data sebagai berikut: kadar air optimum (OMC) = 24%, Kepadatan kering max (γ_d) = 1,485 t/m³, CBR *unsoked* = 11,8%, CBR *soked* = 2,45%, dan *swelling* = 5,127%. Tanah asli dicampur dengan kapur dengan berbagai presentase (5%, 8%, 10%, 12%). Lama pemeraman 3 hari dengan metode *standard proctor*. Dari hasil pengujian didapatkan kesimpulan bahwa presentase optimum kapur sebesar 10 % yang dapat meningkatkan sifat tanah paling baik dengan hasil sebagai berikut: CBR *unsoked* naik dari 11,8% menjadi 22,1% dan CBR *soked* naik dari 2,45% menjadi 7,6%.

Dari sekian banyak metode stabilisasi, kebanyakan dilakukan di lapisan tanah dangkal atau permukaan saja. Namun apabila tanah ekspansif berada pada kedalaman jauh dari permukaan tanah (>1,5 m), maka harus menggunakan metode stabilisasi untuk lapisan dalam. Salah satu metode stabilisasi tanah dalam yaitu dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). DSM adalah suatu metode perbaikan tanah dengan mencampur tanah dengan bahan aditif yang dimasukkan ke dalam tanah dengan cara mekanik atau dengan alat pencampur semacam mesin bor atau *auger*. Dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Arif Lukman Hakim (2015) yang melakukan penelitian tentang pengaruh jarak dan panjang

kolom DSM tipe *panels* terhadap nilai daya dukung tanah di Bojonegoro. Kesimpulan yang didapatkan adalah variasi jarak dan panjang kolom berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah. Daya dukung maksimum didapatkan pada jarak kolom terkecil dan panjang kolom terbesar. Dan stabilisasi dengan metode DSM dengan campuran 15% *fly ash* terbukti dapat menurunkan nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

Sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan pada tanah lempung ekspansif di daerah Ngasem, Bojonegoro dengan metode DSM dengan campuran *fly ash*. Maka diperlukan penelitin lanjutan dengan tetap menggunakan metode DSM hanya yang membedakan kali ini digunakan campuran kapur. Kadar kapur yang digunakan yaitu 10% . Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom DSM berpola *single square* dengan diameter kolom 4,5 cm terhadap nilai daya dukung tanah dan *swelling*. Diharapkan dengan penelitian laboratorium ini dapat dijadikan acuan untuk stabilisasi tanah dengan metode DSM dengan campuran bahan aditif kapur di Kec. Ngasem, Kab. Bojonegoro, Jawa Timur.

1.2 Identifikasi Masalah

Banyak permasalahan yang ditimbulkan tanah lempung ekspansif. Sifat-sifat tanah lempung ekspansif yaitu nilai daya dukung yang rendah dan potensi kembang susut yang tinggi sangat riskan untuk mendirikan bangunan di atas tanah dasar berupa lempung ekspansif. Lempung ekspansif sangat sensitif terhadap perubahan kadar air. Kadar air yang tinggi menyebabkan tanah mengembang dan volume tanah bertambah, sebaliknya apabila kadar air rendah volume tanah akan menyusut. Volume tanah yang berubah-ubah dapat menyebabkan kerusakan parah dan membahayakan bagi konstruksi yang dibangun di atas tanah lempung ekspansif. Oleh karena itu, diperlukan metode stabilisasi tanah yang dapat meningkatkan kekuatan daya dukung tanah dan mengurangi potensi kembang susut dari tanah ekspansif. Salah satu metode stabilisasi tanah dalam yaitu dengan metode *Deep Soil Mixing (DSM)*.

Namun di Indonesia belum banyak penerapan metode DSM untuk stabilisasi tanah, untuk itu pada penelitian kali ini akan dilakukan studi laboratorium dengan metode DSM dengan bahan campuran berupa kapur. Variasi jarak dan panjang kolom pada metode DSM dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai daya dukung tanah. Sehingga dapat diketahui jarak dan panjang kolom yang akan menghasilkan nilai daya dukung maksimum.

1.3 Rumusan masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian kali ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak dan panjang kolom DSM tipe *single square* dengan diameter 4,5 cm terhadap nilai daya dukung (q_u) pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan campuran 10% kapur?
2. Berapa jarak dan panjang kolom yang menghasilkan nilai daya dukung (q_u) maksimum pada lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan campuran 10% kapur?
3. Bagaimana pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan metode DSM tipe *single square* dengan bahan aditif 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah?

1.4 Batasan Masalah

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

1. Sampel tanah yang digunakan diambil dari tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
2. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Perubahan terhadap karakteristik tanah akibat adanya pencampuran tidak akan dianalisis.
4. Pada penelitian ini, analisa kimia dan ekonomi tidak dibahas secara khusus.
5. Kapur yang digunakan adalah kapur yang telah terhidrasi/kapur padam yang didapat dari toko bangunan di Malang.
6. Kadar kapur yang digunakan yaitu 10% dari berat kering tanah. Sedangkan campuran tanah dan kapur untuk stabilisasi DSM menggunakan kadar air (OMC) = 24,10% dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d_{max}}$) = 1,406 kg/cm³, dimana data tersebut diperoleh dari pebgujian pemadatan standar.
7. Berdasarkan penelitian pemadatan standar yang telah dilakukan oleh Hakim (2015), kadar air (OMC) tanah dasar yang digunakan yaitu 27,908% dengan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d_{max}}$) sebesar 1,28 gram/cm³.

8. Metode stabilisasi yang digunakan adalah metode *Deep Soil Mixing* (DSM) menggunakan konfigurasi *single square* dengan diameter (D) 4,5 cm. Variasi jarak antar kolom adalah $1 \times D$, $1,25 \times D$, dan $1,5 \times D$, sedangkan variasi panjang kolom adalah $2 \times B$, $3 \times B$, dan $4 \times B$, dimana B adalah lebar pelat beban dengan $B = 5$ cm
9. Tanah dasar yang distabilisasi hanya mencakup pada area yang terpengaruh tegangan vertikal di bawah luasan pelat yang menerima beban merata, yaitu hingga jarak $2 \times B$ arah horizontal dan $4 \times B$ arah vertikal dari titik pusat beban bekerja.
10. Metode pencampuran yang digunakan adalah *dry mixing* dan pemodelan dilakukan di dalam *box* ukuran (30×30×30) cm.
11. Volume tanah dasar dalam *box* yaitu (30×30×20) cm.
12. Waktu perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah selama 3 hari.
13. Pencampuran sampel tanah dengan kapur dianggap homogen dan dilakukan di luar *box*.
14. Alat pemadat untuk tanah dasar berbentuk persegi (12,5×12,5) cm dengan berat 9,56 kg. Sedangkan alat pemadat untuk kolom *Deep Soil Mixing* berbentuk silinder.
15. Pengujian laboratorium yang dilakukan adalah uji beban hidrolis (*loading test*). Pada uji beban digunakan pelat baja ukuran (5×5×2) cm sebagai penyalur beban yang merupakan pemodelan dari beban pondasi. Pembebanan dihentikan sampai mencapai batas runtuh tanah yaitu ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali beban sama pada penurunan tanah yang berbeda.

1.5 Tujuan Penelitian

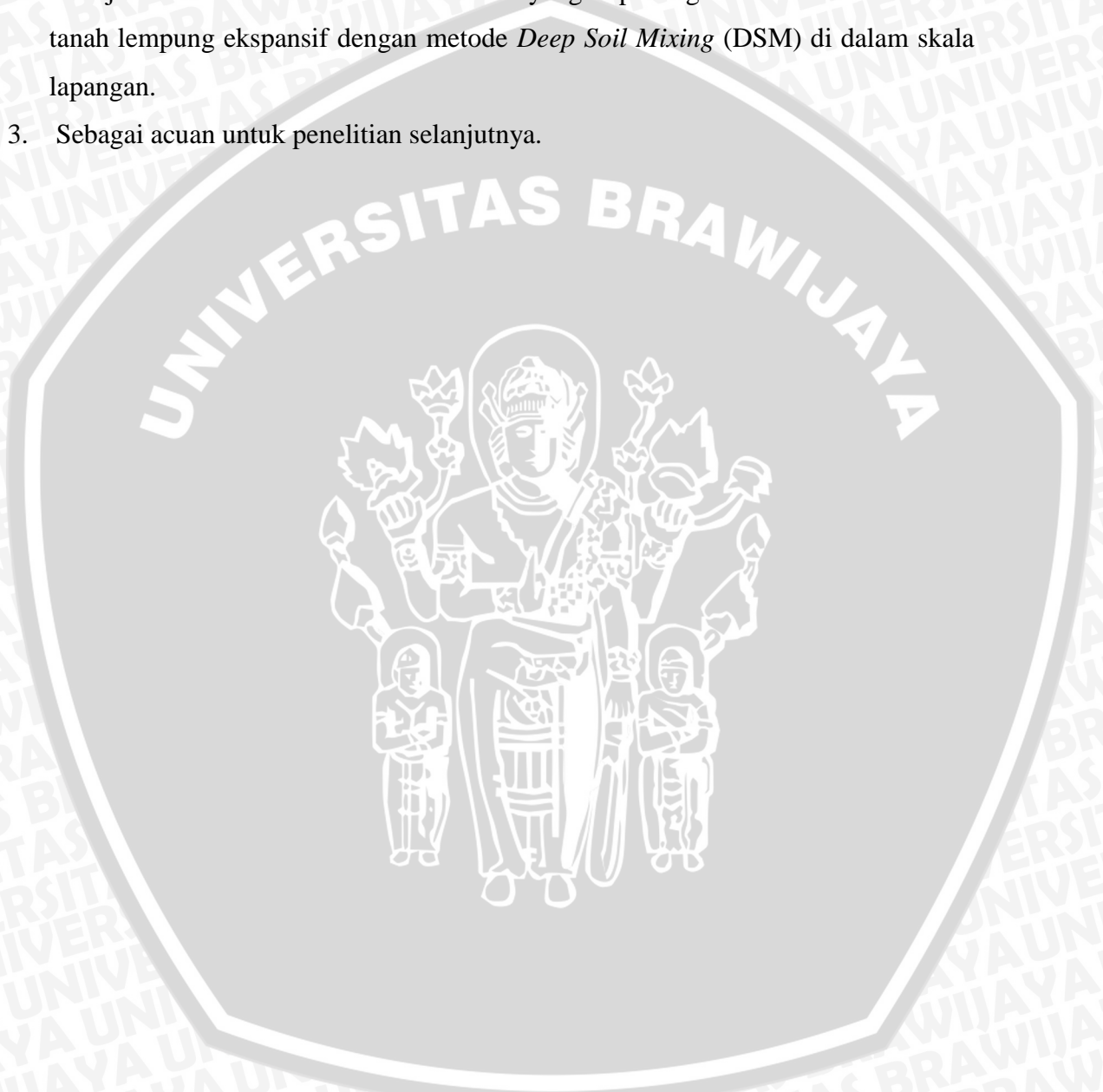
Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom tipe *single square* dengan diameter 4,5 cm terhadap nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan pencampuran 10% kapur.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang kolom yang menghasilkan nilai daya dukung maksimum pada tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan pencampuran 10% kapur.
3. Untuk mengetahui pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif di Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur dengan metode *Deep Soil Mixing* dengan bahan aditif 10% kapur terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

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



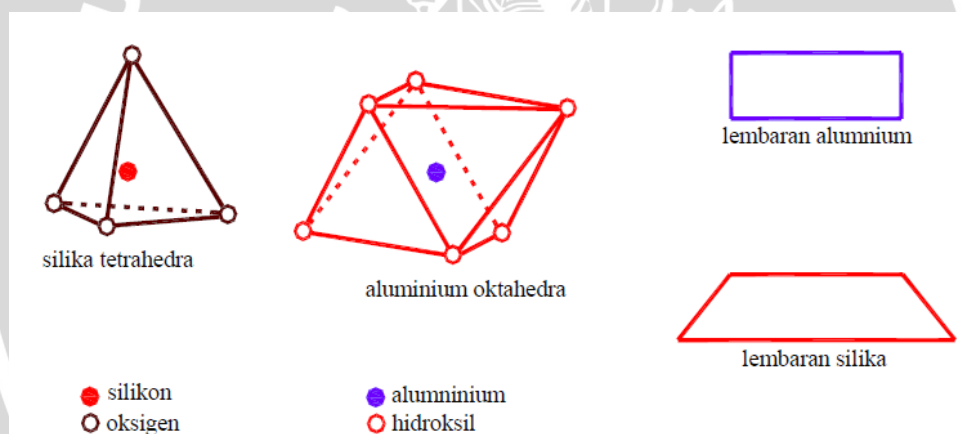
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lempung

2.1.1 Struktur Mineral Penyusun Tanah Lempung

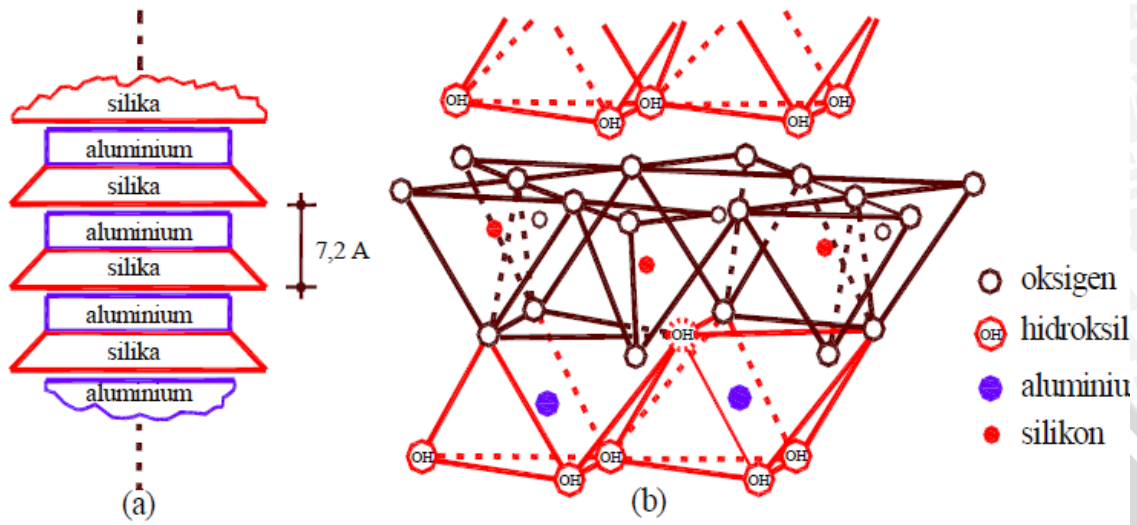
Mineral lempung berasal dari pelapukan tanah akibat reaksi kimia yang menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm. Menurut Hardiyatmo (1992) partikel lempung berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus. Karena itu, lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Kebanyakan susunan dari mineral lempung terdiri dari silika tetahedra dan alumunium oktahedra (**Gambar 2.1**). Silika dan alumunium secara parsial dapat digantikan oleh elemen lain dalam kesatuannya, keadaan ini dikenal sebagai substitusi isomorf (Hardiyatmo,1992:16).



Gambar 2.1 Mineral – mineral lempung

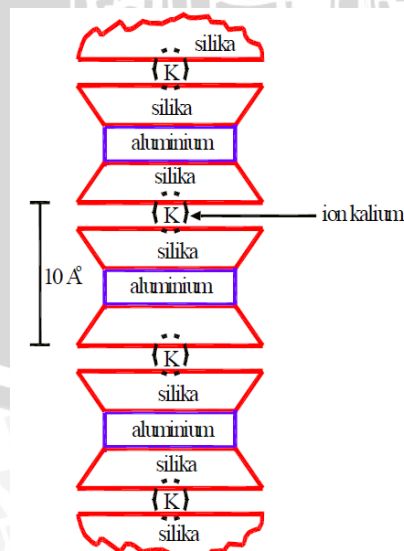
Permukaan partikel-partikel lempung umumnya mengandung muatan negatif. Hal ini terjadi karena substitusi isomorf dan oleh karena pecahnya keping partikel pelat tersebut pada tepi-tepinya. Muatan negatif yang lebih besar dijumpai pada partikel-partikel yang mempunyai spesifik yang lebih besar. Jika ditinjau dari mineraloginya, lempung terdiri dari berbagai mineral penyusun, antara lain *kaolinite*, *montmorillonite*, *illite* dan *polygorskite*. Kelompok yang lain yang perlu diketahui adalah *chlorite*, *vermiculite*, dan *hallosyte* (Hariyatmo, 1992). *Kaolinite* disebut sebagai mineral lempung satu banding satu (1:1). *Kaolinite* terdiri dari susunan satu lembar silika tetrahedra dan satu lembar alumunium oktahedra yang membentuk satu unit dasar (**Gambar 2.2a**). Susunan silika dan alumunium

keduanya terikat oleh ikatan hidrogen (**Gambar 2.2b**). Ikatan pada *kaolinite* sukar dipisahkan sehingga mineral ini stabil dan air tidak dapat masuk diantara lempengannya untuk menghasilkan pengembangan atau penyusutan pada sel satuannya.



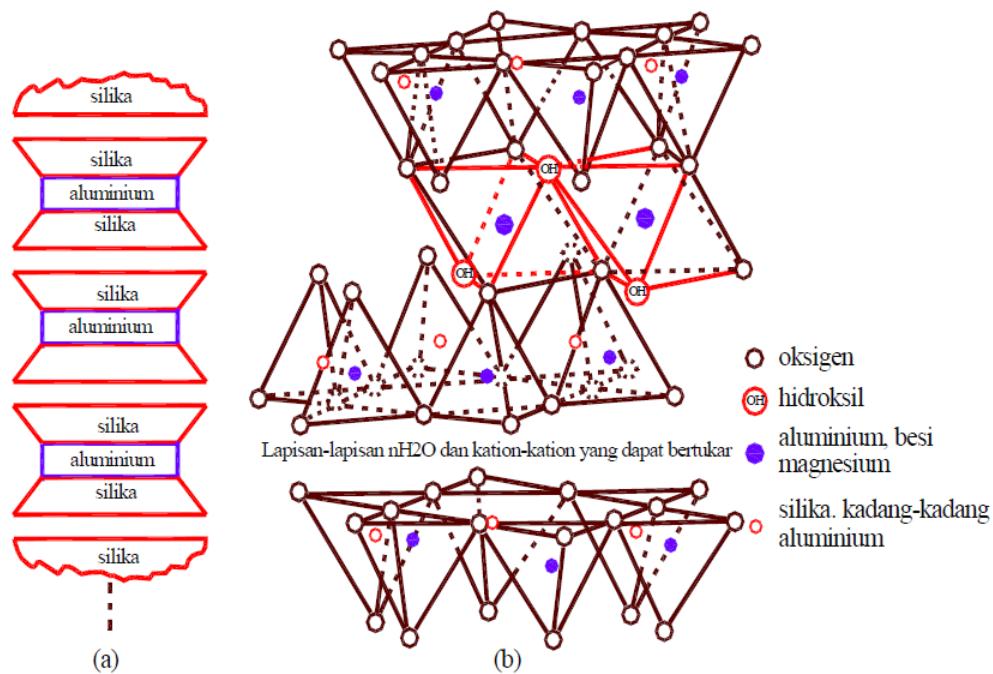
Gambar 2.2 (a) Struktur *Kaolinite* (Lambe, 1953)
(b) Struktur atom *Kaolinite* (Grim, 1959)

Illite bentuk susunan dasarnya terdiri dari sebuah lembaran aluminium oktahedra yang terikat di antara dua lembaran silika tetrahedra (**Gambar 2.3**). Masing – masing lembaran diikat oleh ikatan lemah ion-ion kalium yang terletak di antara lembaran. Ikatan ion kalium (K^+) lebih lemah dari ikatan hidrogen pada *kaolinite*, tetapi lebih kuat dari pada ikatan pada *montmorillonite*. Susunan illite tidak akan mengembang oleh gerakan air di antara lembaran-lembarannya.



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

Montmorillonite disebut juga mineral dua banding satu (2:1), karena satuan susunan kristalnya terbentuk dari susunan dua lempeng silika tetrahedral mengapit satu lempeng alumina oktahedral ditengahnya (**Gambar 2.4a**) sebagaimana dikutip (Das, B. M, 1985) . Hubungan antara satuan unit diikat oleh gaya Van der Waals yang sangat lemah, sehingga air (H₂O) dan kation padat bertukar dan mudah menyusup dan memperlemah ikatan sehingga antar lapisan akan terpisah (**Gambar 2.4b**). Ukuran unit massa sangat besar sehingga sangat mudah menyerap air dan menyebabkan pengembangan. Karena sifatnya tersebut, tanah- tanah yang mengandung mineral *montmorillonite* sangat mudah mengembang oleh tambahan kadar air. Tekanan pengembangan yang dihasilkan dapat merusak struktur ringan dan perkerasan jalan raya (Hardiyatmo,1992).



Gambar 2.4 (a) Struktur mineral *montmorillonite* (Lambe, 1953)

(b) Struktur atom *montmorillonite* (Grim, 1959)

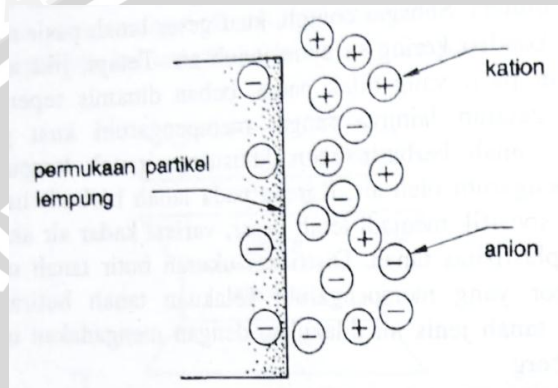
2.1.2 Interaksi Air dengan Mineral Lempung

Air biasanya tidak banyak mempengaruhi kelakuan pada tanah granuler (non kohesif). Sebaliknya air sangat mempengaruhi tanah berbutir halus terutama lempung. Hal ini karena lempung memiliki butiran yang lebih halus sehingga luas permukaan spesifiknya menjadi lebih besar. Sehingga kadar air akan mempengaruhi plastisitas tanah.

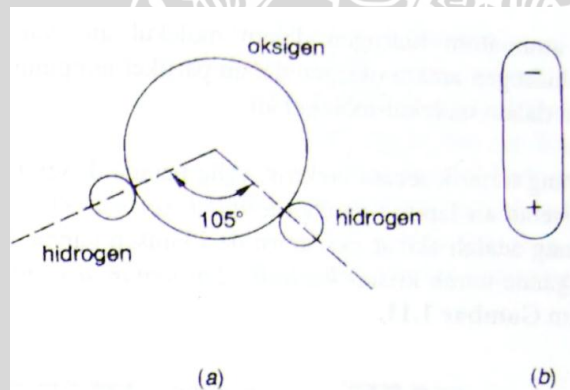
Lempung terdiri dari partikel-partikel bermuatan negatif. Dalam suatu kristal yang ideal, muatan negatif dan positif berada dalam keadaan seimbang, kemudian akibat substitusi isomorf dan kontinuitas perpecahan susunannya, menyebabkan muatan negatif berada pada

permukaan partikel lempung. Untuk mengimbangi muatan negatif tersebut, partikel lempung menarik muatan positif (kation) yang dari garam yang ada pada air porinya. Hal ini disebut dengan pertukaran ion-ion (Hardiyatmo,1992).

Pada saat air ditambahkan pada lempung, maka kation-kation dan anion-anion akan mengapung di sekitar partikel (**Gambar 2.5**). Molekul air adalah molekul yang dipolar, yaitu atom hidrogen tidak tersusun simetri di sekitar atom-atom oksigen (**Gambar 2.6a**). Dipolar berarti satu molekul air adalah batang yang mempunyai muatan positif dan negatif pada ujung yang berlawanan (dobel kutub) (**Gambar 2.6b**)



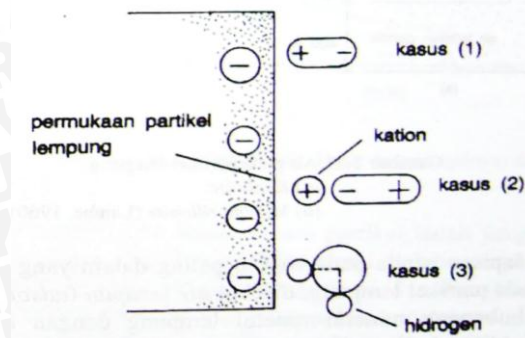
Gambar 2.5 Kation dan anion pada partikel lempung



Gambar 2.6 Sifat dipolar air

Pada (**Gambar 2.7**) Hardiyatmo (1992) menerangkan 3 mekanisme yang menyebabkan molekul air yang dipolar dapat tertarik secara elektrik pada permukaan partikel lempung:

1. Tarikan antara muatan negatif partikel lempung dengan muatan positif dipolar.
2. Tarikan antara kation-kation dalam lapisan ganda dengan muatan negatif dari ujung dipolar. Kation-kation ini tertarik oleh permukaan partikel lempung yang bermuatan negatif.
3. Andil atom-atom hidrogen dalam molekul air, yaitu dengan ikatan hidrogen antara oksigen dalam partikel lempung dan atom oksigen dalam molekul-molekul air.



Gambar 2.7 Molekul air dipolar dalam lapisan ganda

Partikel lempung akan menarik air secara elektrik akan membentuk suatu lapisan ganda (*double-layer water*). Sifat plastis tanah lempung adalah akibat eksistensi dari lapisan ganda. Air lapisan ganda pada bagian dalam yang sangat kuat melekat pada partikel lempung disebut air serapan (*adsorbed water*).

2.1.3 Klasifikasi Tanah Unified Soil Classification System (USCS)

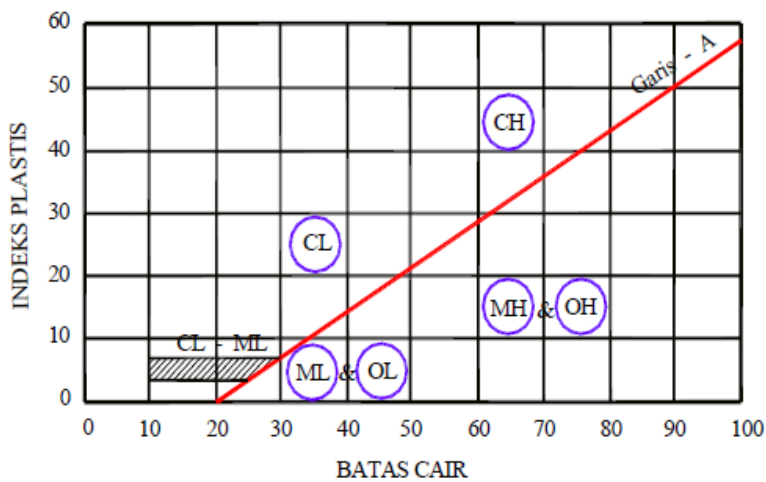
Sistem klasifikasi tanah dibuat pada dasarnya untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisis tanah. Sistem klasifikasi bukan merupakan sistem identifikasi untuk menentukan sifat-sifat mekanis dan geoteknis tanah. Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan untuk mengelompokkan tanah adalah *Unified Soil Classification System (USCS)*. Sistem ini didasarkan pada sifat-sifat indek tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair, dan indek plastisitasnya.

Dalam sistem USCS tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu:

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

Tabel 2.1 Simbol untuk Klasifikasi USCS

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



Gambar 2.8 Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah USCS (Das, Braja. M)

2.1.4 Pengertian Tanah Lempung Ekspansif

Tanah dengan $IP > 17\%$ dikategorikan sebagai tanah lempung seperti yang ditunjukkan pada (Tabel 2.3) (Hardiyatmo, 1992). Lempung merupakan jenis tanah berbutir halus yang sangat dipengaruhi oleh kadar air dan mempunyai sifat yang cukup rumit. Kadar air mempengaruhi sifat kembang susut dan kohesi pada tanah berbutir halus jenis lempung. Lempung yang mempunyai fluktuasi kembang susut yang tinggi disebut lempung ekspansif. Biasanya suatu tanah lempung dapat diperkirakan mempunyai perubahan volume yang besar (ekspansif) apabila indeks plastisitasnya $IP \geq 20$ (Bowles, 1989). Tanah ekspansif memiliki kandungan mineral yang mengalami pertukaran ion yang tinggi yaitu mineral *montmorillonite* yang mengakibatkan tanah ini memiliki potensi kembang susut tinggi. Lempung ekspansif sangat sensitif terhadap perubahan kadar air, saat kadar air meningkat tanah akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori. Sebaliknya saat kadar air menurun tanah akan menyusut dan menyebabkan retak – retak. Tanah lempung ekspansif ini sering menimbulkan kerusakan pada bangunan seperti jalan bergelombang, retaknya dinding, dan terangkatnya pondasi.

Tabel 2.2 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah

PI	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
<17	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

2.1.5 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

1. Identifikasi langsung

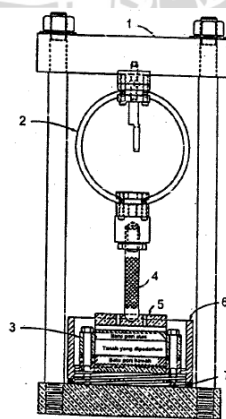
Identifikasi secara langsung yaitu dengan melakukan pengukuran pengembangan secara langsung, baik terhadap contoh tanah terganggu maupun tidak terganggu. Salah satu contoh metode pengukuran langsung yaitu uji kembang bebas (*free swell*) dan perubahan volume potensial.

- Uji kembang bebas (*free swell*)

Uji kembang susut (*free swell*) dilakukan dengan menempatkan sejumlah tanah kering lolos saringan No. 40 ke dalam sebuah silinder ukur berisi air kemudian mengukur volume pengembangannya setelah seluruh tanah turun. Nilai kembang bebas dinyatakan sebagai perbandingan perubahan volume terhadap volume awalnya, yang dinyatakan dalam persen.

- Perubahan volume potensial

Perubahan volume potensial atau sering disebut *potential volume change (PVC)* diukur dengan menggunakan PVC meter seperti yang diperlihatkan pada (Gambar 2.9). Pengujian ini dilakukan dengan menempatkan contoh tanah terganggu pada cetakan pemadatan. Selanjutnya tanah dipadatkan dengan metode modified proctor sebesar pada kadar air alami di lapangan. Kemudian contoh air dibiarkan mengembang sampai menekan cincin ukur. Besarnya tekanan pada cincin ukur dinyatakan sebagai indeks pengembangan dan nilainya dikorelasikan dengan nilai perubahan volume potensial yang ada pada grafik (Gambar 2.9).

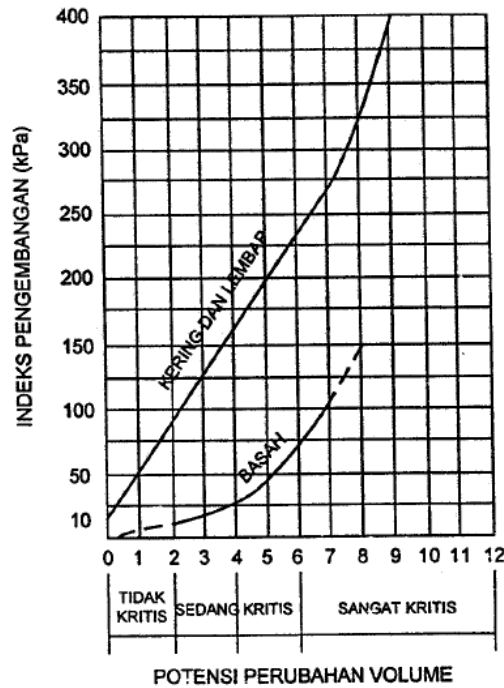


Keterangan gambar:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 1 Pelat pembebanan | 5 Penutup |
| 2 Cincin ukur | 6 Wadah |
| 3 Cetakan pemadatan | 7 Cincin berbentuk O |
| 4 Batang pengatur | |

Gambar 2.9 Peralatan pengujian perubahan volume potensial

Sumber: Nelson & Miller (1992)



Gambar 2.10 Indeks pengembangan terhadap potensi perubahan volume

Sumber: Lambe (1960)

2. Identifikasi tidak langsung

Identifikasi tanah ekspansif secara sederhana dapat dilakukan dengan uji laboratorium yaitu dengan menggunakan nilai Batas Atterberg dan persentase kandungan lempung untuk menggambarkan potensi pengembangan suatu tanah secara kualitatif.

- Nilai indeks plastisitas (PI) dan batas susut (SI)

Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung dengan menggunakan nilai indeks plastisitas (PI) dan nilai indeks susut (SI) diperlihatkan pada (**Tabel 2.3**).

Tabel 2.3 Hubungan *swelling* dengan indeks plastis

PI (%)	SI (%)	Tingkat Pengembangan
< 12	< 15	Rendah
12 - 23	13 - 50	Sedang
23 - 32	30 - 40	Tingkat
> 32	> 40	Sangat Tinggi

Sumber : (Chen, Raman, 1967)

- Tingkat keaktifan (Activity)

Ketebalan air menegililingi butiran tanah lempung tergantung dari macam mineralnya, jadi dapat diharapkan plastisitas tanah lempung tergantung dari (Hardiyatmo,1992):

1. Sifat mineral lempung yang ada dalam butiran.
2. Jumlah mineral.

Bila ukuran butiran semakin kecil, maka luas permukaan butiran semakin besar. Pada konsep Atterbeg, jumlah air yang tertarik oleh permukaan partikel lempung akan bergantung pada jumlah partikel lempung. Skempton (1953), mendefinisikan aktivitas sebagai perbandingan antara indeks plastisitas dengan persen fraksi ukuran lempung (persen berat butiran < 0,002 mm), dan dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

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

Dimana:

PI: Indeks plastisitas

C: Persentase lempung lolos saringan 0,002mm

Dari rumus diatas, Skempton membuat kategori tanah yang membagi menjadi tiga golongan, yaitu:

$A < 0,75$: Tidak aktif

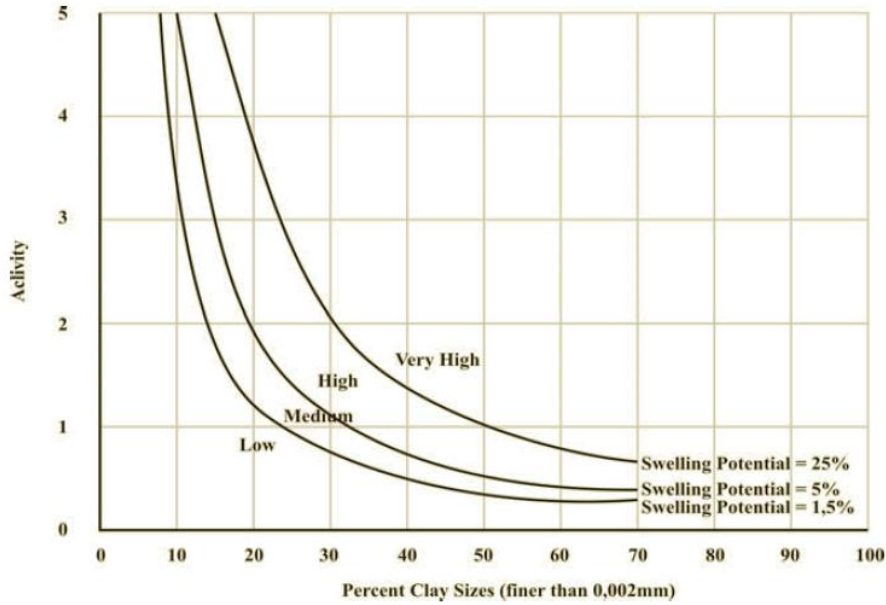
$0,75 < A < 1,25$: Normal

$A > 1,25$: Aktif

Kemudian Seed et el (2003) mengelompokkan besaran aktivitas berdasarkan jenis mineralnya seperti pada (**Tabel 2.4**) sebagai berikut:

Tabel 2.4 Hubungan aktivitas dengan mineral (Seed et al, 2003)

Mineral	Aktivitas
<i>Kaolinite</i>	0,33 - 0,46
<i>Illite</i>	0,99
<i>Montmorillonite</i> (Ca)	1,5
<i>Montmorillonite</i> (Na)	7,2



Gambar 2.11 Grafik klasifikasi potensi mengembang

Sumber: (Seed et al, 2003)

Seed et al (2003) membuat rumus dalam bentuk analitis sebagai berikut:

$$Activity(A) = \frac{PI}{C-n} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana:

PI: Indeks plastisitas

C: Persentase lempung lolos saringan 0,002mm

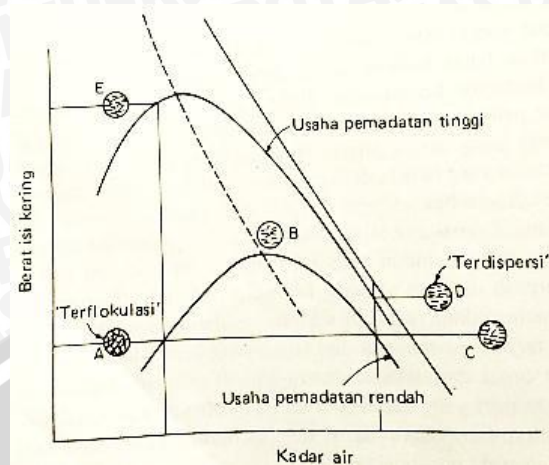
n: berharga 5 atau 10 (n tanah asli = 5, sedangkan n remolded = 10)

2.2 Sifat-Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan

Struktur dan sifat teknis tanah lempung yang dipadatkan akan bergantung pada metode pemadatan, usaha pemadatan dan energi pemadatan [*compaction effort and energy (CE)*], dan kadar air pada saat pemadatan. Biasanya, kadar air tanah yang dipadatkan didasarkan pada posisi-posisi kadar air sisi kering optimum, dekat optimum atau optimum, dan sisi basah optimum. Kering optimum didefinisikan sebagai kadar air yang lebih tinggi daripada air optimumnya (Hardiyatmo,1992). Bowles (1989) pada CE yang sama, dengan kadar air yang bertambah, tekstur tanah akan lebih terdispersi seperti terlihat secara kualitatif dalam (**Gambar 2.12**). Pada keadaan lebih kering dari optimum, tanah akan cenderung membentuk suatu tekstur yang berflokuasi. Apabila usaha pemadatan diperbesar, teksturnya akan semakin terdispersi walaupun kadar airnya tetap konstan seperti pada titik E pada (**Gambar 2.12**). Terlihat pada **Gambar 2.12** bahwa pada tekstur tanah jauh lebih terdispersi pada titik



C dibandingkan pada titik A untuk CE yang sama, tetapi dengan kadar air yang besar dari keadaan lebih kering menjadi basah dari optimum.



Gambar 2.12 Pengaruh pemadatan pada susunan tanah (Lambe,1958)

Percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa pemuaiannya ternyata lebih besar dan penyusutan lebih kecil untuk lempung yang dipadatkan pada bagian yang lebih kering dari optimum. Hal ini disebabkan oleh kombinasi tekstur yang berflokulasi, kepekaan terhadap tambahan air pada titik sentuh, dan kadar air referensi yang lebih rendah untuk pemuaiannya. Permeabilitas pada saat percobaan di laboratorium akan berkurang pada CE yang konstan dan kadar air yang bertambah atau CE yang bertambah dan kadar air yang konstan, hal ini karena tekstur yang terdispersi memiliki permeabilitas yang lebih kecil.

Kompresibilitas dari lempung yang dipadatkan merupakan fungsi dari metode pemadatan maupun tingkat tegangan yang bekerja pada massa tanah. Pada tingkat tegangan yang relatif rendah, lempung yang dipadatkan lebih basah dari optimum akan lebih mudah tertekan. Sebaliknya pada tingkat tegangan tinggi, lempung akan lebih sukar tertekan. Kekuatan contoh tanah kohesif juga tergantung pada kadar air dan tingkat regangan yang akan menentukan “kekuatan”.

2.3 Daya Dukung Tanah

Analisis daya dukung tanah mempelajari kemampuan tanah mendukung struktur di atas pondasi. Zaika & Suroso (2014) menyatakan bahwa daya dukung menyatakan kuat geser tanah melawan penurunan akibat pembebanan, yaitu kuat geser yang dapat dibangkitkan tanah sepanjang bidang gesernya. Menurut Hardiyatmo (2011), daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban pondasi dari struktur yang terletak di atasnya.

Daya dukung ultimit (q_u) didefinisikan sebagai beban maksimum persatuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka:

$$q_u = \frac{p_u}{A} \dots\dots\dots (2-3)$$

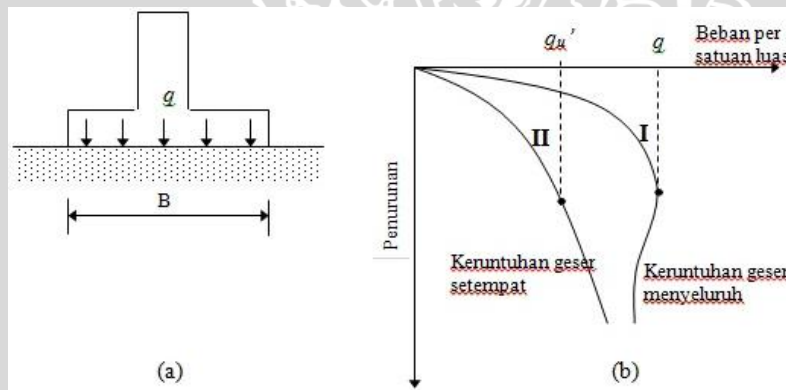
Dimana:

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

p_u = beban ultimit/beban batas (kN)

A = luas beban (m^2)

Konsep perhitungan daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilihat dalam model pondasi menerus dengan lebar (B) yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat (tanah yang jaku) seperti pada **Gambar 2.13a**. Apabila beban terbagi rata (q) tersebut ditambah, maka penurunan pondasi akan bertambah pula. Bila besar beban terbagi rata $q = q_u$ (q_u = daya dukung tanah batas) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q lebih lanjut seperti **Gambar 2.13b**.



Gambar 2.13 (a) Model pondasi
(b) Kurva hubungan antara beban dan penurunan

Terzaghi dengan sejumlah anggapannya menyatakan rumus daya dukung batas untuk pondasi dangkal sebagai berikut:

$$q_u = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \dots\dots\dots (2-4)$$

Dimana:

q_u = daya dukung ultimit (kN/m^2)

c = kohesi tanah dasar pondasi (kN/m^2)

B = lebar pondasi (m)

q = surcharge = γD (kN/m^2)

Φ = sudut geser dalam

N_c, N_q, N_γ adalah faktor daya dukung tanah yang bergantung kepada ϕ

Tanah lempung jika bereaksi dengan kapur dan air, maka akan terjadi beberapa reaksi kimia antara lain yaitu reaksi hidrasi/ penyerapan air yang dapat menurunkan kadar air pada tanah lempung, kemudian reaksi flokulasi dan sementasi yang menyebabkan tanah lempung membentuk ukuran yang lebih besar dan menjadi keras dan kaku. Stabilisasi tanah lempung dengan kapur dapat meningkatkan kuat geser tanah. Kohesi (c) bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, jika kepadatan tanah meningkat maka kohesi tanah juga akan meningkat. Faktor daya dukung bergantung pada nilai (Φ), apabila nilai (Φ) meningkat maka nilai faktor daya dukung juga meningkat yang menyebabkan nilai daya dukung ultimitnya menjadi semakin besar.

Firdaus (2016) meneliti tentang hubungan kuat geser dengan variasi kadar air dan prosentase stabilisasi pada tanah lempung ekspansif dengan 10% kapur. Hasil yang didapatkan adalah semakin kecil kadar air grafik tegangan dan regangan tanah akan semakin kaku dan kohesi (c_u) semakin besar. Sedangkan semakin besar prosentase stabilisasi, kohesinya semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah asli dan remolded (tanpa perbaikan)

Dalam merencanakan pondasi, salah satu syarat yang harus dipenuhi adalah tegangan yang terjadi pada tanah harus lebih kecil dari daya dukung ijin. Tegangan yang terjadi pada tanah menyatakan beban maksimum persatuan luas pondasi (P/A) harus lebih kecil dari daya dukung ijin. Sedangkan daya dukung ijin bergantung pada angka keamanan dan dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$q_a = \frac{qu' = qu - \gamma D}{SF} \dots\dots\dots (2-5)$$

Dimana:

- q_a = daya dukung ijin netto (kN/m^2)
- qu' = daya dukung batas netto (kN/m^2)
- SF = angka keamanan

Menurut Vesic (1963) dalam Hardiyatmo (2011), Terdapat tiga macam pola keruntuhan daya dukung tanah, yaitu:

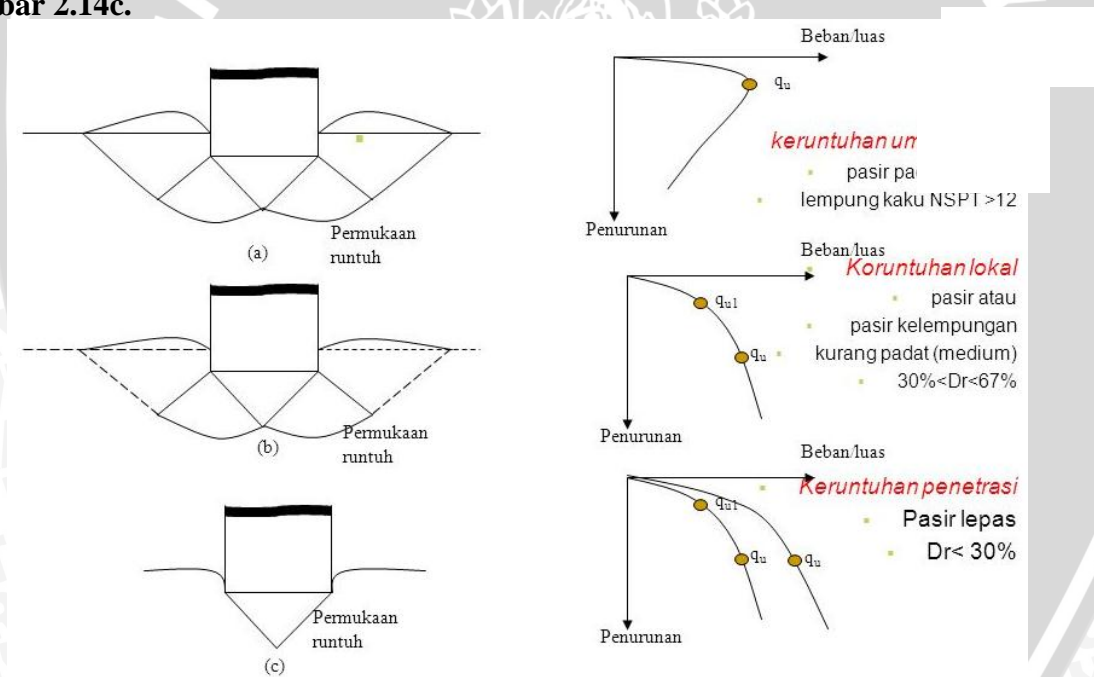
1. Keruntuhan geser umum (*General Shear Failure*)
2. Keruntuhan geser setempat (*Local Shear Failure*)
3. Keruntuhan geser baji/penetrasi (*Punching Shear Failure*)

Pada keruntuhan geser umum kondisi kesetimbangan plastis terjadi penuh di atas *failure plane*, muka tanah di sekitarnya mengembang (naik), keruntuhan terjadi di satu sisi sehingga

pondasi miring, terjadi pada tanah dengan kompresibilitas rendah (padat dan kaku), kapasitas dukung batas (q_u) bisa diamati dengan baik **Gambar 2.14a**.

Keruntuhan geser lokal hampir sama dengan keruntuhan geser umum, namun bidang runtuh yang terbentuk tidak sampai ke permukaan tanah. Muka tanah disekitar pondasi tidak terlalu mengembang, karena dorongan kebawah dasar pondasi lebih besar. Kondisi kesetimbangan plastis hanya terjadi pada sebagian tanah saja. Miring yang terjadi pada pondasi tidak terlalu besar terjadi. Terjadi pada tanah dengan kompresibilitas tinggi yang ditunjukkan dengan penurunan yang relatif besar. Kapasitas dukung batas (q_u) sulit dipastikan sulit dianalisis, hanya bisa diamati penurunannya saja **Gambar 2.14b**.

Pada keruntuhan geser penetrasi terjadi desakan di bawah dasar pondasi disertai pergeseran arah vertikal sepanjang tepi. Tidak terjadi kemiringan pondasi dan pengangkatan di permukaan tanah. Penurunan yang terjadi cukup besar, terjadi pada tanah dengan kompresibilitas tinggi dan kompresibilitas rendah jika kedalaman pondasi agak dalam **Gambar 2.14c**.



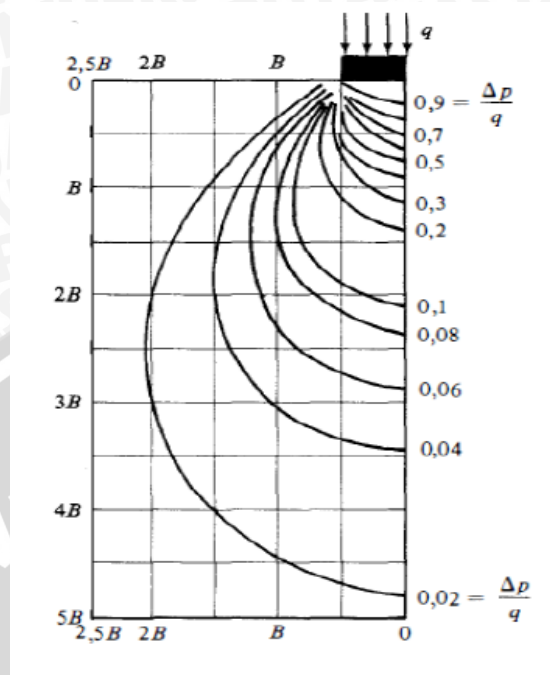
Gambar 2.14 Macam keruntuhan Pondasi

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

Sumber : Vesic (1963)

Tanah yang mendukung suatu pondasi dengan berbagai bentuk, tentunya akan terjadi kenaikan tegangan. Tegangan yang terjadi di dalam massa tanah dapat disebabkan oleh beban yang bekerja di permukaan atau oleh beban akibat berat sendiri tanah. Kenaikan tegangan bergantung pada beban per satuan luas dimana pondasi berada, kedalaman tanah dibawah pondasi dimana tegangan tersebut ditinjau, dan faktor-faktor lainnya. Boussineq

(1883) menemukan cara untuk menghintung penambahan tegangan vertikal tanah di bawah beban lentur berbentuk bujur sangkar seperti terlihat pada **Gambar 2.15** berikut ini.



Gambar 2.15 Isobar tegangan vertikal di bawah luasan berbentuk bujur sangkar yang menerima beban terbagi rata (Das,1995:165)

2.4 Stabilisasi Tanah

Tidak semua tanah dasar memiliki sifat yang baik untuk mendukung dalam merencanakan suatu konstruksi. Apabila tanah dasar bersifat sangat lepas atau sangat mudah tertekan, atau memiliki indeks konsistensi yang tidak sesuai, permeabilitas yang tinggi, daya dukung rendah, serta sifat-sifat jelek yang lain yang tidak mendukung untuk suatu proyek konstruksi, maka tanah dasar tersebut harus distabilisasikan. Menurut Bowles(1989) upaya stabilisasi dapat terdiri dari salah satu tindakan berikut:

1. Meningkatkan kerapatan tanah
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan/atau tahanan gesek yang timbul
3. Menambah bahan untuk menyebabkan perubahan - perubahan kimiawi dan/atau fisis pada tanah
4. Menurunkan muka air tanah (drainase tanah)
5. Mengganti tanah yang buruk.

Secara umum, stabilisasi tanah dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Stabilisasi mekanis

Stabilisasi mekanis dapat berupa mencampur dua macam tanah atau lebih yang bergradasi berbeda untuk memenuhi syarat kekakuan tertentu. Selain itu cara mekanis juga dapat terdiri dari pekerjaan-pekerjaan berikut: pemadatan dengan berbagai jenis peralatan mekanis seperti mesin gilas (*roller*), berat beban yang dijatuhkan, ledakan, tekanan statis, dan sebagainya.

2. Stabilisasi dengan bahan tambah (kimiawi)

Stabilisasi dengan bahan tambah sering disebut dengan stabilisasi kimiawi yang bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah seperti: kekuatan, tekstur, plastisitas, dan kemudahan dalam pengerjaan (*workability*). Bahan-tambah (*additives*) ditambahkan ke dalam tanah dengan perbandingan tertentu. Perbandingan campuran disesuaikan dengan kualitas tanah yang diinginkan. Bahan tambah yang sering digunakan antara lain: kapur, semen, abu-terbang (*fly-ash*), aspal (*bitumen*) dan lain-lain.

2.5 Stabilisasi Kimiawi dengan Kapur

Stabilisasi kimiawi dilakukan dengan cara menambahkan *stabilizing agents* pada tanah dasar yang ingin ditingkatkan mutunya. Kapur adalah salah satu bahan aditif yang mampu memperbaiki kualitas tanah dasar yang kurang baik. Menurut SNI 03-4147-1996 jenis kapur dibedakan menjadi beberapa tipe berikut ini:

- 1) Kapur tipe I adalah kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi, dengan kadar Magnesium Oksida (MgO) paling tinggi 4% berat,
- 2) Kapur tipe II adalah kapur Magnesium atau Dolomit yang mengandung Magnesium Oksida lebih dari 4% dan paling tinggi 36% berat,
- 3) Kapur tohor (CaO) adalah hasil pembakaran batu kapur pada suhu $\pm 90^{\circ}\text{C}$, dengan komposisi sebagian besar Kalsium Karbonat (CaCO_3),
- 4) Kapur padam adalah hasil pemadaman kapur tohor dan air, sehingga membentuk hidrat $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.

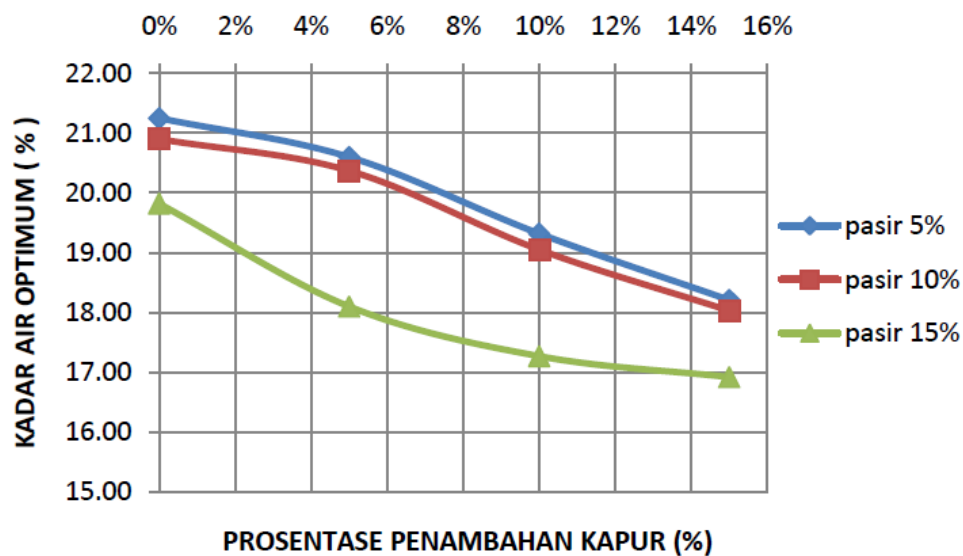
Sedangkan jenis kapur yang digunakan untuk stabilisasi tanah adalah kapur padam dan kapur tohor. Stabilisasi tanah dengan menggunakan campuran kapur telah banyak digunakan pada proyek-proyek konstruksi di Indonesia. Bahan ini mudah didapat dipasaran dan diproduksi secara besar-besaran. Kapur aktif yang telah mati, akan bereaksi dengan mineral lempung seperti *montmorillonit*, akan menetralkan muatan negatif lempung, sehingga kemampuan tanah dalam menyerap air dapat berkurang (Bowles, 1989).

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

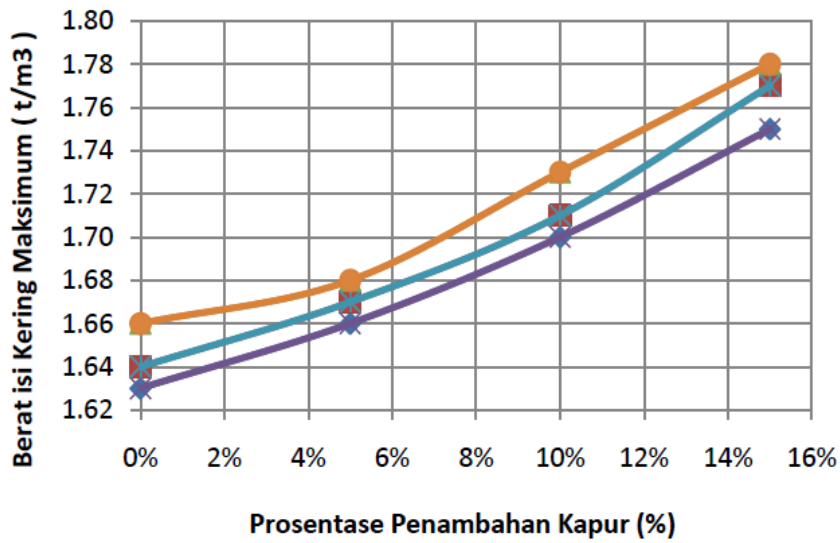
1. Reaksi flokulasi yaitu pengikatan mineral lempung akibat terjadinya pertukaran ion dari tanah Na^+ dan H^+ dengan ion Ca^{++} dari kapur.
2. Cementation (pengerasan)/reaksi pozzolan (*pozzolanic reaction*) antara kalsium dari kapur dengan SiO_2 , Al_2O_3 dan FeO_3 dari tanah.
3. Reaksi penyerapan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

Reaksi lain yaitu reaksi karbonasi (*carbonation*), namun reaksi ini hanya sedikit meningkatkan kekuatan tanah sehingga sering diabaikan. Reaksi flokulasi akan merubah susunan/struktur tanah yaitu dengan membentuk butiran agregat yang berukuran lebih besar sehingga memberi pengaruh lebih baik bagi konstruksi di atasnya.

Penambahan kapur dapat meningkatkan kepadatan tanah yaitu dengan menurunkan nilai kadar air optimum (OMC) dan menaikkan nilai berat volume kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$). Seperti pada penelitian yang dilakukan Risman (2011) dengan melakukan variasi penambahan kapur dan pasir pada tanah lempung, dan akan menghasilkan grafik sebagai berikut:

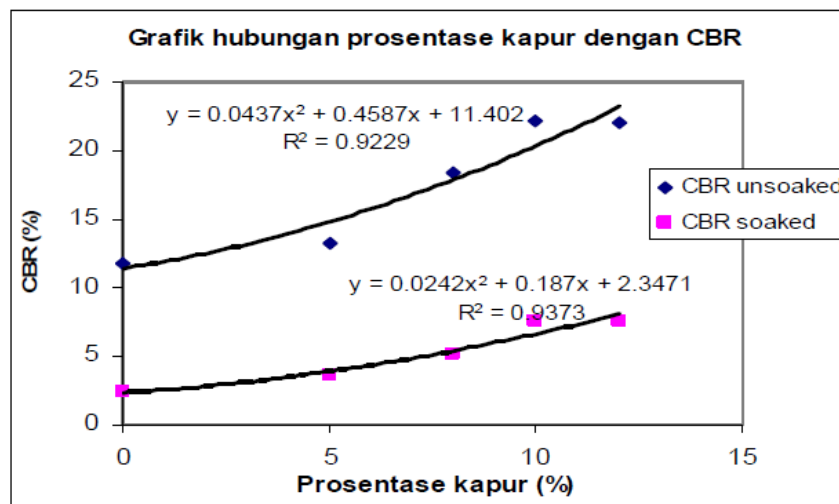


Gambar 2.16 Grafik hubungan prosentase penambahan kapur dan pasir dengan kadar air optimum



Gambar 2.17 Grafik hubungan prosentase penambahan kapur dan pasir dengan berat isi kering maksimum

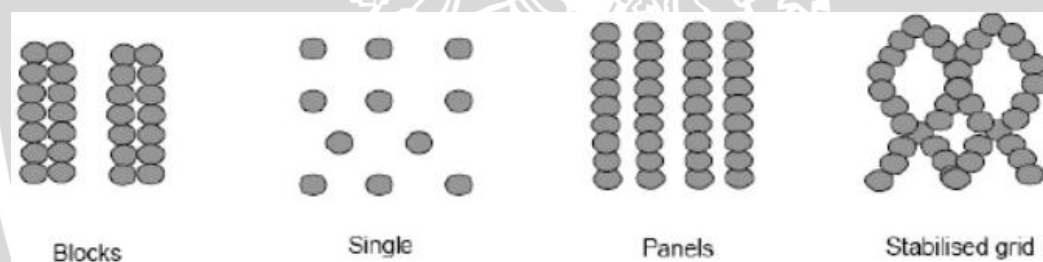
Warsiti (2009) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi penambahan kapur untuk meningkatkan nilai CBR tanah ekspansif di sendang mulyo, hasil yang didapatkan yaitu kadar kapur optimum untuk meningkatkan nilai CBR sebesar 10% dengan waktu curing selama 3 hari.



Gambar 2.18 Grafik hubungan prosentase kapur dengan CBR

2.6 Stabilisasi Tanah dengan DSM (*Deep Soil Mixing*)

DSM kolom pertama kali ditemukan di Jepang pada tahun 1970-an dan sejak saat itu metode ini sangat populer di dunia sebagai metode stabilisasi tanah yang ekonomis dan terbukti dapat meningkatkan daya dukung tanah. Prinsip dari metode DSM adalah untuk memperbaiki kekuatan tanah dengan menggunakan bahan pengikat. DSM adalah teknologi modifikasi tanah *in-situ* dimana pengikat basah atau kering disuntikkan ke dalam tanah dan dicampur secara *in-situ* dengan tanah lunak (lempung, gambut atau tanah organik) dengan cara mekanis atau dengan alat pencampuran berupa *rotary mixing tool* (Porbaha et al, 2005; EuroSoilStab, 2002). Alat pencampuran dapat berupa mesin bor atau *auger*. Bahan campuran yang biasanya digunakan sebagai bahan pengikat pada metode ini dapat berupa semen, kapur, campuran semen dan kapur dan bahan aditif lainnya. Tujuan dari metode DSM yaitu untuk menghasilkan massa tanah yang stabil yang dapat berinteraksi dengan tanah alami atau tidak, sehingga menghasilkan massa tanah seperti tumpukan kaku yang secara independen dapat melaksanakan beban desain. Selain itu metode DSM dapat mengurangi penurunan dan meningkatkan stabilitas tanah. Tergantung pada aplikasi, terdapat beberapa pola yang dapat digunakan dalam metode ini, seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.19**).



Gambar 2.19 Pola khas dari *Deep Soil Mixing*

Terdapat dua macam metode dalam memasukkan bahan pengikat ke dalam tanah yaitu metode basah (*wet mixing*) dan metode kering (*dry mixing*).

2.6.1 Metode Pencampuran Basah (*wet mixing method*)

Teknik pencampuran basah (*wet mixing*) merupakan teknik perbaikan tanah untuk meningkatkan karakteristik tanah yang lemah dengan cara mekanis yaitu mencampur tanah dengan bahan pengikat dalam bentuk *slurry*. Teknik pencampuran basah cocok digunakan untuk banyak kondisi *subsurface*, dari lempung *soft*, lempung plastis sampai pasir dan kerikil. Pencampuran jenis ini mampu dilakukan sampai kedalaman 100 ft atau ± 30 m. Sedangkan kelemahan teknik ini adalah biaya yang tinggi untuk mobilisasi peralatan pencampur dan *batching plants*. Aplikasi dari metode *wet mixing* yaitu bahan pengikat yang berbentuk seperti bubur (*slurry*) disuntikkan ke dalam tanah melalui “nozzels” yang terletak

di ujung dari auger. Alat pencampuran terdiri dari batang pengeboran, balok melintang, dan akhir bor yang dilengkapi kepala. Pada **Gambar 2.20** ditunjukkan alat pencampur metode *wet mixing*.



Gambar 2.20 Alat pencampuran basah (Porbaha et al, 2005)

2.6.2 Metode Pencampuran kering (*dry mixing method*)

Metode *dry mixing* biasanya digunakan untuk lokasi proyek dimana muka air tinggi dan dekat dari permukaan tanah. Paling cocok untuk tanah dengan kadar air lebih besar dari 60% atau mendekati batas cairnya. Kedalaman tanah yang bisa dicapai dengan teknik ini bisa sampai mencapai 60 kaki atau ± 20 m. Pencampuran dengan *dry mixing* ini menghasilkan getaran yang rendah, tenang, dan tidak menghasilkan merusak untuk pembuangan. Bahan pengikat dimasukkan ke dalam tanah dalam bentuk kering.



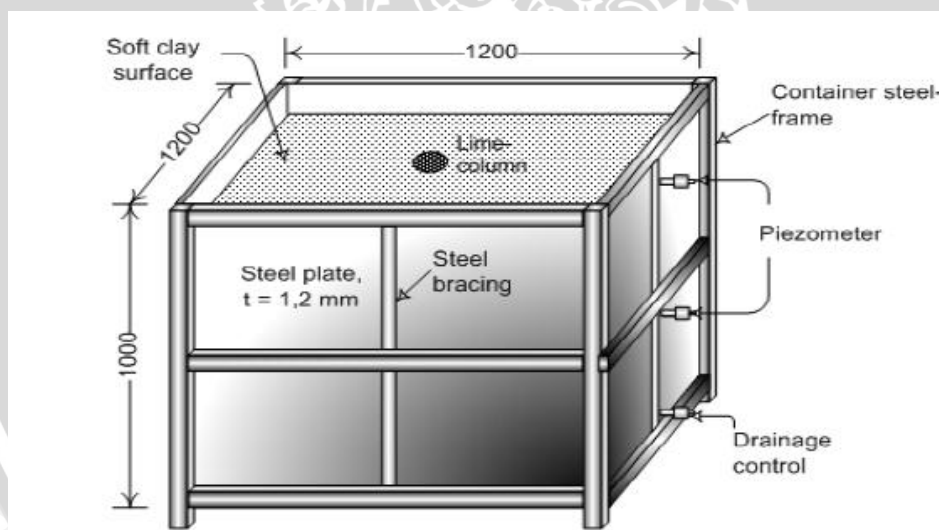
Gambar 2.21 Peyemburan pengikat kering dari alat pencampur (Keller)

Keuntungan metode DSM antara lain:

1. Ekonomis
2. Bebas dari getaran
3. Fleksibel dalam aplikasinya
4. Mengurangi waktu konstruksi
5. Ramah lingkungan

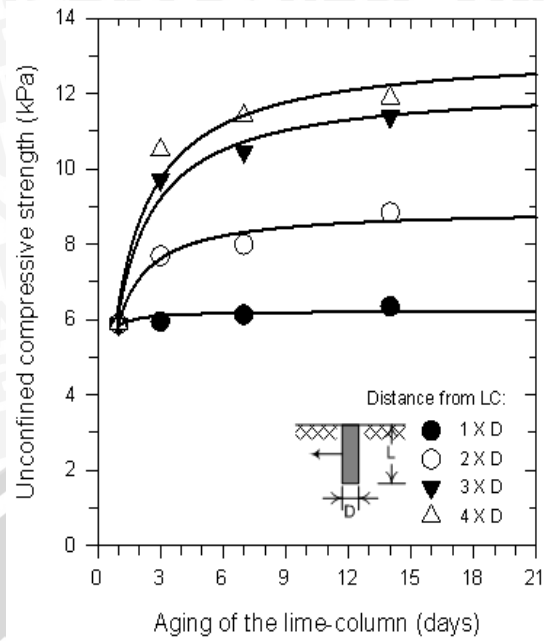
2.7 Penelitian Terdahulu tentang Stabilisasi Lempung dengan Kolom Kapur

Agus Setyo Muntohar (2009) melakukan penelitian dengan judul “Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban-Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom Kapur di Laboratorium”. Penelitian ini dilakukan pada tanah lunak di daerah Bantul-Yogyakarta dengan tujuan untuk mengkaji sebaran kuat dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Kolom kapur dirancang sebagai kolom tunggal dengan diameter (D) 50 mm dan kedalam kolom 200 mm. Uji di laboratorium meliputi uji kuat tekan bebas, uji sondir, dan uji beban langsung. Tanah beserta kolom kapur diletakkan dalam kotak baja berukuran 1,2 m x 1,2 m dengan tinggi 1m (**Gambar 2.22**).

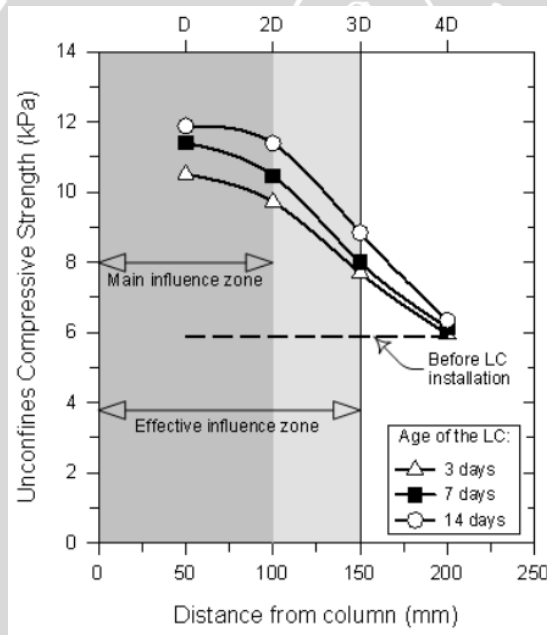


Gambar 2.22 Model 3D kotak baja untuk uji pemodelan kolom kapur

Dari hasil uji kuat tekan bebas didapatkan grafik yang menunjukkan hubungan kuat tekan bebas dengan waktu *curing* **Gambar 2.23**, sedangkan hubungan kuat tekan bebas dengan jarak dari kolom kapur disajikan dalam **Gambar 2.24**.

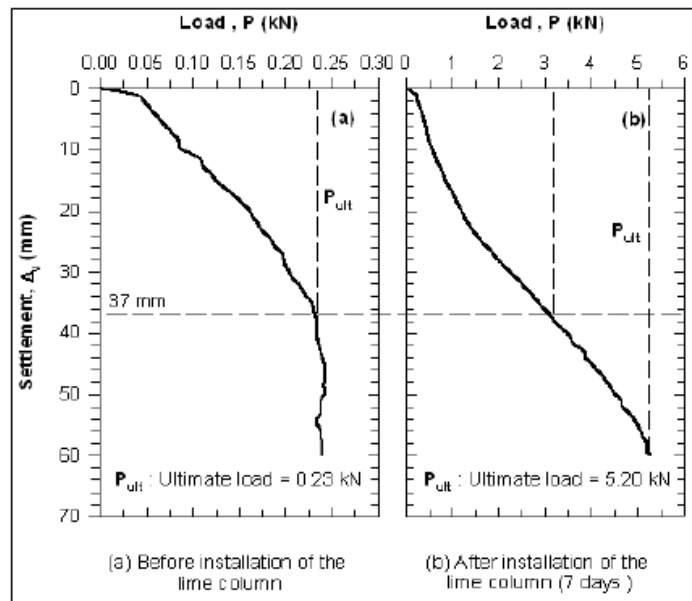


Gambar 2.23 Hubungan kuat tekan bebas dengan waktu curing



Gambar 2.24 Hubungan kuat tekan bebas dengan jarak dari kolom kapur

Pada **Gambar 2.23** menunjukkan waktu curing optimum adalah 3 hari setelah instalasi. Sedangkan dari **Gambar 2.24** terlihat bahwa semakin lama waktu curing dan semakin dekat jarak kolom kekuatan akan semakin meningkat.



Gambar 2.25 Hubungan beban dan penurunan dengan laju beban konstan

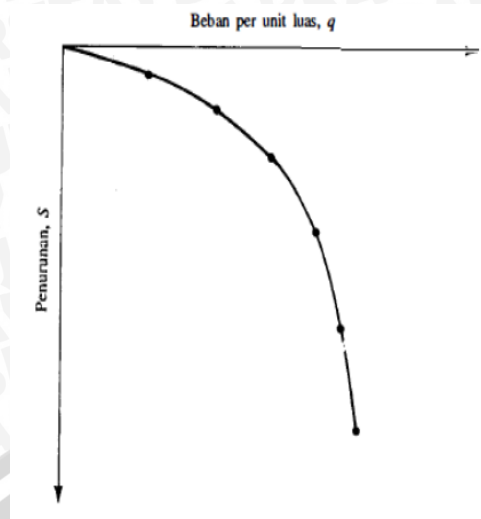
Dari **Gambar 2.25** terlihat bahwa beban tanah meningkat dari 0.23 kN menjadi 5.2 kN setelah diperkuat dengan kolom kapur.

2.8 Uji Pembebanan (*Loading Test*)

Sistem uji pembebanan (*Loading test*) ini diatur oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*) nomer D-1994. Tujuan dilakukan percobaan *loading test* adalah sebagai berikut:

- Untuk mengetahui hubungan antara beban dan penurunan pondasi akibat beban rencana
- Menentukan daya dukung ultimit nyata (*real ultimate bearing capacity*)
- Untuk mengetahui kemampuan elastisitas tanah

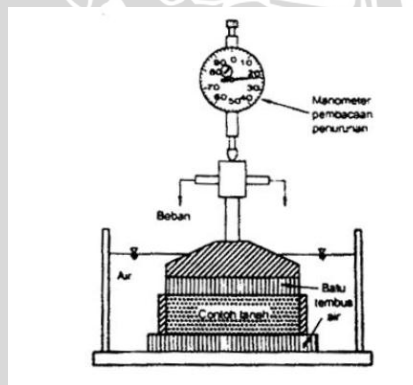
Beban yang dipakaikan pada tiang ini berasal dari dongkrak (*jack*) hidrolik. Diperlukan adanya plat dukung (*bearing plate*) yang diletakkan diatas tanah dasar yang kemudian dilakukan uji pembebanan dengan memberikan beban di atas *bearing plate* secara bertahap. Data penting yang didapat dari *loading test* yaitu grafik hubungan antara beban dan penurunan seperti yang ditunjukkan pada (**Gambar 2.26**).



Gambar 2.26 Grafik Hubungan antara Beban dan Penurunan

2.9 Uji Potensi Mengembang (Swelling)

Salah satu cara untuk menggambarkan sifat tanah ekspansif adalah dengan nilai potensi pengembangan (*swell potential*). Uji pengembangan dilakukan pada cincin besi berbentuk silinder (contoh tanah terkekang lateral), seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.27. Kemudian contoh tanah dibebani dengan tekanan terbagi rata, dan direndam air. Contoh tanah mengembang secara vertikal dan perubahan tinggi dibagi tinggi awal adalah potensi pengembangannya (Hardiyatmo, 2002).



Gambar 2.27 Alat pengujian swelling

Tabel 2.5 Tipikal Klasifikasi Tanah Ekspansif Didasarkan Pada Uji Beban Pengembangan Pada Tekanan Overdurden di Tempat (Snethen, 1984)

Potensi pengembangan (%)	Klasifikasi pengembangan
<0,5	Rendah
0,5 - 1,5	Sedang
1,5	Tinggi

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

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

3.2 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut :

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

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

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

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

3.4 Rancangan Penelitian

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

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian dengan Variasi Jarak dan Panjang Kolom

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

3.5 Variabel Penelitian

Terdapat dua variabel dalam penelitian ini, antara lain :

1. Variabel Bebas

- Konfigurasi
- Diameter
- Kedalaman
- Jarak

2. Variabel Terikat

- Tegangan

- Penurunan/regangan.

3.6 Metode Penelitian

3.6.1 Persiapan Benda Uji

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

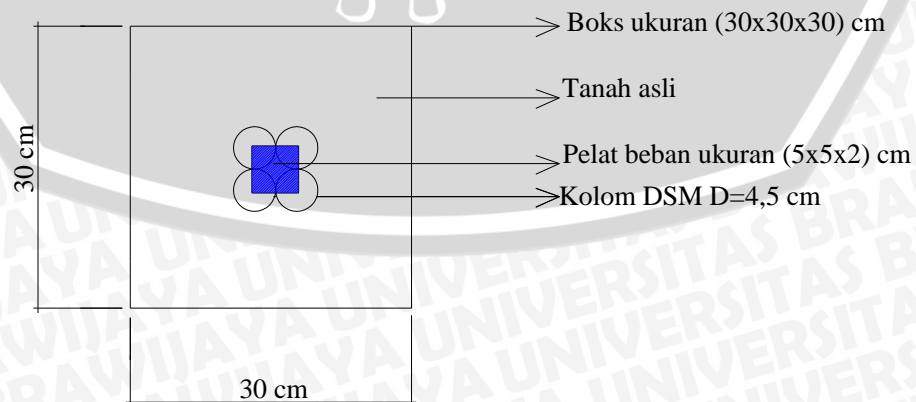
1. Sampel tanah dijemur atau dioven hingga cukup kering sehingga mudah dihancurkan.
2. Sampel tanah diayak lolos saringan No. 4.
3. Sampel tanah yang lolos saringan No. 4, kemudian ditambahkan air dengan kadar air optimum (OMC) 27,908% yang digunakan sebagai tanah dasar atau asli. Pencampuran dilakukan di dalam bak pencampur hingga merata pada seluruh bagian kemudian sampel dijenuhkan di dalam kresek selama sehari sehingga homogen.
4. Pembuatan benda uji dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi dan tanah yang distabilisasi menggunakan kapur 10% dengan metode *Deep Soil Mixing*.
5. Tanah dasar atau asli dicetak di dalam *box* yang telah ditentukan hingga volumenya mencapai 18000 cm^3 atau $(30 \times 30 \times 20) \text{ cm}$. Sampel dibagi menjadi 4 lapisan, dimana setiap lapisan dipadatkan dengan menggunakan alat pemadat berbentuk persegi $(12,5 \times 2,5) \text{ cm}$ dan harus mencapai kepadatan kering (γ_d) $1,288 \text{ gr/cm}^3$ dengan OMC 27,9%. Agar tercapai kepadatan yang diharapkan, setiap lapis harus dikontrol dengan cara memadatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
6. Setelah pembuatan benda uji tanah asli selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan.
7. Selanjutnya, langkah 5 diulangi yang kemudian dilakukan pembuatan lubang kolom *Deep Soil Mixing* sesuai dengan variasi jarak dan panjang kolom yang telah ditentukan dengan bantuan pipa besi. Variasi jarak dan panjang kolom ini ditentukan berdasarkan pada daerah tanah yang terkena pengaruh tegangan vertikal di bawah suatu luasan berbentuk bujur sangkar yang menerima beban merata (isobar dapat dilihat pada **Gambar 2.15**).

8. Tanah dicampur dengan kadar 10% kapur dari berat kering tanah yang distabilisasi. Kemudian dicampur dengan kadar air optimum (OMC) 24,10%. Pencampuran dilakukan di luar *box* hingga rata (homogen).
9. Sampel tanah yang sudah dicampur 10% kapur, dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan jarak dan panjangnya (lihat **Tabel 3.1**). Proses instalasi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut :
 - a. Pipa besi dikeluarkan dari tanah sehingga diperoleh lubang kolom.
 - b. Tanah campuran kapur dimasukkan ke dalam lubang dengan membagi beberapa lapisan, dimana untuk panjang kolom (D_f) 10 cm dibagi menjadi 3 lapisan, (D_f) 15 cm dibagi menjadi 3 lapisan, dan (D_f) 20 cm dibagi menjadi 4 lapisan.
 - c. Tiap lapisan dipadatkan dengan kepadatan kering (γ_d) 1,406 gr/cm³ dengan OMC 24,10%. Agar tercapai kepadatan yang diinginkan, setiap lapis harus dikontrol dengan cara memadamatkan kebutuhan berat tanah sesuai volume tiap lapis.
10. Kemudian benda uji dieramkan selama 3 hari.
11. Setelah pemeraman selesai, selanjutnya dilakukan uji pembebanan.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan pajang pada konfigurasi kolom DSM yang digunakan (**Tabel 3.1**). Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap perilaku daya dukung (q) tanah. Konfigurasi kolom DSM yang digunakan yaitu tipe *single square* berdiameter (D) 4,5 cm.

Tabel 3.2 Variasi Jarak dan Panjang Tipe *Single square* berdiameter 4,5 cm

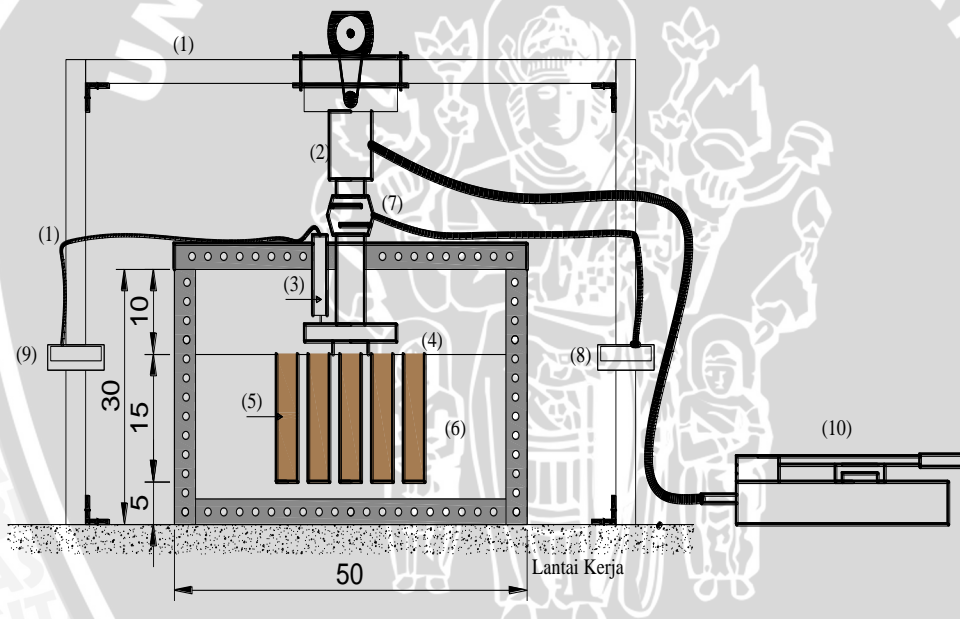
Lebar pondasi B = 5 cm	Diameter kolom (D) = 4,5 cm		
	Jarak kolom(L) 1D = 4,5 cm	Jarak kolom(L) 1,25D = 5,625 cm	Jarak kolom(L) 1,5D = 6,75 cm
Kedalaman sampel tanah = 20 cm	Konfigurasi Single Square 		
	Panjang DF=2B 		
	Panjang DF=3B 		
	Panjang DF=4B 		



Gambar 3.1 Pemodelan kolom DSM

3.6.2 Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan dongkrak hidrolik. Sebagai pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton dan dapat langsung dibaca besarnya beban yang terjadi. Digunakan alat *LVDT* untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi. Dongkrak hidrolik dihubungkan ke piston yang terhubung dengan batang portal (*frame*) yang terbuat dari baja profil. Secara manual dongkrak hidrolik dilakukan pemompaan yang memberikan tekanan pada piston yang kemudian tekanan dari piston disalurkan melalui *load cell* agar terbaca beban yang diberikan. Kemudian *load cell* dihubungkan ke piston bantuan yang akan menekan ke pelat pondasi. Pelat baja tersebut berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari piston dongkrak hidrolik menjadi beban merata. Letak piston bantuan diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat simetris di atas permukaan benda uji. Skema uji pembebanan disajikan pada **Gambar 3.2**.



Keterangan :

- | | | |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1. Portal baja | 5. Kolom stabilisasi DSM | 9. Alat pembaca LVDT |
| 2. Piston hidrolik | 6. Tanah dasar/asli | 10. Pompa hidrolik |
| 3. <i>Dial LVDT</i> | 7. <i>Load cell</i> | |
| 4. Pelat baja (5x5x2) cm | 8. Alat pembaca <i>load cell</i> | |

Gambar 3.2 Skema uji pembebanan sampel

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan model benda uji.
2. Melakukan pengukuran terhadap titik tengah permukaan tanah dengan bantuan penggaris dan tali.

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

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

Pembacaan LVDT	Interval	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kN/m
A	$\Delta = A \pm 50$	$S = A \times 0,005$	P	A	$Q = P/A$
	0			25	
	50			25	
	100			25	
	150			25	
	200			25	
	250			25	
	300			25	
	350			25	
	400			25	
	450			25	
	500			25	
	550			25	
	600			25	
	650			25	
	700			25	
	750			25	
	800			25	

3.7 Metode Analisa Data

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

Perhitungan daya dukung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$q_u = P_u/A \dots\dots\dots (3-1)$$

dimana, q_u : daya dukung (kg/cm²)

P_u : Beban *ultimit* yang diterima (kg)

A : luas bidang yang menerima gaya ($A = 25 \text{ cm}^2$)

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

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

$$\text{BCI} = q_u \text{ tanah stabilisasi} / q_u \text{ tanah asli} \dots \dots \dots (3-2)$$

Dengan :

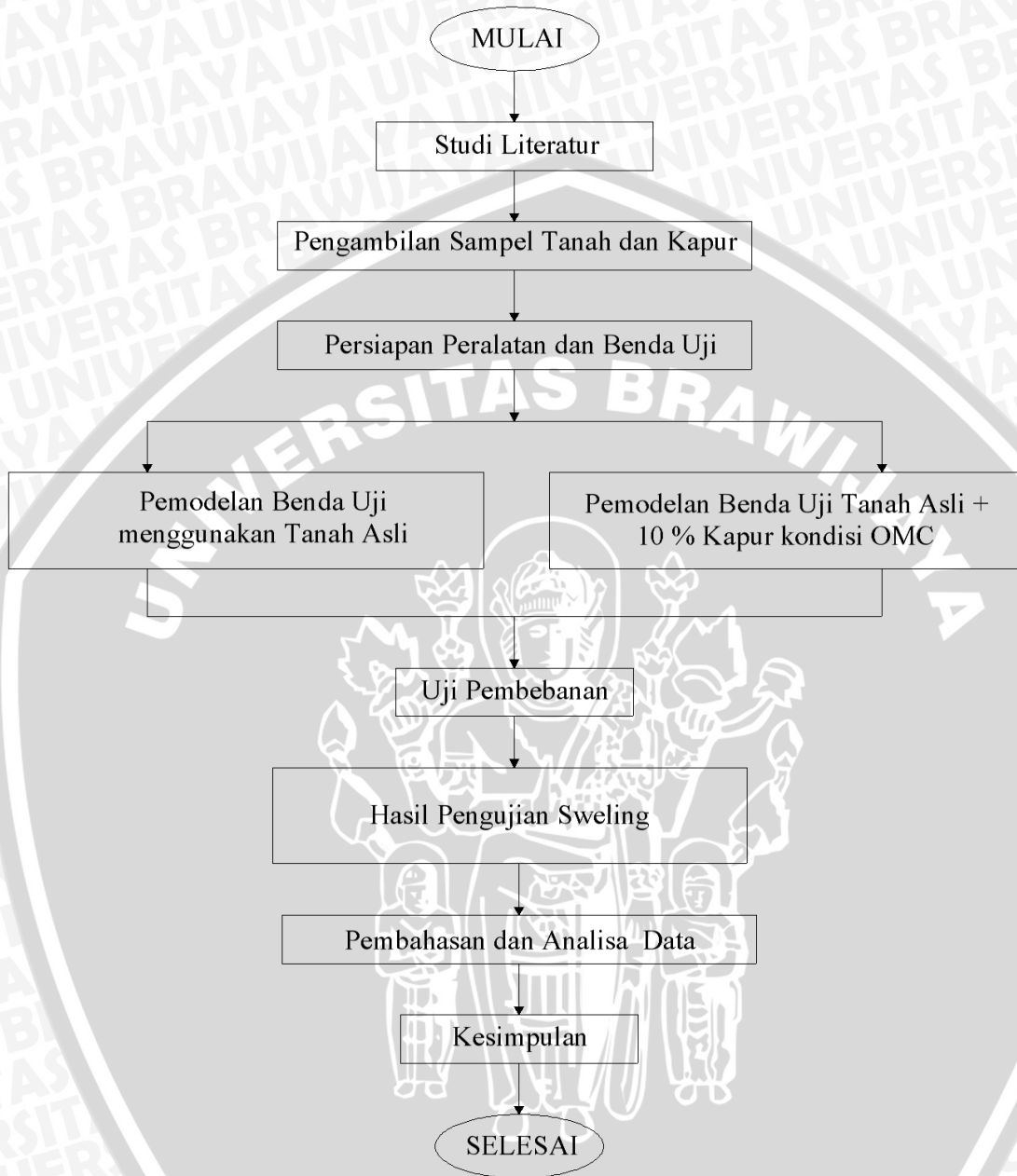
BCI : rasio daya dukung tanah yang distabilisasi terhadap daya dukung tanah tanpa stabilisasi

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

Tabel 3.4 Bearing Capacity Improvement (BCI)

Je nis Sampe l	Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (Df)	P_u	q_u	Penurunan	BCI
	cm	cm	kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli	-	-				
		1B				
	1D	2B 3B				
Tanah Asli + Kolom DSM 10% kapur		1B				
	1,25D	2B 3B				
		1B				
	1,5D	2B 3B				

3.8 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Specific Gravity

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan nilai *specific gravity* (G_s) yang mempunyai butiran lolos saringan No. 4 dengan menggunakan *picnometer*. Berat spesifik atau berat jenis (*specific gravity*) tanah (G_s) merupakan perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada temperatur tertentu.

Pada penelitian kali ini, digunakan metode ASTM benda uji yang digunakan berupa tanah asli tanpa campuran 10% kapur. Dibuat sebanyak 2 benda uji yang masing-masing dilakukan pengujian *specific gravity* dan hasilnya akan dirata-rata. Hasil dari pengujian *specific gravity* dapat dilihat pada **Tabel 4.1** dibawah ini.

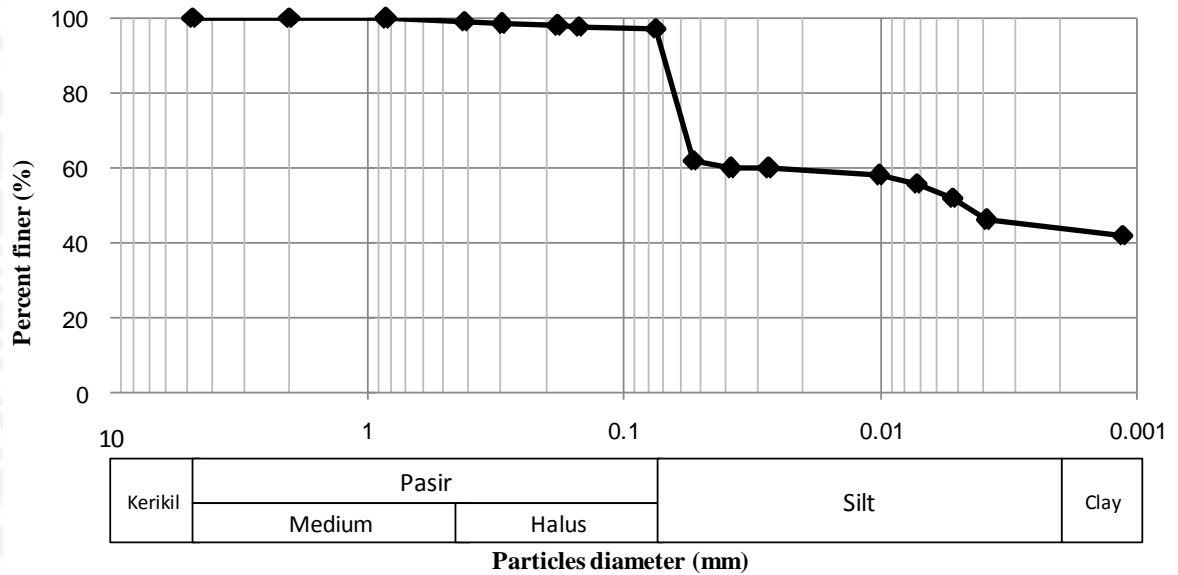
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Specific Gravity Tanah Asli

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

4.2 Pemeriksaan Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sifat Fisik Tanah

4.2.1 Analisis Mekanis Tanah (*Mechanical Grain Size*)

Pemeriksaan ini dilakukan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dan agregat kasar dengan menggunakan saringan. Analisis mekanis tanah adalah penentuan variasi ukuran partikel-partikel yang ada pada tanah. Variasi tersebut dinyatakan dalam prosentase dari berat kering total. Ada dua cara untuk mendapatkan distribusi ukuran-ukuran partikel tanah, yaitu dengan analisis ayakan untuk ukuran partikel berdiameter lebih besar dari 0,075 mm (tertahan saringan No. 200), dan analisis hidrometer untuk ukuran partikel berdiameter lebih kecil dari 0,075 mm (lolos saringan No. 200). Hasil analisis saringan dan hidrometer dapat dilihat pada grafik **Gambar 4.1**.



Gambar 4.1 Gabungan analisis saringan dan hidrometer

Berdasarkan grafik pada **Gambar 4.1** di atas, dapat diketahui bahwa tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki prosentase lolos saringan No. 200 sebesar 97,03 % sehingga menurut sistem klasifikasi USCS tanah tergolong jenis tanah berbutir halus.

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

Dari hasil uji analisis mekanis tanah, sampel tanah tergolong jenis tanah berbutir halus. Sifat yang sangat penting dari tanah berbutir halus adalah plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya mineral lempung. Sifat plastisitas lempung sangat bergantung pada kadar airnya. Oleh karena itu, diperlukan uji batas-batas Atterberg.

Pemeriksaan uji batas-batas Atterberg dilakukan untuk mengetahui sifat konsistensi dari tanah berbutir halus pada kadar air yang bervariasi. Sedangkan konsistensi sendiri adalah kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu. Batas-batas tersebut adalah batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas susut (*shrinkage limit*). Hasil pengujian batas-batas Atterberg dapat dilihat pada **Tabel 4.2** dibawah ini:

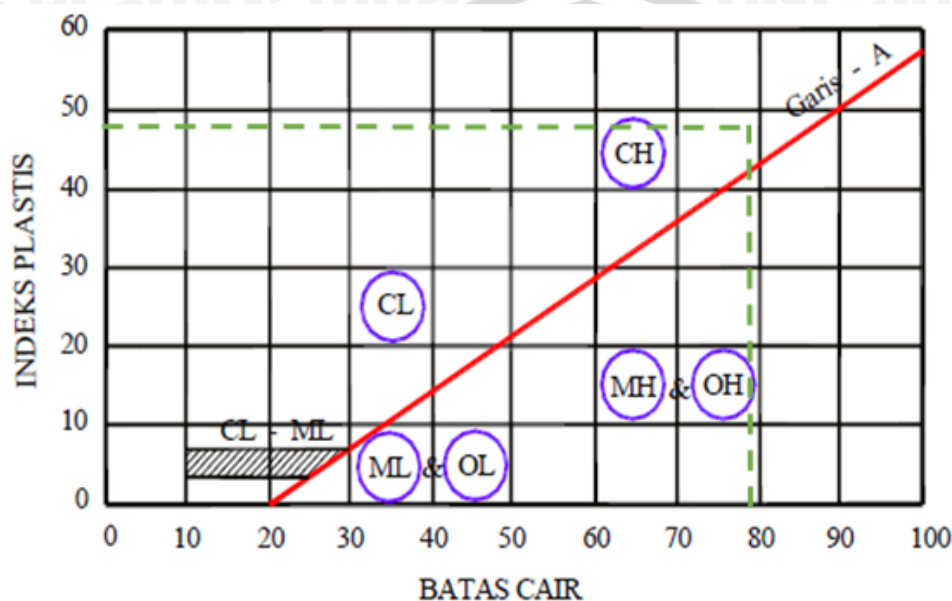
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Batas-Batas Atterberg

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

Hasil tersebut nantinya akan dimasukkan pada tabel dan grafik untuk menggolongkan jenis tanah dengan memasukkan kriteria-kriteria tertentu.

4.2.3 Klasifikasi Berdasarkan Sistem *Unified*

Dari hasil pengujian batas-batas Atterberg didapatkan nilai batas cair (LL) sebesar 79,11 % dan nilai indeks plastisitas (PI) sebesar 47,81 %. Menurut sistem klasifikasi *unified* sampel tanah tergolong tanah berbutir halus karena lebih dari 50 % presentase tanah yang lolos saringan No. 200. Harga LL dan PI selanjutnya akan di plotkan pada diagram plastisitas seperti yang disajikan pada grafik **Gambar 4.2** dibawah ini:

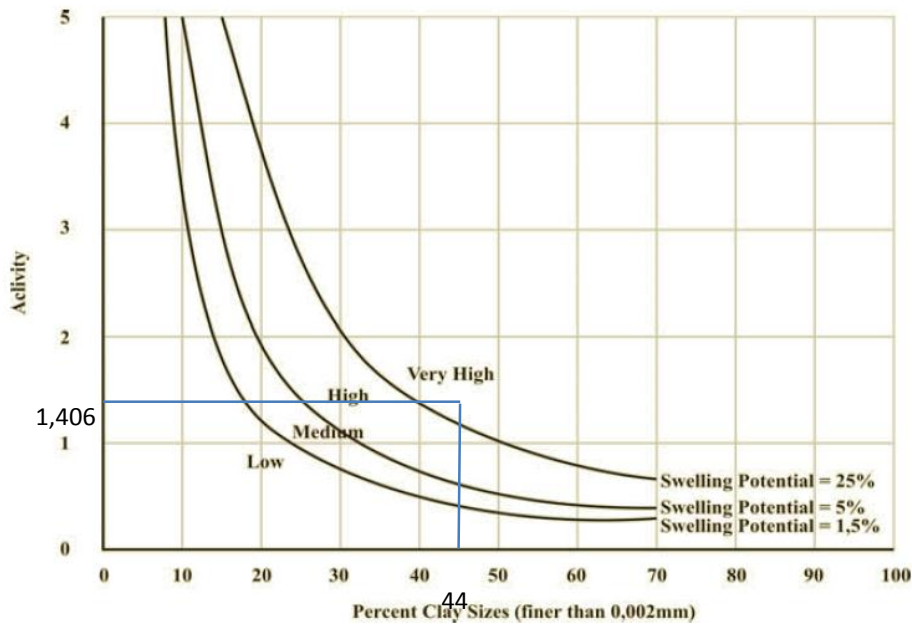


Gambar 4.2 Grafik plastisitas sistem klasifikasi *Unified*

Dari **Gambar 4.2** dapat disimpulkan bahwa sampel tanah lempung tergolong ke dalam tanah CH yaitu lempung anorganik dengan plastisitas tinggi.

4.2.4 Kriteria Tanah Lempung Ekspansif

Untuk menentukan tanah lempung tergolong ekspansif atau tidak, salah satunya dapat dilakukan dengan identifikasi tidak langsung yaitu dengan menggunakan nilai batas-batas Atterberg. Nilai batas Atterberg seperti batas susut (SL) dan indeks plastisitas (PI) dapat digunakan sebagai parameter dalam identifikasi lempung ekspansif. Berdasarkan pada **Tabel 2.3** tanah asli termasuk dalam tingkat pengembangan tinggi karena memiliki nilai PI lebih besar $> 32\%$ yaitu sebesar 47,81%. Selain itu, tingkat ekspansifitas juga dapat dilihat dari nilai aktivitasnya. Aktivitas adalah perbandingan dari indeks plastisitas (PI) dengan prosentase tanah $< 0,002$ mm. Diketahui nilai PI sebesar 47,81 % dan prosentase tanah dengan ukuran 0,002 mm sekitar 44 %. Dengan menggunakan persamaan 2-2 nilai aktivitas dapat dihitung, dan akan diperoleh nilai aktivitas tanah asli sebesar 1,406. Kemudian hasil perhitungan nilai aktivitas dan prosentase ukuran tanah $< 0,002$ mm diplotkan ke dalam grafik potensi pengembangan seperti terlihat pada (**Gambar 4.3**).



Gambar 4.3 Grafik klasifikasi berdasarkan potensi mengembang

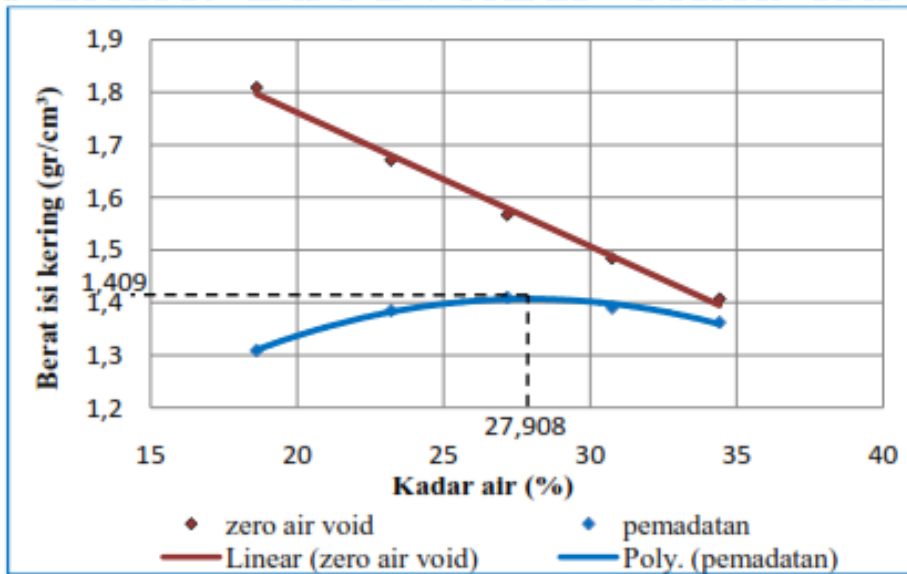
Dari grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro tergolong tanah dengan potensi pengembangan yang tinggi.

4.3 Pemeriksaan Pematatan Tanah

4.3.1 Penentuan Kadar Air Untuk Campuran DSM

Pematatan adalah suatu usaha berupa memberikan beban dinamis (tumbukan) sehingga akan menambah berat volume kering tanah yang dipadatkan. Akibat dari beban dinamis, maka rongga udara menjadi berkurang dan butir-butir tanah akan merapat satu sama lain. Uji pematatan menggunakan Standart-Proctor ASTM-D-689 Metode B untuk mengetahui hubungan antara kadar air dan berat volume tanah. Sehingga akan didapatkan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (γ_d) dari sampel tanah.

Penentuan kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d_{max}}$) didapat dari uji pematatan standar yang telah dilakukan oleh Hakim (2015) seperti dalam (**Gambar 4.4**), grafik tersebut dapat digunakan karena sampel yang digunakan berasal dari lokasi pengambilan dan jenis tanah yang sama.

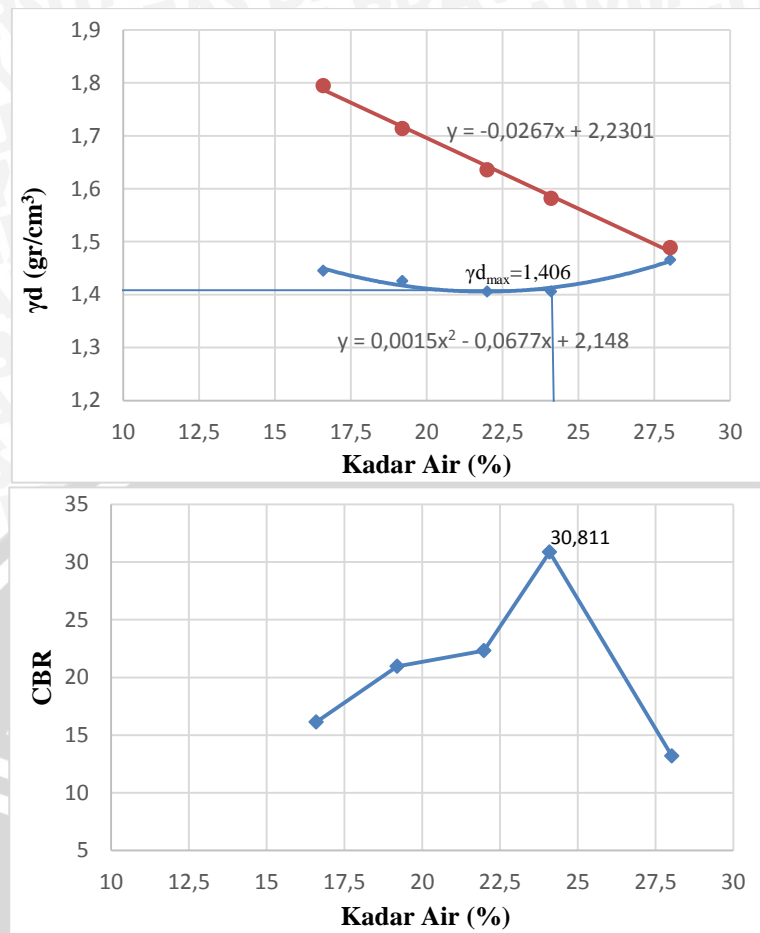


Gambar 4.4 Pemadatan standar tanah asli (Hakim, 2015)

Dari **Gamabr 4.4** maka besarnya kadar air optimum (OMC) untuk tanah asli adalah 27,908 % dengan berat isi kering maksimum (γ_{dmax}) sebesar 1,409 gr/cm³. Untuk tanah dengan campuran 10% kapur juga dilakukan uji pemadatan standar, namun menghasilkan grafik yang aneh yaitu grafik pemadatan melengkung ke atas. Hal ini dapat terjadi karena sifat tanah lempung yang tidak stabil sehingga sulit didapatkan kepadatan maksimumnya. Penentuan nilai OMC dan (γ_{dmax}) untuk pemodelan kolom DSM di boks dilakukan dengan uji CBR (*California Bearing Ratio*). Kadar air yang menghasilkan nilai CBR paling besar ditetapkan sebagai nilai OMC. CBR paling tinggi menunjukkan kondisi paling padat dan daya dukung paling tinggi pada pemodelan kolom DSM. Sedangkan besarnya nilai CBR dari tanah +10% kapur disajikan pada **Tabel 4.3** berikut ini:

Tabel 4.3 Perbandingan Nilai CBR Tanah Stabilisasi

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



Gambar 4.5 Grafik pemadatan dan CBR tanah stabilisasi

Dari **Gambar 4.5** didapatkan kadar air optimum (OMC) sebesar 24,10 % dan berat isi kering maksimum ($\gamma_{d_{\max}}$) sebesar 1,406 gr/cm^3 . Namun di lapangan sulit untuk menerapkan kepadatan yang sama seperti pada uji pemadatan standar, sehingga dibuat rentang antara 95% dari $\gamma_{d_{\max}}$. Pelaksanaan di lapangan harus mencapai rentang derajat kepadatan dari uji pemadatan standar.

4.3.2 Usaha Pemadatan Tanah Model

Seperti pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Hakim (2015) istilah kepadatan tanah model digunakan karena pada saat pemodelan benda uji di dalam boks cukup sulit untuk dikerjakan. Dalam praktek di laboratorium, cukup sulit mencapai kepadatan rencana ($\gamma_{d_{\max}}$) sebesar 1,409 gr/cm^3 , selain itu boks tidak kuat menahan getaran dari usaha pemadatan untuk mencapai kepadatan rencana sampai-sampai boksnya pecah. Sehingga untuk pemodelan tanah asli di dalam boks digunakan kadar air optimum sebesar 27,908% dan berat isi kering maksimum sebesar 1,28 gr/cm^3 yang didapatkan dari *trial and error* pemodelan tanah asli dalam boks yang pernah dilakukan oleh Hakim, dkk (2015).

Pemodelan benda uji dilakukan di dalam boks ukuran (30x30x30) cm dengan tinggi benda uji sebesar 20 cm. Tinggi sampel dibagi menjadi 4 lapisan yang masing-masing 5 cm. Dengan data kadar air optimum, berat isi kering, dan volume tanah, maka akan dapat dihitung jumlah kebutuhan tanah dan air untuk pemodelan tanah di dalam boks. Sebelum dimasukkan di dalam boks, terlebih dahulu kebutuhan tanah dan air per lapisan dicampur di luar boks sampai homogen. Setelah itu campuran tanah dan air tersebut dimasukkan ke dalam boks dan dipadatkan sampai tingginya 5 cm. Demikian seterusnya untuk lapisan-lapisan selanjutnya. Agar kepadatan rencana dapat dicapai, maka perlu dilakukan kontrol kepadatannya pada tiap lapisan. Untuk itu dilakukan uji *density* pada tanah model yang hasilnya disajikan pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Uji *Density* pada Tanah Model

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

Selanjutnya untuk pemodelan kolom DSM dengan campuran 10% kapur, digunakan kadar air sebesar 24,10% dan berat isi kering maksimum 1,406 gr/cm³. Diameter kolom yang digunakan adalah 4,5 cm. Sama seperti pada pemodelan tanah asli, kolom DSM dibagi tiap-tiap lapisan setinggi 5 cm. Kebutuhan tanah, kapur, dan air tiap lapisan dicampur sampai homogen dan dimasukkan ke dalam lubang lalu dipadatkan sampai mencapai tinggi rencana. Perlakuan tersebut dilakukan pada semua variasi jarak dan panjang kolom, sehingga seluruh sampel nantinya memiliki kepadatan yang seragam.

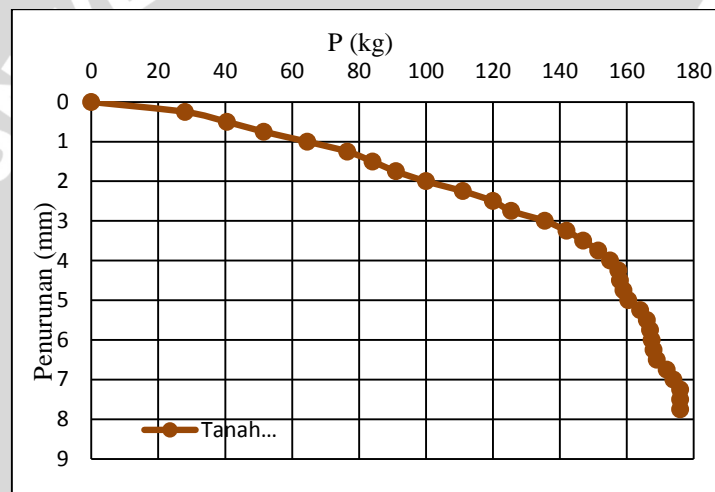
4.4 Hasil Uji beban (*Load Test*) di Laboratorium

Uji beban (*Load test*) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui hubungan antara beban yang bekerja dengan besarnya penurunan yang terjadi. Hasil dari pengujian ini akan menghasilkan grafik hubungan antara beban dan penurunan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan dongkrak hidrolik yang berfungsi memberikan tekanan kepada piston, yang selanjutnya beban akan diteruskan ke plat baja (*bearing plate*). Plat baja berfungsi untuk meneruskan beban dari piston ke tanah. Plat baja yang digunakan berukuran 5 x 5x 2 cm yang diletakkan tepat di atas benda uji. Pemberian beban dilakukan secara bertahap sampai mencapai batas keruntuhan tanah. Pembacaan dilakukan setiap kelipatan 50 pada pembacaan lvdt. Benda uji yang dipakai berupa tanah asli dan tanah yang sudah distabilisasi dengan

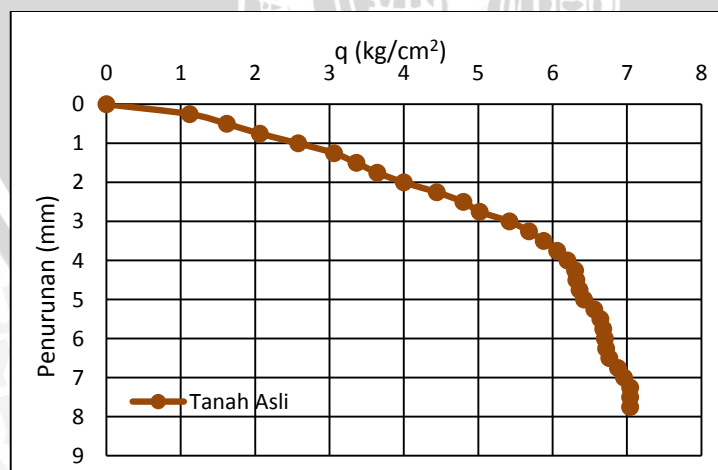
kolom DSM dengan variasi jarak dan panjang kolom. Pemberian variasi jarak dan panjang kolom bertujuan untuk mengetahui pada jarak dan panjang kolom berapakah yang akan menghasilkan nilai daya dukung optimum. Uji pembebanan dilakukan sebanyak 10 sampel, yaitu 1 sampel tanah asli dan 9 sampel tanah dengan variasi jarak dan panjang kolom DSM.

4.4.1 Hasil Uji Beban pada Tanah Asli

Uji beban dilakukan terhadap sampel tanah asli yang belum dilakukan stabilisasi dengan kolom DSM. Sampel tanah asli dipadatkan di dalam boks dengan kadar air optimum (OMC) sebesar 27,908 % dan kepadatan relatif (γ_d) sebesar 1,28 gr/cm³. Dari hasil uji beban pada sampel tanah asli akan didapatkan grafik hubungan antara beban (P) dengan penurunan seperti pada (**Gambar 4.6**). Selanjutnya akan dibuat grafik hubungan daya dukung (q) dengan penurunan seperti pada (**Gambar 4.7**).



Gambar 4.6 Hubungan beban dan penurunan pada tanah asli



Gambar 4.7 Hubungan daya dukung (q) dan penurunan pada tanah asli

Dari grafik hubungan antara beban (P) dan penurunan (**Gambar 4.6**) dapat terlihat bahwa pada saat awal pembebanan, besarnya penurunan sebanding dengan besarnya beban

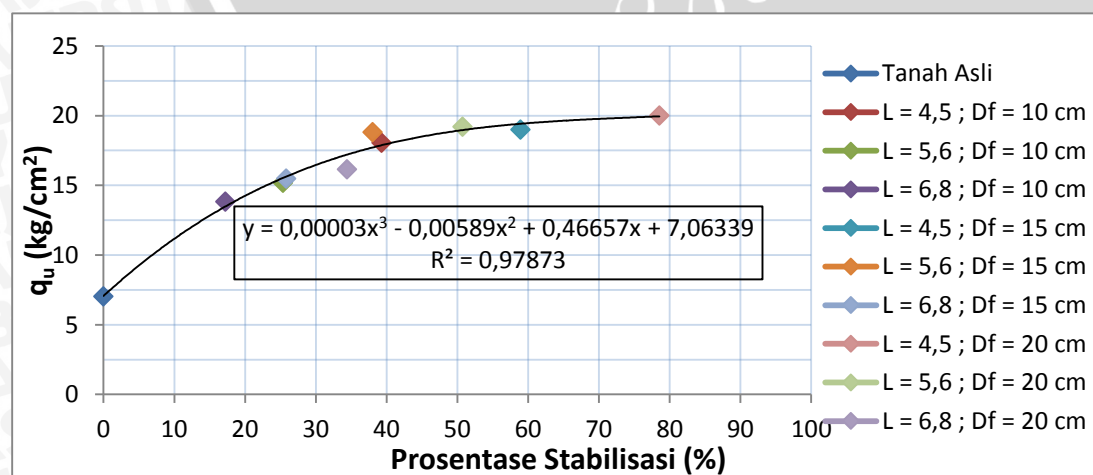
yang diberikan. Namun seiring dengan bertambahnya beban, hubungan beban dan penurunan sudah tidak sebanding lagi. Terlihat bahwa penambahan beban kecil namun penurunannya semakin besar, meskipun beban sudah dihentikan namun penurunannya akan terus bertambah. Hal ini menandakan tanah sudah mencapai batas keruntuhan atau telah mencapai daya dukung batas/ultimit. Pada grafik hubungan antara daya dukung (q) dan penurunan (**Gambar 4.7**) didapatkan daya dukung ultimit (q_u) tanah asli sebesar $7,04 \text{ kg/cm}^2$ dan penurunan sebesar $7,75 \text{ mm}$.

4.4.2 Nilai Q_u Berdasarkan Prosentase Tanah yang Distabilisasi dengan Kolom DSM

Prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm^2 dengan kedalaman 20 cm . Hasil pengujian eksperimen daya dukung terhadap prosentase tanah stabilisasi ditampilkan pada **Tabel 4.5** dan **Gambar 4.8** sebagai berikut:

Tabel 4.5 Nilai Daya Dukung Terhadap Prosentase Stabilisasi Tanah

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi %	P_u kg	q_u kg/cm^2
Tanah Asli	-	0	176	7,04
Tanah Asli + Kolom Stabilisasi DSM dengan 10% Kapur	L = 4,5 ; Df = 10 cm	39,27	457	18,06
	L = 5,6 ; Df = 10 cm	25,36	380	15,2
	L = 6,8 ; Df = 10 cm	17,2	346	13,84
	L = 4,5 ; Df = 15 cm	58,9	475	19
	L = 5,6 ; Df = 15 cm	38,04	470,5	18,82
	L = 6,8 ; Df = 15 cm	25,8	390	15,5
	L = 4,5 ; Df = 20 cm	78,54	500,5	20,02
	L = 5,6 ; Df = 20 cm	50,72	480	19,2
	L = 6,8 ; Df = 20 cm	34,4	404	16,16



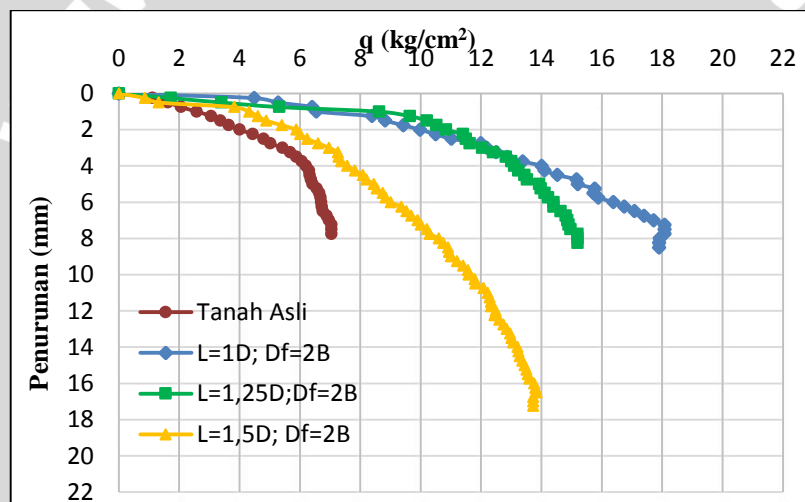
Gambar 4.8 Perbandingan nilai daya dukung terhadap prosentase stabilisasi tanah

Dari **Gambar 4.8** dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung dengan prosentase stabilisasi tanah dengan kolom DSM adalah berbanding lurus. Semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan.

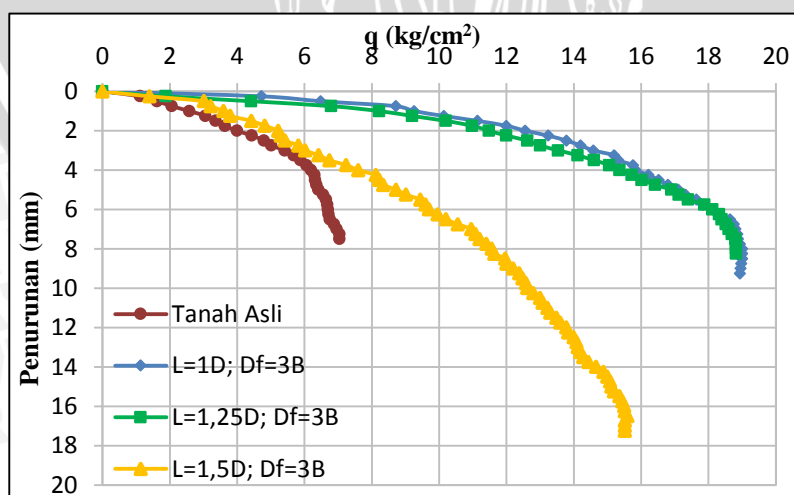
4.4.3 Hasil Uji Beban Sampel Tanah dengan Stabilisasi Kolom DSM

4.4.3.1 Perbandingan Hasil Uji Beban Tanah Asli dengan Tanah Stabilisasi pada Variasi Jarak (L) terhadap panjang kolom konstan Df

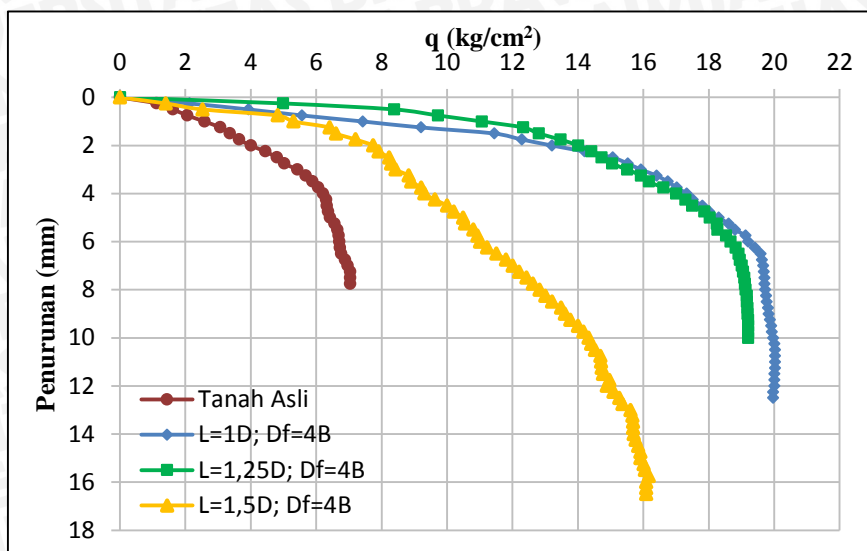
Hasil uji beban untuk variasi jarak antar kolom terhadap panjang kolom (Df) akan didapatkan grafik hubungan antara daya dukung dengan penurunan. Perbandingan hasil uji beban dari keempat sampel dapat dilihat pada **Gambar 4.9** untuk variasi jarak kolom terhadap panjang kolom 2B, **Gambar 4.10** untuk variasi jarak kolom terhadap panjang kolom 3B, dan **Gambar 4.11** untuk variasi jarak kolom terhadap panjang kolom 4B.



Gambar 4.9 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 2B



Gambar 4.10 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 3B



Gambar 4.11 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 4B

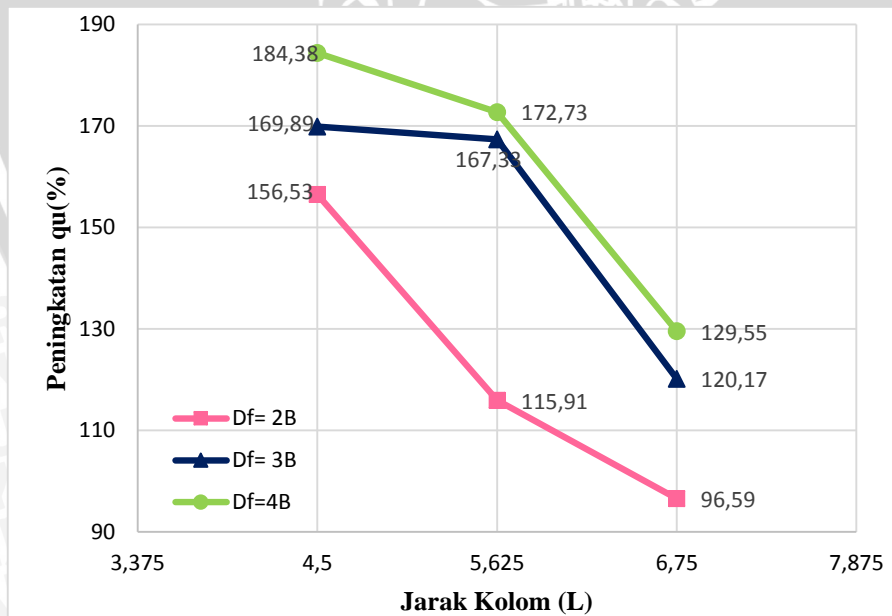
Dari **Gambar 4.9**, **Gambar 4.10**, dan **Gambar 4.11** secara umum menunjukkan bahwa nilai daya dukung batas (q_u) tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan q_u tanah asli. Dari ketiga gambar diatas pada grafik variasi jarak ($L=1,25D$) dan $L=1D$ terlihat bahwa pada penurunan tertentu kedua grafik tersebut bersilangan. Hal ini dapat terjadi karena beberapa faktor salah satunya diakibatkan oleh usaha pemadatan tanah yang kurang merata, sehingga kepadatan sampel tanah tidak merata, ada bagian tanah yang sudah padat dan ada bagian tanah lainnya yang kurang padat (berongga). Sehingga pada saat pemberiann beban, distribusi tegangannya tidak merata. Selain diakibatkan oleh kepadatan tanah yang tidak merata, hal ini juga dapat diakibatkan oleh pemompoan dongkrak hidrolik yang tidak seragam/konstan sehingga kecepatan pemompaannya terlalu cepat yang mengakibatkan pembacaan beban meningkat namun penurunannya relatif kecil sehingga terjadi persilangan antar grafik.

Dari ketiga gambar diatas, terlihat bahwa pada variasi jarak kolom $L=1D$ dan $L=1,25D$ memiliki bentuk grafik yang hampir sama. Bentuk tersebut dinamakan elastoplastik yaitu pada awalnya tanah bersifat elastis namun ketika diberikan beban tertentu sifatnya berubah menjadi plastis. Sifat plastis adalah suatu keadaan dimana tanah mengalami penurunan yang tajam namun peningkatan daya dukungnya sangat kecil. Hal ini terjadi karena sifat sementasi kapur yang menjadikan tanah bersifat kaku. Sehingga meskipun kapur sangat baik dalam meningkatkan daya dukung tanah, namun karena sifat kaku tersebut menyebabkan tanah akan mengalami brittle/patah jika tanah sudah tidak mampu lagi menahan beban yang bekerja.

Dari **Gambar 4.9**, dan **Gambar 4.10** terlihat bahwa pada jarak $L=1D$ dan $L=1,25D$ kedua grafik saling berdekatan/berimpit. Hal ini menunjukkan bahwa pada jarak $L=1D$ dan $L=1,25D$ memiliki sifat kekakuan yang hampir sama yang menyebabkan nilai daya dukung ultimitnya tidak jauh berbeda. Hal ini dapat terjadi karena prosentase kapur yang cukup besar yang menyebabkan sifat kaku yang sama antara jarak $L=1D$ dan $L=1,25D$. Untuk dapat membandingkan prosentase peningkatan nilai (q_u) terhadap tanah asli pada variasi jarak terhadap panjang kolom akan disajikan pada **Tabel 4.6** dan **Gambar 4.12** berikut ini:

Tabel 4.6 Prosentase Peningkatan Nilai q_u dengan Variasi Jarak terhadap Panjang Kolom

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	q_u	Penurunan	Prosentase Peningkatan Nilai q_u
	cm	cm	kg/cm ²	mm	(%)
Tanah Asli			7,04	7,25	-
	4B	1,5 D	16,16	16	129,55
		1,25 D	19,2	9,25	172,73
	1 D	20,02	10,5	184,38	
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur		1,5 D	15,5	16,5	120,17
	3B	1,25 D	18,82	7,75	167,33
		1 D	19	8,5	169,89
	2B	1,5 D	13,84	16,5	96,59
		1,25 D	15,2	7,75	115,91
	1 D	18,06	7,25	156,53	

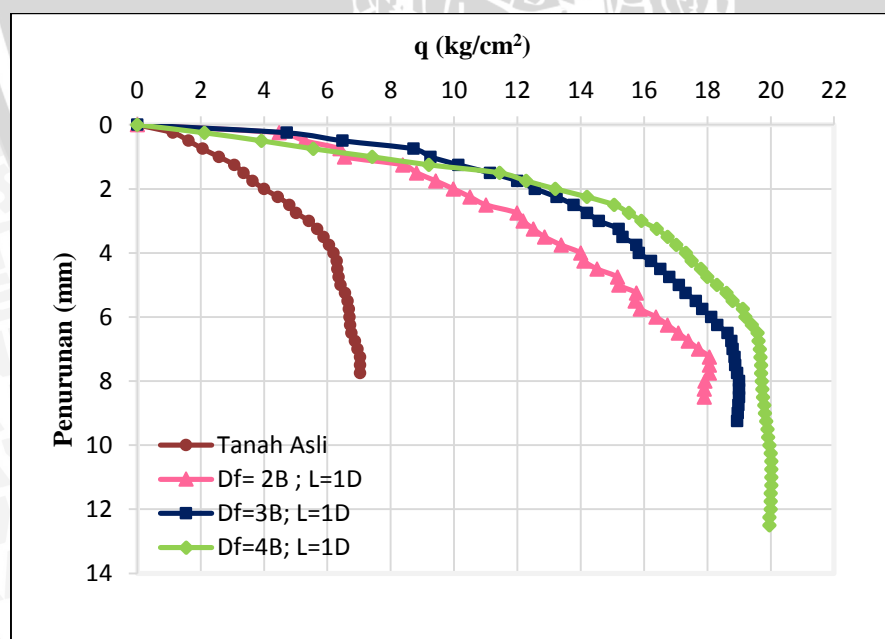


Gambar 4.12 Perbandingan prosentase peningkatan q_u pada variasi jarak (L) terhadap panjang kolom(Df)

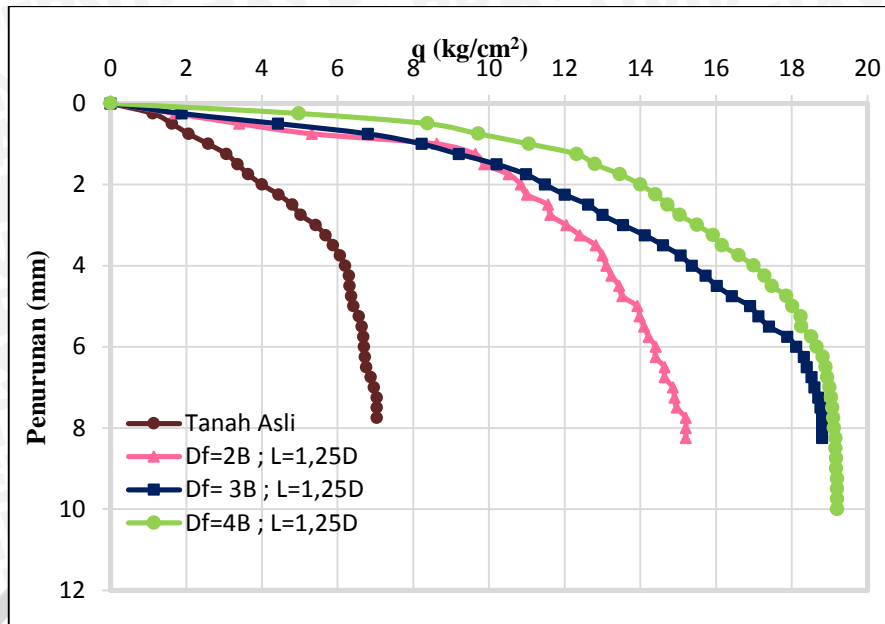
Dari **Tabel 4.6** Nilai q_u terbesar berada pada jarak 1D panjang kolom terpanjang 4B yaitu sebesar $q_u = 20,02 \text{ kg/cm}^2$ meningkat 184,38 % dari tanah asli. Sedangkan nilai q_u terkecil berada pada jarak 1,5D dan panjang kolom 2B yaitu sebesar $13,84 \text{ kg/cm}^2$ meningkat 96,59 % dari tanah asli. Dari **Tabel 4.6** dan **Gambar 4.12** menunjukkan bahwa semakin rapat jarak antar kolom akan menghasilkan nilai daya dukung yang semakin besar. Hal ini terjadi karena pada jarak antar kolom yang lebih rapat penyebaran tegangan yang dihasilkan oleh beban akan lebih terkekang oleh tanah stabilisasi kolom DSM. Sedangkan ketika jaraknya diregangkan maka distribusi tegangannya tidak hanya diterima oleh kolom stabilisasi DSM namun juga diterima oleh tanah aslinya. Hal ini menyebabkan daya dukung tanah terbagi antara tanah asli dan tanah stabilisasi sehingga menyebabkan nilai daya dukungnya menurun.

4.4.3.2 Perbandingan Hasil Uji Beban Tanah Asli dan Tanah Stabilisasi pada Variasi Panjang Kolom (D_f) terhadap Jarak Kolom Konstan (L)

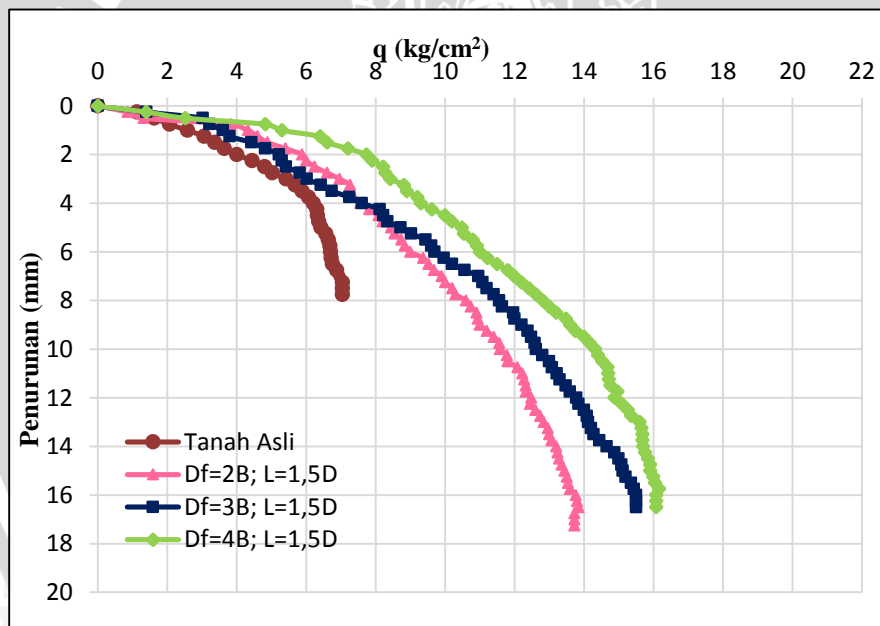
Hasil uji beban untuk variasi panjang kolom yaitu $D_f=2B$, $D_f=2B$, $D_f = 4B$ terhadap jarak antar kolom (L) akan didapatkan grafik hubungan antara daya dukung dengan penurunan dari 4 sampel tanah. Perbandingan hasil uji beban dari keempat sampel dapat dilihat pada **Gambar 4.13** untuk variasi panjang kolom (D_f) terhadap jarak kolom $L=1D$, **Gambar 4.14** untuk variasi panjang kolom (D_f) terhadap jarak kolom $L=1,25D$, dan **Gambar 4.15** untuk variasi panjang kolom (D_f) terhadap jarak kolom $L=1,5D$.



Gambar 4.13 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1D$



Gambar 4.14 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,25D$

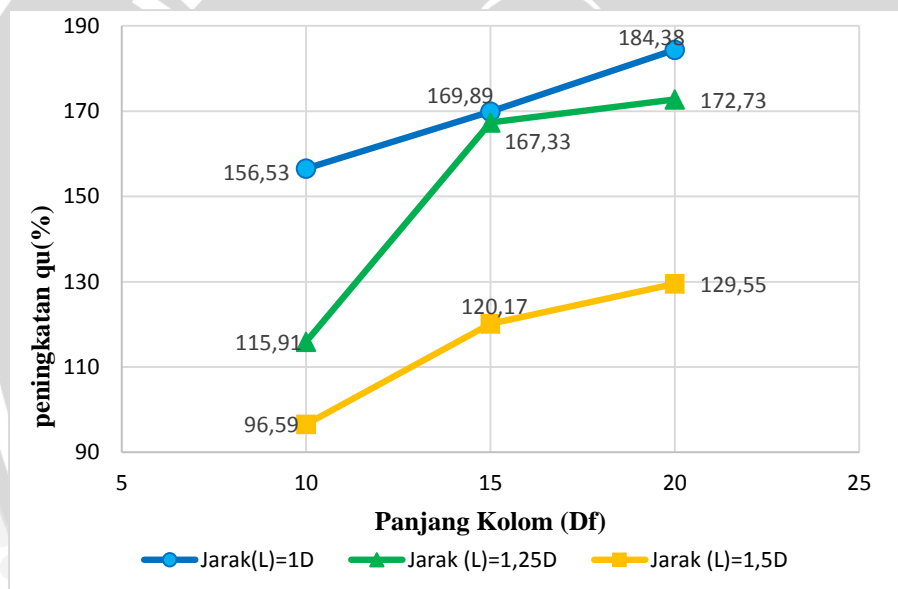


Gambar 4.15 Hubungan daya dukung dan penurunan dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,5D$

Dari **Gambar 4.13**, **Gambar 4.14**, dan **Gambar 4.15** dapat diketahui bahwa variasi panjang kolom berpengaruh terhadap daya dukung tanah. Untuk dapat membandingkan prosentase peningkatan nilai (q_u) terhadap tanah asli pada variasi panjang kolom terhadap jarak kolom akan disajikan pada **Tabel 4.7** dan **Gambar 4.16**.

Tabel 4.7 Prosentase Peningkatan Nilai q_u dengan Variasi Panjang Kolom terhadap Jarak

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (Df)	q_u	Penurunan	Prosentase Peningkatan Nilai q_u
	cm	cm	kg/cm ²	mm	(%)
Tanah Asli			7,04	7,25	-
	1D	2B	18,06	7,25	156,53
		3B	19	8,5	169,89
		4B	20,02	10,5	184,38
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	1,25 D	2B	15,2	8,25	115,91
		3B	18,82	7,75	167,33
		4B	19,2	9,25	172,73
	1,5 D	2B	13,84	16,5	96,59
		3B	15,5	16,5	120,17
		4B	16,16	16	129,55

**Gambar 4.16** Perbandingan prosentase peningkatan q_u pada variasi panjang (Df) terhadap jarak kolom(L)

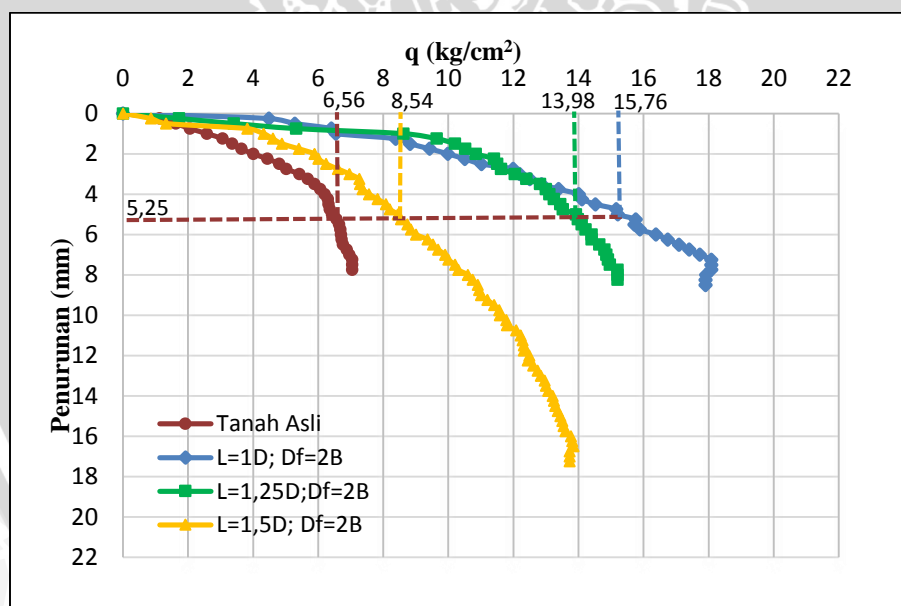
Dari **Tabel 4.7** dan **Gambar 4.16** dapat disimpulkan bahwa stabilisasi tanah dengan kolom DSM terbukti dapat meningkatkan nilai q_u dari tanah asli. Dari hasil tersebut secara umum dapat disimpulkan bahwa panjang kolom berbanding lurus dengan nilai q_u . Artinya semakin panjang kolom DSM, nilai q_u juga semakin besar. Sebaliknya semakin pendek kolom DSM maka nilai q_u juga semakin kecil. Dari **Gambar 4.16** dapat dilihat besarnya prosentase peningkatan q_u , untuk jarak $L=1,5D$ peningkatan q_u terbesar adalah 129,55% yaitu pada panjang kolom terpanjang $Df=4B$, untuk $L=1,25D$ peningkatan q_u sebesar

172,73%, dan untuk $L=1D$ peningkatan q_u sebesar 184,38%. Dari hasil tersebut terlihat bahwa peningkatan q_u terbesar adalah saat variasi panjang kolom terpanjang yaitu $D_f=4B$. Hal ini terjadi karena semakin panjang kolom DSM maka volume tanah yang distabilisasi juga semakin besar, yang menyebabkan daya dukungnya juga semakin meningkat dan tegangan yang dihasilkan oleh beban akan diterima oleh kolom stabilisasi dan disalurkan ke dalam tanah, panjang kolom DSM yang lebih panjang akan lebih banyak menerima tegangan daripada panjang kolom yang lebih pendek. Sehingga panjang kolom terbesar akan menghasilkan nilai q_u yang lebih besar.

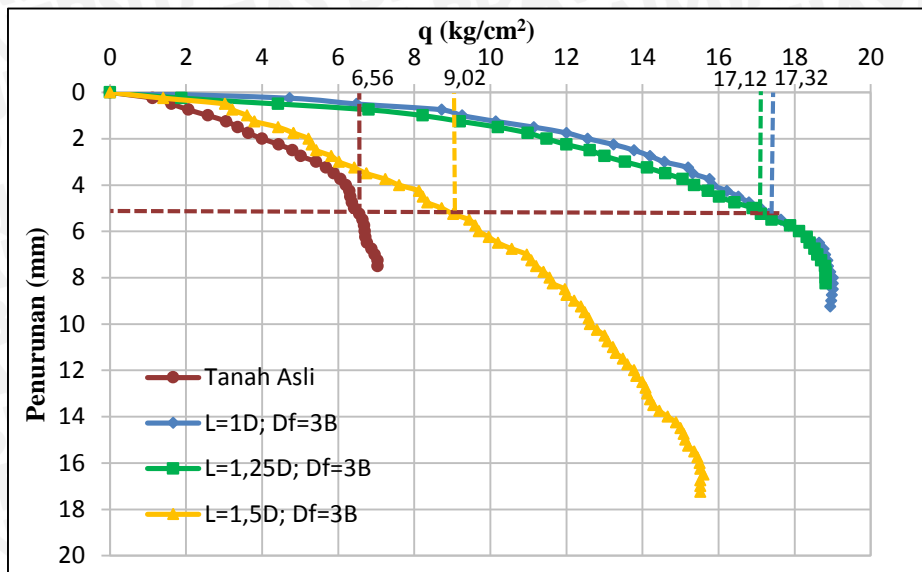
4.4.4 Perbandingan Daya Dukung pada Penurunan yang Sama

4.4.4.1 Perbandingan Daya Dukung pada Variasi Jarak Kolom (L) terhadap Panjang Kolom (D_f)

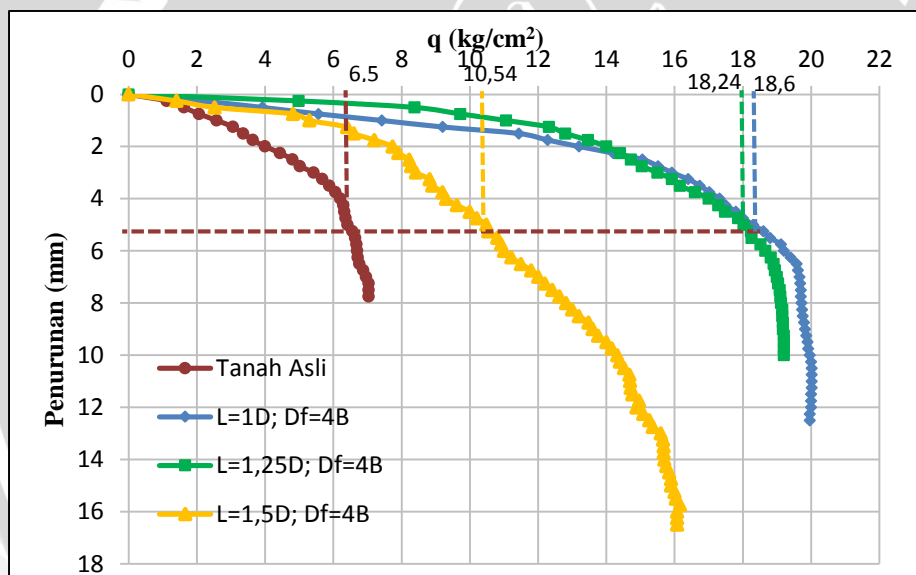
Analisis daya dukung pada penurunan yang sama digunakan untuk mengetahui perbandingan nilai daya dukung pada kondisi yang sama yaitu pada penurunan 5,25 mm. Hal ini dilakukan untuk analisis BCI yang ditinjau berdasarkan penurunannya.



Gambar 4.17 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 2B



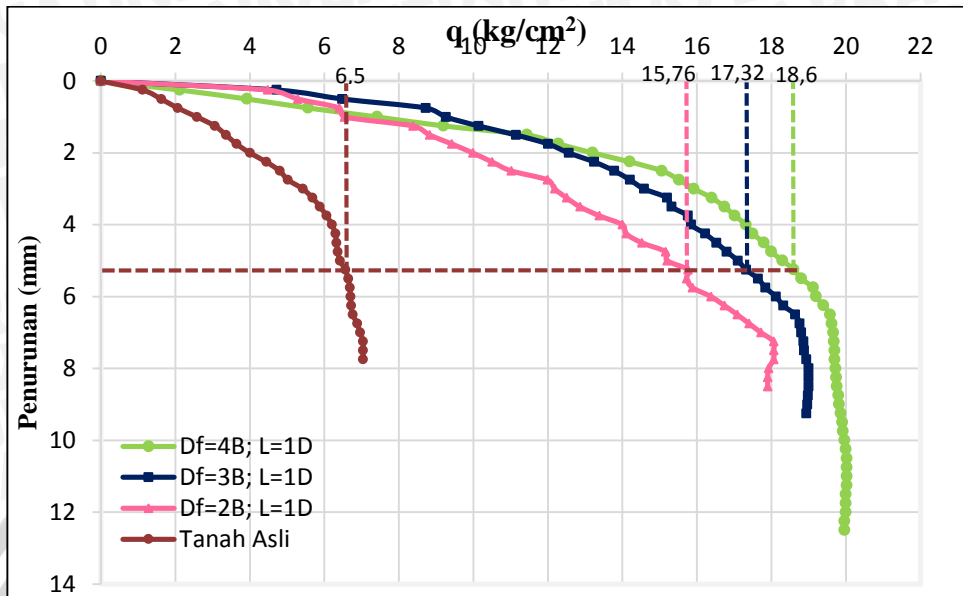
Gambar 4.18 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 3B



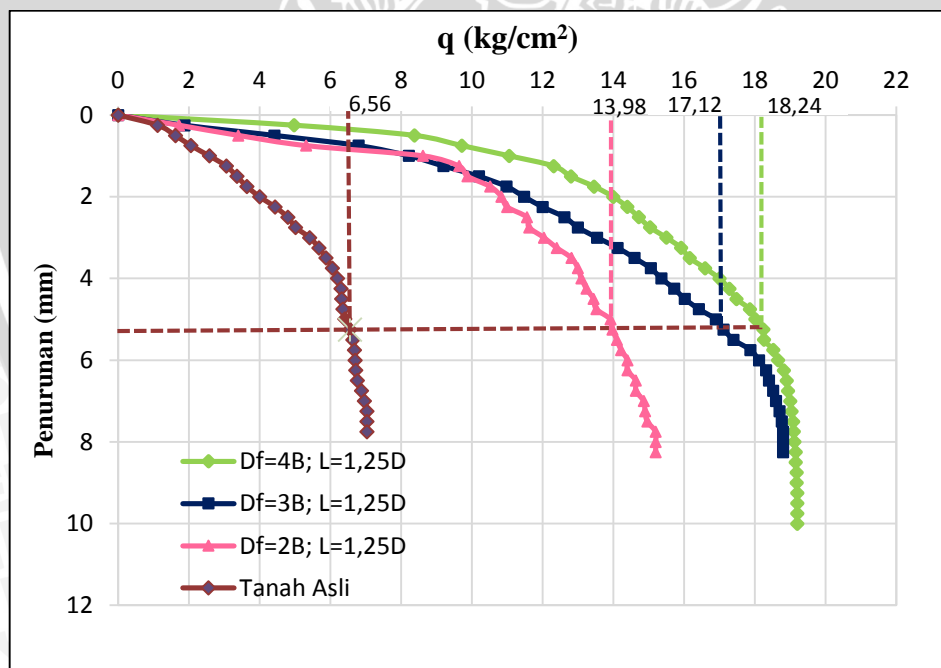
Gambar 4.19 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi jarak terhadap panjang kolom 4B

Dari ketiga grafik diatas terlihat bahwa pada penurunan yang sama, semakin dekat jarak antar kolom maka daya dukungnya semakin besar. Sebaliknya jika jarak antar kolom semakin jauh/renggang daya dukunnya semakin kecil. Daya dukung terbesar berada pada jarak terdekat dan kolom paling panjang yaitu 1D dan 4B.

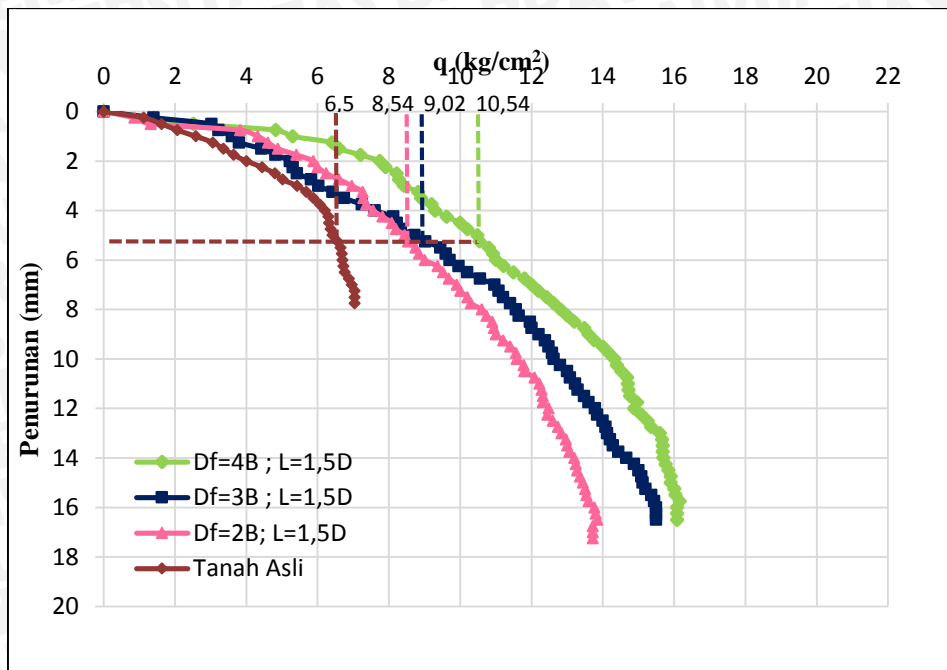
4.4.4.2 Perbandingan Daya Dukung (q) pada Variasi Panjang Kolom (Df) terhadap Jarak Kolom (L)



Gambar 4.20 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1D$



Gambar 4.21 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,25D$



Gambar 4.22 Perbandingan daya dukung pada penurunan yang sama dengan variasi panjang kolom terhadap jarak $L=1,5D$

Dari ketiga grafik diatas secara umum terlihat bahwa pada penurunan yang sama, semakin besar panjang kolom DSM maka daya dukungnya juga semakin besar pula. Dan sebaliknya, semakin pendek kolom DSM maka daya dukungnya juga semakin kecil.

4.5 Analisis BCI

Bearing Capacity Improvement (BCI) adalah perbandingan antara daya dukung tanah yang distabilisasi terhadap daya dukung tanah tanpa stabilisasi. Analisis BCI bertujuan untuk mengetahui berapa besar peningkatan daya dukung yang terjadi akibat adanya stabilisasi kolom DSM. Dengan demikian dapat diketahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom DSM dalam meningkatkan nilai daya dukung tanah. Sehingga nantinya akan diketahui pada variasi jarak dan panjang kolom berapa yang menghasilkan daya dukung maksimum. Kali ini akan ditinjau analisis BCI berdasarkan nilai daya dukung ultimit (q_u) yaitu analisis BCIu dan berdasarkan nilai daya dukung pada penurunan yang sama yang disebut analisis BCIs.

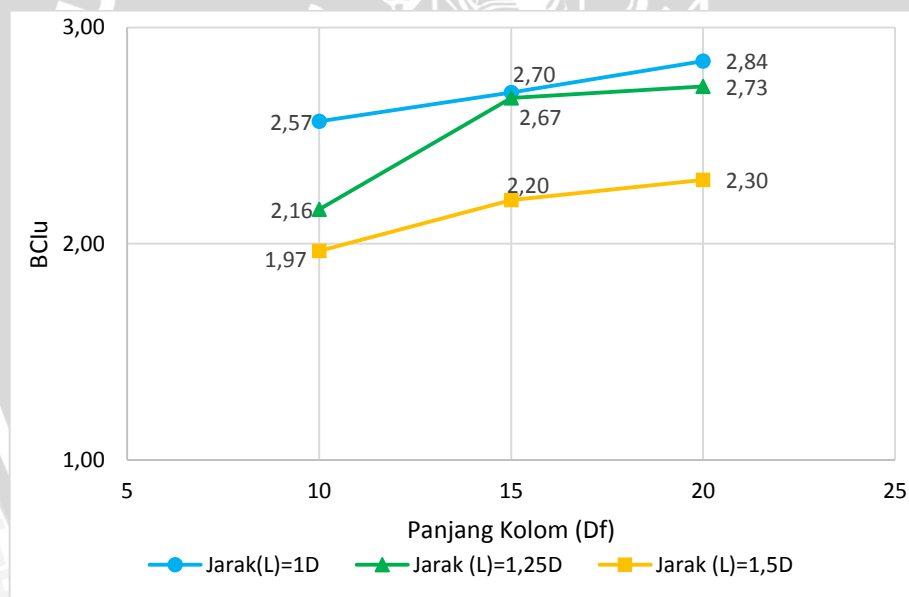
4.5.1 Analisis BCIu

Analisis BCIu merupakan perbandingan antara daya dukung batas (q_u) tanah dengan stabilisasi terhadap daya dukung batas (q_u) tanah tanpa stabilisasi. Pada **Tabel 4.8** dan **Gambar 4.23** disajikan nilai BCIu dan pengaruh variasi panjang kolom(Df) terhadap jarak

kolom (L) sedangkan pada **Tabel 4.9** dan **Gambar 4.24** disajikan nilai BC_{Iu} dan pengaruh variasi jarak kolom (L) terhadap panjang kolom(D_f) sebagai berikut:

Tabel 4.8 Nilai BC_{Iu} Pada Variasi Panjang Kolom (D_f)

Jenis Sampel	Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (D _f)	P _u	q _u	Penurunan	BC _{Iu}
	cm	cm	kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli			176	7,04	7,25	1
	1D	10	457	18,06	7,25	2,57
		15	475	19	8,5	2,70
20		500,5	20,02	10,5	2,84	
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	1,25 D	10	380	15,2	8,25	2,16
		15	470,5	18,82	7,75	2,67
		20	480	19,2	9,25	2,73
	1,5 D	10	346	13,84	16,5	1,97
		15	390	15,5	16,5	2,20
		20	404	16,16	16	2,30

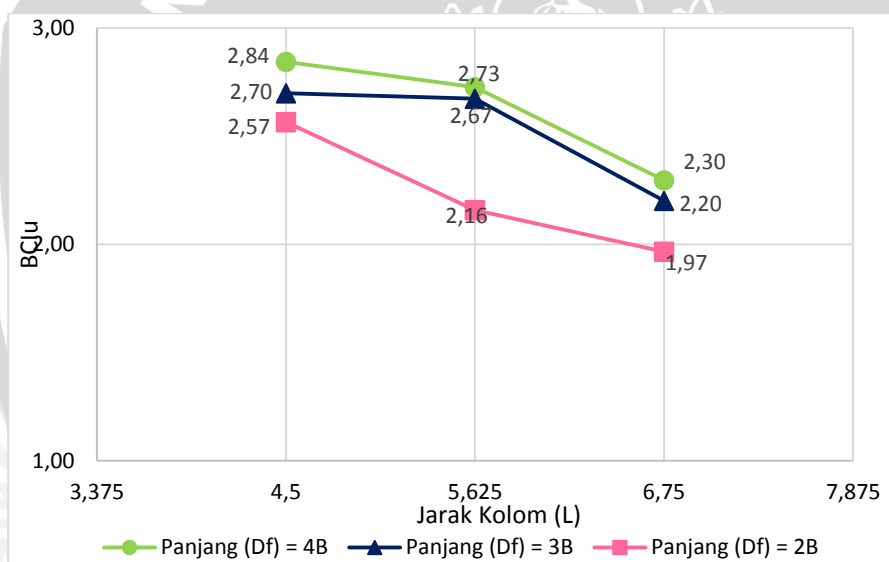


Gambar 4.23 Perbandingan pengaruh variasi panjang terhadap nilai BC_{Iu}

Dari **Tabel 4.8** dan **Gambar 4.23** terlihat bahwa variasi panjang kolom berpengaruh terhadap nilai BC_{Iu}. Semakin panjang kolom DSM nilai BC_{Iu} akan semakin meningkat. Nilai BC_{Iu} tertinggi adalah 2,84 yang berada jarak kolom 1D dan panjang kolom 20 cm. Sedangkan nilai BC_{Iu} terendah adalah 1,97 yang berada jarak kolom 1,5D dan panjang kolom 10 cm.

Tabel 4.9 Nilai BC_{Iu} Pada Variasi Jarak Kolom (L)

Jenis Sampel	Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	P_u	q_u	Penurunan	BC _{Iu}
	cm	cm	kg	kg/cm ²	mm	
Tanah Asli			176	7,04	7,25	1
	4B	1,5 D	404	16,16	16	2,30
		1,25 D	480	19,2	9,25	2,73
1 D		500,5	20,02	10,5	2,84	
Tanah Asli + Kolom DSM 10 % Kapur	3B	1,5 D	390	15,5	16,5	2,20
		1,25 D	470,5	18,82	7,75	2,67
		1 D	475	19	8,5	2,70
	2B	1,5 D	346	13,84	16,5	1,97
		1,25 D	380	15,2	7,75	2,16
		1 D	457	18,06	7,25	2,57

**Gambar 4.24** Perbandingan pengaruh variasi jarak terhadap nilai BC_{Iu}

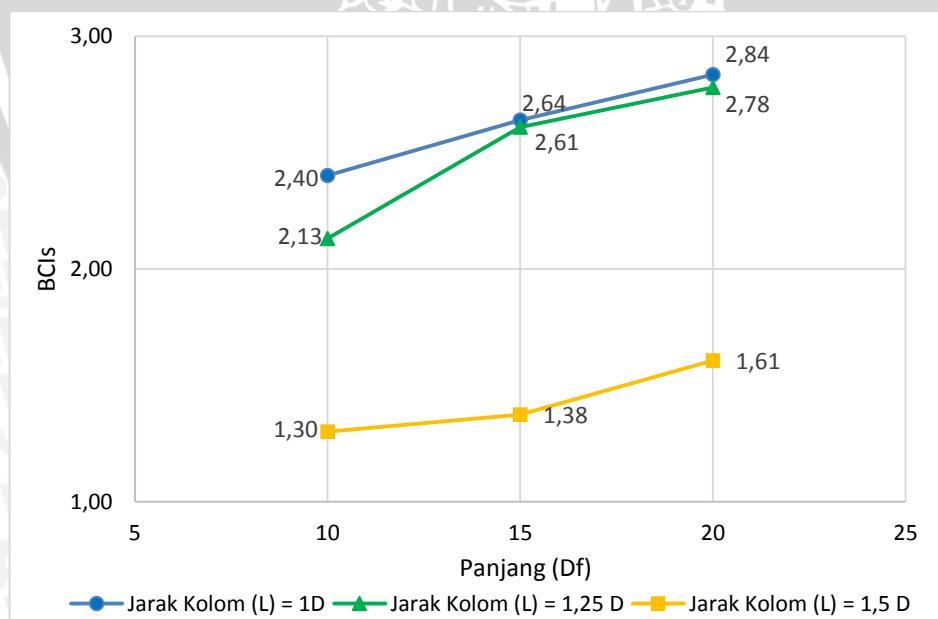
Dari **Tabel 4.9** dan **Gambar 4.24** menunjukkan bahwa variasi jarak kolom DSM berpengaruh terhadap nilai BC_{Iu}. Secara umum variasi jarak kolom memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan BC_{Iu}. Semakin dekat jarak antar kolom maka semakin besar pulai nilai BC_{Iu} nya. Jadi dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak antar kolom dan semakin panjang kolom DSM maka nilai BC_{Iu} akan semakin meningkat.

4.5.1 Analisis BCIs

Analisis BCIs merupakan perbandingan antara daya dukung (q) tanah dengan stabilisasi terhadap daya dukung (q) tanah tanpa stabilisasi yang ditinjau pada penurunan yang sama. Pada **Tabel 4.10** dan **Gambar 4.25** disajikan nilai BCIs dan pengaruh variasi panjang kolom (D_f) terhadap jarak kolom (L) sedangkan pada **Tabel 4.11** dan **Gambar 4.26** disajikan nilai BCIs dan pengaruh variasi jarak kolom (L) terhadap panjang kolom (D_f) sebagai berikut:

Tabel 4.10 Nilai BCIs Pada Variasi Panjang Kolom (D_f)

Jarak Kolom (L)	Panjang Kolom (D_f)	q_u	Penurunan	BCIs
cm	cm	kg/cm ²	mm	
1D		6,56	5,25	1
	10	15,76	5,25	2,4
	15	17,32	5,25	2,64
	20	18,6	5,25	2,84
1,25 D	10	13,98	5,25	2,13
	15	17,12	5,25	2,61
	20	18,24	5,25	2,78
1,5 D	10	8,54	5,25	1,3
	15	9,02	5,25	1,38
	20	10,54	5,25	1,61

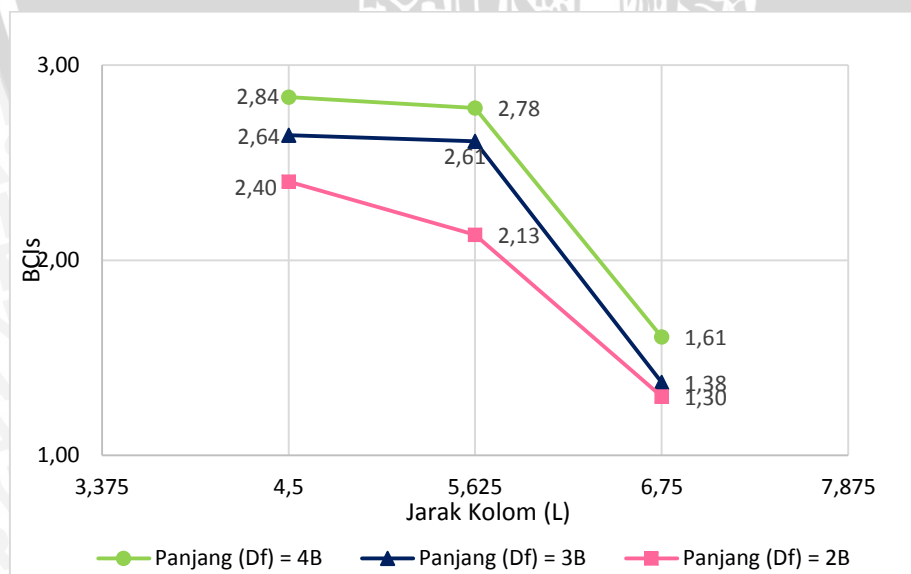


Gambar 4.25 Perbandingan pengaruh variasi panjang terhadap nilai BCIs

Dari **Tabel 4.10** dan **Gambar 4.25** secara umum menunjukkan hasil yang hampir sama dengan analisis BCI berdasarkan daya dukung batas (BCIu). Semakin panjang kolom DSM, maka semakin besar pula nilai q_u nya, yang menyebabkan hasil BCIs juga akan meningkat. Pada **Gambar 4.21** terlihat bahwa grafik BCIs pada variasi jarak $L=1,5D$ jauh dibawah grafik variasi $L=1,25D$ dan $L=1D$. Hal ini karena nilai daya dukung pada variasi $L=1,5D$ jauh lebih kecil dibandingkan daya dukung pada variasi $L=1,25D$ dan $L=1D$ yang hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa jarak kolom yang lebih rapat akan menghasilkan daya dukung yang lebih besar dibandingkan dengan jarak kolom yang lebih renggang.

Tabel 4.11 Nilai BCIs Pada Variasi Jarak Kolom (L)

Panjang Kolom (Df)	Jarak Kolom (L)	q_u	Penurunan	BCIs
cm	cm	kg/cm ²	mm	
		6,56	5,25	1
20	1,5 D	10,54	5,25	1,61
	1,25 D	18,24	5,25	2,78
	1 D	18,6	5,25	2,84
15	1,5 D	9,02	5,25	1,38
	1,25 D	17,12	5,25	2,61
	1 D	17,32	5,25	2,64
10	1,5 D	8,54	5,25	1,3
	1,25 D	13,98	5,25	2,13
	1 D	15,76	5,25	2,4

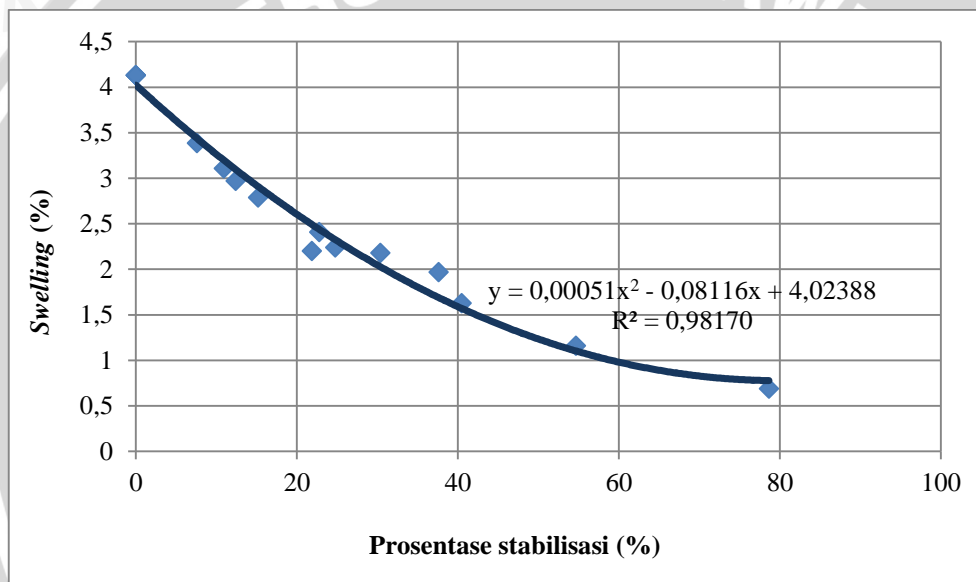


Gambar 4.26 Perbandingan pengaruh variasi jarak terhadap nilai BCIs

Dari **Tabel 4.11** terlihat bahwa pada penurunan yang sama semakin semakin dekat jarak antar kolom maka nilai BCIs nya akan semakin meningkat. Nilai BCIs terbesar berada pada jarak kolom 1D dan panjang kolom 4B yaitu sebesar 2,84.

4.6 Pemeriksaan Potensi Pengembangan (*Swelling*)

Potensi pengembangan (*swelling*) adalah perubahan tinggi dari contoh tanah yang mengembang selama perendaman dibagi dengan tinggi awal dan dinyatakan dalam persen (%). Pada hasil penelitian yang telah dilakukan (Firdaus,2016) mengenai pengaruh volume kolom DSM terhadap nilai potensi pengembangan akan menghasilkan grafik hubungan antara pengembangan dengan prosentase stabilisasi yang disajikan **Gambar 4.27** berikut ini :



Gambar 4.27 Hubungan nilai *swelling* dengan prosentase stabilisasi (komunikasi pribadi dengan Adelina, 2016)

Dari **Gambar 4.27** terlihat bahwa nilai potensi pengembangan semakin menurun seiring dengan bertambahnya prosentase stabilisasi. Hal ini dapat terjadi karena reaksi antara kapur dan mineral lempung yang dapat menetralsisir muatan negatif lempung sehingga kemampuan lempung dalam menyerap air akan berkurang. Kandungan air yang semakin berkurang dapat menurunkan nilai *swelling*. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa besarnya prosentase stabilisasi berbanding terbalik dengan nilai *swelling*.

Dari grafik pada **Gambar 4.27** menghasilkan sebuah persamaan yang digunakan untuk mengetahui pengaruh prosentase stabilisasi kolom DSM di dalam boks terhadap nilai potensi

pengembangan yaitu dengan cara memasukkan nilai prosentase stabilisasi ke dalam persamaan dan hasilnya disajikan pada **Tabel 4.12** sebagai berikut:

Tabel 4.12 Nilai Potensi Pengembangan Berdasarkan Prosentase Stabilisasi

Jenis Benda Uji	Variabel	Prosentase Stabilisasi	Pengembangan (Swelling)	Penurunan Swelling dari tanah asli
		%	%	%
Tanah Asli	-	0	4,13	
	L = 4,5 ; Df = 10 cm	39,27	1,62	63,42
Tanah Asli + Kolom	L = 5,6 ; Df = 10 cm	25,36	2,29	47,65
	L = 6,8 ; Df = 10 cm	17,2	2,78	36,04
Stabilisasi DSM	L = 4,5 ; Df = 15 cm	58,9	1,01	77,09
	L = 5,6 ; Df = 15 cm	38,04	1,67	62,23
dengan 10% Kapur	L = 6,8 ; Df = 15 cm	25,8	2,27	48,22
	L = 4,5 ; Df = 20 cm	78,54	0,8	80,67
	L = 5,6 ; Df = 20 cm	50,72	1,22	72,61
	L = 6,8 ; Df = 20 cm	34,4	1,84	58,47

Dalam jurnal yang berjudul “*Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils*” disebutkan bahwa toleransi kenaikan tanah (Δh) yang diijinkan untuk *flexible pavement structure* sebesar 12 mm dan untuk *rigid pavement structure* 18 mm. Tanah asli memiliki nilai *swelling* sebesar 4,133%, sedangkan rata-rata tinggi tanah ekspansif di lapangan yaitu 1,5 m. Sehingga tanah asli mengalami kenaikan tanah (Δh) sebesar 61,95 mm. Untuk memenuhi toleransi kenaikan tanah (Δh) maksimum sebesar 12 mm untuk *flexible pavement structure* maka nilai *swelling* maksimum yang diijinkan sebesar 0,8%. Dan untuk *rigid pavement structure* nilai *swelling* yang diijinkan sebesar 1,2%. Dengan demikian nilai *swelling* yang memenuhi toleransi untuk *flexible pavement structure* adalah pada jarak kolom 4,5 cm dan panjang kolom 20 cm dan untuk *rigid pavement structure* adalah pada jarak kolom 4,5 cm dan panjang kolom 20 cm.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan uraian pada hasil dan pembahasan yang telah dibahas pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin rapat jarak antar kolom DSM dan semakin panjang kolom DSM maka nilai daya dukung tanah semakin meningkat. Sebaliknya semakin renggang jarak antar kolom DSM dan semakin pendek kolom DSM maka daya dukung semakin menurun.
2. Berdasarkan pada analisis BCIu, jarak dan panjang kolom yang menghasilkan nilai daya dukung maksimum adalah dengan jarak $1,25D$ dan panjang kolom $4B$
3. Semakin besar prosentase stabilisasi nilai *swelling* akan semakin menurun. Berdasarkan *flexible and rigid pavement structure* nilai *swelling* maksimum yang diijinkan sebesar 0,8% dan 1,2% sehingga yang memenuhi toleransi tersebut yaitu pada jarak ($1D$ dan panjang kolom $4B$) dan (jarak $1D$ dan panjang kolom $3B$).

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian dan dari hasil dan pembahasan ditemukan sejumlah kekurangan-kekurangan baik saat pelaksanaan penelitian maupun pada hasil yang didapatkan, sehingga diperlukan adanya perbaikan demi pengembangan penelitian selanjutnya. Oleh karena itu, saran-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian dengan metode DSM lebih lanjut sebagai berikut:

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh lama waktu perawatan/*curing* pada sampel tanah, sehingga diketahui lama waktu *curing* yang menghasilkan daya dukung optimum
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang variasi prosentase kadar kapur, sehingga dapat diketahui prosentase kadar kapur optimum untuk menghasilkan daya dukung optimum
3. Dipelukan boks yang lebih kaku dan kuat sehingga mampu untuk menahan beban yang diberikan sehingga tidak mengakami retak atau pecah akibat tidak kuat menahan beban yang terjadi.



DAFTAR PUSTAKA

- Ansorie, A. A. 2015. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Single Square Diameter 3 cm Terhadap Daya Dukung Tanah. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Apriyono, A. & Sumiyanto. 2012. Efektivitas Injeksi Larutan Kapur untuk Menurunkan Plastisitas Tanah Lempung sebagai Upaya Mengatasi Kerusakan Jalan Raya. *Dinamika Rekayasa*. 8 (1): ISSN 1858-3075
- Bowles, Joseph. 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Terjemahan Johan K Hainim Jakarta: Erlangga.
- Chen, F. H. 1975. *Foundaion on Expansive Soil*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. 1995. *Mekanika Tanah, Jilid I*. Terjemahan Noor E. & Indrasurya, B. M. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2005. *Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif Untuk Konstruksi Jalan*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- EuroSoilStab. 2002. *Design Guide Soft Soil Stabilization*. Project No. BE 96-3177, Ministry of Transport Public Works and Management
- Hakim, A. L. 2015. Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Panels Diameter 2 cm Terhadap Daya Dukung Tanah. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Hardiyatmo, H. 1992. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Harnaeni, R. S. 2012. Efektifitas Semen pada Atabilisasi Lemnpung dengan Kapur Akibat Percepatan Waktu Antara Pencampuran dan Pemadatan. *Symposium Nasional RAPI XI FT UMS*. ISSN: 412-9612
- Ingles, O. D., & Metcalf, J. B. (1974). *Soils Stabilization*. Sidney: Betterwood.
- Madhyannapu, Raja A. & Puppala, Anand J. 2014. Design and Construction Guidelines for Deep Soi Mixing to Stabilize Expansive Soils. . *Journal ASCE*. 04014051
- 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.
- Risman. 2011. Analisis Daya Dukung Tanah Lempung yang Distabilisasi dengan Kapur dan Pasir. *Wahana Teknik Sipil*. 16 (2): 58-67.
- Seed, H.B., Woodward R.J, & Lundgren R. 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal ASCE*. Soil Mechanics and Foundations Div., Vol.88
- Warsiti. 2009. Meningkatkan CBR dan Memperkecil Swelling Tanah Sub Grade dengan Metode Stabilisasi Tanah dan Kapur. *Jurnal Wahana Teknik Sipil*. 14 (1): 38-45.
- Zaika, Y & Suroso. 2014. Buku Ajar Mekanika Tanah II. Malang: Teknil Sipil Universitas Brawijaya.



LAMPIRAN

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

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

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

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

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

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

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

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

Sumber: SNI 1964 (2008:4)

Lampiran 4. Analisa Saringan dan Hydrometer

Analisa Saringan (*Grain Size*)

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

Analisa Hydrometer

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

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

Pengujian Batas Plastis Tanah

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

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

Nilai indeks plastisitas tanah (PI) = LL – PL

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

Pengujian Batas Susut Tanah

Nomor Cawan		1
Berat Cetakan (gr)		19.17
Berat Cawan + Tanah Basah (gr)		56.82
Berat Cawan + Tanah Kering (gr)		42.59
Berat Tanah Basah (m_1) (gr)		37.65
Berat Air (gr)		14.23
Berat Tanah Kering (m_2) (gr)		23.42
Volume Tanah Basah (V) (ml)		25
Volume Tanah Kering (V_s) (ml)		14
Kadar Air (w) (%)		60.76
$SL = (w - ((V - V_s) / m_2)) * 100\%$		13.79

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

Rekapitulasi Batas-batas *Atterberg* :

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

Lampiran 6. Pemeriksaan Pemadatan Standar Laboratorium Tanah Asli

Diketahui:

Berat cetakan = 4600 gram
 Diameter cetakan = 15,5 cm
 Tinggi cetakan = 11 cm

Kadar air:

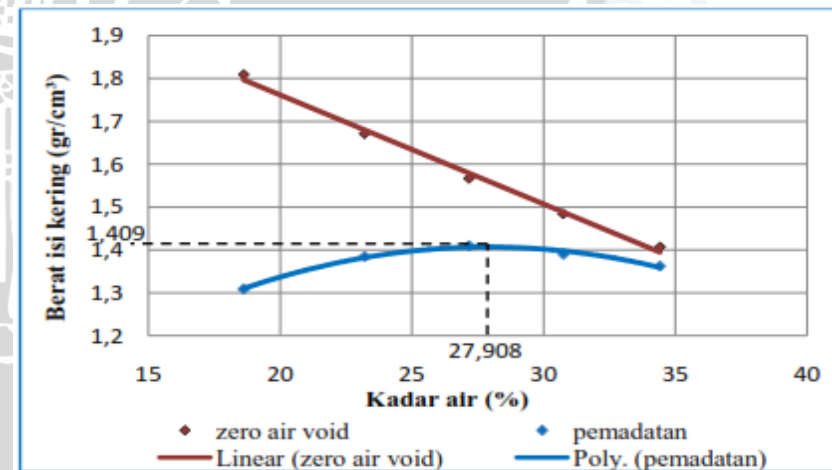
Penambahan Air	ml	400			550			700			850			1000		
		Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah
berat cawan	gr	4,00	4,00	4,00	3,90	4,00	4,00	4,00	4,10	8,20	4,00	7,80	4,00	3,90	4,10	8,10
berat tanah basah + cawan	gr	18,10	14,70	18,10	21,30	26,90	20,70	30,60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

Berat isi:

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

Zero Air Void:

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



Perhitungan berat isi kering maksimum:

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

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

$$x = 27,908$$

Sehingga,

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

$$y = 1,4073$$

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

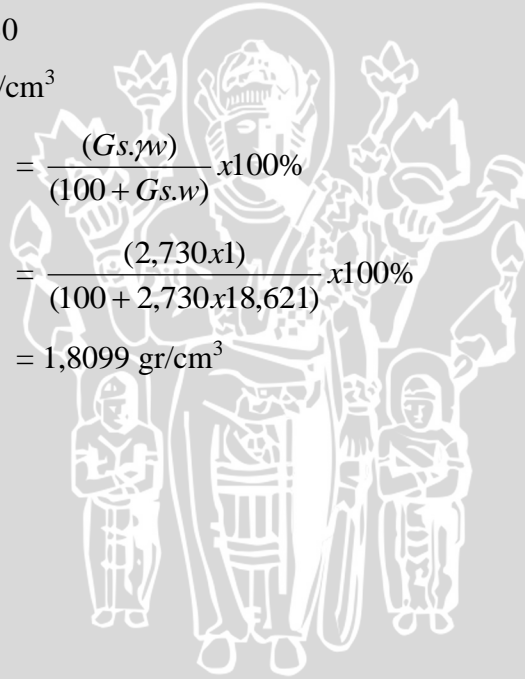
Perhitungan zero air void:

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

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

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

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



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

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

Kadar air :

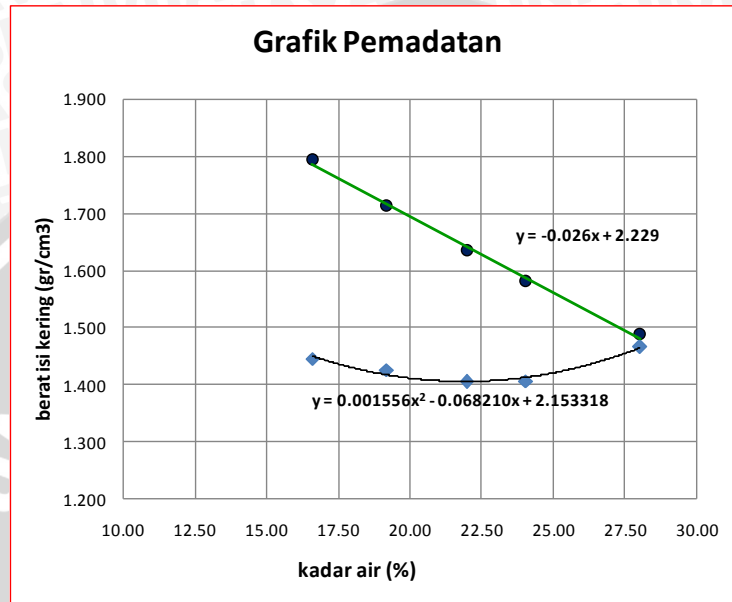
Penambahan Air	ml	400			500			600			700			900		
		Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah	Atas	Tengah	Bawah
berat cawan	gr	5.47	5.72	6.22	5.55	5.45	5.56	4.20	5.94	5.70	5.87	6.07	4.22	4.04	4.14	4.16
berat tanah basah + cawan	gr	26.54	33.37	27.83	31.58	24.61	33.55	33.25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

Berat isi :

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

Zero air void :

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

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

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur

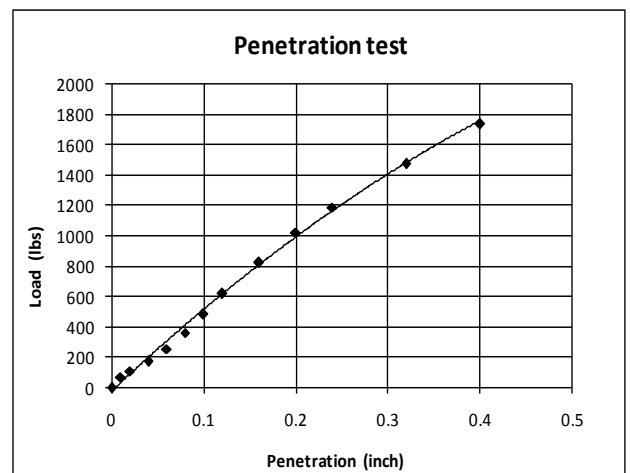
Penambahan air = 400 ml

Kadar air = 16,60 %

Kepadatan isi kering = 1,445 gr/cm³

Penetration test

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



CBR Value

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

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur

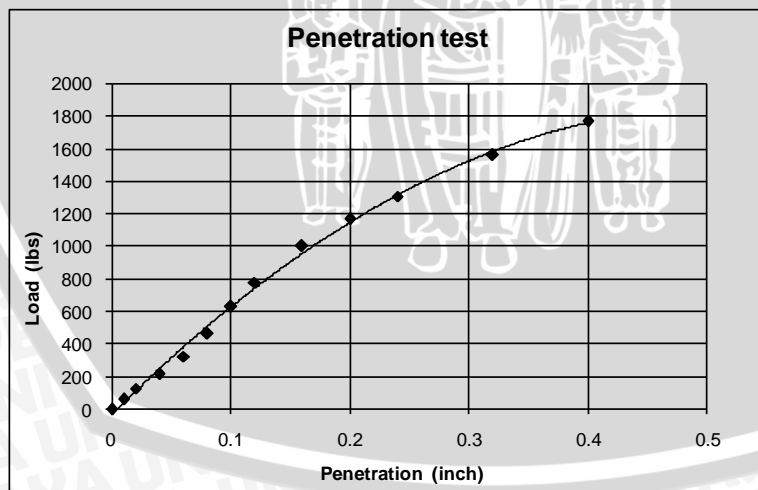
Penambahan air = 500 ml

Kadar air = 19,20 %

Kepadatan isi kering = 1,426 gr/cm³

Penetration test

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

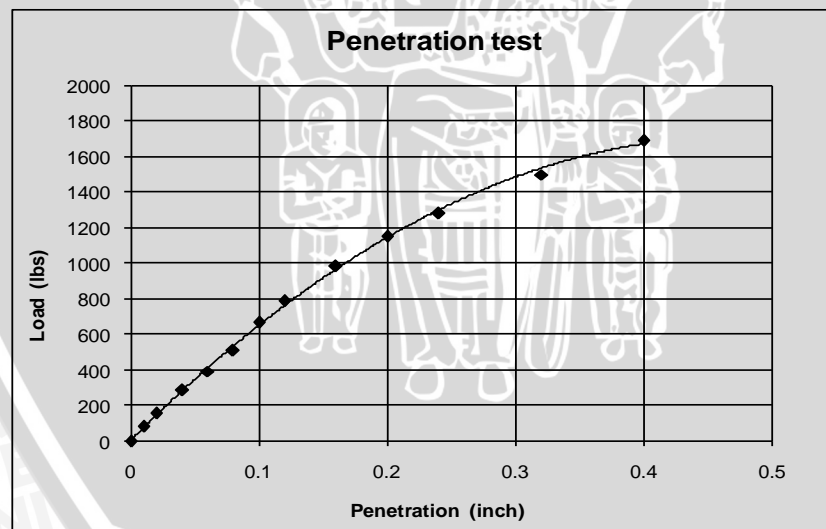
**CBR Value**

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

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

Penetration test

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



CBR Value

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

Jenis tanah = Tanah lempung ekspansif + 10% kapur

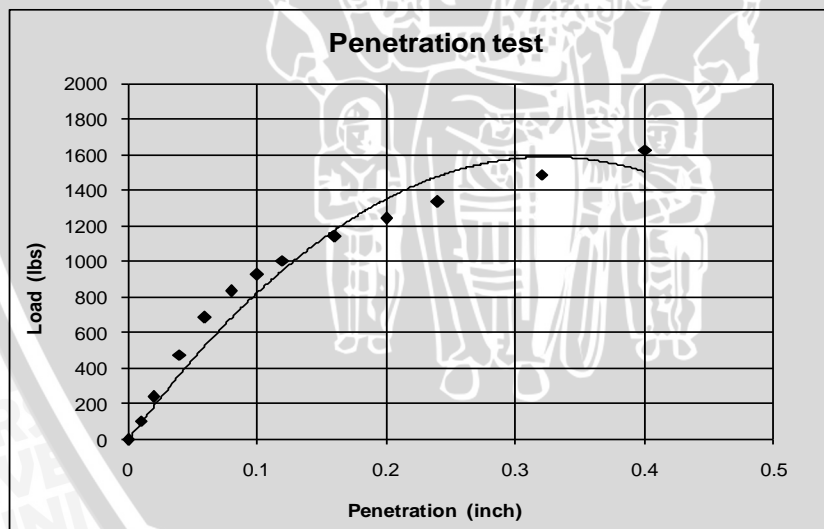
Penambahan air = 700 ml

Kadar air = 24,10 %

Kepadatan isi kering = 1,406 gr/cm³

Penetration test

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



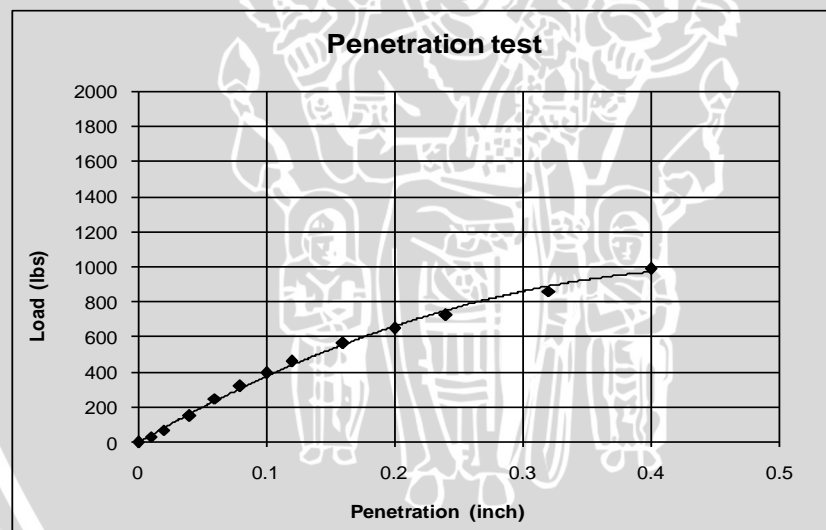
CBR Value

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

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

Penetration test

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



CBR Value

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

Tabel Rekapitulasi Nilai CBR Tanah Stabilisasi

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

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

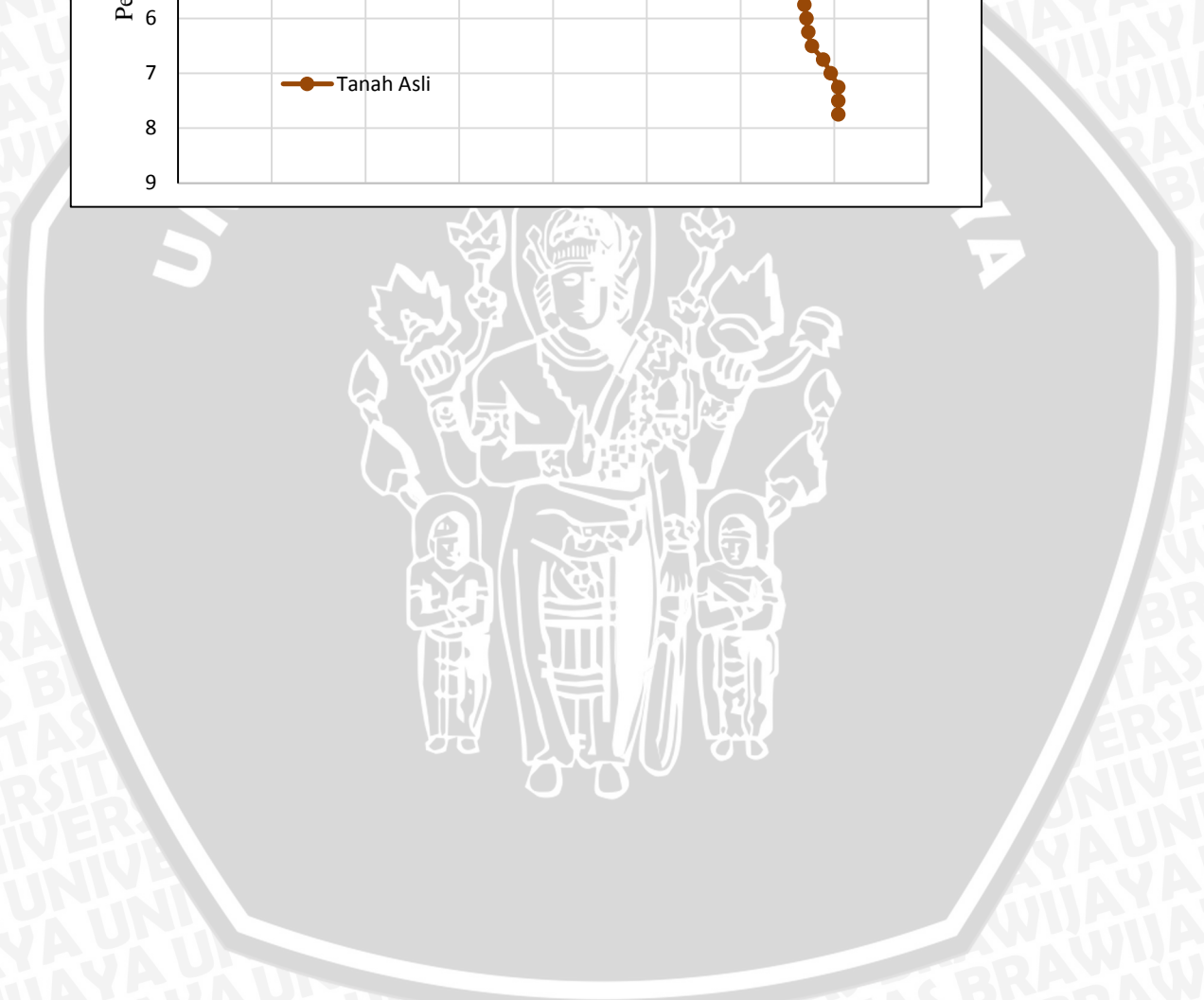
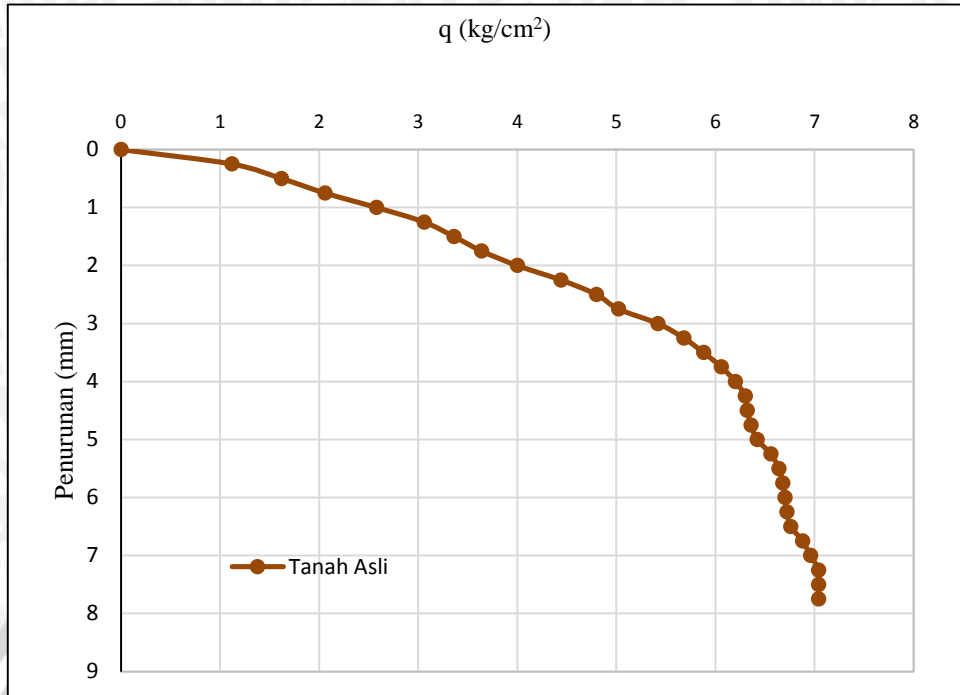
Ring No.		I	II	III	IV
Mass of wet soil + ring	gram	35.95	35.34	35.87	35.18
Mass of dry soil + ring	gram	32.05	31.62	31.98	31.35
Mass of ring	gram	18.06	18.06	18.06	17.84
Diameter ring	cm	2.3	2.3	2.3	2.3
Height of ring	cm	2.60	2.60	2.60	2.55
Volume of ring	cm ³	10.80	10.80	10.80	10.59
Mass of wet soil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

Lampiran 10. Hasil Uji Pembebanan (Load Test)

- Uji Beban untuk Tanah Asli

Faktor kalibrasi : 0,005

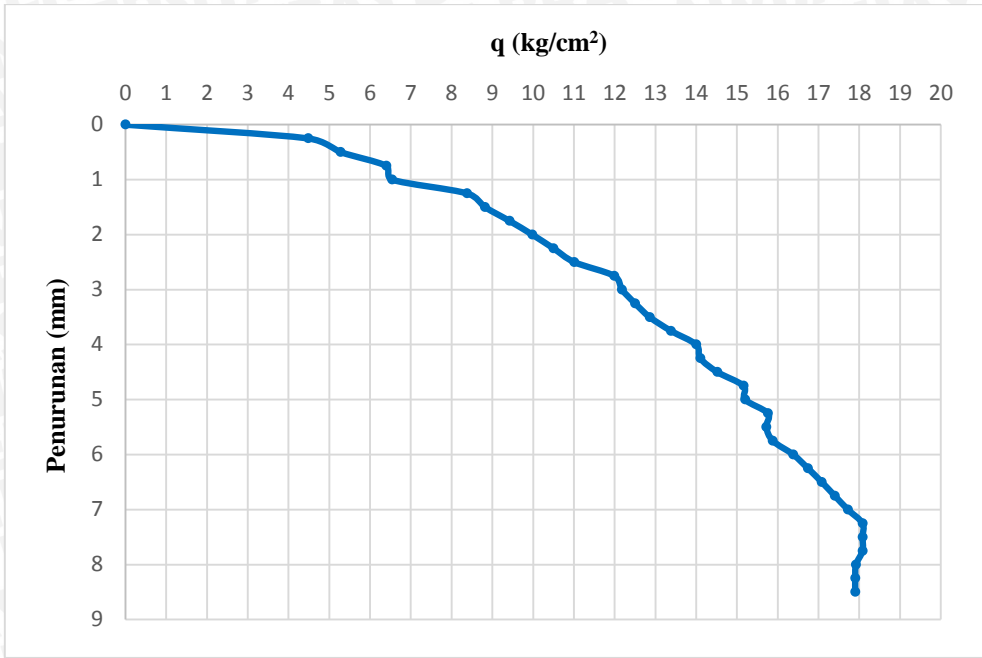
Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s)	Beban (P)	Luas Pelat (A)	Daya Dukung (q)
		mm	kg	cm ²	kg/cm ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
4500	0	0	0	25	0
4450	50	0.25	28	25	1.12
4400	100	0.5	40.5	25	1.62
4350	150	0.75	51.5	25	2.06
4300	200	1	64.5	25	2.58
4250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



Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1D$; $Df = 2B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

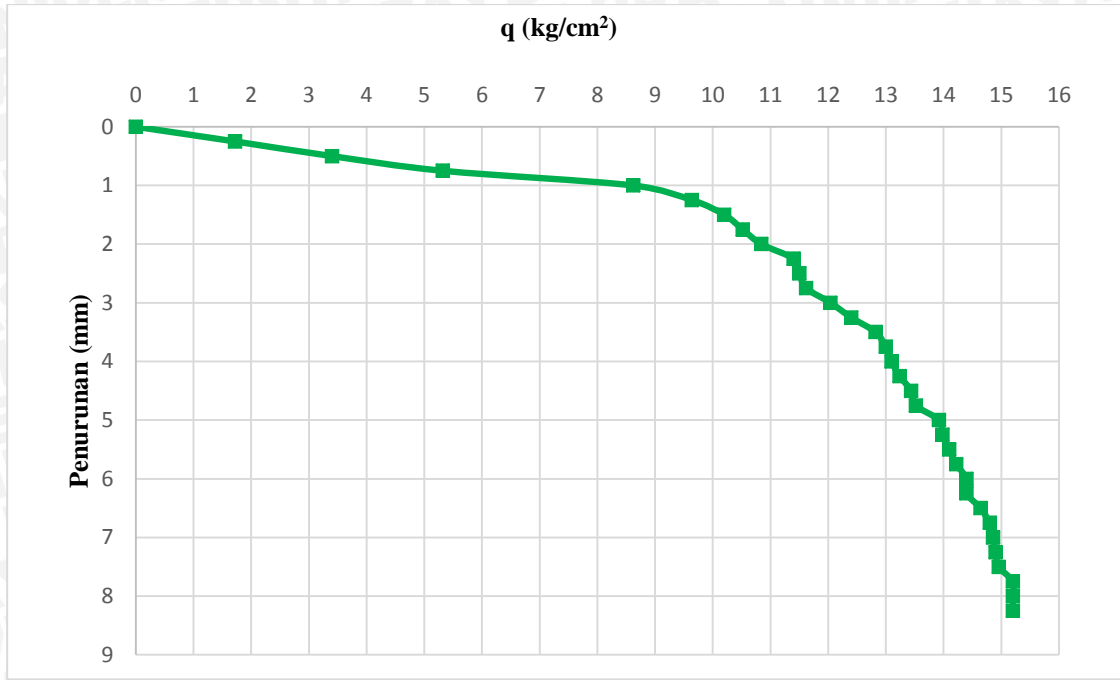
Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s)	Beban (P)	Luas Pelat (A)	Daya Dukung (q)
		mm	kg	cm ²	kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
2550	0	0	0	25	0
2500	50	0,25	112	25	4,48
2450	100	0,5	132	25	5,28
2400	150	0,75	160	25	6,4
2350	200	1	163,5	25	6,54
2300	250	1,25	209,5	25	8,38
2250	300	1,5	220,5	25	8,82
2200	350	1,75	235,5	25	9,42
2150	400	2	249,5	25	9,98
2100	450	2,25	262,5	25	10,5
2050	500	2,5	275,3	25	11,012
2000	550	2,75	299,7	25	11,988
1950	600	3	304,5	25	12,18
1900	650	3,25	312,5	25	12,5
1850	700	3,5	321,5	25	12,86
1800	750	3,75	334,5	25	13,38
1750	800	4	350	25	14
1700	850	4,25	352,5	25	14,1
1650	900	4,5	363	25	14,52
1600	950	4,75	379	25	15,16
1550	1000	5	380	25	15,2
1500	1050	5,25	394	25	15,76
1450	1100	5,5	393	25	15,72
1400	1150	5,75	397	25	15,88
1350	1200	6	409,5	25	16,38
1300	1250	6,25	418,5	25	16,74
1250	1300	6,5	427	25	17,08
1200	1350	6,75	435	25	17,4
1150	1400	7	443	25	17,72
1100	1450	7,25	457	25	18,08
1050	1500	7,5	449,5	25	18,08
1000	1550	7,75	448	25	18,08
950	1600	8	448	25	17,92
900	1650	8,25	447,5	25	17,9
850	1700	8,5	447,5	25	17,9



Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1.25D$; $Df = 2B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1400	0	0	0	25	0
1350	50	0,25	43	25	1,72
1300	100	0,5	85	25	3,4
1250	150	0,75	133	25	5,32
1200	200	1	215,5	25	8,62
1150	250	1,25	241	25	9,64
1100	300	1,5	247	25	9,88
1050	350	1,75	263	25	10,52
1000	400	2	271	25	10,84
950	450	2,25	275	25	11
900	500	2,5	289	25	11,56
850	550	2,75	290,5	25	11,62
800	600	3	301	25	12,04
750	650	3,25	310	25	12,4
700	700	3,5	320,5	25	12,82
650	750	3,75	325	25	13
600	800	4	327,5	25	13,1
550	850	4,25	331	25	13,24
500	900	4,5	336	25	13,44
450	950	4,75	338	25	13,52
400	1000	5	348	25	13,92
350	1050	5,25	349,5	25	13,98
300	1100	5,5	352,5	25	14,1
250	1150	5,75	355,5	25	14,22
200	1200	6	360	25	14,4
150	1250	6,25	360	25	14,4
100	1300	6,5	366	25	14,64
50	1350	6,75	366	25	14,64
0	1400	7	371,5	25	14,86
-50	1450	7,25	372,5	25	14,9
-100	1500	7,5	374	25	14,96
-150	1550	7,75	380	25	15,2
-200	1600	8	380	25	15,2
-250	1650	8,25	380	25	15,2

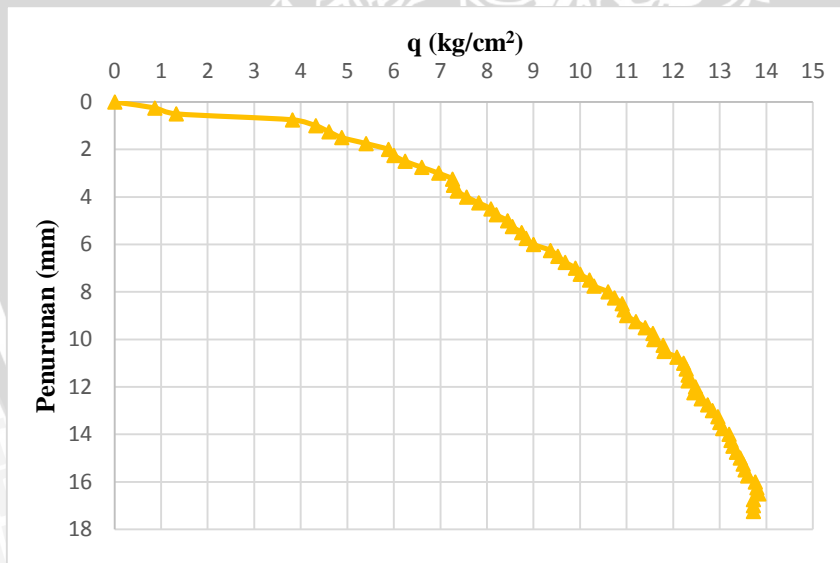


Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi L=1.5D ; Df = 2B

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
850	0	0	0	25	0
800	50	0,25	21,5	25	0,86
750	100	0,5	33	25	1,32
700	150	0,75	95,5	25	3,82
650	200	1	108	25	4,32
600	250	1,25	115	25	4,6
550	300	1,5	122	25	4,88
500	350	1,75	135	25	5,4
450	400	2	147	25	5,88
400	450	2,25	150	25	6
350	500	2,5	156	25	6,24
300	550	2,75	165	25	6,6
250	600	3	174	25	6,96
200	650	3,25	181,5	25	7,26
150	700	3,5	182	25	7,28
100	750	3,75	184	25	7,36
50	800	4	189	25	7,56
0	850	4,25	195,5	25	7,82
-50	900	4,5	202	25	8,08
-100	950	4,75	205	25	8,2
-150	1000	5	211	25	8,44
-200	1050	5,25	213,5	25	8,54
-250	1100	5,5	218,5	25	8,74
-300	1150	5,75	221	25	8,84
-350	1200	6	225	25	9
-400	1250	6,25	234	25	9,36
-450	1300	6,5	238	25	9,52
-500	1350	6,75	242	25	9,68
-550	1400	7	247,5	25	9,9
-600	1450	7,25	250	25	10
-650	1500	7,5	250,5	25	10,02
-700	1550	7,75	257,5	25	10,3
-750	1600	8	265	25	10,6
-800	1650	8,25	265,5	25	10,62
-850	1700	8,5	266	25	10,64
-900	1750	8,75	273,5	25	10,94
-950	1800	9	275	25	11
-1000	1850	9,25	280	25	11,2
-1050	1900	9,5	289	25	11,56
-1100	1950	9,75	289	25	11,56
-1150	2000	10	289,5	25	11,58
-1200	2050	10,25	294,5	25	11,78
-1250	2100	10,5	295	25	11,8
-1300	2150	10,75	302	25	12,08
-1350	2200	11	305,5	25	12,22
-1400	2250	11,25	307	25	12,28

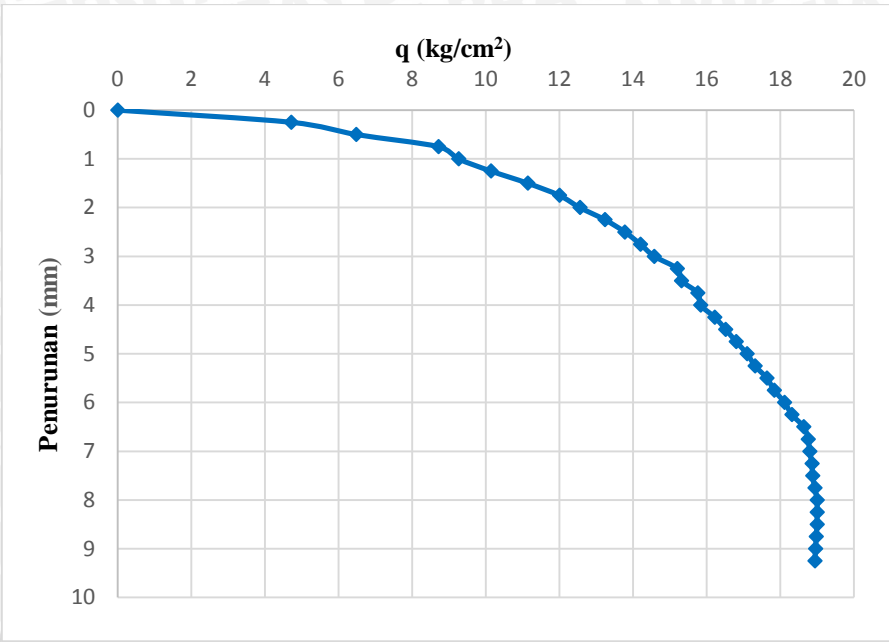
-1450	2300	11,5	308	25	12,32
-1500	2350	11,75	308	25	12,32
-1550	2400	12	312	25	12,48
-1600	2450	12,25	311	25	12,44
-1650	2500	12,5	315	25	12,6
-1700	2550	12,75	321	25	12,84
-1750	2600	13	318,5	25	12,74
-1800	2650	13,25	324	25	12,96
-1850	2700	13,5	323	25	12,92
-1900	2750	13,75	326,5	25	13,06
-1950	2800	14	330	25	13,2
-2000	2850	14,25	330,5	25	13,22
-2050	2900	14,5	332	25	13,28
-2100	2950	14,75	334	25	13,36
-2150	3000	15	341	25	13,64
-2200	3050	15,25	336	25	13,44
-2250	3100	15,5	333	25	13,32
-2300	3150	15,75	336	25	13,44
-2350	3200	16	342	25	13,68
-2400	3250	16,25	343	25	13,72
-2450	3300	16,5	346	25	13,84
-2500	3350	16,75	340	25	13,6
-2550	3400	17	340	25	13,6
-2600	3450	17,25	340	25	13,6



Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi L=1D ; Df = 3B

Faktor kalibrasi alat = 0.005

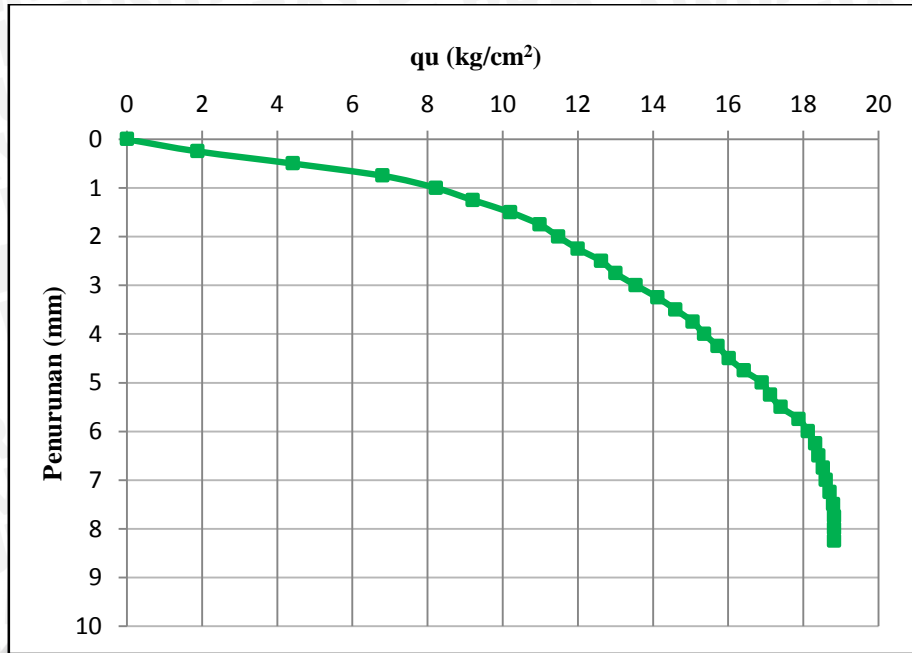
Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/cm ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
300	0	0	0	25	0
250	50	0.25	118	25	4.72
200	100	0.5	162	25	6.48
150	150	0.75	218	25	8.72
100	200	1	231.5	25	9.26
50	250	1.25	253.5	25	10.14
0	300	1.5	278.5	25	11.14
-50	350	1.75	300	25	12
-100	400	2	314	25	12.56
-150	450	2.25	331	25	13.24
-200	500	2.5	344.5	25	13.78
-250	550	2.75	355	25	14.2
-300	600	3	364.5	25	14.58
-350	650	3.25	380	25	15.2
-400	700	3.5	383	25	15.32
-450	750	3.75	394	25	15.76
-500	800	4	396	25	15.84
-550	850	4.25	405.5	25	16.22
-600	900	4.5	413	25	16.52
-650	950	4.75	420	25	16.8
-700	1000	5	427.5	25	17.1
-750	1050	5.25	433	25	17.32
-800	1100	5.5	441	25	17.64
-850	1150	5.75	446	25	17.84
-900	1200	6	453	25	18.12
-950	1250	6.25	458	25	18.32
-1000	1300	6.5	466	25	18.64
-1050	1350	6.75	469	25	18.76
-1100	1400	7	470	25	18.8
-1150	1450	7.25	471.5	25	18.86
-1200	1500	7.5	472	25	18.88
-1250	1550	7.75	473.5	25	18.94
-1300	1600	8	475	25	19
-1350	1650	8.25	475	25	19
-1400	1700	8.5	475	25	19
-1450	1750	8.75	474.5	25	18.98
-1500	1800	9	474	25	18.96
-1550	1850	9.25	473.5	25	18.94



Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1,25D$; $D_f = 3B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
350	0	0	0	25	0
300	50	0,25	47	25	1,88
250	100	0,5	110,5	25	4,42
200	150	0,75	170	25	6,8
150	200	1	205,5	25	8,22
100	250	1,25	230	25	9,2
50	300	1,5	255	25	10,2
0	350	1,75	274,5	25	10,98
-50	400	2	287	25	11,48
-100	450	2,25	300	25	12
-150	500	2,5	315,5	25	12,62
-200	550	2,75	325	25	13
-250	600	3	338,5	25	13,54
-300	650	3,25	353	25	14,12
-350	700	3,5	365	25	14,6
-400	750	3,75	376,5	25	15,06
-450	800	4	384	25	15,36
-500	850	4,25	393	25	15,72
-550	900	4,5	400,5	25	16,02
-600	950	4,75	410,5	25	16,42
-650	1000	5	422,5	25	16,9
-700	1050	5,25	428	25	17,12
-750	1100	5,5	435	25	17,4
-800	1150	5,75	447	25	17,88
-850	1200	6	453	25	18,12
-900	1250	6,25	458	25	18,32
-950	1300	6,5	460	25	18,4
-1000	1350	6,75	463	25	18,52
-1050	1400	7	465	25	18,6
-1100	1450	7,25	467,5	25	18,7
-1150	1500	7,5	470	25	18,8
-1200	1550	7,75	470,5	25	18,82
-1250	1600	8	470,5	25	18,82
-1300	1650	8,25	470,5	25	18,82

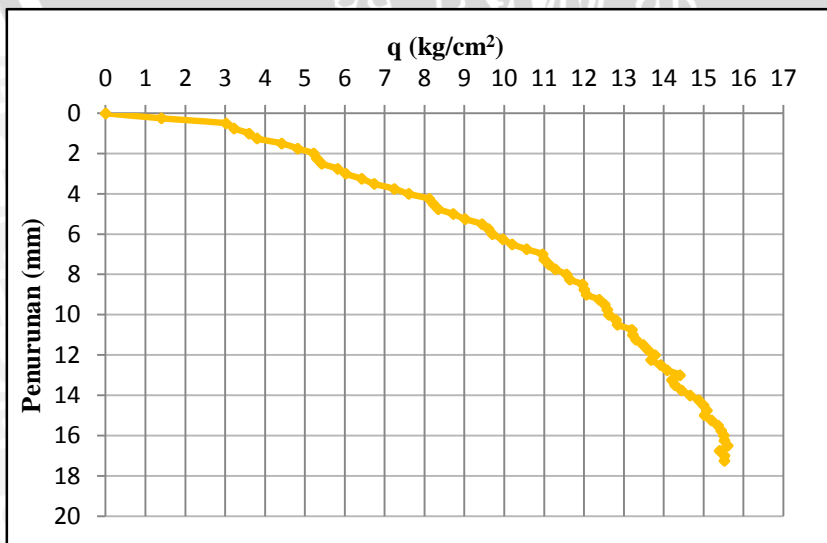


Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1,5D$; $Df = 3B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1750	0	0	0	25	0
1700	50	0,25	35	25	1,4
1650	100	0,5	75,5	25	3,02
1600	150	0,75	80,5	25	3,22
1550	200	1	90	25	3,6
1500	250	1,25	95	25	3,8
1450	300	1,5	110,5	25	4,42
1400	350	1,75	120,5	25	4,82
1350	400	2	130,5	25	5,22
1300	450	2,25	132,5	25	5,3
1250	500	2,5	135,5	25	5,42
1200	550	2,75	145,5	25	5,82
1150	600	3	150,5	25	6,02
1100	650	3,25	160,5	25	6,42
1050	700	3,5	168,5	25	6,74
1000	750	3,75	181	25	7,24
950	800	4	190	25	7,6
900	850	4,25	203	25	8,12
850	900	4,5	205,5	25	8,22
800	950	4,75	208,5	25	8,34
750	1000	5	218	25	8,72
700	1050	5,25	225,5	25	9,02
650	1100	5,5	236	25	9,44
600	1150	5,75	240	25	9,6
550	1200	6	242,5	25	9,7
500	1250	6,25	249	25	9,96
450	1300	6,5	255	25	10,2
400	1350	6,75	264	25	10,56
350	1400	7	274	25	10,96
300	1450	7,25	275	25	11
250	1500	7,5	278	25	11,12
200	1550	7,75	282	25	11,28
150	1600	8	289	25	11,56
100	1650	8,25	291	25	11,64
50	1700	8,5	299	25	11,96
0	1750	8,75	300	25	12
-50	1800	9	301,5	25	12,06
-100	1850	9,25	309,5	25	12,38
-150	1900	9,5	313	25	12,52

-200	1950	9,75	314,5	25	12,58
-250	2000	10	315,5	25	12,62
-300	2050	10,25	320	25	12,8
-350	2100	10,5	321	25	12,84
-400	2150	10,75	330	25	13,2
-450	2200	11	330,5	25	13,22
-500	2250	11,25	332,5	25	13,3
-550	2300	11,5	337	25	13,48
-600	2350	11,75	340	25	13,6
-650	2400	12	344,5	25	13,78
-700	2450	12,25	342	25	13,68
-750	2500	12,5	348	25	13,92
-800	2550	12,75	352	25	14,08
-850	2600	13	360	25	14,4
-900	2650	13,25	355	25	14,2
-950	2700	13,5	357	25	14,28
-1000	2750	13,75	361	25	14,44
-1050	2800	14	366,5	25	14,66
-1100	2850	14,25	372	25	14,88
-1150	2900	14,5	375	25	15
-1200	2950	14,75	377	25	15,08
-1250	3000	15	375,5	25	15,02
-1300	3050	15,25	380	25	15,2
-1350	3100	15,5	384	25	15,36
-1400	3150	15,75	386	25	15,44
-1450	3200	16	387,5	25	15,5
-1500	3250	16,25	388	25	15,52
-1550	3300	16,5	390	25	15,6
-1600	3350	16,75	385	25	15,4
-1650	3400	17	388	25	15,52
-1700	3450	17,25	388	25	15,52

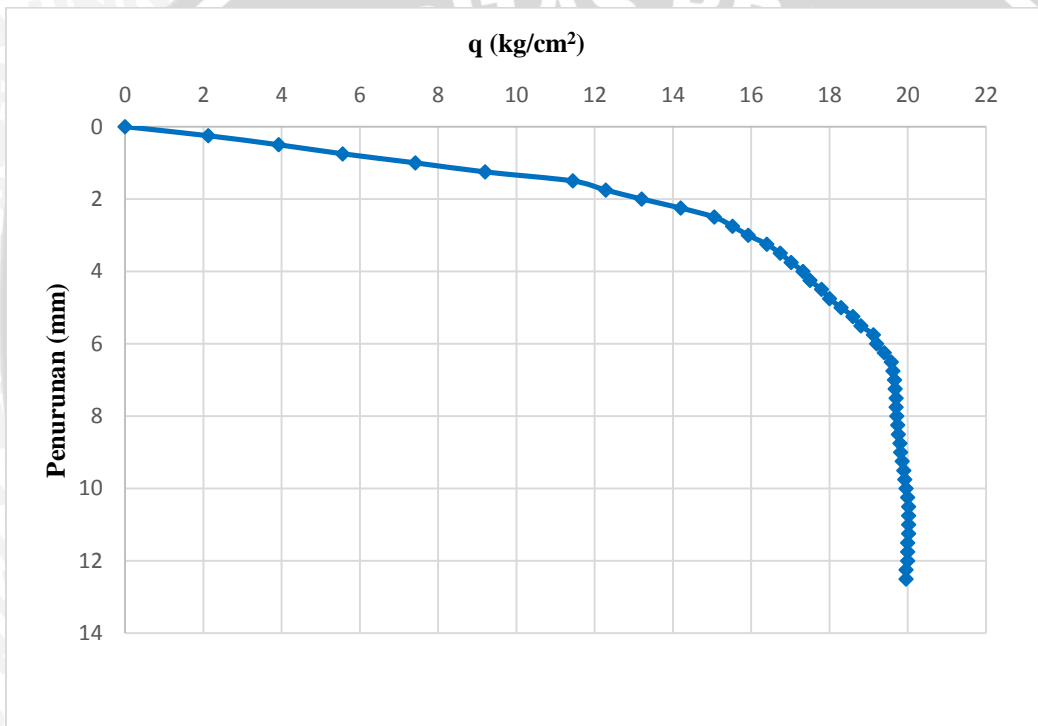


Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi L=1D ; Df = 4B

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/cm ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
600	0	0	0	25	0
550	50	0.25	63	25	2.52
500	100	0.5	91	25	3.64
450	150	0.75	110.5	25	4.42
400	200	1	135	25	5.4
350	250	1.25	159	25	6.36
300	300	1.5	182	25	7.28
250	350	1.75	208.5	25	8.34
200	400	2	236	25	9.44
150	450	2.25	256	25	10.24
100	500	2.5	283	25	11.32
50	550	2.75	304	25	12.16
0	600	3	329	25	13.16
-50	650	3.25	343	25	13.72
-100	700	3.5	369	25	14.76
-150	750	3.75	381	25	15.24
-200	800	4	391	25	15.64
-250	850	4.25	398	25	15.92
-300	900	4.5	408.5	25	16.34
-350	950	4.75	423	25	16.92
-400	1000	5	434	25	17.36
-450	1050	5.25	445	25	17.8
-500	1100	5.5	453	25	18.12
-550	1150	5.75	464	25	18.56
-600	1200	6	472.5	25	18.9
-650	1250	6.25	483	25	19.32
-700	1300	6.5	489.5	25	19.58
-750	1350	6.75	490.5	25	19.62
-800	1400	7	491.5	25	19.66
-850	1450	7.25	492	25	19.68
-900	1500	7.5	492.5	25	19.7
-950	1550	7.75	492.5	25	19.7
-1000	1600	8	493	25	19.72
-1050	1650	8.25	493.5	25	19.74
-1100	1700	8.5	494	25	19.76
-1150	1750	8.75	495	25	19.8
-1200	1800	9	495.5	25	19.82
-1250	1850	9.25	496.5	25	19.86
-1300	1900	9.5	497.5	25	19.9

-1350	1950	9.75	498	25	19.92
-1400	2000	10	499	25	19.96
-1450	2050	10.25	500	25	20
-1500	2100	10.5	500.5	25	20.02
-1550	2150	10.75	500.5	25	20.02
-1600	2200	11	500.5	25	20.02
-1650	2250	11.25	500.5	25	20.02
-1700	2300	11.5	500	25	20
-1750	2350	11.75	500	25	20
-1800	2400	12	500	25	20
-1850	2450	12.25	499	25	19.96
-1900	2500	12.5	499	25	19.96

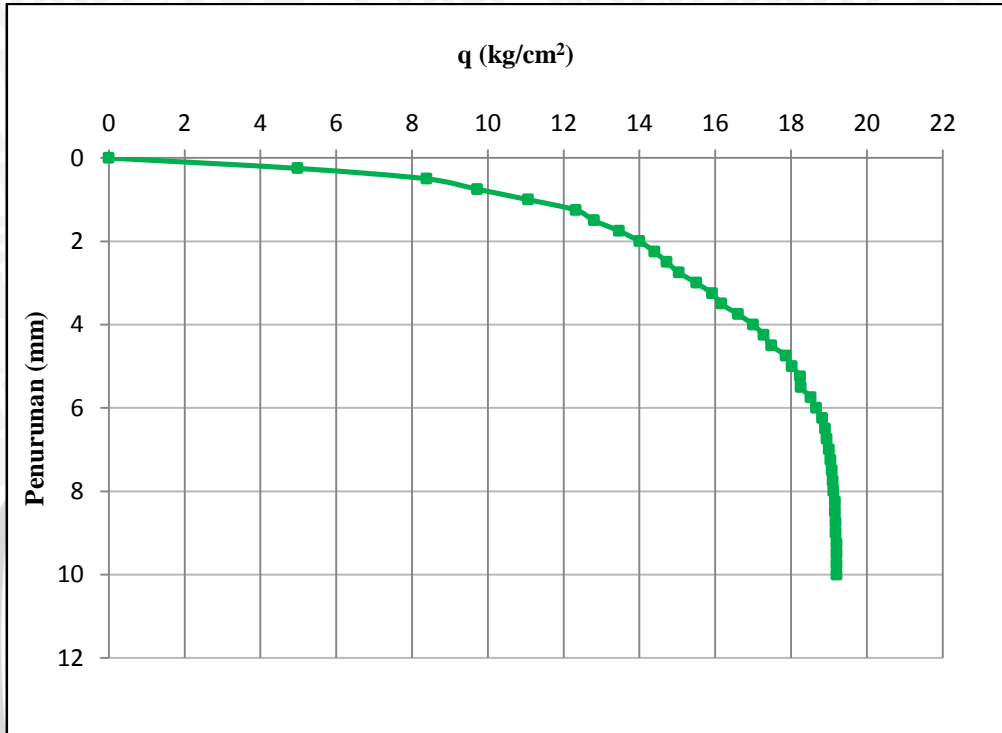


Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1,25D$; $Df = 4B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1200	0	0	0	25	0
1150	50	0,25	124,5	25	4,98
1100	100	0,5	209,5	25	8,38
1050	150	0,75	243	25	9,72
1000	200	1	276,5	25	11,06
950	250	1,25	308	25	12,32
900	300	1,5	320	25	12,8
850	350	1,75	336,5	25	13,46
800	400	2	350	25	14
750	450	2,25	360	25	14,4
700	500	2,5	368	25	14,72
650	550	2,75	376	25	15,04
600	600	3	387,5	25	15,5
550	650	3,25	398	25	15,92
500	700	3,5	404	25	16,16
450	750	3,75	415	25	16,6
400	800	4	425	25	17
350	850	4,25	432	25	17,28
300	900	4,5	437	25	17,48
250	950	4,75	446,5	25	17,86
200	1000	5	450,5	25	18,02
150	1050	5,25	456	25	18,24
100	1100	5,5	456,5	25	18,26
50	1150	5,75	463	25	18,52
0	1200	6	466,5	25	18,66
-50	1250	6,25	470,5	25	18,82
-100	1300	6,5	472,5	25	18,9
-150	1350	6,75	473,5	25	18,94
-200	1400	7	475	25	19
-250	1450	7,25	476	25	19,04
-300	1500	7,5	477	25	19,08
-350	1550	7,75	477,5	25	19,1
-400	1600	8	478	25	19,12
-450	1650	8,25	479	25	19,16
-500	1700	8,5	479	25	19,16
-550	1750	8,75	479,5	25	19,18
-600	1800	9	479,5	25	19,18
-650	1850	9,25	480	25	19,2
-700	1900	9,5	480	25	19,2

-750	1950	9,75	480	25	19,2
-800	2000	10	480	25	19,2



Hasil Uji Beban untuk Kolom Variasi $L=1,5D$; $Df = 4B$

Faktor kalibrasi alat = 0.005

Pembacaan LVDT	Interval (Δ)	Penurunan (s) mm	Beban (P) kg	Luas Pelat (A) cm ²	Daya Dukung (q) kg/m ²
A	$\Delta = A \pm 50$	$s = \Delta \times 0.005$	P	$A = 5 \times 5$	$q = P/A$
1750	0	0	0	25	0
1700	50	0,25	35	25	1,4
1650	100	0,5	63	25	2,52
1600	150	0,75	120,5	25	4,82
1550	200	1	132,5	25	5,3
1500	250	1,25	160	25	6,4
1450	300	1,5	165	25	6,6
1400	350	1,75	180	25	7,2
1350	400	2	193,5	25	7,74
1300	450	2,25	197,5	25	7,9
1250	500	2,5	205,5	25	8,22
1200	550	2,75	207	25	8,28
1150	600	3	210,5	25	8,42
1100	650	3,25	220,5	25	8,82
1050	700	3,5	222,5	25	8,9
1000	750	3,75	230	25	9,2
950	800	4	232,5	25	9,3
900	850	4,25	240,5	25	9,62
850	900	4,5	250	25	10
800	950	4,75	255,5	25	10,22
750	1000	5	262	25	10,48
700	1050	5,25	263,5	25	10,54
650	1100	5,5	280	25	11,2
600	1150	5,75	283	25	11,32
550	1200	6	285	25	11,4
500	1250	6,25	298,5	25	11,94
450	1300	6,5	300,5	25	12,02
400	1350	6,75	301,5	25	12,06
350	1400	7	302,5	25	12,1
300	1450	7,25	311	25	12,44
250	1500	7,5	322,5	25	12,9
200	1550	7,75	323,5	25	12,94
150	1600	8	327,5	25	13,1
100	1650	8,25	338	25	13,52
50	1700	8,5	342	25	13,68
0	1750	8,75	342	25	13,68
-50	1800	9	344	25	13,76
-100	1850	9,25	350	25	14
-150	1900	9,5	356	25	14,24

-200	1950	9,75	357,5	25	14,3
-250	2000	10	358	25	14,32
-300	2050	10,25	358,5	25	14,34
-350	2100	10,5	363	25	14,52
-400	2150	10,75	367	25	14,68
-450	2200	11	362,5	25	14,5
-500	2250	11,25	368	25	14,72
-550	2300	11,5	369	25	14,76
-600	2350	11,75	370	25	14,8
-650	2400	12	372	25	14,88
-700	2450	12,25	377	25	15,08
-750	2500	12,5	381,5	25	15,26
-800	2550	12,75	387	25	15,48
-850	2600	13	390,5	25	15,62
-900	2650	13,25	391,5	25	15,66
-950	2700	13,5	392	25	15,68
-1000	2750	13,75	392	25	15,68
-1050	2800	14	392,5	25	15,7
-1100	2850	14,25	394	25	15,76
-1150	2900	14,5	396	25	15,84
-1200	2950	14,75	397,5	25	15,9
-1250	3000	15	397,5	25	15,9
-1300	3050	15,25	400	25	16
-1350	3100	15,5	401	25	16,04
-1400	3150	15,75	404	25	16,16
-1450	3200	16	406	25	16,24
-1500	3250	16,25	406	25	16,24
-1550	3300	16,5	406	25	16,24

