

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH CAMPURAN KAPUR PADA

TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

TERHADAP NILAI CBR

Disusun Oleh:

CINDY RAHAYU

14-811-0009



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MEDAN AREA

MEDAN

2020

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 27/6/22

Access From (repository.uma.ac.id)27/6/22

HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 1 Oktober 2020



Cindy Rahayu
14.811.0009

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISA PENGARUH CAMPURAN KAPUR PADA
TANAH LEMPUNG EKSPANSIF
TERHADAP NILAI CBR

Disusun Oleh:

CINDY RAHAYU

14.811.0009

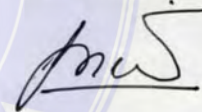
Disetujui Oleh:

Pembimbing I



Ir. H. Edy Hermanto, MT

Pembimbing II



Ir. Nuri Mahda Rangkuti, MT

Mengetahui:

Dekan


Dr. Ir. Dina Maizana, MT

Ka. Prodi Sipil


Ir. Nurmaidah, MT

5.2 Format Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah Mahasiswa

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : CINDY PAHAYU
NPM : 14.811.0009
Program Studi : TEKNIK SIPIL
Fakultas : TEKNIK
Jenis karya : ~~Tugas Akhir/Skripsi/Tesis~~

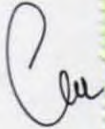
demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul : ANALISIS PENGARUH CAMPURAN KAPUR PADA TANAH LEMPUNG EKSPANSIF TERHADAP NILAI CBR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir/skripsi/tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : MEDAN

Pada tanggal : 1 OKTOBER 2020

Yang menyatakan


(CINDY PAHAYU)



ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang mengalami perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, perilakunya akan mengembang ketika kondisi tanah basah dan akan menyusut ketika kondisi tanah kering. Pengembangan dan penyusutan tanah ekspansif berdampak terhadap kerusakan bangunan ringan dan jalan raya. Kerusakan bangunan ringan yang terjadi retak-retak pada dinding dan lantai hingga pondasi, sedangkan pada jalan raya mulai retak memanjang hingga retak longitudinal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh campuran kapur pada tanah lempung ekspansif terhadap nilai CBRnya. Kapur umumnya berasal dari batu kapur (*limestone*) atau dolomite. Kapur telah dikenal sebagai salah satu bahan stabilisasi tanah yang baik, terutama bagi stabilisasi tanah lempung yang mempunyai sifat kembang-susut yang besar dan daya dukungnya yang rendah. Adanya unsur cation (Ca^{2+}) pada kapur dapat memberikan ikatan antar partikel yang lebih besar untuk menaikkan daya dukung tanah. Dari hasil analisis pengaruh campuran kapur pada tanah lempung ekspansif terhadap nilai CBR dapat disimpulkan bahwa nilai batas cair dan indeks plastisitas mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar kapur. Nilai batas cair menurun dari 47,11% menjadi 43,08% dan indeks plastisitas menurun dari 29,66% menjadi 24,13%. Kenaikan nilai CBR unsoaked tertinggi terjadi pada penambahan variasi campuran 8% kapur sebesar 13,99%, nilai ini memenuhi persyaratan CBR tanah dasar (*subgrade*) minimal 6%.

Kata kunci : Tanah Lempung, Kapur, CBR

ABSTRACT

The expansive clay is sil that experiencing volume changes due to the water content fluctuation, with characteristic it will swell when the soil condition is wet and shrink when dry. The swellings and shringking of expansive clay impact the damage of minor buildings and the highway. The damage of minor buildings thatoccurs cracks in walls and floors to the foundation, while on the highways experiencing elongated cracks to longitudinal cracks. The study purposes to find out how much effect of the lime mixture on expansive clay on their CBR values. Lime generally comes from limestone or dolomite. It has been recognized as a good soil stabilizer, especially for the stabilization of clay soils which have large fluctuations properties and low bearing capacity. Then, the presence of cation (Ca^+) elements in lime can provide greater bonds between particles to increase the bearing capacity of the soil. Furthermore, from the analysis of the effect of the lime mixture on expansive clay on CBR values, it can be concluded that the liquid limit value and the plasticity index decrease as increasing levels of lime. The liquid limit value decreased from 47.11% to 43.08% and the plasticity index decreased from 29.66% to 24.13%. the highest increase in unsoaked CBR value occurred in the addition of an 8% lime mixture variation of 13.99%, thus this value fulfills the CBR requirement of a minimum subgrade of 6%.

Keyword: Clays, Lime, CBR

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa dengan segala nikmat yang diturunkan seperti hujan kepada kita semua, sehingga kita selalu berbahagia, tercukupi segala kebutuhan hidup. Oleh karena ribuan nikmat yang tak bisa disebutkan itu akhirnya penulis mampu menyelesaikan Skripsi dengan judul “Analisa Pengaruh Campuran Kapur Pada Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Nilai CBR”.

Dalam proses penulisan Skripsi ini, penulis telah mendapatkan bimbingan dari berbagai pihak, baik berupa material, spiritual dan informasi. Oleh karena itu, sudah selayaknya penulis menyampaikan terima kasih kepada:

- Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc, selaku Rektor Universitas Medan Area.
- Ibu Dr. Grace Yuswita Harahap, ST, MT, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
- Ibu Ir. Nurmaidah, MT, Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area.
- Bapak Ir. H. Edy Hermanto, MT dan Ibu Ir. Nuril Mahda Rangkuti, MT, selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan saran dan masukan yang bermanfaat bagi penulis.
- Bapak dan Ibu Dosen tanpa terkecuali dan para staf Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

- Kepala Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatera Utara dan Asisten Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatera Utara yang telah membantu dalam penelitian dilaboratorium.
- Terima kasih kepada Ayahanda Hariono dan Ibunda tercinta Rasmianti, serta kepada adik yang memberi dorongan semangat dan kekuatan serta dorongan moril dan materil kepada saya.
- Seluruh teman-teman mahasiswa dan teman seperjuangan di Fakultas Teknik, khususnya untuk Program Studi Teknik Sipil Stambuk 2014.

Walaupun penulis sudah berusaha semaksimal mungkin, namun penulis juga menyadari kemungkinan terdapat kekurangan dan kesilapan. Kiranya skripsi ini dapat menambah pembendaharaan serta literature pada Jurusan Teknik Sipil dan menambah referensi pada jurusan Fakultas Teknik Sipil Universitas Medan Area. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna bagi kita semua.

Medan, Januari 2020

Hormat Saya,

CINDY RAHAYU
14.811.0009

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR NOTASI	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Maksud dan Tujuan	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tanah	5
2.2 Klasifikasi Tanah	6
2.2.1 Sistem Klasifikasi Unified	7
2.2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO	8
2.3 Tanah Lempung Ekspansif	9
2.4 Mineral Lempung	10
2.5 Kapur	11
2.6 Stabilisasi Tanah	13
2.6.1 Prinsip Dasar Perbaikan Tanah	16
2.6.2 Jenis Perbaikan Tanah	17
2.7 Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Kapur	19
2.7.1 Prinsip Teknis	19
2.7.2 Karakteristik Bahan Stabilizer	20
2.7.3 Kriteria Tanah	21

2.8 Kadar Air (<i>Water Content</i>)	22
2.9 Specific Gravity (<i>Gs</i>)	23
2.10 Batas – Batas Atterberg	23
2.10.1 Batas Cair (<i>Liquid Limit, LL</i>)	25
2.10.2 Batas Plastis (<i>Plastic Limit, PL</i>)	27
2.10.3 Indeks Plastisitas (<i>Plasticity Index</i>)	28
2.11 Pemasatan	28
2.11.1 Umum	28
2.11.2 Uji Proctor Standar (<i>Standard Proctor Test</i>)	31
2.11.3 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Hasil Pemasatan	35
2.12 CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	43
III. METODOLOGI PENELITIAN	47
3.1 Lokasi Penelitian	47
3.2 Bahan Uji	47
3.3 Pengujian Laboratorium	47
3.4 Bagan Alur	48
3.5 Metode Pengumpulan Data	49
3.6 Prosedur Penelitian	49
3.6.1 Uji Kadar Air (<i>Water Content</i>)	49
3.6.2 Uji Specific Gravity (<i>Gs</i>)	51
3.6.3 Uji Batas – Batas Atterberg	53
3.6.3.1 Uji Batas Cair (<i>Liquid Limit, LL</i>)	53
3.6.3.2 Uji Batas Plastis (<i>Plastic Limit, PL</i>)	57
3.6.4 Uji Pemasatan Standard Proctor	60
3.6.5 Uji CBR (<i>California Bearing Ratio</i>)	65
3.7 Penelitian pada Tanah yang Distabilisasi dengan Kapur ...	70
3.7.1 Pengujian Batas – Batas Atterberg	70
3.7.2 Pengujian Pemasatan (<i>Compaction Test</i>)	72
3.7.3 Percobaan CBR Labratorium	74

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1 Hasil Pengujian Pada Tanah Asli	77
4.2 Hasil Pengujian Tanah dengan Campuran Kapur	78
4.2.1 Hasil Pengujian Atterberg Limit	78
4.2.2 Hasil Pengujian Pematatan Standar Proctor	82
4.3.3 Hasil Penambahan Kapur Terhadap Nilai CBR	84
V. KESIMPULAN DAN SARAN	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA.....	88
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Batas – batas Atterberg	24
Gambar 2.2 Skema Alat Uji Batas Cair	25
Gambar 2.3 Kurva Untuk Penentuan Batas Cair Lempung	26
Gambar 2.4 Prinsip Pemadatan	30
Gambar 2.5 Alat Uji Standar Proctor	32
Gambar 2.6 Kurva Hubungan Kadar Air dan Berat Volume Kering	33
Gambar 2.7 Bentuk Umum Kurva Pemadatan Untuk Empat Jenis Tanah (ASTM D-698)	36
Gambar 2.8 Berbagai – macam Tipe Kurva Pemadatan yang Sering Dijumpai Pada Tanah	38
Gambar 2.9 Pengaruh Energi Pemadatan Pada Hasil Pemadatan Lempung Berpasir	39
Gambar 2.10 Pengaruh Pemadatan Pada Struktur Tanah Lempung (Menurut Lambe, 1958)	42
Gambar 2.11 Perubahan Permeabilitas Dengan Kadar Air yang diberikan (Lambe, 1958)	43
Gambar 2.12 Hasil Percobaan CBR	45

Gambar 3.1	Bagan Alir Penelitian	53
Gambar 3.2	Prinsip Pengujian Specific Gravity	54
Gambar 3.3	Skema Alat yang Dipergunakan	54
Gambar 3.4	Contoh Pengujian Batas Cair	57
Gambar 3.5	Penentuan Batas Cair	58
Gambar 3.6	Proses Penentuan Batas Plastis	63
Gambar 3.7	Peralatan Proctor (Yeop et al.2000)	63
Gambar 3.8	Langkah Proses Pemadatan (digambar ulang atas seizing Prof. Yeol, yeol et al. 2000)	65
Gambar 3.9	Kurva Pemadatan	67
Gambar 3.10	Tabung untuk Pengujian CBR (Yeol et al., 2000)	68
Gambar 3.11	Langkah Proses Pemadatan (Yeol et al., 2000)	68
Gambar 3.12	Skema Pengujian CBR di Laboratorium (Yeol et al., 2000) 69	
Gambar 3.13	Hubungan antara Penetrasi dan Gaya	71
Gambar 3.14	Grafik Hubungan antara Kadar Air dengan Pukulan pada Variasi Campuran 6% Kapur	73
Gambar 3.15	Grafik Hubungan antara Berat Isi Kering (γ_d) dengan Kadar Air Optimum pada Variasi 6% Kapur	76

Gambar 3.16	Grafik Hubungan antara Beban dan Penurunan pada 65 Tumbukan dengan Variasi 6% Kapur	76
Gambar 4.1	Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Nilai Batas Cair LL (%)	79
Gambar 4.2	Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Nilai Batas Plastis PL (%)	80
Gambar 4.3	Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Nilai Indeks Plastis PI (%)	81
Gambar 4.4	Pengaruh Penambahan Variasi Kapur Terhadap Nilai Berat Isi Kering γ_d Maksimum	83
Gambar 4.5	Pengaruh Penambahan Variasi Kapur Terhadap Nilai Berat Isi Kadar Air Maksimum	83
Gambar 4.6	Pengaruh Penambahan Variasi Kapur Terhadap Nilai CBR	85

DAFTAR NOTASI

G	= Kerikil (<i>gravel</i>)
S	= Pasir (<i>sand</i>)
C	= Lempung (<i>clay</i>)
M	= Lanau (<i>silt</i>)
O	= Lanau atau Lempung Organik (<i>organic silt or clay</i>)
Pt	= Tanah Gambut dan Tanah Organik Tinggi (<i>peat and highly organic soil</i>)
W	= Gradasi Baik (<i>well-graded</i>)
P	= Gradasi Buruk (<i>poorly-graded</i>)
H	= Plastisitas Tinggi (<i>high-plasticity</i>)
L	= Plastisitas Rendah (<i>low-plasticity</i>)
GI	= Indeks Kelompok (<i>group index</i>)
F	= Persen Butiran Lolos Saringan no. 200 (0,075)
LL	= Batas Cair
PL	= Batas Plastis
PI	= Indeks Plastis
Wc	= Kadar Air (<i>water content</i>)
Ww	= Berat Air
Ws	= Berat Tanah dalam Keadaan Kering Oven (<i>Oven dry</i>)
Gs	= Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)
γ_d	= Berat Volume Butiran Padat
γ_w	= Berat Volume Air
I_F	= Indeks Aliran
w_I	= Kadar Air (%) pada N_I pukulan

- w_2 = Kadar Air (%) pada N_2 pukulan
- N = Jumlah Pukulan
- w_N = Kadar Air
- $tg\beta$ = 0,121 (tapi $tg\beta$ tidak sama dengan 0,121 untuk semua jenis tanah)
- γ_{zav} = Berat Volume pada Kondisi *zero air void*
- e = Angka Pori
- N_b = Jumlah Pukulan per lapisan
- N_l = Jumlah Lapisan
- W = Berat Pemukul
- H = Tinggi Jatuh Pemukul
- V = Volume *mould*
- P_T = Beban Percobaan (*test load*)
- P_S = Beban Standar (*standard load*)
- γ_{wet} = Berat Volume Tanah Kondisi Basah (Berat tanah dibagi volumenya)

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai Khas Berat Jenis Gs Partikel Tanah	23
Tabel 2.2 Harga – Harga $(N/25)^{0,121}$	27
Tabel 2.3 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah (Jumikis,1962)	28
Tabel 2.4 Hitungan Energi Pemadatan	40
Tabel 2.5 Beban Standar yang Dipakai Untuk Percobaan CBR ...	45
Tabel 3.1 Data Percobaan Penentuan Kadar Air	50
Tabel 3.2 Data Percobaan Penentuan Specific Gravity.....	53
Tabel 3.3 Penentuan Kadar Air pada Batas Cair	56
Tabel 3.4 Contoh Penentuan Kadar Air pada Batas Plastis (PL) ..	59
Tabel 3.5 Hasil Pengujian Pemadatan Standar Proctor	64
Tabel 3.6 Hasil Pengujian CBR	69
Tabel 3.7 Hasil Pengujian Batas Cair pada Penambahan Kapur 10%	70
Tabel 3.8 Hasil Pengujian Batas Plastis pada Penambahan Kapur 10%	71
Tabel 3.9 Hasil Penelitian Batas Cair dan Batas Plastis Tanah Setelah Distabilisasi Dengan Kapur	72
Tabel 3.10 Hasil Pengujian Proctor Standar dengan Variasi Campuran 10% Kapur	72
Tabel 3.11 Hasil Penelitian Standar Proctor Terhadap Berbagai	

Variasi Penambahan Campuran Kapur	74
Tabel 3.12 Hasil Pengujian CBR Laboratorium dengan Variasi 10% Kapur	75
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tanah Asli	77
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Atterberg Limit	78
Tabel 4.3 Korelasi Indeks Uji dengan Tingkat Pengembangan Menurut Holtz	82
Tabel 4.4 Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Nilai CBR	84



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah berguna sebagai bahan bangunan pada berbagai macam pekerjaan teknik sipil, di samping itu tanah juga berfungsi sebagai sebagai pendukung pondasi dari bangunan.

Tanah yang terdapat pada wilayah Tanjung Selamat, Medan ini merupakan tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang mengalami perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, perilakunya akan mengembang ketika kondisi tanah basah dan akan menyusut ketika kondisi tanah kering. Tanah ekspansif banyak didominasi oleh tanah berbutir halus jenis lempung atau lanau.

Pengembangan dan penyusutan tanah ekspansif berdampak terhadap kerusakan bangunan ringan dan jalan raya. Kerusakan bangunan ringan yang terjadi retak-retak pada dinding dan lantai hingga pondasi, sedangkan pada jalan raya mulai retak memanjang hingga retak longitudinal.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, perbaikan kualitas dari tanah lempung ekspansif dapat diperbaiki melalui penambahan bahan *additive*. Bahan *additive* yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan campuran batu kapur (*limestone*). (Ranggaesa R.A)

Kapur merupakan salah satu material untuk pembangunan yang telah banyak dipakai oleh manusia. Sejak lama campuran lempung-kapur telah banyak dipakai sebagai bahan bangunan. Kapur tersebut umumnya berasal dari batukapur (*limestone*) atau dolomite. Stabilisasi tanah dengan kapur pada dasarnya sama dengan stabilisasi tanah dengan semen, seperti contohnya teknik pengujian dan pelaksanaannya. Perbedaannya adalah kapur lebih cocok untuk stabilisasi tanah untuk tanah lempung, dan kurang cocok untuk tanah granuler.

Kapur telah dikenal sebagai salah satu bahan stabilisasi tanah yang baik, terutama bagi stabilisasi tanah lempung yang mempunyai sifat kembang-susut yang besar dan daya dukungnya rendah. Adanya unsur cation (Ca^{2+}) pada kapur dapat memberikan ikatan antar partikel yang lebih besar untuk melawan sifat mengembang dan menaikkan daya dukung tanah. (Fitri Febriani, Iskandar Maricar, Farid Sitepu)

Ranggaesa R.A menyatakan bahwa kenaikan nilai CBR *soaked* dan *unsoaked* tertinggi terjadi pada penambahan persentase kapur 8% dan semakin banyak kadar kapur yang ditambahkan maka semakin kecil *swelling* yang terjadi. Hubungan tegangan dan regangan menunjukkan bahwa penambahan persentase kadar kapur 8% tanah tersebut menjadi tidak terlalu getas maupun tidak terlalu lembek. Sutikno dan Budi Damianto (2009) menyatakan bahwa pada penambahan kadar kapur 4% - 6% terjadi peningkatan nilai CBR yang signifikan.

Hatmoko J.T menyatakan penambahan kapur pada tanah ekspansif menurunkan tekanan dan potensi pengembangan dengan angka yang cukup signifikan. Potensi pengembangan turun dari 12% pada tanah asli menjadi 1,12%

pada tanah dengan kadar kapur 10%. Tekanan pengembangan turun dari 340 kPa pada tanah asli menjadi 105 kPa pada tanah dengan kadar kapur 10%.

Widianti Anita (2009) menyatakan penambahan serat ke dalam tanah yang distabilisasikan dengan kapur-abu sekam padi mampu meningkatkan nilai CBR rendaman hingga 867% dari nilai CBR tanah asli. Dalam penelitian ini kita akan membahas mengenai pengaruh campuran kapur pada tanah lempung ekspansif terhadap nilai CBRnya. Kapur digunakan untuk stabilisasi tanah.

1.2 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh campuran kapur pada tanah lempung ekspansif terhadap nilai CBRnya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh campuran kapur pada tanah lempung ekspansif terhadap indeks plastisitasnya, berat isi kering optimum, kadar air optimum, serta pengaruhnya terhadap nilai CBR.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi campuran kapur pada tanah lempung ekspansif sebagai bahan stabilisasi terhadap nilai batas-batas atterberg, pemadatan dan CBR unsoaked yang dilakukan di laboratorium.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Benda uji yang digunakan adalah tanah lempung ekspansif dan kapur sebagai bahan stabilisasi dengan perbandingan 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% dari berat tanah.
2. Penelitian ini menggunakan metode California Bearing Ratio (CBR) laboratorium tanpa rendaman (*unsoaked*).
3. Penelitian ini hanya menguji batas-batas atterberg, pemadatan dan pengujian CBR.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang diantara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah. Pembentukan tanah dari induknya, dapat berupa fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, air, es, manusia atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Partikel-partikel mungkin berbentuk bulat, bergerigi maupun bentuk-bentuk diantaranya. Umumnya, pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbondioksida, air (terutama yang mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan masih berada di tempat asalnya, maka tanah ini disebut tanah residual (*residual soil*) dan apabila tanah berpindah tempatnya, disebut tanah terangkut (*transportes soil*).

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat)

disertai dengan air dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut. Tanah berguna sebagai bahan bangunan pada berbagai macam pekerjaan teknik sipil, tanah juga berfungsi sebagai pendukung pondasi dari bangunan.

Istilah pasir, lempung, lanau atau lumpur digunakan untuk menggambarkan ukuran partikel pada ukuran butiran yang telah ditentukan. Akan tetapi, istilah yang sama juga digunakan untuk menggambarkan sifat tanah yang khusus. Sebagai contoh, lempung adalah jenis tanah yang bersifat kohesif dan plastis, sedang pasir digambarkan sebagai tanah yang tidak kohesif dan tidak plastis.

Kebanyakan jenis tanah terdiri dari banyak campuran, atau lebih dari satu macam ukuran partikel. Tanah lempung belum tentu terdiri dari partikel lempung saja, akan tetapi dapat bercampur dengan butiran-butiran ukuran lanau maupun pasir, dan mungkin terdapat campuran bahan organik.

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan terinci. Sebagian besar sistem klasifikasi tanah yang telah dikembangkan untuk tujuan rekayasa didasarkan pada sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas. Walaupun saat ini terdapat berbagai sistem klasifikasi tanah, tetapi tidak ada satupun dari sistem-sistem tersebut yang benar-

benar memberikan penjelasan yang tegas mengenai segala kemungkinan pemakaiannya. Hal ini disebabkan karena sifat-sifat tanah yang bervariasi.

Kebanyakan klasifikasi tanah menggunakan indeks tipe pengujian yang sangat sederhana untuk memperoleh karakteristik tanah. Karakteristik tersebut digunakan untuk menentukan kelompok klasifikasi. Umumnya, klasifikasi tanah didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari analisis saringan (dan uji sedimentasi) dan plastisitas.

Terdapat dua sistem klasifikasi yang sering digunakan, yaitu *Unified Soil Classification* dan AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Sistem-sistem ini menggunakan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas.

2.2.1 Sistem Klasifikasi Unified

Pada Sistem Unified, tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, dan sebagai tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Selanjutnya, tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan subkelompok yang dapat dilihat dalam Tabel 2.1. Simbol-simbol yang digunakan tersebut adalah:

G = kerikil (*gravel*)

S = pasir (*sand*)

C = lempung (*clay*)

M = lanau (*silt*)

O = lanau atau lempung organik (*organic silt or clay*)

Pt = tanah gambut dan tanah organik tinggi (*peat and highly organic soil*)

W = gradasi baik (*well-graded*)

P = gradasi buruk (*poorly-graded*)

H = plastisitas tinggi (*high-plasticity*)

L = plastisitas rendah (*low plasticity*)

2.2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials Classification*) berguna untuk menentukan kualitas tanah dalam perancangan timbunan jalan, *subbase* dan *subgrade*. Sistem ini terutama ditujukan untuk maksud-maksud dalam lingkup tersebut.

Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok (Tabel 2.2). Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg.

Indeks kelompok (*group index*) digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah-tanah dalam kelompoknya. Indeks kelompok dihitung dengan persamaan:

8

$$GI = (F-35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F-15) (PI-10) \quad (2.1)$$

dengan,

GI = indeks kelompok (*group index*)

F = persen butiran lolos saringan no.200 (0,075 mm)

LL = batas cair

PI = indeks plastis

2.3 Tanah Lempung Ekspansif

Setiap pekerjaan teknik sipil tidak lepas dengan aspek yang paling penting yaitu tanah. Sejumlah masalah dengan bangunan teknik sipil yang sering dijumpai di lapangan adalah akibat dari sifat-sifat teknik tanah yang buruk, yang ditandai dengan kadar air tanah yang tinggi, kompresibilitas yang besar dan daya dukung yang rendah. Sebagian dari jenis tanah yang memiliki sifat buruk tersebut adalah tanah yang mudah mengalami kembang susut besar (Sudjianti, 2012).

Beberapa jenis tanah yang memiliki potensi kembang susut besar adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume secara signifikan seiring dengan perubahan kadar airnya. Tanah jenis ini merupakan tanah lempung yang banyak mengandung mineral-mineral dengan potensi kembang tinggi. Tanah dengan kondisi seperti ini sering disebut sebagai tanah lempung ekspansif (Hardiyatmo,2006).

Tanah ekspansif adalah salah satu jenis tanah berbutir halus berukuran koloidal yang terbentuk dari mineral-mineral ekspansif yaitu: *montmorillonite*,

illite, kaolinite, halloysite, chlorite, vermiculite dan *attapulgit* (Chen, 1975). Tanah lempung ekspansif ini memiliki potensi kembang susut tinggi, apabila terjadi perubahan kadar air. Sifat kembang susut ini berhubungan langsung dengan kadar air mineral lempung khususnya mineral *montmorillonite* dan *illite*. Bila kadar mineral lempung naik, maka luas permukaan akan naik, dan batas cair serta indeks plastisitas akan naik, sehingga potensi kembang-susut akan naik (Muhunthan, 1991).

Pengertian tanah ekspansif menurut Buku Pedoman Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan Departemen Pekerjaan Umum tahun 2005, yang dimaksud dengan tanah ekspansif adalah tanah atau batuan yang kandungan lempungnya memiliki potensi kembang susut tinggi akibat perubahan kadar air.

Fenomena pengembangan pada tanah ekspansif terjadi pada kondisi pembasahan dengan nilai derajat kejenuhan (S_r) < 1, berarti tanah berada pada kondisi tidak jenuh. Pada kondisi tidak jenuh ini, maka tanah ekspansif terdiri dari tiga fase, yaitu: butiran, air dan udara, sehingga menghasilkan *suction*. Akibat perubahan nilai derajat kejenuhan (S_r) dan angka pori (e), maka nilai *suction* akan naik, sehingga *suction* yang terjadi pada tanah ekspansif akan mempengaruhi perilaku kembang-susut tanah tersebut (rifai, 2002).

2.4 Mineral Lempung

Tanah lempung ekspansif adalah salah satu jenis tanah berbutir halus berukuran koloidal yang terbentuk dari mineral-mineral ekspansif yaitu *montmorillonite, illite, kaolinite, halloysite, chlorite, vermiculite* dan *attapulgit* (Chen, 1975).

Pelapukan tanah akibat reaksi kimia menghasilkan susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran lebih kecil dari 0,002 mm, yang disebut mineral lempung. Partikel lempung berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus, sehingga lempung mempunyai sifat yang sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung (Kerr, 1959).

2.5 Kapur

Kapur merupakan salah satu material untuk pembangunan yang telah banyak dipakai oleh manusia. Kapur adalah kalsium oksida (CaO) yang dibuat dari batuan karbonat yang dipanaskan pada suhu sangat tinggi. Kapur tersebut umumnya berasal dari batukapur (*limestone*) atau dolomite.

Kapur berasal dari batukapur alami, dan tipe kapur tertentu yang terbentuk, bergantung pada material induk dan proses produksinya. Batukapur terbentuk dari kalsium, karbon dan oksigen, sedang dolomite mengandung zat kimia yang sama ditambah magnesium. Lambe (1962) membagi tipe kapur menjadi 5 tipe dasar, yaitu:

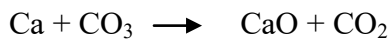
1. Kapur tohor kalsium tinggi (*high-calcium quicklime*) ...CaO.
2. Kapur tohor dolomitik (*dolomitic quicklime*) ...CaO + MgO.
3. Kapur kalsium tinggi terhidrasi (*hydrated high-calciumlime*) ...Ca(OH)₂.
4. Kapur dolomitik terhidrasi normal (*normal hydrated dolomiticlime*)
...Ca(OH)₂ + MgO.

5. Kapur dolomitic terhidrasi tekan (*pressure-hydrated dolomiticlime*) ...
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$.

SNI 03-4147-1996 membagi tipe kapur menjadi 4 macam:

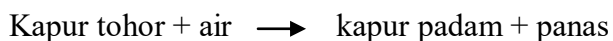
1. Kapur tipe I, yaitu kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi; dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4%.
2. Kapur tipe II, yaitu kapur magnesium atau dolomite yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan maksimum 36% berat.
3. Kapur tohor (CaO), yaitu hasil pembakaran batukapur pada suhu +/-90°F, dengan komposisi sebagian besar kalsium karbonat (CaCO₃).
4. Kapur padam, yaitu kapur dari hasil pemadatan kapur tohor dengan air, sehingga terbentuk hidrat Ca(OH)₂.

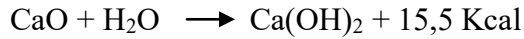
Kapur mentah atau kapur tohor pada prinsipnya terdiri dari kalsium oksida CaO. Kapur tohor ini diperoleh dari pembakaran batukapur (*limestone*) pada suhu lebih kurang 1000⁰C. Batukapur mengandung kalsium karbonat (CaCO₃). Jika dibakar dengan suhu tersebut, maka karbon dioksidanya ke luar dan tinggal kapurnya saja (CaO). Proses kimia pembentukan kapur adalah:



Kapur padam adalah kalsium hidroksida Ca(OH)₂ dan berasal dari hidrasi kapur tohor. Kalsium hidroksida terbentuk dari penambahan air pada kapur tohor.

Reaksi hidrasi adalah sebagai berikut:





Dalam stabilisasi tanah dengan kapur, bahan-bahan seperti kapur kalsium tinggi terhidrasi Ca(OH)_2 , kapur dolomitik monohidrat $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$, kapur tohor (*quicklime*) kalsitik CaO , dan kapur tohor dolomitik $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ lebih sering digunakan. Walaupun kapur terhidrasi (kapur padam) Ca(OH)_2 lebih banyak digunakan, namun akhir-akhir ini kapur tohor (CaO) juga digunakan. Kapur terhidrasi Ca(OH)_2 berbentuk serbut halus, sedang kapur tohor (CaO) lebih merupakan bahan granuler (kasar).

Kapur *dolomite*, adalah campuran magnesium hidroksida dan kalsium hidroksida. Kapur ini juga dapat digunakan untuk stabilisasi. Kemurnian dan kehalusan butiran kapur *dolomite* sangat penting diperhatikan agar stabilisasi dapat berhasil dengan baik, terutama untuk stabilisasi tanah-tanah yang bersifat plastis.

2.6 Stabilisasi Tanah

Dalam perancangan konstruksi bangunan sipil, sering ditemukan lapisan tanah yang memiliki daya dukung rendah (*low strength*), yang sangat mempengaruhi bebrbagai tahapan rancang-bangun konstruksi, baik dalam tahap perencanaan (*design*), tahap pelaksanaan (*perform*), maupun tahapan operasional dan pemeliharaan (*Operational and Maintenance*).

Stabilisasi tanah adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan kemampuan daya dukung suatu lapisan tanah, dengan cara memberikan perlakuan (*treatment*) khusus terhadap lapisan tanah tersebut.

Dengan demikian dapat diketahui bahwa tujuan dari stabilisasi tanah adalah minimal untuk memenuhi satu dari empat sasaran berikut ini:

1. Untuk memperbaiki (meningkatkan) daya dukung tanah.
2. Untuk memperbaiki (memperkecil) penurunan lapisan tanah.
3. Untuk memperbaiki (menurunkan) permeabilitas dan swelling potensial tanah.
4. Untuk menjaga (mempertahankan) potensi tanah yang ada (*existing strength*).

Dari keempat sasaran dari suatu tindakan stabilisasi yang diuraikan diatas, sangat jarang dapat dicapai secara bersamaan (sekaligus). Akan tetapi harus selalu diupayakan agar dapat tercapai perbaikan parameter yang diinginkan, dengan tanpa mengakibatkan pengrusakan parameter yang lainnya. Seperti halnya stabilisasi dengan kapur (*lime stabilization*) dapat meningkatkan daya dukung lapisan tanah, akan tetapi dapat pula memperbesar permeabilitas lapisan.

Adapun salah satu jenis dari stabilisasi tanah adalah stabilisasi kimia, yaitu stabilisasi dengan menggunakan bahan-bahan kimia yang memungkinkan terjadinya reaksi kimia, dan menghasilkan senyawa baru yang bersifat stabil dari pada senyawa yang terdapat dalam massa tanah sebelum stabilisasi dilakukan. Salah satu contoh stabilisasi kimia pada tanah yaitu stabilisasi dengan kapur. Stabilisasi dengan bahan kapur dapat meningkatkan daya dukung karena ikatan partikel tanah dengan ion kalsium (Ca) lebih stabil dari pada ikatan dalam senyawa tanah lunak (lempung). Akan tetapi sifat kapur yang banyak

mengandung ion hidoksida (OH) sangat porous, sehingga memperbesar permeabilitas massa tanah.

Semua tindakan mengubah sifat-sifat asli dari pada tanah, untuk disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi adalah merupakan tindakan yang dapat dikategorikan sebagai upaya stabilisasi tanah. Secara khusus pengertian stabilisasi tanah juga dapat dilihat dari berbagai definisi yang dikemukakan beberapa ahli, antara lain:

1. Menurut Lambe (1962), mendefinisikan stabilisasi tanah sebagai perubahan dari setiap property tanah untuk memperbaiki kinerja tekniknya (*soil stabilization as "the alteration of any property of a soil to improve its engineering performance"*), dalam pengertian ini Lambe memakai sifat-sifat tanah (*soil property*) mencakup sifat mikroskopis dan makroskopis dari massa tanah.
2. Jon A. Epps et al. (1971), mengatakan stabilisasi tanah adalah tindakan untuk memperbaiki sifat rekayasa tanah (*soil properties*).
3. Ingles & Metcalf (1972), mengatakan bahwa perubahan sifat tanah untuk memenuhi persyaratan teknik tertentu, dikenal sebagai stabilisasi tanah.
4. Punmia (1980), menyatakan bahwa stabilisasi tanah dalam pengertian luas mencakup berbagai metode yang digunakan untuk memodifikasi sifat tanah untuk memperbaiki kinerja tekniknya. Dalam hal ini menurut Punmia bahwa tujuan utama dari stabilisasi tanah adalah untuk meningkatkan kekuatan atau stabilisasi tanah dan mengurangi biaya

konstruksi dengan memanfaatkan sebaik-baiknya bahan yang tersedia secara lokal.

5. Winterkorn (1975), menyatakan bahwa stabilisasi tanah adalah istilah kolektif untuk metode fisik, kimia, atau biologi, atau kombinasi metode semacam itu, yang digunakan untuk memperbaiki sifat tertentu dari tanah alami agar sesuai dengan tujuan rekayasa yang tepat.
6. Ruston Paving Company Inc., menyatakan bahwa “stabilisasi tanah adalah perubahan fisik dan kimia permanen dari tanah dan agregat untuk meningkatkan sifat teknisnya sehingga meningkatkan daya dukung sub-grade atau sub-basis untuk mendukung perkerasan dan pondasi.

Selain definisi di atas, masih banyak lagi terminology yang dikemukakan beberapa ahli lain. Secara umum orang mengartikan bahwa stabilisasi tanah adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu guna memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, atau dapat pula diartikan secara umum bahwa stabilisasi tanah adalah usaha untuk mengubah atau memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu.

2.6.1 Prinsip Dasar Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah terbagi atas dua kelompok, yakni perbaikan tanah secara kimiawi dan perbaikan tanah secara fisik. Kedua cara tersebut memiliki kesamaan dalam tujuan dan sasaran yang ingin dicapai, namun banyak perbedaan dalam metode maupun bahan pencampur (*addictive*) yang dipergunakan.

Teknik perbaikan tanah memiliki prinsip dasar bahwa kapasitas tanah yang kurang baik (dalam berbagai aspek), dapat diperbaiki melalui peningkatan sifat-sifat (*properties*) dari pada tanah, sesuai dengan tujuan perbaikan yang diinginkan.

2.6.2 Jenis Perbaikan Tanah

Dalam upaya memperbaiki parameter tanah, maka berbagai teknik perbaikan tanah yang telah dihasilkan oleh para rekayasawan (*engineer*). Berbagai jenis perbaikan tanah yang telah dikembangkan selama ini, antara lain:

1. Perbaikan tanah dengan semen (*soil cement*) ; yaitu perbaikan tanah dengan menggunakan bahan semen sebagai pencampur.
2. Perbaikan tanah dengan kapur (*soil lime*) ; yaitu perbaikan tanah dengan menggunakan kapur sebagai bahan pencampur tanah yang lemah. Cara ini merupakan metode paling tua yang dikenal sejak zaman Romawi Kuno, ketika desakan mobilisasi alat perang dan personil militer mereka semakin tinggi seiring dengan perkembangan ekspansi kekuasaan pada zaman itu.
3. Perbaikan tanah dengan abu (*soil ash*) ; yaitu perbaikan tanah dengan menggunakan bahan abu sebagai pencampur, dapat berasal dari abu batu, abu terbang, abu sekam, dan lain sebagainya.
4. Perbaikan tanah dengan larutan kimia (*sovent stabilization*) ; yang mana berbagai bahan kimia yang biasa digunakan untuk meningkatkan parameter tanah, seperti larutan soda kaustik (NaOH),

larutan asam sulfat (H_2SO_4), dan berbagai larutan lain. Cairan campuran yang sekarang banyak digunakan cukup bervariasi, yang mana beberapa pabrikan telah mengembangkan berbagai jenis cairan *addictive* sebagai bahan *stabilizer* untuk perbaikan tanah.

5. Perbaikan tanah dengan pemadatan ; yaitu penyaluran enersi tumbukan dan/atau vibrasi (*dynamic load*) secara langsung ke lapisan tanah yang kurang padat (gembur). Metode ini dimaksudkan untuk memperbaiki parameter tanah yang berhubungan dengan daya dukung, kuat geser, penurunan, dan permeabilitas tanah.
6. Perbaikan tanah dengan konsolidasi ; yaitu pemberian beban statis secara langsung di atas lapisan tanah (*static load*), sehingga tanah akan terkompresi sebelum pelaksanaan konstruksi dilakukan.
7. Perbaikan tanah dengan teknik pengeringan (*dewatering*) ; yaitu upaya peningkatan bearing capacity tanah melalui proses pengeringan tanah, sehingga kadar air tanah menurun, dan meningkatkan tegangan efektif di dalam tanah.
8. Perbaikan tanah dengan pengganti tanah (*replacement*) ; yaitu perbaikan gradasi dengan cara menambah tanah pada fraksi tertentu yang dianggap kurang baik, sehingga tercapai gradasi yang rapat dan memiliki parameter yang lebih baik.

9. Perbaiki tanah dengan *permeation resin* ; yaitu pengaliran bahan perekat (resin) yang memiliki viskositas rendah ke dalam pori-pori tanah tanpa menggusur atau mengubah struktur tanah.

2.7 Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Kapur

Untuk mendapatkan akurasi dan efektifitas di dalam penerapan suatu metode perbaikan tanah, beberapa hal yang harus di pahami dengan baik, antara lain; prinsip teknis dari jenis perbaikan tanah yang akan diterapkan, sifat-sifat bahan *stabilizer*, kriteria tanah yang cocok dengan bahan stabilizer, dan perubahan *properties* tanah yang terjadi dan relevansinya dengan syarat teknis yang ingin dicapai.

2.7.1 Prinsip Teknis

Kapur merupakan bahan stabilizer yang secara kimiawi bersifat basa. Prinsip perbaikan tanah dengan kapur adalah mencampurkan kapur untuk memanfaatkan keunggulan sifat-sifat teknis dari bahan kapur, dengan tanah yang memiliki karakteristik kurang baik, seperti tanah dengan plastisitas yang tinggi (*high plasticity*), potensi ekspansi yang tinggi (*expansive soil*), kompresibilitas yang tinggi, dan lain sebagainya.

Perbaikan tanah dengan kapur tidak sekedar dicampurkan, namun juga diikuti dengan pemadatan. Oleh karena itu tanah yang diperbaiki dengan bahan kapur, akan mempermudah pekerjaan pemadatan tanah, karena kapur akan mengurangi kelekatan dan kelunakan tanah, serta membuat struktur partikel tanah lempung menjadi rapuh (*fragile*), sehingga mudah untuk dipadatkan. Namun demikian konsekuensi negatif dari perbaikan tanah dengan kapur adalah menurunkan nilai kepadatan maksimum dari massa tanah.

Penggunaan kapur sebagai bahan stabilizer untuk perbaikan tanah, sebenarnya sudah dipergunakan oleh militer pada zaman kerajaan Romawi, untuk membangun jalan tanah untuk menunjang mobilisasi pasukan perang dan alat perang mereka. Metode perbaikan tanah dengan kapur kembali dikembangkan yang lebih luas, selama Perang Dunia I dan Perang Dunia II, yang bukan hanya digunakan pada pembangunan jalan, namun juga diterapkan pada pembangunan landasan pesawat tempur dan pesawat angkutan militer. Sampai sekarang perbaikan tanah dengan kapur lebih berkembang pesat, karena sudah lebih banyak digunakan untuk berbagai kepentingan pembangunan infrastruktur, baik untuk jalan raya, landasan pesawat, reklamasi lahan, *backfill* pada konstruksi dinding penahan, dan lain sebagainya.

2.7.2 Karakteristik Bahan Stabilizer

Berdasarkan persyaratan dalam SNI 03-4147-1996, jenis kapur yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai bahan perbaikan tanah adalah kapur padam dan kapur tohor.

Sebagaimana yang diketahui bahwa ada beberapa jenis kapur, antara lain:

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

- 4) Kapur tipe II, yaitu kapur Magnesium atau Dolomit yang mengandung Magnesium Oksida (MgO) lebih dari 4% dan paling tinggi 36% berat.

2.7.3 Kriteria Tanah

Sebagaimana diketahui bahwa dalam tindakan perbaikan tanah dengan bahan stabilizer dari kapur adalah merupakan salah satu metode kimia, maka tanah kriteria umum dari tanah yang dapat distabilisasi dengan kapur hanya tanah yang berbutir halus. Tanah granuler (pasir dan lanau) tidak efektif untuk distabilisasi dengan bahan kapur. Secara khusus kriteria tanah yang efektif untuk diperbaiki dengan stabilizer dari bahan kapur adalah:

- 1) Jenis tanah lempung yang bersifat asam (pH, 7,00).
- 2) Tanah lempung dengan plastisitas tinggi.
- 3) Tanah lempung dengan *swelling potential* tinggi.
- 4) Tanah lempung dengan kompresibilitas tinggi.
- 5) Tanah lempung dengan permeabilitas tinggi.

Perbaikan dengan kapur dapat dilakukan pada tanah lempung yang memiliki karakteristik seperti di atas, dengan tujuan untuk memperbaiki karakteristik-karakteristik tersebut, sehingga dapat meningkatkan kinerja tanah untuk memenuhi kepentingan dalam mendukung konstruksi yang berdiri di atasnya.

2.8 Kadar Air (*Water Content*)

Secara umum, tanah terdiri dari tiga unsur yaitu butiran tanah atau partikel padat (*solid*), air (*water*), dan udara (air dan gas). Kandungan air dan udara yang terdapat di dalam tanah menempati rongga (*void*) yang terdapat di antara butiran, yang disebut pori tanah. Bila volume pori di dalam tanah dipenuhi oleh air, maka tanah dinyatakan dalam kondisi jenuh. Sebaliknya bila di dalam pori tanah tidak berisi air sama sekali, maka tanah dalam kondisi kering.

Besarnya volume air yang terkandung di dalam pori tanah disbanding dengan volume pori tanah yang ditempati oleh air dan udara disebut derajat kejenuhan (*degree of saturation*) yang dinotasikan dengan *S*.

Besarnya kandungan air yang terdapat di dalam suatu contoh tanah yang sering disebut kadar air, w_c (*moisture content* atau *water content*) dinyatakan dalam persentase terhadap berat tanah dalam keadaan kering, sehingga:

$$W_C = \frac{W_W}{W_S} \times 100\% \quad (2.2)$$

dimana:

W_C = kadar air (*water content*)

W_W = berat air

W_S = berat tanah dalam keadaan kering oven (*oven dry*)

2.9 Specific Gravity (Gs)

Berat spesifik atau berat jenis (*specific gravity*) (G_s) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_d), dengan berat volume (γ_w) pada temperature 4°C.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.3)$$

G_s tidak berdimensi. Secara tipikal, berat jenis berbagai jenis tanah berkisar antara 2,65 sampai 2,75. Berat jenis tanah $G_s = 2,67$ biasanya digunakan untuk tanah-tanah tidak berkohesi atau tanah granuler, sedang untuk tanah-tanah kohesif tidak mengandung bahan organik G_s berkisar diantara 2,68 sampai 2,72. Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah diberikan dalam **Tabel 2.1**.

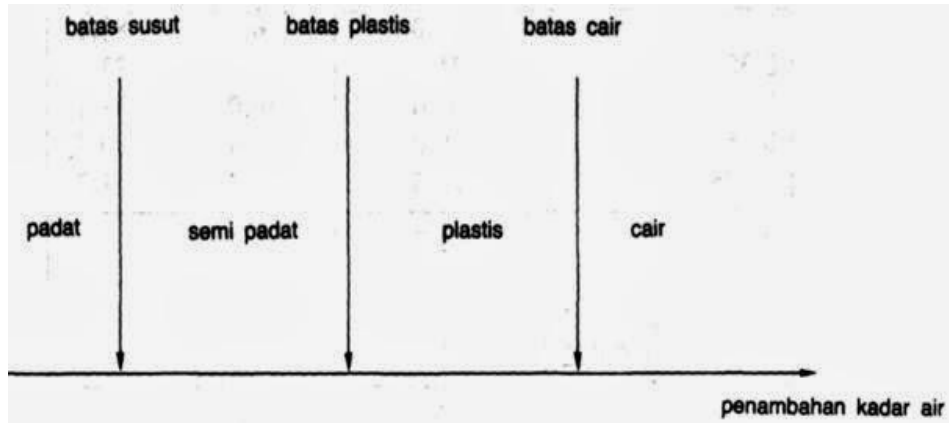
Tabel 2.1 Nilai khas berat jenis G_s partikel tanah

Jenis Tanah	G_s
Kerikil	2.65 - 2.68
Pasir	2.65 - 2.68
Lanau, anorganik	2.62 - 2.68
Lempung, organik	1.58 - 2.65
Lempung, anorganik	2.68 - 2.75

Sumber: Joseph E Bowles, Analisis dan desain pondasi jilid I

2.10 Batas – batas Atterberg

Suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel mineral lempung dalam tanah. Istilah plastisitas menggambarkan kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak atau remak.



Gambar 2.1 Batas-batas Atterberg

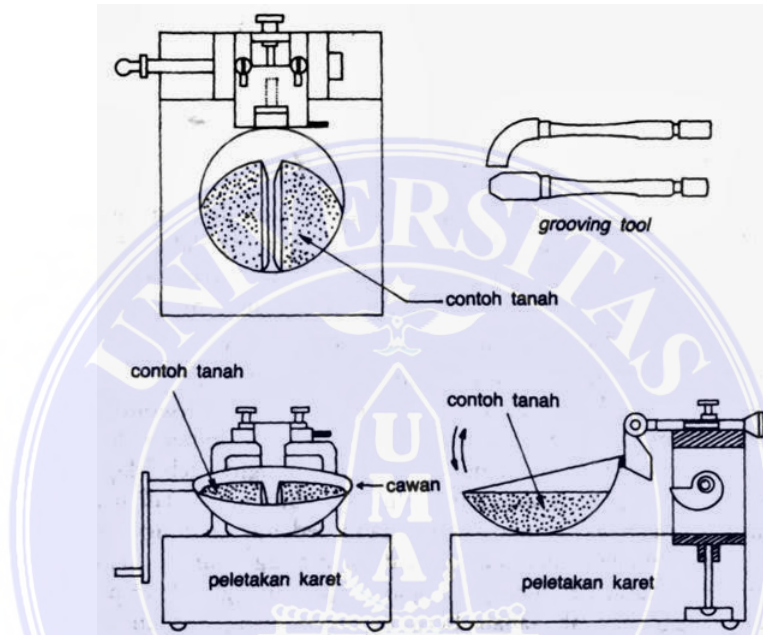
Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, Mekanika Tanah 1

Bergantung pada kadar air, tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat atau padat. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut *konsistensi*. Konsistensi bergantung pada gaya tarik antara partikel mineral lempung. Sembarang pengurangan kadar air menghasilkan berkurangnya tebal lapisan kation yang menyebabkan bertambahnya gaya tarik partikel. Bila tanah dalam kedudukan plastis, besarnya jaringan gaya antar partikel akan sedemikian hingga partikel bebas menggelincir antara satu dengan yang lain, dengan kohesi yang tetap terpelihara. Pengurangan kadar air menghasilkan pengurangan volume tanah.

Atterberg (1991), memberikan cara untuk menggambarkan batas-batas konsistensi dari tanah berbutir halus dengan mempertimbangkan kandungan kadar air tanah. Batas-batas tersebut adalah batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*) dan batas susut (*shrinkage limit*). Kedudukan batas-batas konsistensi untuk tanah kohesif ditunjukkan dalam gambar (2.1).

2.10.1 Batas Cair (*Liquid Limit, LL*)

Batas cair (*LL*), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.

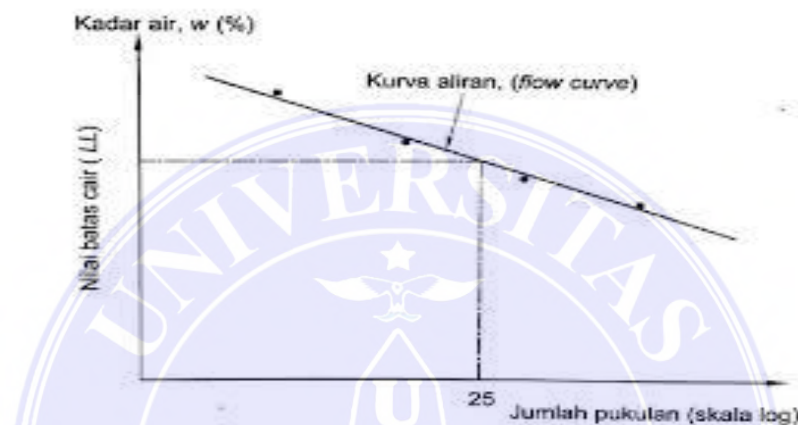


Gambar 2.2 Skema alat uji batas cair

Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, Mekanika Tanah 1

Batas cair biasanya ditentukan dari uji Casagrande (1948). Gambar skematis dari alat pengukur batas cair dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Contoh tanah dimasukkan dalam cawan. Tinggi contoh dalam cawan kira-kira 8 mm. Alat pembuat alur (*grooving tool*) dikerukkan tepat di tengah-tengah cawan hingga menyentuh dasarnya. Kemudian, dengan alat penggetar, cawan diketuk-ketukkan pada landasan dengan tinggi jatuh 1 cm. persentase kadar air yang dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan, sesudah 25 kali pukulan, didefinisikan sebagai batas cair tanah tersebut. Karena sulitnya

mengatur kadar air pada waktu celah menutup pada 25 kali pukulan, maka biasanya percobaan dilakukan beberapa kali, yaitu dengan kadar air yang berbeda dengan jumlah pukulan berkisar antara 15 sampai 35. Kemudian, hubungan kadar air dan jumlah pukulan digambarkan dalam grafik semi logaritmik untuk menentukan kadar air pada 25 kali pukulan (**Gambar 2.3**).



Gambar 2.3 Kurva untuk penentuan batas cair lempung
Sumber: Hary Chritady Hardiyatmo, Mekanika Tanah 1

Kemiringan dari garis dalam kurva didefinisikan sebagai indeks aliran (*flow index*), dan dinyatakan dalam persamaan:

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log(N_2/N_1)} \quad (2.4)$$

dengan, I_F = indeks aliran

w_1 = kadar air (%) pada N_1 pukulan

w_2 = kadar air (%) pada N_2 pukulan

Perhatikan bahwa nilai w_1 dan w_2 dapat ditukarkan untuk memperoleh nilai positifnya, walaupun kemiringan kurva sebenarnya negatif.

Dari banyak uji batas-cair, Waterways Experiment Station di Vicksburg, Mississippi (1949), mengusulkan persamaan batas cair:

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{tg\beta} \quad (2.5)$$

dengan,

N = jumlah pukulan, untuk menutup celah 0,5 in (12,7 mm)

w_N = kadar air

$tg\beta = 0,121$ (tapi $tg\beta$ tidak sama dengan 0,121 untuk semua jenis tanah)

Tabel 2.2 Harga-harga $(N/25)^{0,121}$

N	$(\frac{N}{25})^{0,121}$	N	$(\frac{N}{25})^{0,121}$
20	0,973	26	1,005
21	0,979	27	1,009
22	0,985	28	1,014
23	0,990	29	1,018
24	0,995	30	1,022
25	1,000		

Sumber: Braja M. Das, Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)

Jilid 1

2.10.2 Batas Plastis (*Plastic Limit, PL*)

Batas plastis (*PL*), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

2.10.2 Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)

Indeks plastisitas (*PI*) adalah selisih batas cair dan batas plastis:

$$PI = LL - PL \quad (2.6)$$

Indeks plastisitas (*PI*) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah. Jika tanah mempunyai *PI* tinggi, maka tanah mengandung banyak butiran lempung. Jika *PI* rendah, seperti lanau, sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, macam tanah, dan kohesi diberikan oleh Atterberg terdapat dalam **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah (Jumikis, 1962)

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

Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, Mekanika Tanah 1

2.11 Pemadatan

2.11.1 Umum

Tanah, kecuali berfungsi sebagai pendukung fondasi bangunan, juga digunakan sebagai bahan timbunan seperti: tanggul, bendungan, dan jalan. Jika tanah dilapangan membutuhkan perbaikan guna mendukung bangunan di atasnya, atau tanah akan digunakan sebagai bahan timbunan, maka pemadatan sering dilakukan.

Tingkat pemadatan tanah diukur dari berat volume kering tanah yang dipadatkan. Bila air ditambahkan kepada suatu tanah yang sedang dipadatkan, air tersebut akan berfungsi sebagai pembasah (pelumas) pada partikel-partikel tanah. Karena adanya air, partikel-partikel tanah tersebut akan lebih mudah bergerak dan bergeseran satu sama lain dan membentuk kedudukan yang lebih rapat/padat. Untuk usaha pemadatan yang sama, berat volume kering dari tanah akan naik bila kadar air dalam tanah (pada saat dipadatkan) meningkat (**Gambar 2.4**). Harap dicatat bahwa pada saat kadar air $w = 0$, berat volume basah dari tanah (Y) adalah sama dengan berat volume keringnya (Y_d), atau

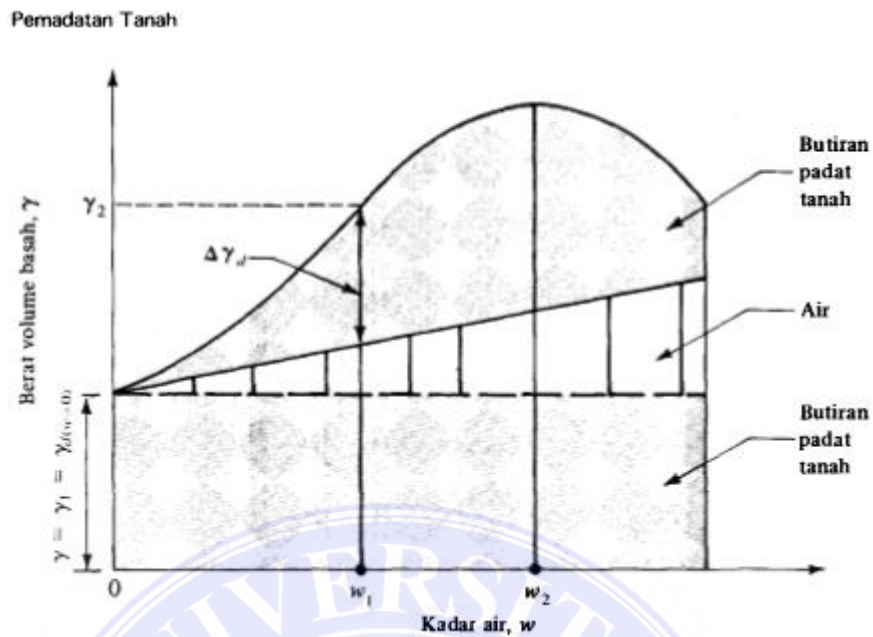
$$Y = Y_{d(w=0)} = Y_1 \quad (2.7)$$

Bila kadar airnya ditingkatkan terus secara bertahap pada usaha pemadatan yang sama, maka berat dari jumlah bahan padat dalam tanah persatuan volume juga meningkat secara bertahap pula. Misalnya, pada $w = w_1$, berat volume basah dari tanah sama dengan:

$$Y = Y_2 \quad (2.8)$$

Berat volume kering dari tanah tersebut pada kadar air ini dapat dinyatakan dalam:

$$Y_{d(w=w_1)} = Y_{d(w=0)} + \Delta Y_d \quad (2.9)$$



Gambar 2.4 Prinsip Pemadatan

Sumber: Braja M. Das, Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)

Jilid 1

Setelah mencapai kadar air tertentu $w = w_2$ (lihat Gambar 2.4), adanya penambahan kadar air justru cenderung menurunkan berat volume kering dari tanah. Hal ini disebabkan karena air tersebut kemudian menempati ruang-ruang pori dalam tanah yang sebetulnya dapat di tempati oleh partikel-partikel padat dari tanah. Kadar air dimana harga berat volume kering maksimum tanah dicapai disebut *kadar air optimum*.

Tanah lempung yang dipadatkan dengan cara yang benar akan dapat memberikan kuat geser tinggi. Stabilisasi terhadap sifat kembang-susut tergantung dari jenis kandungan mineralnya. Sebagai contoh, lempung *montmorillonite* akan mempunyai kecenderungan yang lebih besar terhadap perubahan volume disbanding dengan lempung *kaolinite*. Lempung padat mempunyai permeabilitas yang rendah dan tanah ini tidak apat dipadatkan

dengan baik pada waktu sangat basah (jenuh). Bekerja dengan tanah lempung yang sangat basah akan mengalami banyak kesulitan, karena pada saat lempung dipadatkan, air sulit mengalir ke luar dari rongga pori lempung. Air yang tidak mau ke luar dari rongga pori tanah ini menyebabkan butiran sulit merapat satu sama lain saat dipadatkan.

Peristiwa bertambahnya berat volume kering oleh beban dinamis disebut **pemadatan**. Oleh akibat beban dinamis, butir-butir tanah merapat satu sama lain sebagai akibat berkurangnya rongga udara.

Percobaan-percobaan di laboratorium yang umum dilakukan untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum adalah *Proctor Compaction Test* (*Uji Pemadatan Proctor*, menurut nama penemunya, Proctor, 1933). Cara dan prosedur untuk melakukan percobaan tersebut akan dibahas dalam uraian-uraian berikut.

2.11.2 Uji Proctor Standar (*Standard Proctor Test*)

Untuk menentukan hubungan kadar air dan berat volume, dan untuk mengevaluasi tanah agar memenuhi persyaratan kepadatan, maka umumnya dilakukan uji pemadatan.

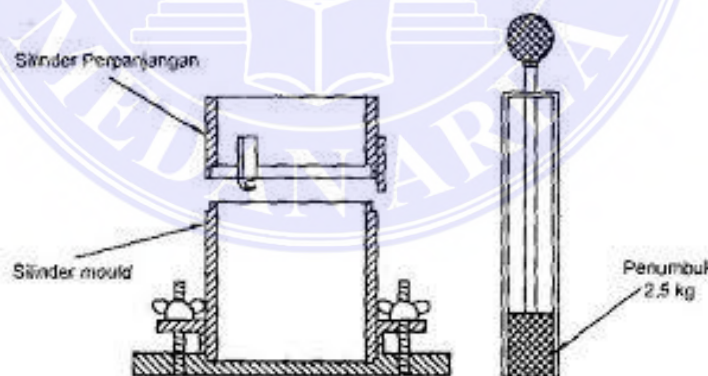
Proctor (1933) telah mengamati bahwa ada hubungan yang pasti antara kadar air dan berat volume kering tanah padat. Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya, terdapat suatu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya.

Hubungan berat volume kering (γ_d) dengan berat volume basah (γ_b) dan kadar air (w), dinyatakan dalam persamaan :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1 + w} \quad (2.10)$$

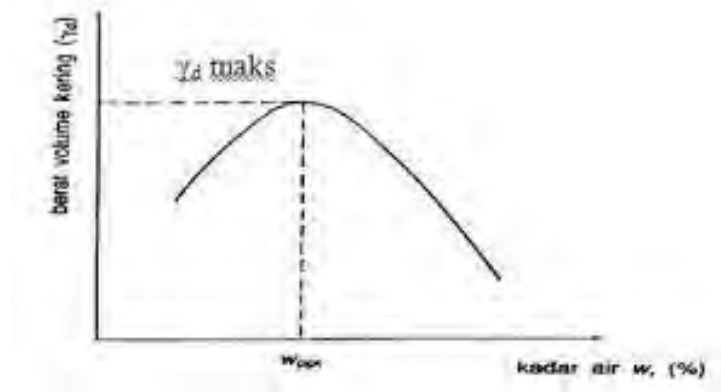
Berat volume kering setelah pemadatan bergantung pada jenis tanah, kadar air, dan usaha yang diberikan oleh alat penumbuknya. Karakteristik kepadatan tanah dapat dinilai dari pengujian standar laboratorium yang disebut uji Proctor.

Pada uji Proctor, tanah dipadatkan dalam sebuah alat pemadat berupa silinder *mould* yang mempunyai volume $9,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Tanah dicampur air dengan kadar yang berbeda-beda dan kemudian dipadatkan dengan menggunakan penumbuk khusus. Tanah di dalam *mould* dipadatkan dengan penumbuk yang beratnya 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,5 cm (1ft). tanah dipadatkan dalam 3 lapisan dengan tiap lapisan ditumbuk 25 kali pukulan.



Gambar 2.5 Alat uji standar Proctor

Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*



Gambar 2.6 Kurva hubungan kadar air dan berat volume kering

Sumber: Hary Christady Hadiyatmo, Mekanika Tanah 1

Dalam uji pemadatan, percobaan diulang paling sedikit 5 kali dengan kadar air tiap percobaan divariasikan. Kemudian, digambarkan sebuah grafik hubungan kadar air dan berat volume keringnya. Kurva yang dihasilkan dari pengujian memperlihatkan nilai kadar air yang terbaik (w_{opt}) untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum.

Pada nilai kadar air rendah, untuk kebanyakan tanah, tanah cenderung bersifat kaku dan sulit dipadatkan. Setelah kadar air ditambah, tanah menjadi lebih lunak. Pada kadar air yang tinggi, berat volume kering berkurang. Bila seluruh udara di dalam tanah dapat dipaksa keluar pada waktu pemadatan, tanah akan berada pada kedudukan jenuh dan nilai berat volume kering akan menjadi maksimum. Akan tetapi, dalam praktik, kondisi ini sulit dicapai.

Kemungkinan berat volume kering maksimum dinyatakan sebagai berat volume kering dengan tanpa rongga udara atau berat volume kering saat tanah menjadi jenuh (γ_{zav}), dapat dihitung dari persamaan:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + wG_s} \quad (2.11)$$

Karena saat tanah jenuh ($S = 1$) dan $e = wG_s$, maka:

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (2.12)$$

dimana,

γ_{zav} = berat volume pada kondisi *zero air void*

γ_w = berat volume air

e = angka pori

G_s = berat spesifik butiran pada tanah

Berat volume kering (γ_d) setelah pemadatan pada kadar air w dengan kadar udara (*air content*), A ($A = V_a/V = \text{volume udara/volume total}$) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\gamma_d = \frac{G_s (1 - A) \gamma_w}{1 + wG_s} \quad (2.13)$$

Spesifikasi yang diberikan untuk uji Proctor menurut ASTM dan AASHTO dengan volume cetakan sebesar $1/30 \text{ ft}^3$ dan jumlah tumbukan 25 kali per lapisan pada umumnya dipakai untuk tanah-tanah berbutir halus yang lolos ayakan Amerika no. 4. Sebenarnya, pada masing-masing ukuran cetakan masih ada empat metode lain yang disarankan, yang berbeda-beda menurut ukuran

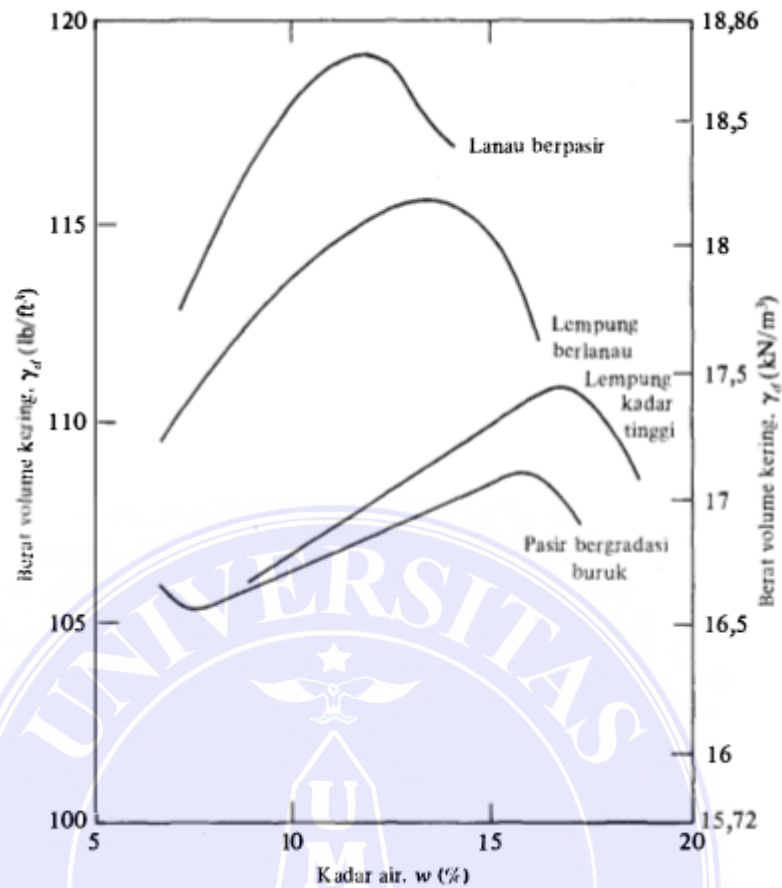
cetakan, jumlah tumbukan per lapisan, dan ukuran partikel tanah maksimum pada agregat tanah yang dipadatkan.

2.11.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Hasil Pemadatan

Pada sub-sub terdahulu ditunjukkan bahwa kadar air mempunyai pengaruh yang besar terhadap tingkat kepadatan yang dapat dicapai oleh suatu tanah. Selain kadar air, factor yang sangat mempengaruhi kepadatan adalah jenis tanah dan usaha pemadatan.

1) Pengaruh Jenis Tanah

Jenis tanah, seperti distribusi ukuran butiran, bentuk butiran tanah, berat jenis dan macam mineral lempung yang terdapat dalam tanah sangat berpengaruh pada berat volume maksimum dan kadar air optimumnya. **Gambar 2.7** memperlihatkan sifat-sifat khusus kurva pemadatan yang diperoleh oleh beberapa macam tanah, yang diuji menurut prosedur pemadatan ASTM *Test Designation D – 698*.



Gambar 2.7 Bentuk umum kurva pemadatan untuk empat jenis tanah (ASTM D-698)

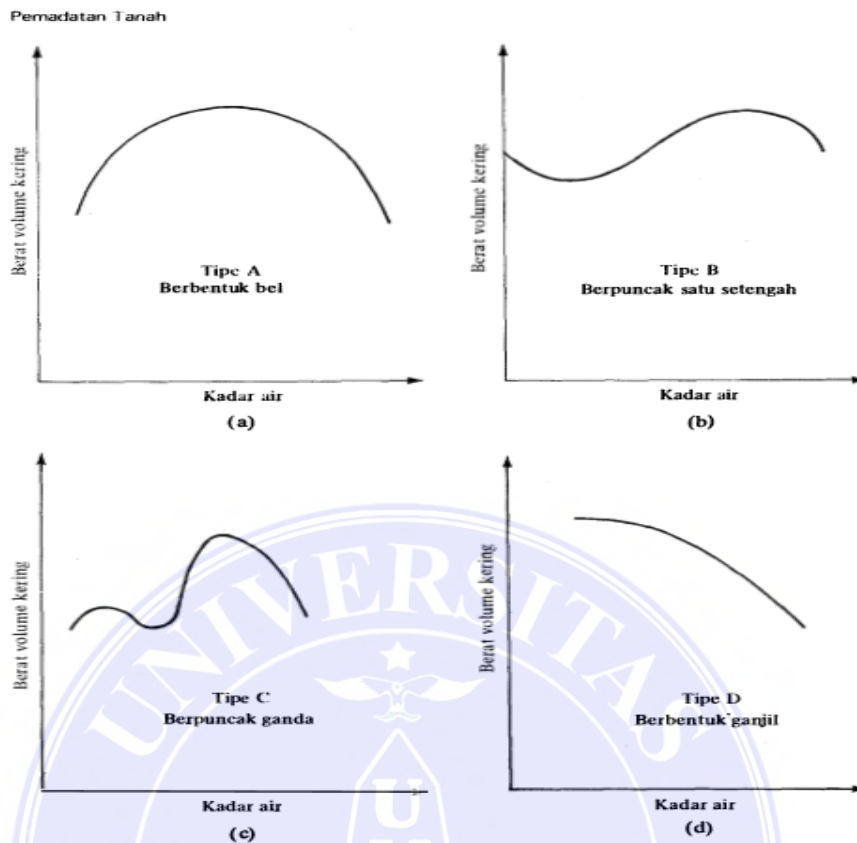
Sumber: Braja M. Das, Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)

Jilid 1

Gambar 2.7 memperlihatkan bentuk umum kurva pemadatan untuk empat jenis tanah (ASTM D-698). Kurva pemadatan berbentuk bel adalah umum terdapat pada hampir semua tanah lempung. Pada tanah pasir, harga berat volume kering cenderung menurun dahulu dengan naiknya kadar air, kemudian naik sampai mencapai harga maksimum dengan penambahan kadar air lebih lanjut. Penurunan berat volume pada awal kurva disebabkan karena pengaruh peristiwa kapiler pada tanah. Pada kadar air yang lebih rendah, adanya tegangan tarik kapiler pada pori-pori tanah mencegah kecenderungan partikel tanah untuk bergerak lebih bebas untuk menjadi lebih padat.

Kemudian tegangan kapiler tersebut akan berkurang dengan bertambahnya kadar air sehingga partikel-partikel menjadi mudah bergerak dan menjadi lebih dekat.

Lee dan Suedkamp (1972) mempelajari kurva-kurva pemadatan untuk 35 jenis tanah, hasilnya terdapat beberapa perbedaan bentuk kurva pemadatan. Kurva tipe A (**Gambar 2.8**), adalah kurva yang mempunyai satu puncak. Tipe ini biasanya ditemukan pada tanah-tanah yang mempunyai batas cair 30 dan 70. Kurva tipe B mempunyai bentuk seperti huruf S pada arah mendatar. Kurva tipe C mempunyai dua puncak. Kurva tipe B dan C adalah kurva pemadatan yang dapat diperoleh pada tanah yang mempunyai batas cair (*LL*) kurang dari 30. Kurva tipe D adalah kurva yang tidak mempunyai puncak. Tipe ini disebut sebagai berbentuk ganjil. Kurva C atau D dapat terjadi pada pemadatan tanah-tanah dengan batas cair (*LL*) lebih besar daripada 70.



Gambar 2.8 Berbagai macam tipe kurva pemadatan yang sering dijumpai pada tanah

Sumber: Braja M. Das, Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)

Jilid 1

2) Pengaruh Usaha Pemadatan

Energy pemadatan per volume satuan E dinyatakan oleh persamaan:

$$E = \frac{N_b N_l W H}{V} \quad (2.14)$$

dengan,

N_b = jumlah pukulan per lapisan

N_l = jumlah lapisan

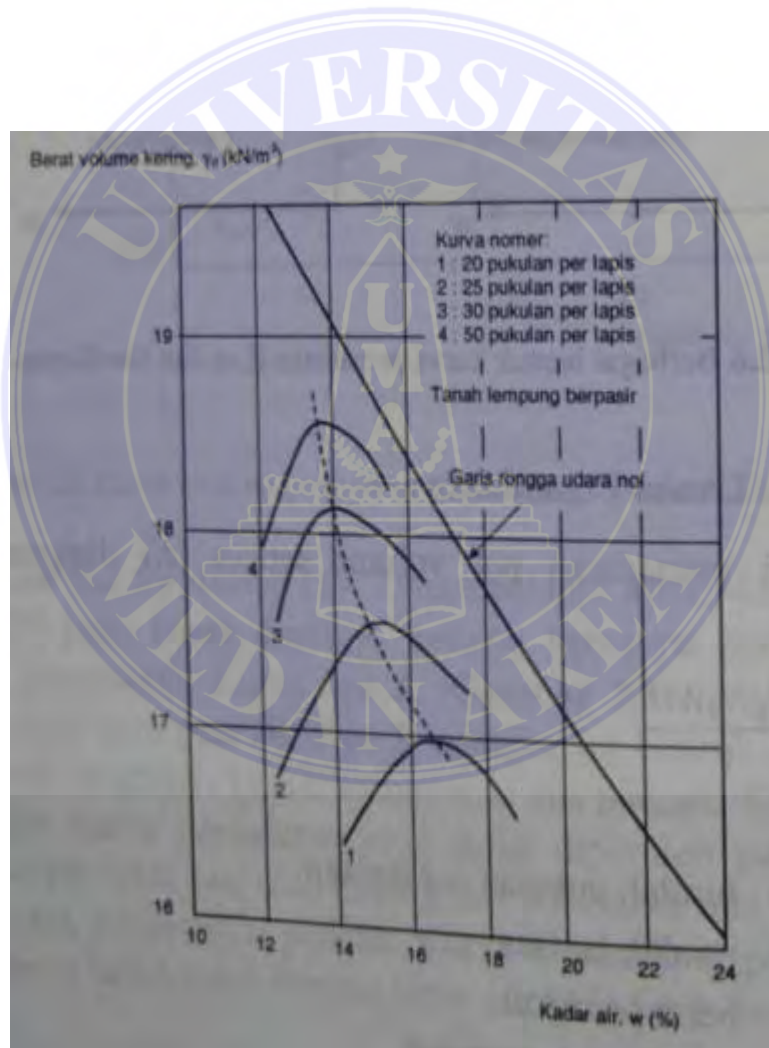
W = berat pemukul

H = tinggi jatuh pemukul

V = volume mould

Pada uji standar Proctor:

$$E = \frac{(25)(3)(5,5)(1)}{(1/30)} = 12375 \text{ ft} - \text{ft}^3 (592,5 \text{ kJ/m}^3) \quad (2.15)$$



Gambar 2.9 Pengaruh energi pemadatan pada hasil pemadatan lempung berpasir

Sumber: Hary Christady Hadiyatmo, Mekanika Tanah 1

Jika usaha pemadatan per volume satuan E berubah, maka bentuk kurva hubungan kadar air terhadap berat volume kering juga berubah. Pada **Gambar 2.9** diperlihatkan hasil uji pemadatan tanah lempung berpasir dengan *mould* dari standar Proctor. Jumlah lapisan pada saat pemadatan di dalam *mould* sama, yaitu 3 lapisan, akan tetapi jumlah pukulan pada tiap lapisan dibedakan, yaitu antara 20 sampai 50 kali pukulan. Besarnya energi pemadatan dihitung dengan menggunakan **Persamaan (2.15)** dan hasilnya diperlihatkan dalam **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Hitungan energi pemadatan

No. Kurva pada Gambar 2.9	Jumlah pukulan per lapisan (Nb)	Energi pemadatan (ft-lb/ft ³)
1	20	9900
2	25	12375
3	30	14850
4	50	24750

Sumber: Hary Christady Hadiyatmo, Mekanika Tanah 1

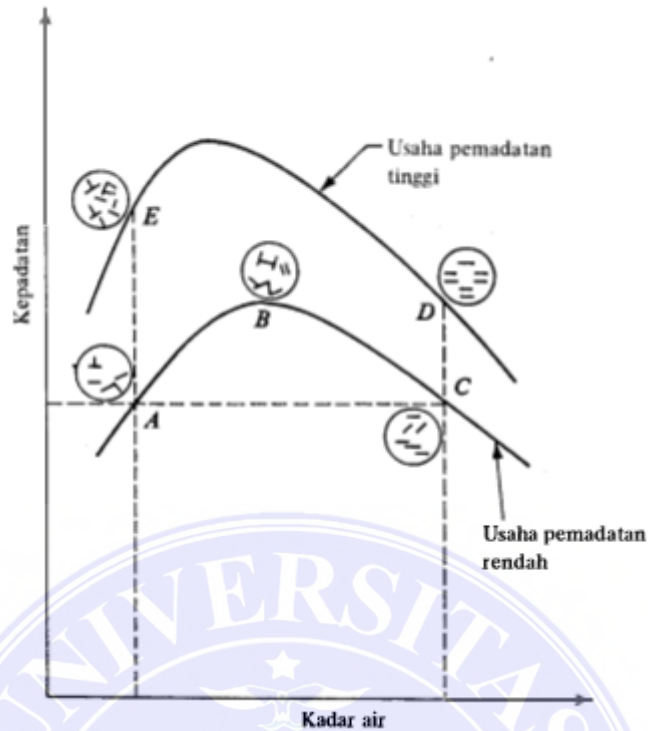
Catatan 1 ft-lb/ft³ = 47,99 J/m³

Spesifikasi yang diberikan untuk uji Proctor menurut ASTM dan AASHTO dengan volume cetakan sebesar 1/30 ft³ dan jumlah tumbukan 25 kali per lapisan pada umumnya dipakai untuk tanah-tanah berbutir halus yang lolos ayakan Amerika No.4. Sebenarnya, pada masing-masing ukuran cetakan masih ada empat metode lain yang disarankan, yang berbeda-beda menurut ukuran cetakan, jumlah tumbukan per lapisan, dan ukuran partikel tanah maksimum pada agregat tanah yang dipadatkan.

3) Sifat-sifat Tanah Lempung Dipadatkan

Sifat-sifat teknis tanah lempung setelah pemadatan bergantung pada cara atau usaha pemadatan, macam tanah, dan kadar airnya. Pada usaha pemadatan yang lebih besar diperoleh kepadatan yang lebih tinggi. Biasanya, posisi kadar air tanah yang dipadatkan, didasarkan pada posisi-posisi kadar air sisi kering optimum (*dry side of optimum*), dekat optimum atau optimum, dan sisi basah optimum (*wet side of optimum*). Kering optimum didefinisikan sebagai kadar air yang lebih dari kadar air optimumnya. Demikian juga dengan dekat optimum atau optimum, yang berarti kadar air yang kurang lebih mendekati optimumnya.

Penyelidikan pada tanah lempung yang dipadatkan memperlihatkan bahwa bila lempung dipadatkan pada kering optimum, susunan tanah akan tidak bergantung pada macam pemadatannya (Seed dan Chan, 1959). Pemadatan tanah dengan kadar air pada basah optimum akan mempengaruhi susunan, kuat geser serta sifat kemampatan tanah. Pada usaha pemadatan yang sama, dengan penambahan kadar air, penyesuaian susunan butiran menjadi bertambah. Pada kering optimum, tanah selalu terflokulasi. Sebaliknya, pada basah optimum susunan tanah menjadi terdispersi beraturan. Dalam **Gambar 2.10** susunan tanah pada titik C lebih teratur daripada A. Jika usaha pemadatan ditambah, susunan tanah cenderung untuk lebih beraturan penyesuaiannya, bahkan berlaku juga pada kondisi kering optimum. Dengan melihat **Gambar 2.10**, contoh dalam titik E lebih teratur daripada titik A, sedang pada kondisi basah optimum, susunan pada titik D akan lebih teratur daripada titik C.

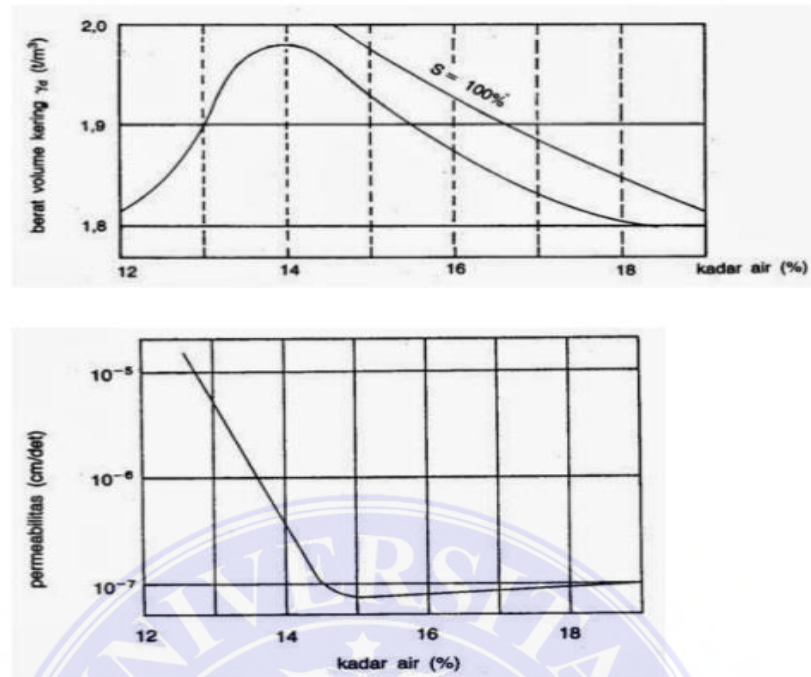


Gambar 2.10 Pengaruh pemadatan pada struktur tanah lempung (menurut Lambe,1958)

Sumber: Braja M. Das, Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)

Jilid 1

Permeabilitas tanah berkurang dengan penambahan kadar airnya pada usaha pemadatan yang sama, dan mencapai minimum pada kadar air optimumnya (Lambe, 1958). Jika usaha pemadatan ditambah, koefisien permeabilitas berkurang, sebab angka pori berkurang. Perubahan permeabilitas ini bersama-sama dengan pembentukan kadar air, ditunjukkan dalam **Gambar 2.11**. terlihat bahwa permeabilitas tanah lebih tinggi bila tanah dipadatkan pada kering optimum daripada bila tanah dipadatkan pada basah optimum.



Gambar 2.11 Perubahan permeabilitas dengan kadar air yang diberikan (Lambe, 1958)

Sumber: Hary Christady Hadiyatmo, Mekanika Tanah 1

Kompresibilitas atau sifat mudah mampat lempung yang dipadatkan adalah fungsi dari tingkat tekanan yang dibebankan pada tanah. Pada tingkat tekanan yang relatif rendah, lempung yang dipadatkan pada basah optimum akan mempunyai sifat lebih mudah mampat atau kompresibel. Sedang pada tingkat tekanan yang tinggi adalah kebalikannya (tidak mudah mampat). Pengurangan angka pori yang lebih besar terjadi pada tanah yang dipadatkan basah optimum untuk penambahan tekanan yang diterapkn (Lambe, 1958).

2.12 CBR (*California Bearing Ratio*)

Lapisan tanah yang akan dipakai sebagai lapisan sub-base atau sub-grade suatu konstruksi jalan pada umumnya memerlukan proses pemadatan agar mampu

menerima beban sesuai dengan yang direncanakan. Salah satu cara untuk mengukur kekokohan (*bearing*) lapisan tanah adalah pengujian *California Bearing Ratio* (CBR).

California Bearing Ratio (CBR) merupakan suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standar load*) dan dinyatakan dalam persentase. CBR juga merupakan perbandingan antara bahan penetrasi suatu bahan terhadap beban standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama.

Lebih jelas lagi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$CBR = \frac{P_T}{P_S} \times 100\% \quad (2.16)$$

Dalam hal ini:

P_T = beban percobaan (*test load*)

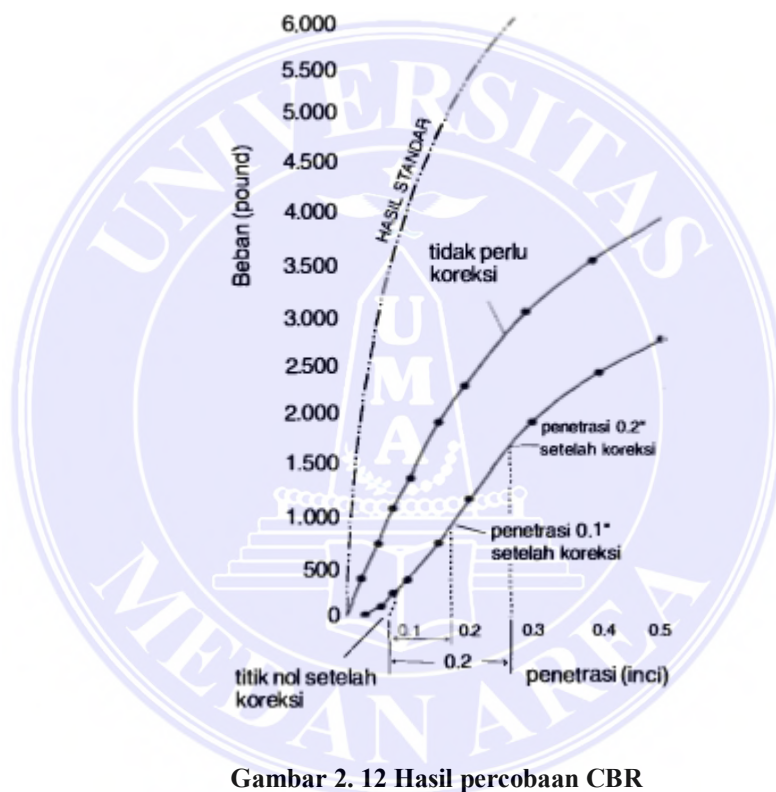
P_S = beban standar (*standard load*)

Harga CBR adalah nilai yang menyatakan kualitas tanah dasar dibandingkan dengan bahan standar berupa batu pecah yang mempunyai nilai CBR sebesar 100% dalam memikul beban lalu lintas.

Tabel 2.5 Beban standar yang dipakai untuk percobaan CBR

Penetrasi plunyer (in)	Beban Standar (lb)	Penetrasi Plunyer (mm)	Beban Standar (kg)	Beban Standar (Kn)
0.10	3.000	2.50	1.370	13.50
0.20	4.500	5.00	2.055	20.00
0.30	5.700	7.50	2.630	25.50
0.40	6.900	10.00	3.180	31.00
0.50	7.800	12.50	3.600	35.00

Sumber: Ir. G. Djatmiko Soedarmo, Ir. S. J. Edy Purnomo, Mekanika Tanah 1



Gambar 2.12 Hasil percobaan CBR

Sumber: Ir. G. Djatmiko Soedarmo, Ir. S. J. Edy Purnomo, Mekanika Tanah 1

Prinsip dasar dari pengujian CBR adalah membandingkan besarnya beban (gaya) yang diperlukan untuk menekan torak dengan luas penampang 3 inch² ke dalam lapisan perkerasan sedalam 0,1 inch (2,54 mm) atau 0,2 inch (5,08 mm) dengan beban standar. Oleh karena itu, kekokohan lapisan perkerasan dinyatakan

dalam “kekokohan relatif” atau persen kekokohan. Besarnya beban standar penetrasi 0,1 inch adalah 3000 lbs (*pound*) atau sekitar 1350 kg, sedangkan besarnya beban standar untuk penetrasi 0,2 inch adalah 4500 lbs atau sekitar 2025 kg.

Suatu hal yang perlu diingat bahwa pengujian CBR hanya mengukur kekokohan relatif dari lapisan permukaan tanah, karena diameter penampang torak yang dipergunakan hanya sekitar 4,96 cm, sehingga daerah (volume) lapisan tanah di bawah torak yang terpengaruhi tekanan (*stress bulb*) hanya di permukaan.

Metoda CBR ini mula-mula diciptakan oleh O.J. Porter, kemudian dikembangkan oleh California State Highway Departement, tetapi kemudian dikembangkan dan dimodifikasi oleh corps insinyur-insinyur tetantara Amerika Serikat (*U.S. Army Corps of Engineers*). Metoda ini mengkombinasikan percobaan pembebanan di laboratorium atau di lapangan dengan rencana empiris (*empirical design charts*) untuk menentukan tebal lapisan perkerasan. Hal ini digunakan sebagai metoda perencanaan perkerasan lentur (*flexible pavement*) jalan raya dan lapangan terbang.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatera Utara, Medan. Pada penelitian ini menggunakan tanah lempung ekspansif daerah Tanjung Selamat, Medan.

3.2 Bahan Uji

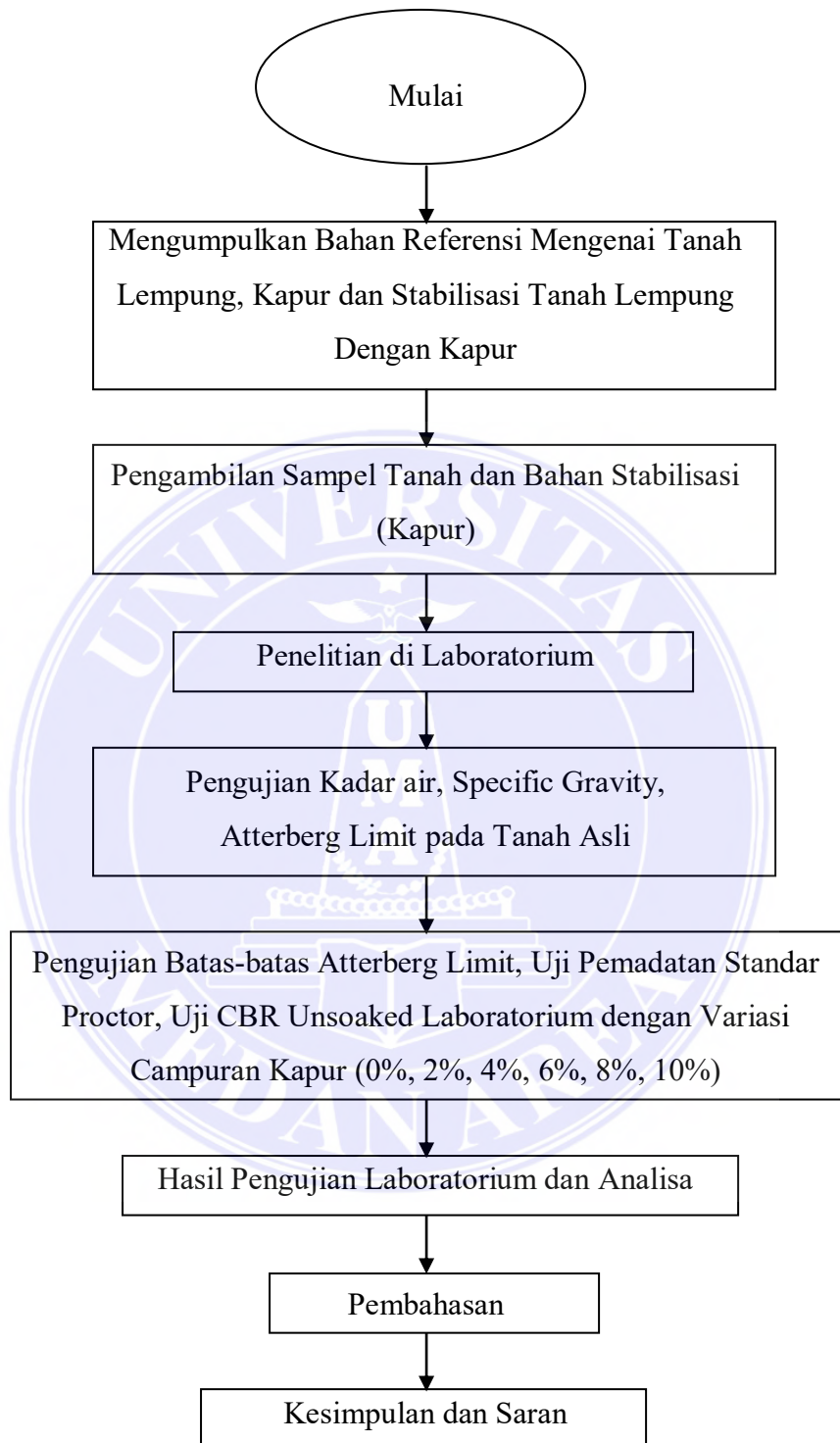
1. Tanah, dalam penelitian ini tanah yang digunakan adalah tanah lempung yang diperoleh dari Jln. Pendidikan, Tanjung Selamat, Medan.
2. Kapur, kapur yang digunakan berasal dari Pabrik Penggilingan Batu Kapur Sunggal.
3. Air, air yang digunakan berasal dari Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatera Utara.

3.3 Pengujian Laboratorium

Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sumatera Utara. Beberapa pengujian yang dilakukan antara lain adalah:

1. *Basic Properties*, meliputi test kadar air (*water content*), batas cair, batas plastis dan berat jenis.
2. *Engineering Properties*, meliputi percobaan pemadatan standar proctor dan CBR Unsoaked Laboratorium.

3.4 Bagan Alur



Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

3.5 Metode Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, dimana mahasiswa melakukan suatu percobaan tentang suatu hal. Mengamati prosesnya serta menuliskan hasil percobaannya. Penelitian ini melakukan uji laboratorium yang meliputi beberapa pengujian, yaitu:

1. Penentuan Kadar Air (*Water Content*), yang bertujuan untuk menentukan kadar air yang terkandung di dalam contoh tanah yang digunakan.
2. Penentuan Specific Gravity (*G_s*), yang bertujuan untuk menentukan berat jenis contoh tanah yang digunakan.
3. Penentuan Batas-batas Atterberg yang meliputi batas cair, dan batas plastis tanah sehingga mendapatkan nilai IP (*Indeks Plasticity*).
4. Uji Standard Proctor (*Pemadatan Tanah*), untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum pada energi yang standard, dengan jalan memberikan kadar air yang optimum.
5. Uji CBR (*California Bearing Ratio*), yang bertujuan untuk menentukan kekokohan permukaan lapisan tanah yang umumnya akan dipakai sebagai sub-base (*urugan*) atau sub-grade (*lapisan tanah dasar*).

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Uji Kadar Air (*Water Content*)

Tujuan dari percobaan ini adalah untuk menentukan kadar air yang terkandung di dalam suatu contoh tanah.

a. Alat yang digunakan:

1. Cawan aluminium

2. Contoh tanah basah yang akan ditentukan kadar airnya
 3. Oven
 4. Timbangan
- b. Prosedur Pengujian:
1. Timbang beberapa cawan aluminium kosong (bersih dan kering), kemudian catat beratnya masing-masing menurut kode yang tercantum di cawan (W_1).
 2. Masukkan contoh tanah basah ke dalam cawan aluminium dan timbang (W_2).
 3. Masukkan cawan yang berisi tanah ke dalam oven yang mempunyai temperature $105 \pm 5^\circ\text{C}$ dan biarkan selama 24 jam.
 4. Keluarkan cawan yang berisi contoh tanah dari oven, dinginkan beberapa saat dan timbang (W_3).
 5. Hitung kadar air tanah dengan perumusan:

$$W_c = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \% \quad (3.1)$$

Berdasarkan pengujian contoh tanah di laboratorium, diperoleh data seperti terlihat pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Data Percobaan Penentuan Kadar Air

Kode cawan	Berat cawan kosong, W_1 (gr)	Berat cawan dan Tanah basah, W_2 (gr)	Berat cawan dan Tanah kering, W_3 (gr)	Kadar Air, W_c (%)
1	14.4	44.77	36.23	39.12
2	11.42	41.58	33.26	38.10
3	11.46	41.66	34.07	33.57
Rata - rata				36.93

Sumber: Penelitian 2019

3.6.2 Uji Specific Gravity (Gs)

Tujuan dari percobaan ini adalah untuk menentukan *Specific Gravity* suatu contoh tanah.

a. Alat yang digunakan:

1. Contoh tanah
2. Piknometer 250 ml (**Gambar 3.2a**)
3. Air suling yang sudah divakum (*de-aired-distilled water*)
4. Timbangan
5. Pompa hisap (*vacuum pump*)

b. Prosedur Pengujian:

1. Timbang piknometer kosong dan kering (W_1) seperti pada **Gambar 3.2a**.
2. Masukkan contoh tanah (yang sudah dikeringkan dengan cara dioven) ke dalam piknometer yang sudah diketahui beratnya (W_1), lalu timbang piknometer yang berisi tanah (W_2). Untuk tanah lempung sebaiknya ditumbuk agar butiran tanah terpisah antara yang satu dengan yang lain. (**Gambar 3.2b**)
3. Masukkan air suling ke dalam piknometer yang berisi tanah sampai hampir penuh.
4. Hisap piknometer yang berisi air dan tanah dengan menggunakan pompa penghisap (*vacuum pump*), sampai tidak ada gelembung udara.
5. Tambahkan air suling ke dalam piknometer sampai batas penuh.

6. Timbang berat piknometer yang berisi tanah dan air (W_3).

(Gambar 3.2d)

7. Kosongkan dan bersihkan piknometer, lalu isi kembali piknometer dengan air suling sampai hampir penuh dan hisap dengan pompa penghisap sampai tidak ada gelembung udara di dalam air.

(Gambar 3.2c)

8. Penuhi piknometer dengan air suling sampai batas penuh dan timbang (W_4).

9. Specific Gravity (G_s) tanah dapat ditentukan dengan perumusan:

$$G_s = \frac{W_s}{W_w} \quad (3.2)$$

Dimana:

W_s = berat tanah kering

$$= W_2 - W_1$$

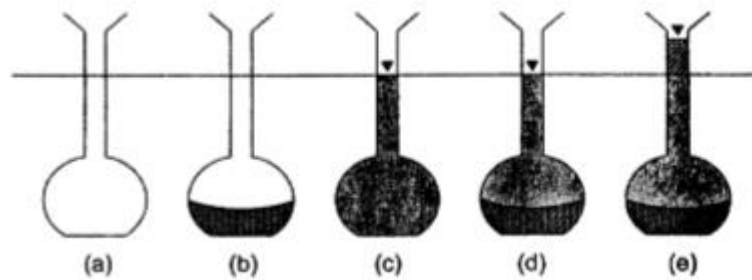
W_w = berat air yang dipindahkan oleh tanah kering

$$= W_4 + W_5 - W_3, \text{ atau}$$

$$= W_4 + (W_2 - W_1) - W_3$$

Sehingga,

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{W_4 + (W_2 - W_1) - W_3} \quad (3.3)$$



Gambar 3.2 Prinsip Pengujian Specific Gravity
 Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium

Berdasarkan pengujian contoh tanah di laboratorium, diperoleh data seperti terlihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Percobaan Penentuan Specific Gravity

Nomor Piknometer		1	2
Berat Piknometer + contoh tanah	W2 (gr)	43.53	43.84
Berat Piknometer	W1 (gr)	26.69	30.15
Berat Tanah	$W_t = W_2 - W_1$ (gr)	16.84	13.69
Temperatur °C		20°C	
Berat piknometer + air + tanah pada temperatur 20°C	W3 (gr)	85.84	87.56
Berat piknometer + air pada 20°C	W4 (gr)	75.9	78.74
$W_5 = W_t + W_4$	(gr)	92.74	92.43
Isi Tanah	$\frac{W_5 - W_3}{W_3}$ cm ³	6.9	4.87
Berat Jenis (Gs)	$\frac{W_t}{W_5 - W_3}$	2.44	2.81
Rata - rata		2.63	

Sumber: Penelitian 2019

3.6.3 Uji Batas – batas Atterberg

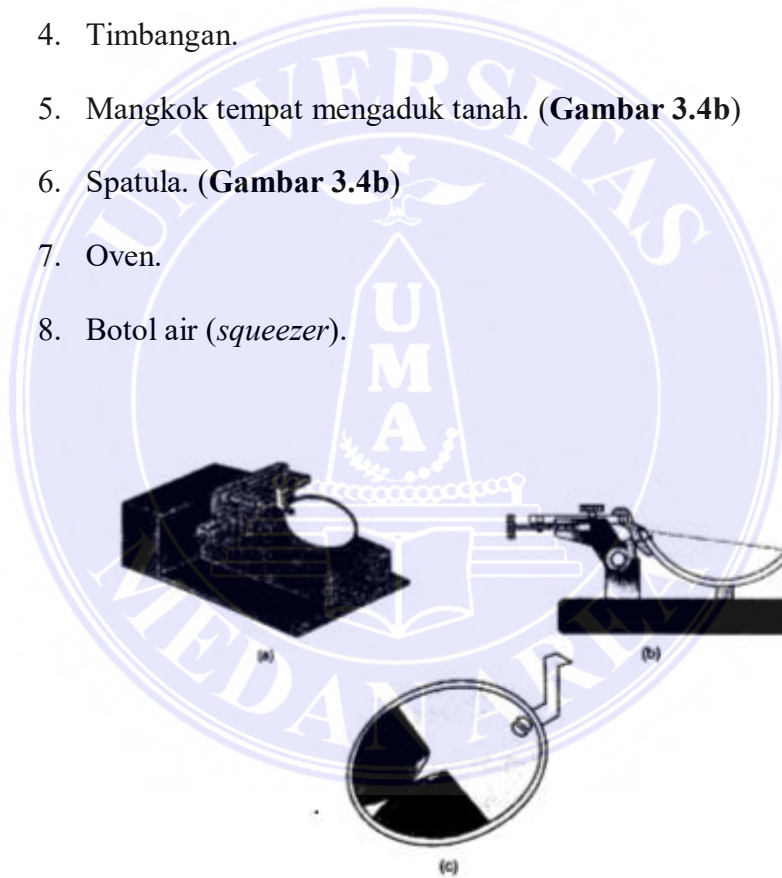
3.6.3.1 Uji Batas Cair (*Liquid Limit, LL*)

Pengujian batas cair dimaksudkan untuk menentukan besarnya kadar air di dalam contoh tanah pada fase tanah akan berubah dari air menjadi platis atau

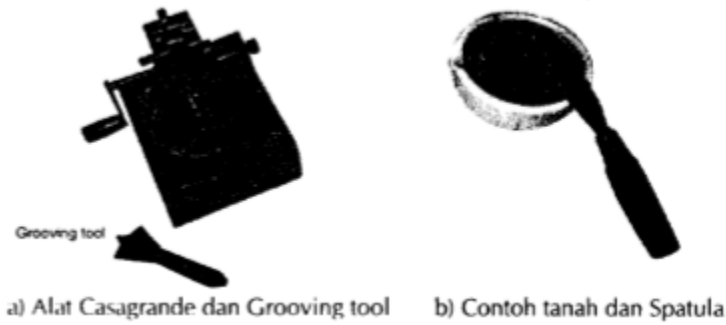
sebaliknya.

a. Alat yang digunakan:

1. Alat Casagrande untuk menentukan batas cair. (**Gambar 3.3a** dan **Gambar 3.4a**)
2. Alat grooving tool untuk membuat alur (coakan) berbentuk “V”. (**Gambar 3.3a**)
3. Cawan aluminium.
4. Timbangan.
5. Mangkok tempat mengaduk tanah. (**Gambar 3.4b**)
6. Spatula. (**Gambar 3.4b**)
7. Oven.
8. Botol air (*squeezer*).



Gambar 3.3 Skema Alat yang Dipergunakan
Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium



Gambar 3.4 Contoh Pengujian Batas Cair
Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium

b. Prosedur Pengujian:

1. Ambil 4 atau 5 buah cawan aluminium (kosong, bersih dan kering) dan timbang masing-masing berat dan kodenya.
2. Masukkan contoh tanah ke dalam mangkok pengaduk dan tambahkan air sedikit demi sedikit sambil diaduk memakai spatula sampai adonan merata dan terlihat “plastis”.
3. Tuangkan adonan tanah ke dalam container alat Casagrande dan ratakan hingga ketebalan tanah kurang lebih 1 cm.
4. Buat alur atau coakan (*grooving*) pada adonan di dalam container (*grooving tool* digerakkan dari arah pukul 12 ke arah pukul 6). Pada saat membuat alur, alat pembuat coakan (*grooving tool*) harus tegak lurus dengan dasar container. (**Gambar 3.4a**)
5. Gerakkan tuas pemutar berlawanan arah jarum jam dengan kecepatan 2 putaran (ketukan) per detik dan hitung jumlah putaran samai kedua dinding alur adonan tanah di dalam container menutup. (**Gambar 3.3c**)
6. Ambil contoh tanah dan masukkan ke dalam salah satu cawan aluminium yang sudah diketahui beratnya dan timbang.

7. Masukkan cawan dan tanah ke dalam oven yang mempunyai temperature $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, dan diamkan selama 24 jam.
8. Ulangi langkah ke-2 sampai dengan langkah ke-7 pada contoh tanah yang mempunyai kadar air berbeda-beda, sehingga didapatkan contoh adonan yang menutup sepanjang 1,27 cm pada jumlah putaran kurang dari 25 dan lebih dari 25 putaran, masing-masing dua buah. Sedapat mungkin jumlah putaran antara 20 sampai 35. Apabila alur pada adonan sudah menutup sebelum 20 putaran maka tanah terlalu basah, sebaliknya apabila alur belum menutup setelah 35 putaran, maka tanah terlalu kering, sehingga kedua percobaan harus diulang.
9. Ambil semua cawan dari oven, dinginkan dan timbang. Data percobaan kemudian ditabulasikan seperti terlihat pada **Tabel 3.3**.
10. Batas cair tanah ditentukan berdasarkan besarnya kadar air, dimana alur meutup sepanjang 1,27 cm (1/2 inch) pada putaran ke 25. Oleh karena sulit untuk mendapatkan adonan yang tepat pada batas cairnya, maka kadar air ditentukan dengan cara menggambar grafik hubungan antara jumlah putaran (ketukan) dengan kadar air. (**Gambar 3.5**)

$$\text{Kadar air } (W_c) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad ()$$

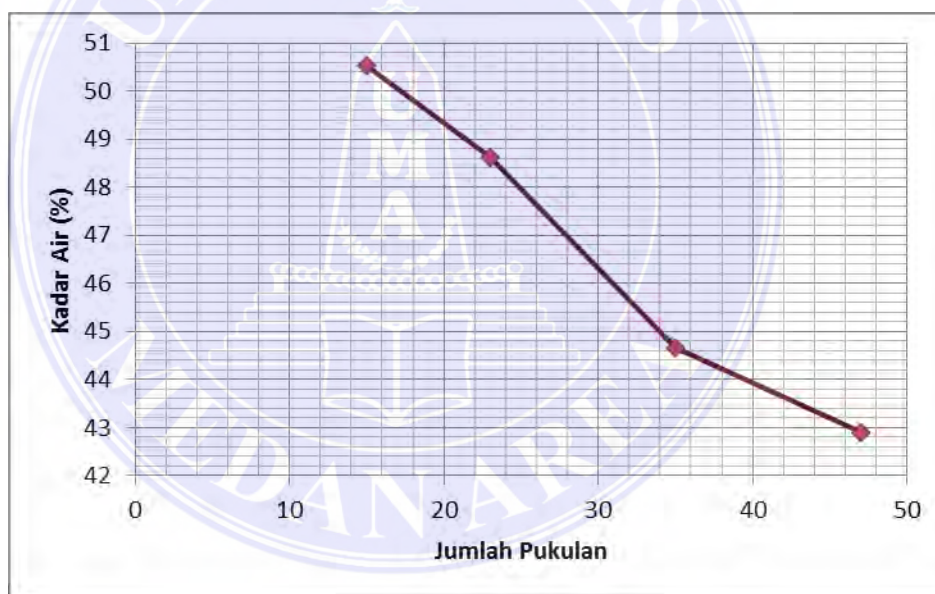
Tabel 3.3 Penentuan Kadar Air pada Batas Cair

Batas Cair (LL)		15 kali	23 kali	35 kali	47 kali
No. Cawan		1	2	3	4
Berat cawan + contoh basah	gr	47.41	45.18	43.35	44.29
Berat cawan + contoh kering	gr	34.95	33.72	32.89	34.02
Berat air	gr	12.46	11.46	10.46	10.27
Berat cawan	gr	10.29	10.15	9.47	10.08
Berat contong kering	gr	24.66	23.57	23.42	23.94
Kadar air	%	50.53	48.62	44.66	42.90
Batas Cair (LL)		47.50	48.13	46.52	46.30
Rata - rata		47.11			

Sumber: Penelitian 2019

Berdasarkan data pada **Tabel 3.3** dan **Gambar 3.5** diperoleh besarnya

Batas Cair (LL) contoh tanah lempung ekspansif 47,11 %

**Gambar 3.5** Penentuan Batas Cair

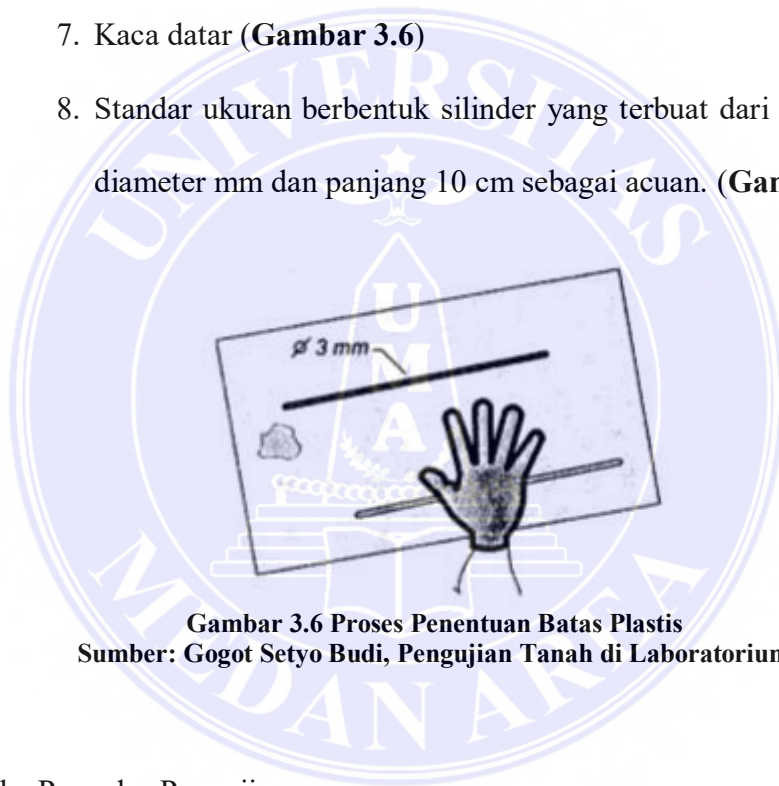
Sumber: Penelitian 2019

3.6.3.2 Batas Plastis (*Plastic Limit, PL*)

Pengujian batas plastis dimaksudkan untuk menentukan besarnya kadar air di dalam contoh tanah pada saat tanah akan berubah dari fase plastis menjadi fase semi padat atau sebaliknya.

a. Alat yang digunakan:

1. Cawan aluminium
2. Timbangan
3. Mangkok tempat mengaduk tanah
4. Spatula
5. Oven
6. Botol air
7. Kaca datar (**Gambar 3.6**)
8. Standar ukuran berbentuk silinder yang terbuat dari logam dengan diameter mm dan panjang 10 cm sebagai acuan. (**Gambar 3.6**)



Gambar 3.6 Proses Penentuan Batas Plastis
Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium

b. Prosedur Pengujian:

1. Bersihkan cawan aluminium dan timbang beserta tutupnya, catat beratnya.
2. Ambil tanah (yang agak kering) dan letakkan di dalam mangkok.
3. Tambahkan air ke dalam contoh tanah dan aduk dengan spatula sampai merata

4. Ambil contoh tanah kira-kira setengah ruas ujung jari kelingking dan remas-remas sehingga berbentuk seperti bola (kelereng).
5. Letakkan bola tanah tersebut di atas kaca datar dan gulung atau gelintir (*rolled*) menggunakan telapak tangan berulang kali sampai tanah berbentuk silinder dengan diameter 3 mm. (**Gambar 3.6**)
6. Amati tekstur tanah dengan seksama. Apabila contoh tanah yang berbentuk silinder dengan diameter 3 mm tersebut terlihat mulai retak, maka masukkan tanah tersebut ke dalam cawan aluminium dan tutup cawan dengan rapat agar kadar air tidak berubah.
7. Jika tanah yang digulung sampai diameter 3 mm belum terlihat retak, maka tanah terlalu basah dan sebaliknya bila tanah sudah retak sebelum mencapai 3 mm, maka tanah terlalu kering.
8. Ulangi proses ke-3 sampai dengan ke-7, sampai mendapatkan silinder tanah yang mulai retak pada diameter 3 mm.
9. Timbang contoh tanah dan cawan, kemudian masukkan ke dalam oven selama 24 jam pada temperatur 105° +/- 5°C.
10. Keluarkan contoh tanah dari oven dan timbang cawan yang berisi tanah kering.
11. Batas plastis ditentukan berdasarkan kadar air, dimana contoh tanah yang digulung (*rolled*) sampai diameter 3 mm mulai retak. (**Tabel 3.4**)

12.

$$\text{Kadar air } (W_c) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad ()$$

Tabel 3.4 Penentuan Kadar Air pada Batas Plastis (PL)

Batas Plastis (PL)			
No. Cawan		1	2
Berat cawan + contoh basah	gr	12.79	13.04
Berat cawan + contoh kering	gr	12.45	12.47
Berat air	gr	0.34	0.57
Berat cawan	gr	10.51	9.19
Berat contong kering	gr	1.94	3.28
Kadar air	%	17.53	17.38
Rata – rata		17.45	

Sumber: Penelitian 2019

Berdasarkan data pada **Tabel 3.4** diperoleh besarnya Batas Plastis (PL) sebesar 17,45%.

3.6.4 Uji Pemadatan Standard proctor

Proses pemadatan di laboratorium adalah usaha untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum pada energy yang standar, dengan jalan memberikan kadar air yang optimum. Pemadatan dilakukan dengan menggunakan beban standar berdasarkan ASTM D-1586 (1998) dan AASHTO (1982). Hasil yang diperoleh dari pengujian pemadatan biasanya dipersentasikan dalam bentuk grafik hubungan antara berat-volume tanah dalam keadaan kering (*dry density*) dan kadar air (*moisture content*).

- a. Alat yang digunakan:
 1. Standard Proctor
 2. Penumbuk (*rammer*)
 3. Cawan aluminium
 4. Timbangan
 5. Oven

b. Prosedur Pengujian:

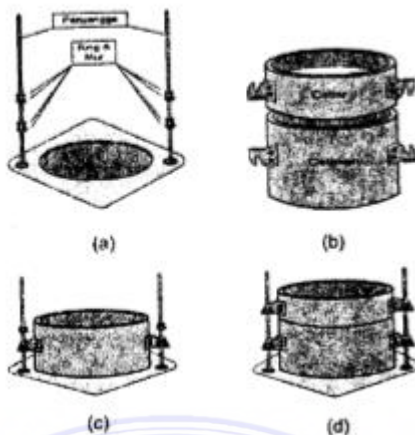
1. Siapkan beberapa cawan aluminium kosong dan bersih, timbang dan catat berat masing-masing.
2. Timbang berat tabung Proctor (*mold*), tanpa alas dan *collar*.
(Gambar 3.7b)
3. Siapkan contoh tanah yang akan ditentukan kepadatannya (beratnya 3-4 kg) dan keringkan di dalam oven selama 24 jam.
4. Keluarkan contoh tanah dari oven, biarkan hingga dingin, tambahkan air sekitar 3% dan berat tanah kering dan aduk sampai rata.
5. Masukkan tanah secukupnya ke dalam tabung silinder yang telah dipasang *collar* **(Gambar 3.7d)**, sehingga volume tanah setelah ditumbuk kira-kira tinggal 1/3 volume tabung. **(Gambar 3.8a)**
6. Tumbuk tanah di dalam tabung secara merata sebanyak 25 kali.
7. Tambahkan tanah ke dalam tabung silinder, sehingga volume tanah setelah ditumbuk sebanyak 25 kali menjadi sekitar 2/3 volume tabung. **(Gambar 3.8b)**
8. Tambahkan tanah ke dalam tabung sampai penuh (mendekati tinggi *collar*) dan tumbuk sebanyak 25 kali. Pastikan bahwa permukaan tanah di dalam tabung setelah ditumbuk lebih tinggi dari tabung (*mold*, tanpa *collar*). **(Gambar 3.8c)**
9. Lepas *collar* dengan hati-hati agar tanah dalam *collar* tidak terpotong.

10. Ratakan tanah di permukaan tabung sedater mungkin, lepas bagian alas tabung, dan timbang (*mold* dan tanah).
11. Keluarkan tanah dari dalam tabung (*mold*).
12. Ambil contoh tanah di bagian atas, tengah, dan bawah tabung, masukkan ke dalam cawan yang telah ditentukan beratnya, untuk menentukan kadar airnya.
13. Timbang cawan dan contoh tanah, masukkan ke dalam oven pada temperature $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam.
14. Pecahkan tanah yang menggumpal setelah dikeluarkan dari tabung Proctor.
15. Tambahkan air (sekitar 3%) ke dalam contoh tanah yang dikeluarkan dari tabung (langkah 11) aduk hingga rata, kemudian ulangi langkah 5 sampai 14.
16. Ulangi proses langkah 15 beberapa kali.
17. Penambahan air dihentikan bila berat tabung dan tanah setelah ditumbuk lebih kecil dari berat tanah dan tabung pada percobaan sebelumnya.
18. Berat volume kering dapat ditentukan dari perumusan:

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + W_c} \quad ()$$

γ_{wet} = berat volume tanah kondisi basah (berat tanah dibagi volumenya)

W_c = kadar air



Gambar 3.7 Peralatan Proctor (Yeop et al. 2000)
Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium



Gambar 3.8 Langkah Proses Pematatan (digambar ulang atas seizing Prof. Yeol, yeol et al. 2000)

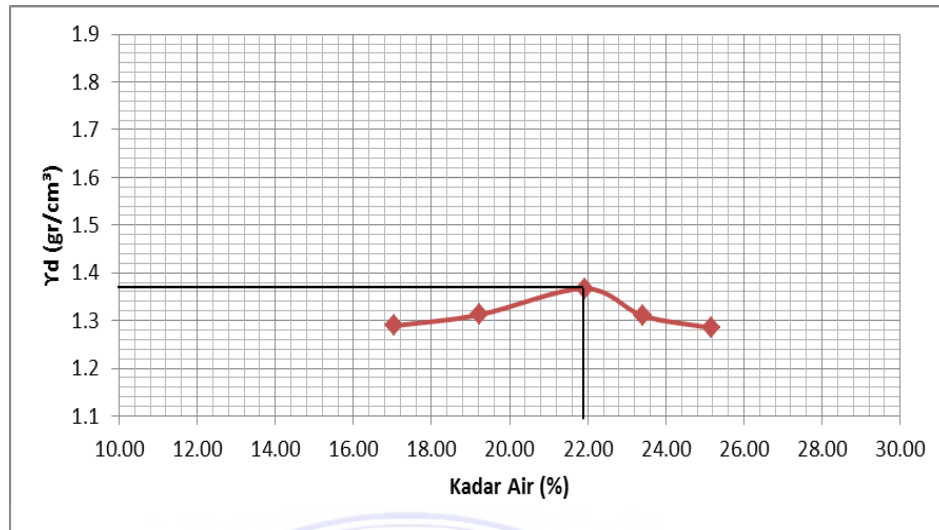
Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium

Hasil pengujian kepadatan tanah dengan memakai Standard Proctor diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 3.5 Hasil Pengujian Pemadatan Standar Proctor

Persiapan Contoh Uji						
Berat tanah basah	(gr)	2000	2000	2000	2000	2000
Kadar air mula-mula	(%)	36.93	36.93	36.93	36.93	36.93
Penambahan air	(%)	2	4	6	8	10
Penambahan air	(cc)	40	80	120	160	200
Berat Isi						
Berat tanah + cetakan	(gr)	6541	6593	6689	6642	6634
Berat cetakan	(gr)	5130	5130	5130	5130	5130
Berat tanah basah	(gr)	1411	1463	1559	1512	1504
Isi cetakan	$t = \frac{d}{11.60}$ $d = 10.13$	935.3	935.3	935.3	935.3	935.3
Berat isi basah	(γ_{tb})	1.509	1.564	1.667	1.617	1.608
Berat isi kering	($\gamma_d = \gamma_{tb} / (100 + w) * 100\%$ (gr/cc))	1.289	1.312	1.367	1.310	1.285
Kadar Air						
Tanah basah + cawan	(gr)	27.41	36.43	33.14	31.55	38.92
Tanah kering + cawan	(gr)	24.81	32.06	29.01	27.51	33.08
Berat air	(gr)	2.60	4.37	4.13	4.04	5.84
Berat cawan	(gr)	9.55	9.32	10.17	10.26	9.86
Berat tanah kering	(gr)	15.26	22.74	18.84	17.25	23.22
Kadar air	(%)	17.04	19.22	21.92	23.42	25.15

Sumber: Penelitian 2019



Gambar 3.9 Kurva Pematadatan
Sumber: Penelitian 2019

3.6.5 Uji CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengujian CBR bertujuan untuk menentukan kekokohan permukaan lapisan tanah yang umumnya akan dipakai sebagai *sub-base* (urugan) atau *sub-grade* (lapisan tanah dasar).

➤ Pengujian kering (*unsoaked*)

a. Alat yang digunakan:

1. Tabung silinder (*mold*) berdiameter 15 cm
2. Penumbuk (*rammer*)
3. Cawan aluminium
4. Timbangan
5. Oven
6. Mesin penekan (*compression machine*)

b. Prosedur pengujian:

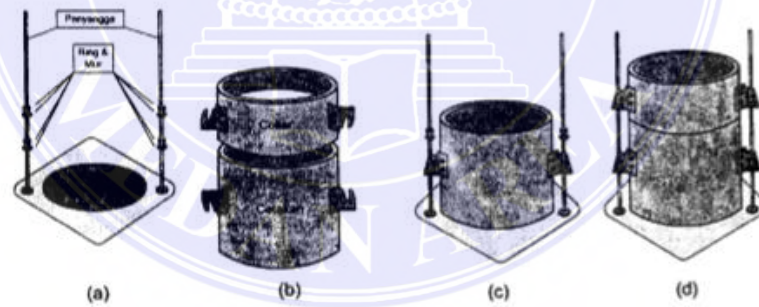
1. Tentukan berat-volume kering (γ_{dry}) maksimum dan kadar air optimum contoh tanah, yang diperoleh dari pengujian standard proctor.
2. Timbang berat tabung (*mold*) CBR, tanpa alas dan *collar*.
3. Siapkan contoh tanah yang akan diuji kekokohannya dan keringkan di dalam oven selama 24 jam.
4. Keluarkan contoh tanah dari oven, biarkan hingga dingin, kemudian tambahkan air sampai kadar air optimum dan aduk sampai rata.
5. Masukkan tanah secukupnya ke dalam tabung silinder CBR yang telah dipasang *collar*, sehingga volume tanah setelah ditumbuk kira-kira tinggal $1/5$ volume tabung.
6. Tumbuk tanah di dalam tabung secara merata sebanyak 56 kali dengan memakai penumbuk (*rammer*) yang dijatuhkan dari ketinggian 45 cm.
7. Ulangi langkah 5 dan 6 sebanyak 5 kali sampai tanah di dalam tabung penuh dan permukaannya rata.
8. Taruh beban standar (berupa lempengan logam yang berlubang di tengahnya) di atas permukaan tanah di dalam tabung CBR.
9. Letakkan tabung yang berisi tanah dan beban standar pada mesin penekan, dan atur ketinggian agar torak penekan yang mempunyai luas penampang 3 inch^2 (diameter 4,96 cm) melewati lubang beban standar dan duduk tepat di atas permukaan contoh tanah.

10. Pasang dan atur *dial* penurunan agar jarum penunjuk penurunan tepat pada posisi nol.
11. Jalankan mesin penekan dengan kecepatan 0,025 inch per menit.
12. Lakukan pembacaan (pencatatan) gaya yang terjadi setiap penetrasi.
13. Gambarkan grafik hubungan antara penetrasi dan gaya tekan yang terjadi.
14. Hitung kekokohan tanah dengan perumusan:

$$CBR_{0,1"} = \frac{\text{Gaya pada penetrasi } 0,1" \text{ [lbs]}}{3000 \text{ [lbs]}} \times 100\% \quad ()$$

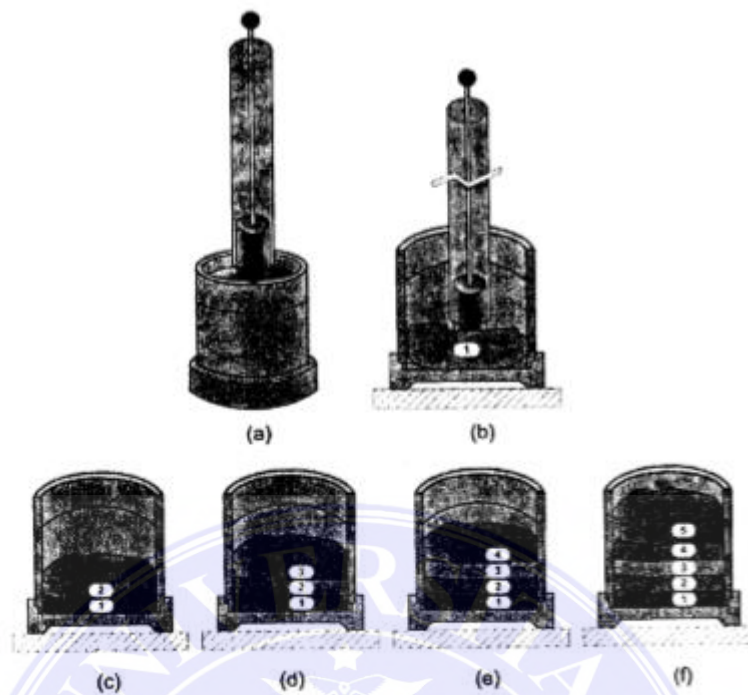
Atau dengan perumusan

$$CBR_{0,2"} = \frac{\text{Gaya pada penetrasi } 0,2" \text{ [lbs]}}{4500 \text{ [lbs]}} \times 100\% \quad ()$$



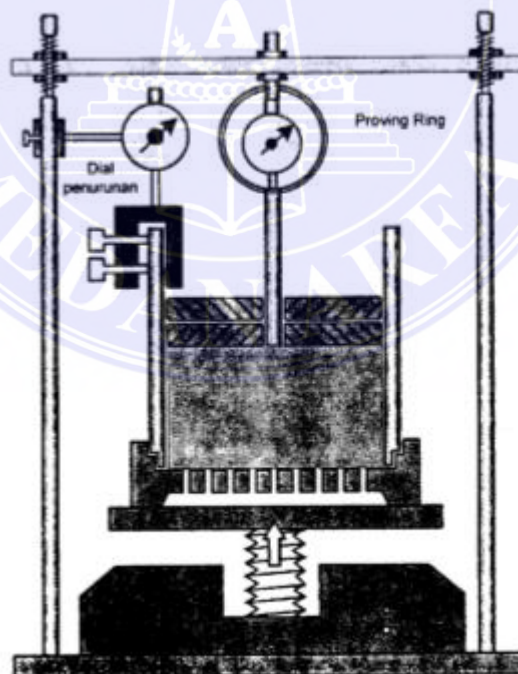
Gambar 3.10 Tabung untuk pengujian CBR (Yeol et al., 2000)

Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium



Gambar 3.11 Langkah Proses Pemasatan (Yeol et al., 2000)

Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium



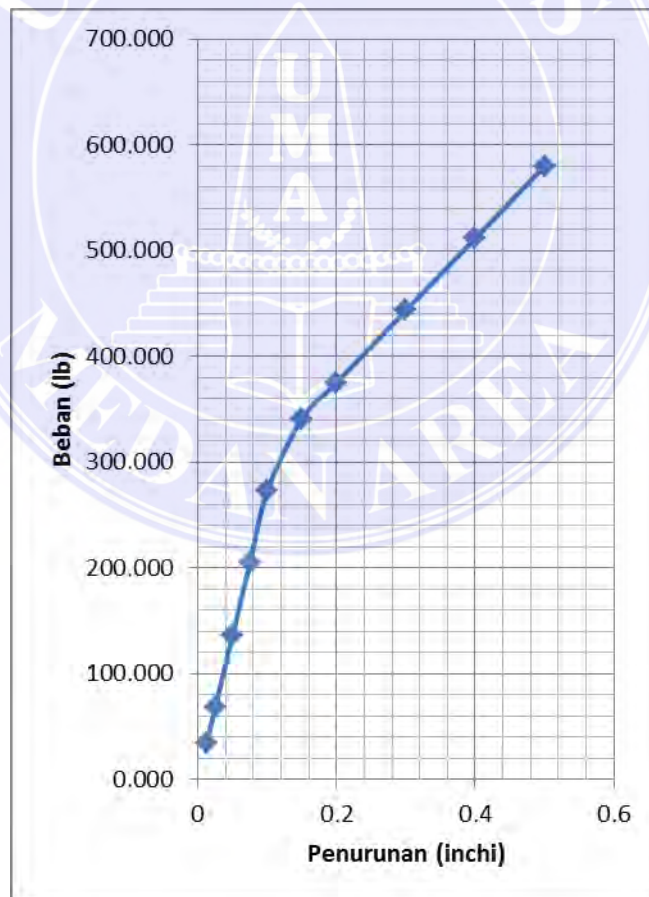
Gambar 3.12 Skema Pengujian CBR di Laboratorium (Yeol et al., 2000)

Sumber: Gogot Setyo Budi, Pengujian Tanah di Laboratorium

Tabel 3.6 Hasil Pengujian CBR

Waktu (min)	Penurunan (inch)	Pembacaan arloji		Beban (LB)	
		atas	bawah	atas	bawah
0	0				
1/4	0.0125	1		34.100	
1/2	0.025	2		68.200	
1	0.05	4		136.400	
1.5	0.075	6		204.600	
2	0.1	8		272.800	
3	0.15	10		341.000	
4	0.2	11		375.100	
6	0.3	13		443.300	
8	0.4	15		511.500	
10	0.5	17		579.700	

Sumber: Penelitian 2019



Gambar 3.13 Hubungan antara Penetrasi dan Gaya
Sumber: Penelitian 2019

3.7 Penelitian pada Tanah yang Distabilisasi dengan Kapur

Pada pengujian ini, tanah yang diuji adalah tanah lempung yang telah dicampur dengan kapur. Pada proses penelitian ini, dilakukan pemeraman agar dapat mengetahui perubahan yang terjadi akibat oleh proses kimia antara tanah lempung, kapur dan air. Cara perawatan yang dilakukan terhadap benda uji adalah perawatan kering dimana sampel dibungkus dengan plastic transparan pada suhu kamar, yang diharapkan tidak terjadi terlalu banyak perubahan pada kadar airnya.

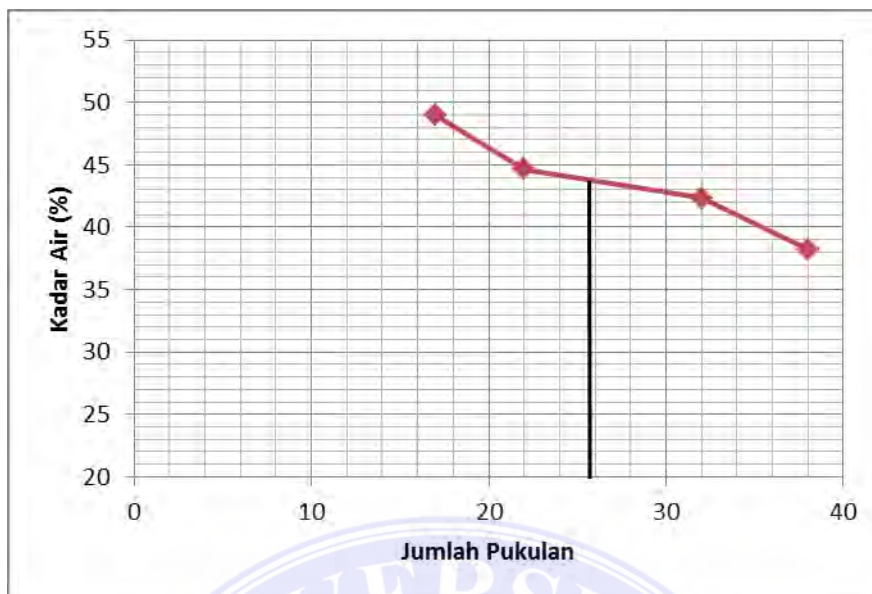
3.7.1 Pengujian Batas-batas Atterberg

Seperti yang telah dipaparkan di atas, pada penelitian ini dilakukan pengujian batas cair (*LL*) dan batas plastis (*PL*). Hasil penelitian yang akan dipaparkan adalah hasil pengujian dengan tanah lempung dengan penambahan kapur sebanyak 6% dari berat tanah asli.

Tabel 3.7. Hasil Pengujian Batas Cair pada Penambahan Kapur 6 %

Batas Cair (LL)		17 kali	22 kali	32 kali	38 kali
No. Cawan		1	2	3	4
Berat cawan + contoh basah	gr	36.59	36.44	34.44	36.24
Berat cawan + contoh kering	gr	27.34	27.89	26.85	28.68
Berat air	g r	9.25	8.55	7.59	7.56
Berat cawan	g r	8.46	8.75	8.93	8.91
Berat contong kering	g r	18.88	19.14	17.92	19.77
Kadar air	%	48.99	44.67	42.35	38.24
Batas Cair (LL)		46.76	43.99	43.64	40.23
Rata – rata				43.65	

Sumber: Penelitian 2019



Gambar 3.14. Grafik Hubungan antara Kadar Air dengan Pukulan pada Variasi Campuran 6% Kapur
Sumber: Penelitian 2019

Tabel 3.8. Hasil Pengujian Batas Plastis pada Penambahan Kapur 6 %

Batas Plastis (PL)			
No. Cawan		1	2
Berat cawan + contoh basah	gr	18.2	17.56
Berat cawan + contoh kering	gr	16.71	16.19
Berat air	gr	1.49	1.37
Berat cawan	gr	8.44	8.58
Berat contong kering	gr	8.27	7.61
Kadar air	%	18.02	18.00
Rata - rata		18.01	

Sumber: Penelitian 2019

Dari pengujian batas cair dan plastis tanah lempung dengan variasi campuran

6% kapur, diperoleh data-data sebagai berikut:

$$\text{Batas Cair (LL)} = 43,65 \%$$

$$\text{Batas Plastis (PL)} = 18,01 \%$$

$$\text{Indeks Plastisitas (PI)} = 25,64 \%$$

Berikut adalah hasil penelitian batas cair dan batas plastis dari stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan variasi campuran kapur 0%, 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%.

Tabel 3.9. Hasil penelitian batas cair dan batas plastis tanah lempung setelah distabilisasi dengan kapur

Jenis Sampel	Penambahan Kapur (%)	Batas Cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastis (PI) (%)
Tanah Asli	0	47.11	17.45	29.66
Tanah Asli + 2% Kapur	2	45.82	17.76	28.06
Tanah Asli + 4% Kapur	4	45.37	17.85	27.52
Tanah Asli + 6 % Kapur	6	43.56	18.01	25.55
Tanah Asli + 8 % Kapur	8	43.51	18.31	25.20
Tanah Asli + 10 % Kapur	10	43.08	18.95	24.13

Sumber: Penelitian 2019

3.7.2 Pengujian Pemadatan (*Compection Test*)

Pengujian pemadatan proctor standar bertujuan untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum pada energy standar, dengan jalan memberikan kadar air yang optimum. Kegunaan pengujian proctor standar untuk mencari nilai kepadatan maksimum dan kadar air optimum dari suatu sampel tanah.

Hasil pengujian proctor standar pada variasi campuran 6% kapur adalah:

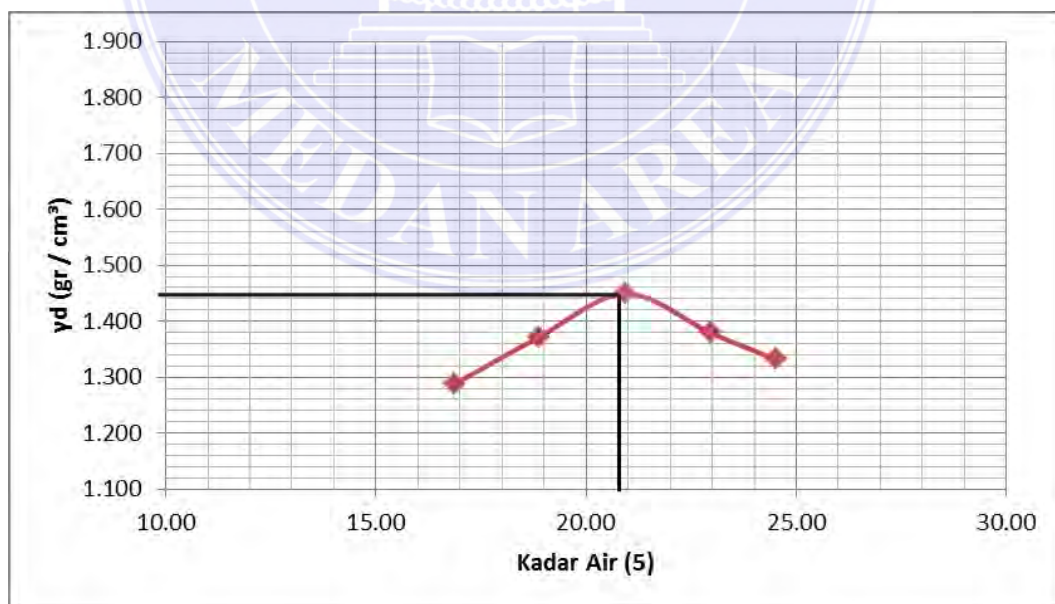
Tabel 3.10. Hasil pengujian proctor standar dengan variasi campuran 6% kapur

Persiapan Contoh Uji						
Berat tanah basah	(gr)	2000	2000	2000	2000	2000
Kadar air mula-mula	(%)	36.93	36.93	36.93	36.93	36.93
Penambahan air	(%)	2	4	6	8	10
Penambahan air	(cc)	40	80	120	160	200

Berat Isi						
Berat tanah + cetakan	(gr)	6538	6655	6769	6716	6681
Berat cetakan	(gr)	5130	5130	5130	5130	5130
Berat tanah basah	(gr)	1408	1525	1639	1586	1551
Isi cetakan	$t = d =$	935.3	935.3	935.3	935.3	935.3
Berat isi basah	(γ_{tb})	1.505	1.631	1.752	1.696	1.658
Berat isi kering	($\gamma_d = \gamma_{tb} / (100 + w) * 100\%$ (gr/cc))	1.288	1.372	1.449	1.379	1.332

Kadar Air						
Tanah basah + cawan	(gr)	29.92	35.53	32.25	34.21	33.02
Tanah kering + cawan	(gr)	26.80	31.21	28.36	29.52	28.14
Berat air	(gr)	3.12	4.32	3.89	4.69	4.88
Berat cawan	(gr)	8.32	8.32	9.78	9.09	8.23
Berat tanah kering	(gr)	18.48	22.89	18.58	20.43	19.91
Kadar air	(%)	16.88	18.87	20.94	22.96	24.51

Sumber: Penelitian 2019



Gambar 3. 15. Grafik Hubungan antara Berat isi kering (Y_d) dengan Kadar Air Optimum pada Variasi 6% Kapur
Sumber: Penelitian 2019

Berikut adalah hasil penelitian uji standar proctor dari stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan variasi campuran kapur 0%, 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%.

Tabel 3.11. Hasil Penelitian Standar Proctor Terhadap Berbagai Variasi Penambahan Campuran Kapur

Jenis Sampel	Penambahan Kapur (%)	Wc opt (%)	Berat isi kering Yd max (gr/cm ³)
Tanah Asli	0	21.92	1.367
Tanah Asli + 2% Kapur	2	20.85	1.460
Tanah Asli + 4% Kapur	4	21.12	1.463
Tanah Asli + 6 % Kapur	6	20.94	1.449
Tanah Asli + 8 % Kapur	8	20.90	1.430
Tanah Asli + 10 % Kapur	10	20.81	1.450

Sumber: Penelitian 2019

3.7.3 Percobaan CBR Laboratorium

California Bearing Ratio (CBR) merupakan suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standar load*) dan dinyatakan dalam persentase. CBR merupakan perbandingan antara bahan penetrasi suatu bahan terhadap beban standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Harga CBR adalah nilai yang menyatakan kualitas tanah dasar dibandingkan dengan bahan standar berupa batu pecah yang mempunyai nilai CBR sebesar 100% dalam memikul beban lalu lintas.

Pengujian CBR dilakukan dengan dengan cara melakukan penetrasi ke dalam contoh uji dengan kecepatan penetrasi konstan dan besarnya beban

yang diperlukan untuk mempertahankan kecepatan penetrasi tertentu. Umumnya harga CBR diambil pada penetrasi 2.54 mm (0.1") dengan standar beban 13.24 kN atau setara dengan 3000 lbs.

Berikut adalah data yang diperoleh dari hasil penelitian CBR laboratorium pada sampel 65 tumbukan, variasi campuran 6% kapur.

Tabel 3.12. Hasil Pengujian CBR Laboratorium dengan Variasi 6% Kapur

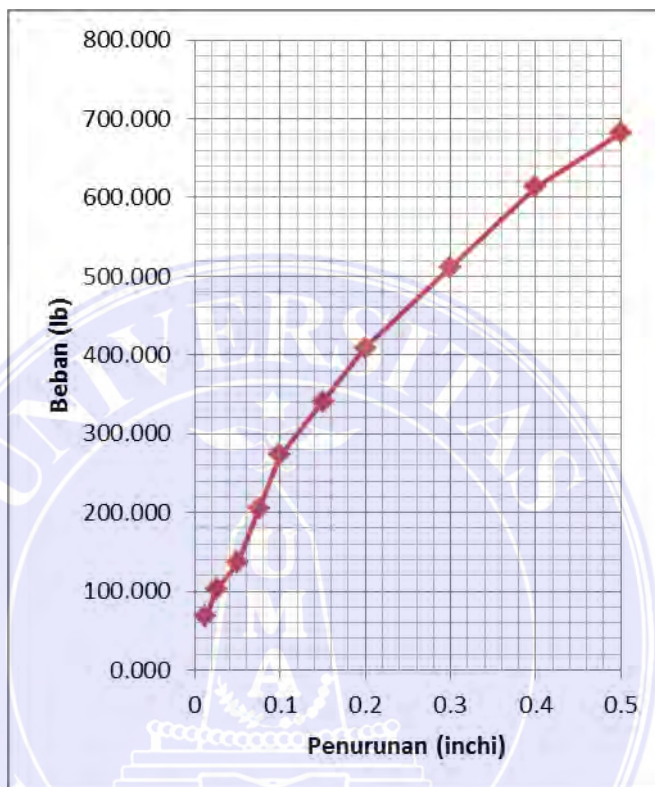
Berat Isi Kering					
Berat tanah & mold (gr)		11592		gr	
Berat mold (gr)		7679		gr	
Berat tanah basah (gr)		3913		gr	
Isi mold (cm ³)		2123		cm ³	
Berat isi basah (gr/cm ³)		1.843		gr/cm ³	
Berat isi kering (gr/cm ³)		1.535		gr/cm ³	

65 x Tumbukan					
Waktu (min)	Penurunan (inch)	Pembacaan arloji		Beban (LB)	
		atas	bawah	atas	bawah
0	0				
1/4	0.0125	2		68.200	
1/2	0.025	3		102.300	
1	0.05	4		136.400	
1.5	0.075	6		204.600	
2	0.1	8		272.800	
3	0.15	10		341.000	
4	0.2	12		409.200	
6	0.3	15		511.500	
8	0.4	18		613.800	
10	0.5	20		682.000	

Kadar Air

Tanah basah + cawan (gr)	42.75
Tanah kering + cawan (gr)	36.98
Berat cawan (gr)	8.25

Berat air (gr)	5.77
Tanah kering (gr)	28.73
Kadar air (%)	20.08
Sumber: Penelitian 2019	



Gambar 3.16 Grafik Hubungan antara Beban dan Penurunan pada 65 tumbukan dengan Variasi Campuran 6% Kapur
Sumber: Penelitian 2019

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan analisa yang dilakukan oleh penyusun, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Dari hasil pengujian Indeks Plastisitas (*PI*) didapatkan bahwa tanah yang diuji merupakan tanah lempung berplastisitas tinggi yang memiliki nilai sebesar 29,66% dan jenis tanah ini sesuai dengan salah satu kriteria tanah yang dapat distabilisasi dengan kapur (*dolomite*). Nilai batas cair (*LL*) dan Indeks Plastisitas (*PI*) juga mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar kapur. Nilai batas cair yang didapatkan menurun dari 47,11% menjadi 43,08% dan nilai indeks plastisitas yang didapatkan juga menurun dari 29,66% menjadi 24,13%. Sedangkan nilai batas plastis mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kadar kapur dari 17,45% menjadi 18,95%.

Dari hasil pengujian juga didapatkan bahwa kenaikan nilai CBR unsoaked tertinggi terjadi pada penambahan 8% kapur yaitu sebesar 13,99%. Hasil stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan campuran kapur ini dapat memenuhi persyaratan CBR tanah dasar (*subgrade*) minimal 6%.

5.2 SARAN

1. Dalam melaksanakan penelitian di laboratorium sebaiknya menyiapkan bahan penelitian seperti tanah diambil dalam waktu yang berdekatan

dengan waktu yang berdekatan dengan waktu memulai penelitian agar kadar air tanah tidak berkurang.

2. Proses pencampuran tanah dengan kapur harus lebih diperhatikan agar mendapatkan data yang lebih akurat.
3. Ketika melakukan penelitian usahakan untuk tidak lupa mengambil foto dokumentasi.



DAFTAR PUSTAKA

- B. Mochtar Indrasurya, Noor Endah dan Braja M. Das.** 2017. *Mekanika Tanah (Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Erlangga, Surabaya.
- Budi Gogot Setyo.** 2011. *Pengujian Tanah di Laboratorium*. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Darwis, H.** 2017. *Dasar – dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Pustaka AQ, Yogyakarta.
- Hardiyatmo C. Hary.** 2016. *Mekanika Tanah 1*. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hardiyatmo C. Hary.** 2017. *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan*. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hatmoko John Tri.** 2007. USC Tanah Lempung Ekspansif yang Distabilisasi dengan Abu Ampas Tebu dan Kapur. *Jurnal Teknik Sipil*. 8 : 64 – 77.
- Panguriseng Darwis.** 2001. *Stabilisasi Tanah*. Buku Ajar Universitas “45”, Makasar.
- Ranggaesa, Riota Abeng dan Zaika Yulvia dan Suroso.** Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Kekuatan dan Pengembangan (*swelling*) Pada Tanah Lempung Ekspansif Bojonegoro. *Jurnal Jurusan Teknik Sipil*.
- Sitomorang, Bachtiar Efendi.** 2018. *Pengaruh Waktu Pemeraman Dengan Menambahkan Kapur Sebagai Bahan Additive Pada Tanah Lempung Ekspansif Terhadap Nilai CBR Tanah*. Skripsi. Universitas Medan Area.

Sudjianto, Agus Tugas. 2015. *Tanah Ekspansif Karakteristik dan Pengukuran Perubahan Volume*. Graha Ilmu, Jawa Timur.

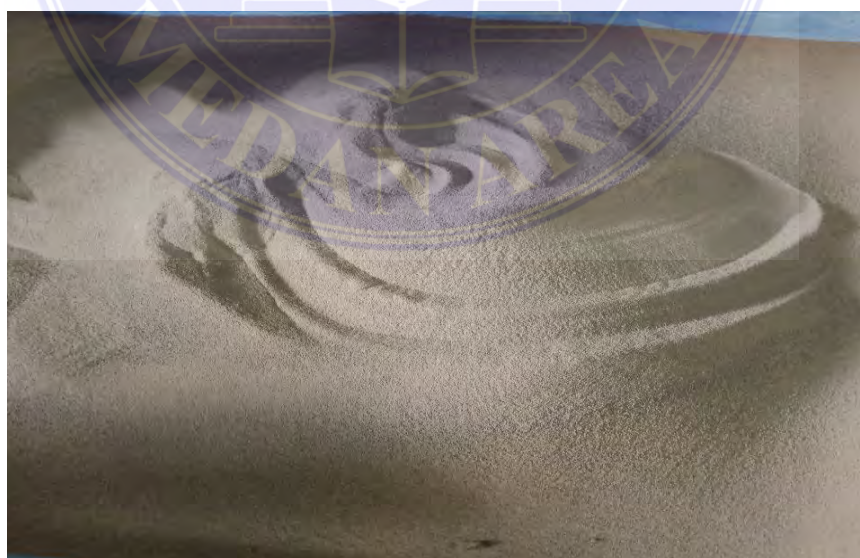
Widianti, Anita. 2009. Peningkatan Nilai CBR Laboratorium Rendaman Tanah dengan Campuran Kapur, Abu Sekam Padi dan Serat Karung Plastik. *Jurnal Ilmiah Semesta Tenika*. 12 (1) : 21 – 27.



LAMPIRAN



Tanah Lempung Sebelum Dihaluskan



Tanah Lempung Setelah Lolos Saringan No. 40



Proses Pengeringan Tanah dengan Oven



Proses Pengujian Berat Jenis Tanah di Dalam Desikator



Proses Pengujian Batas Cair (LL)



Proses Pengujian Batas Plastis (PL)

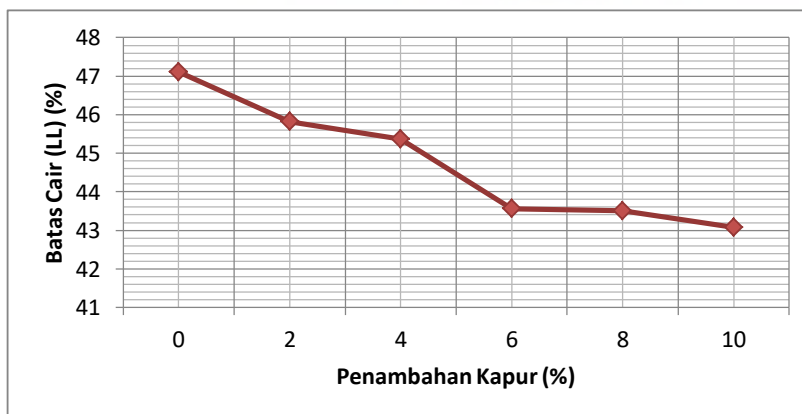
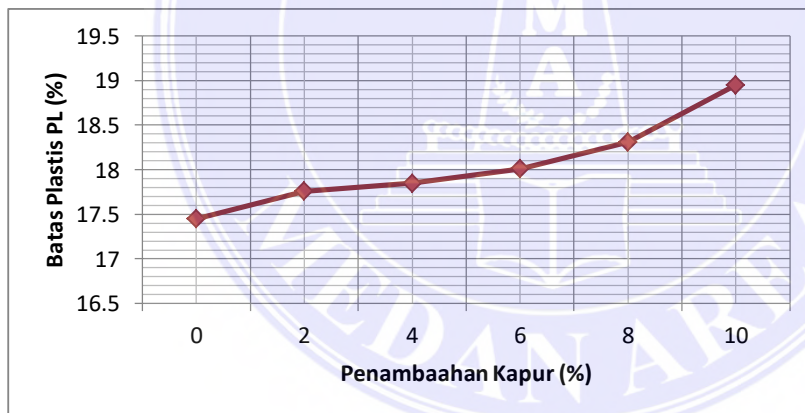
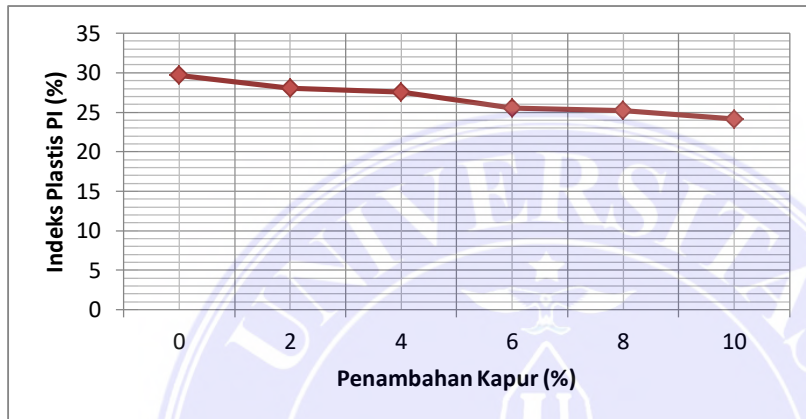


Proses Mengeluarkan Benda Uji Setelah Pengujian Pemadatan Standar

Proctor

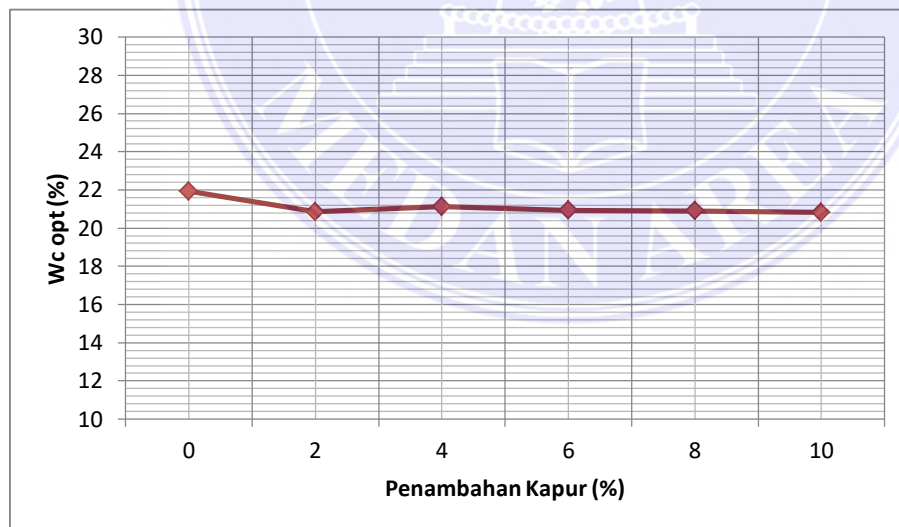
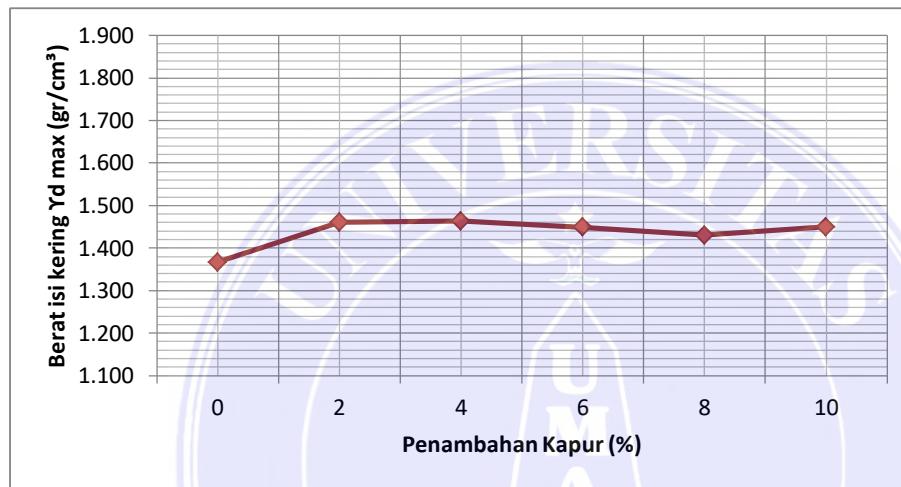
Pengaruh penambahan kapur pada tanah lempung terhadap batas-batas atterberg

Jenis Sampel	Penambahan Kapur (%)	Batas Cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastis (PI) (%)
Tanah Asli	0	47.11	17.45	29.66
Tanah Asli + 2% Kapur	2	45.82	17.76	28.06
Tanah Asli + 4% Kapur	4	45.37	17.85	27.52
Tanah Asli + 6 % Kapur	6	43.56	18.01	25.55
Tanah Asli + 8 % Kapur	8	43.51	18.31	25.20
Tanah Asli + 10 % Kapur	10	43.08	18.95	24.13



Pengaruh penambahan kapur pada tanah lempung terhadap pematatan

Jenis Sampel	Penambahan Kapur (%)	Wc opt (%)	Berat isi kering γ_d max (gr/cm ³)
Tanah Asli	0	21.92	1.367
Tanah Asli + 2% Kapur	2	20.85	1.460
Tanah Asli + 4% Kapur	4	21.12	1.463
Tanah Asli + 6 % Kapur	6	20.94	1.449
Tanah Asli + 8 % Kapur	8	20.90	1.430
Tanah Asli + 10 % Kapur	10	20.81	1.450



Pengaruh Penambahan Kapur Pada Tanah Lempung Terhadap Nilai CBR

Jenis Sampel	Penambahan Kapur (%)	CBR 0,1"	CBR 0,2"
Tanah Asli	0	7.65	8.39
Tanah Asli + 2 % Kapur	2	8.04	8.80
Tanah Asli + 4 % Kapur	4	7.37	8.03
Tanah Asli + 6 % Kapur	6	8.21	9.04
Tanah Asli + 8 % Kapur	8	13.99	14.08
Tanah Asli + 10 % Kapur	10	11.38	11.91

