

**PENAMBAHAN MIKROBA *BACILLUS SUBTILLIS* DAN
PASIR UNTUK STABILISASI TANAH GAMBUT**

TESIS

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Guna Memperoleh Gelar Magister Teknik Sipil pada
Program Pascasarjana Teknik Sipil



Oleh:

MAWARDI
NPM. 183121001

**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM RIAU
2021**

TESIS

PENAMBAHAN MIKROBA *BACILLUS SUBTILLIS* DAN PASIR
UNTUK STABILISASI TANAH GAMBUT

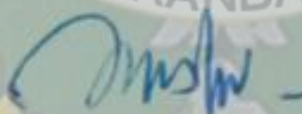
Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

MAWARDI
NPM. 183121001

Program Studi : Teknik Sipil
Bidang Kajian : Geoteknik dan Jalanraya

Telah dipertahankan di depan dewan penguji
Pada tanggal : 09 Agustus 2021
Dan dinyatakan LULUS

Dewan Penguji
Ketua Penguji


Dr. Anas Puri, ST., MT

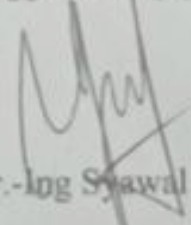
Perpustakaan Universitas Islam Riau

Dokumen ini adalah Arsip Milik :

Anggota Penguji I


Dr. Elizar, ST., MT

Anggota Penguji II


Dr.-Igg Syawal Satibi

Mengetahui

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Islam Riau

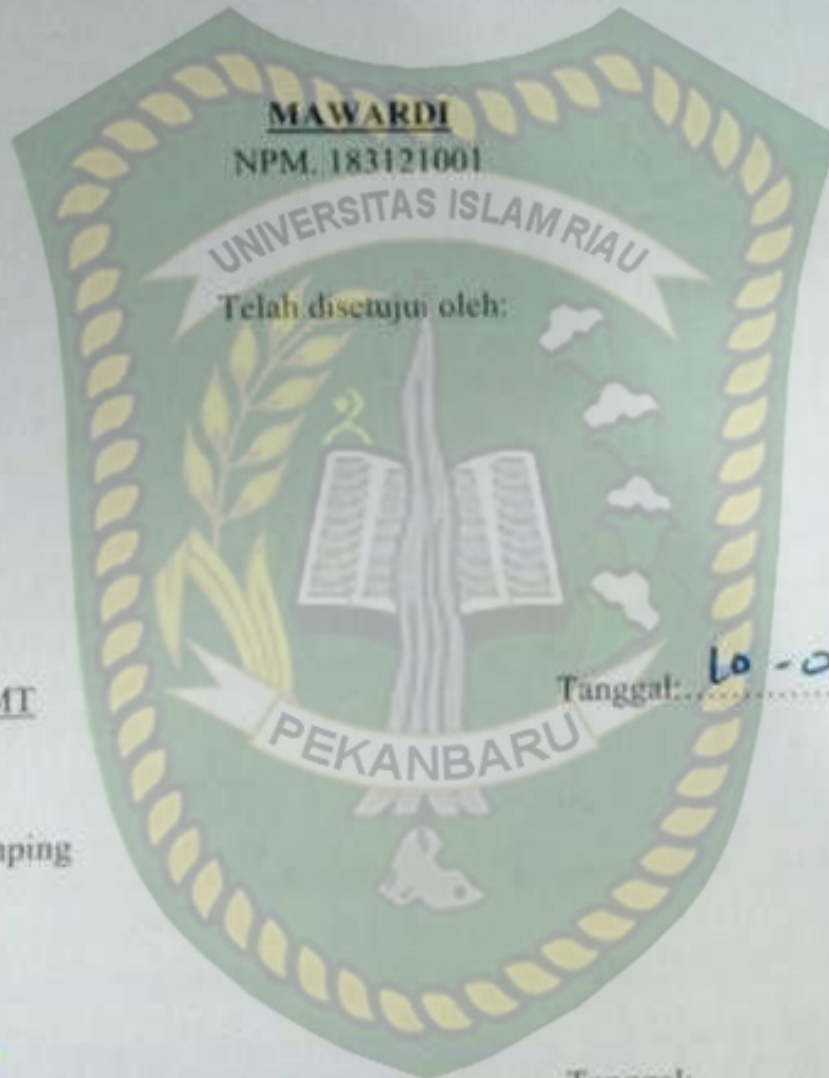

Prof. Dr. H. Yusri Munaf, SH., M.Hum



LEMBAR PENGESAHAN
TESIS

PENAMBAHAN MIKROBA *BACILLUS SUBTILLIS* DAN PASIR
UNTUK STABILISASI TANAH GAMBUT

Yang dipersiapkan dan diajukan oleh:



MAWARDI

NPM. 183121001

UNIVERSITAS ISLAM RIAU


Telah disetujui oleh:

Tanggal: 10-08-2021

PEKANBARU

Tanggal:

Perpustakaan
Dokumen ini adalah
Pembimbing Utama


Dr. Anas Puri, ST., MT

Pembimbing Pendamping


Dr. Elizar, ST., MT

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh gelar Magister Teknik



Tanggal:


Dr. Elizar, ST., MT

Ketua Prodi Magister Teknik Sipil

UNIVERSITAS ISLAM RIAU
PROGRAM PASCASARJANA

Jalan Baharmudilila Vocation No. 113 Pekanbaru 20201 Riau
Telp. (+62) (761) 67-1717 - 70-17726 Fax. (+62) (761) 67-1717

SKRIPSI KEPUTUSAN DIREKTUR PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS ISLAM RIAU
MUSYAWARAH 742

TENTANG PENUNJUKAN PEMBIMBING PENULISAN TESIS MAHASISWA
PROGRAM MAGISTER (S2) TEKNIK SIPIL PPS UIR

DIREKTUR PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS ISLAM RIAU

1. Bahwa penunjukan pembimbing tugas ini merupakan salah satu syarat bagi mahasiswa dalam menyelesaikan skripsi pada Program Magister (S2) Teknik Sipil PPS - UIR
2. Bahwa dalam rangka menunjang proses penulisan dan penyelesaian tesis perlu ditunjuk pembimbing yang akan membimbing dan mengawasi proses penulisan tesis
3. Bahwa dalam rangka menunjang proses penulisan dan penyelesaian tesis perlu ditunjuk pembimbing yang akan membimbing dan mengawasi proses penulisan tesis

Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012
Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2012 Tentang Kenaikan Kualifikasi Nasional Indonesia
Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2009 Tentang Dosen
Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 58 Tahun 2010 Tentang Pengelolaan dan Penyelenggaraan Pendidikan
Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 45 Tahun 2009 Tentang Sistem Penjaminan Mutu Pendidikan
Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 45 Tahun 2014 Tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi
Statuta Universitas Islam Riau Tahun 2016
Peraturan Universitas Islam Riau Tahun Nomor 001 Tahun 2018 Tentang Ketentuan Akademik Bidang Pendidikan Universitas Islam Riau

MEMUTUSKAN

Menunjuk

No	Nama	Jabatan Fungsional	Bertugas Sebagai
1	Dr. Anas Pili, ST, MT	Lektor Kepala	Pembimbing I
2	Dr. Elzar, ST, MT	Lektor	Pembimbing II

Untuk Penulisan Tesis Mahasiswa

Nama: MAWARDI
N.P.M: 183121001
Program Studi: Teknik Sipil
Judul Proposal Tesis: PENAMBAHAN MIKROBA BACILLUS SUBTILLIS DAN PASIR UNTUK STABILITAS TANAH GAMBUT

2. Tugas - tugas pembimbing adalah memberikan bimbingan kepada mahasiswa Program Magister (S2) Teknik Sipil dalam penulisan tesis
 3. Dalam pelaksanaan bimbingan supaya diperhatikan usul dan saran dari forum seminar proposal dan ketentuan penulisan tesis sesuai dengan Buku Pedoman Program Magister (S2) Teknik Sipil
 4. Kepada yang bersangkutan dibenarkan honorarium, sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Riau
 5. Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan dengan ketentuan bila terdapat kekeliruan segera ditinjau kembali.
- KUTIPAN Disampaikan kepada yang bersangkutan untuk dapat diketahui dan dindahkan

DITETAPKAN DI
PADA TANGGAL
Direktur
PEKANBARU
06 Desember 2019

Dr. Ir. Salpul Bahri, M.Eng.
NPK. 921102199



UNIVERSITAS ISLAM RIAU

PROGRAM PASCASARJANA

Jalan KH. Nasution No. 113 Gedung B Pascasarjana Universitas Islam Riau
Marpoyan Damai, Pekanbaru, Riau

SURAT KETERANGAN BEBAS PLAGIAT

Nomor: 162/A-UIR/5-PPS/2021

Program Pascasarjana Universitas Islam Riau menerangkan:

Nama : **MAWARDI**
NPM : **183121001**
Program Studi : **Magister Teknik Sipil**

telah melalui proses pemeriksaan kemiripan karya ilmiah (tesis) menggunakan aplikasi Turnitin pada tanggal 06 Agustus 2021 dan dinyatakan memenuhi syarat batas maksimal tingkat kemiripan tidak melebihi 30 % (tiga puluh persen).

Demikian surat keterangan bebas plagiat ini dibuat sesuai dengan keadaan sebenarnya, agar dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Mengetahui
Studi. Magister Teknik Sipil

Pekanbaru, 06 Agustus 2021
Staf Pemeriksa



H. Elizar, S.T., M.T.

Meini Giva Putri, S.Pd.

Lampiran :

- Turnitin Originality Report
- Arsip Syafitri_ind05

Turnitin Originality Report

Submitted on: 26-Aug-2021 08:13 WIB

ID: 181826143

Word Count: 1208

Submitted: 1

PENAMBAHAN MIKROBA BACILLUS
SUBTILIS DAN PASIR UNTUK
STABILISASI TANAH GAMBUT By
Mawardi

2% match (Internet from 03-Jul-2017)

Similarity by Source	Similarity by Source
13%	17% 4% 4%

http://repository.unhas.ac.id/bitstream/handle/123456789/7345_1A.docx?sequence=1

1% match (Internet from 02-Sep-2019)

<http://journal.umpanokaraya.ac.id/index.php/mits/article/download/249/241/>

1% match (Internet from 30-Jan-2020)

<https://id.scribd.com/doc/293512046/Panduan-Geoteknik-1>

1% match (Internet from 24-May-2014)

http://r.unira.ac.id/wp-content/uploads/2012/07/oambut_berserat.pdf

1% match (Internet from 06-Feb-2021)

<http://www.coursehero.com/file/68405611/Laporan-IA5-Macromen-Strategik.docx/>

1% match (Internet from 17-Nov-2020)

<http://dspace.uil.ac.id/bitstream/handle/123456789/10561/05.5%20bab%205.pdf?sequence=2>

1% match (student papers from 23-Aug-2018)

Submitted to Universitas Islam Indonesia on 2018-08-23

1% match (Internet from 09-Jan-2019)

<http://repository.unair.ac.id/25630/14/14.%20bab%202.pdf>

1% match ()

"Bacillus subtilis". Wikipedia. id. 2021

1% match (Internet from 16-Sep-2017)

<https://documents.mx/documents/nidn-salah.html>

1% match (Internet from 13-Jan-2021)

<http://ecampus.sttind.ac.id/sttind/AmbilLampiran?clazz=ais.database.model.file.LampiranLain&download=false&jenis=Item&jurusan=&ref=2739&usingId=fais>

1% match (Internet from 23-Oct-2020)

<https://odoc.tips/modul-praktikum-laboratorium-uji-tanah-pdf-free.html>

1% match ()

Yulianto, Faisal Estu. "Model Laboratorium Untuk Menentukan Zona Efektif Pada Tanah Gambut Berserat Yang Distabilisasi Dengan Campuran Kapur Dan Abu Terbang". 2016

Perpustakaan
Universitas Islam
Indonesi

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mahasiswa Pascasarjana Universitas Islam Riau Program Magister Teknik Sipil peserta ujian komprehensif penelitian yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mawardi
NIM : 1483121001
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Jenjang Pendidikan : Strata Dua (S2)
Judul Tesis : Penambahan Mikroba *Bacillus Subtilis* Dan Pasir Untuk Stabilisasi Tanah Gambut

Sebagai naskah yang didaftar pada ujian komprehensif ini beserta seluruh dokumentasi persyaratan yang melekat padanya dengan ini saya menyatakan :

1. Bahwa, Naskah Tesis ini adalah benar hasil karya sendiri (tidak karya plagiari) yang saya tulis sesuai dan mengacu kepada kaidah-kaidah metode penelitian ilmiah dan penulisan karya ilmiah.
2. Bahwa, keseluruhan persyaratan administrasi, akademik dan keuangan yang melekat padanya benar telah saya penuhi sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan
3. Bahwa, apabila kemudian hari ditemukan dan terbukti secara sah atau keseluruhan atas persyaratan butir 1 dan butir 2 tersebut diatas, maka saya menyatakan bersedia menerima sanksi pembatalan hasil ujian komprehensif yang telah saya ikuti serta sanksi lainnya sesuai dengan ketentuan yang ada

Demikian persyaratan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa tekanan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru 13 Agustus 2021

Pelaku Pernyataan



MAWARDI

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR NOTASI	ix
BAB I PENDAHULUAN	5
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Rumusan Masalah.....	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	8
1.5 Batasan Masalah.....	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu (<i>State of art</i>).....	9
2.2 Legalitas Penelitian.....	11
BAB III LANDASAN TEORI	9
3.1 Umum.....	9
3.2 Bio-grouting.....	10
3.3 Bacillus Subtilis.....	12
3.3.1 Klasifikasi Bacillus Subtilis.....	13
3.3.2 Karakteristik Bacillus Subtilis.....	13
3.4 Tanah Gambut.....	13
3.4.1 Klasifikasi Tanah Gambut.....	14
3.4.2 Sifat Fisik Tanah Gambut.....	15
3.4.3 Faktor yang Mempengaruhi Perilaku Gambut.....	17
A. Kadar Air Tanah.....	17
B. Berat Spesifik (<i>Specific Gravity</i>).....	18
C. Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>).....	19
D. Kompresibilitas (<i>Compressibility</i>).....	20
E. Permeabilitas (<i>Permeability</i>).....	21

F. Berat Isi dan Angka Pori	23
3.5 Kuat Tekan Bebas (UCS)	23
3.6 CBR (California Bearing Ratio)	25
3.6.1 CBR Laboratorium	26
3.6.2 CBR Lapangan (<i>CBR field</i>)	27
BAB IV METODE PENELITIAN	31
4.1 Umum	31
4.2 Lokasi Penelitian dan Lokasi Pengambilan Sampel	31
4.3 Bagan Alir Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
4.4 Bahan Eksperimen.....	32
4.4.1 Peralatan Pengujian Penelitian	34
4.4.2 Peralatan Pengujian Pendahuluan.....	35
4.4.3 Peralatan Pengujian Utama (kuat Tekan Bebas)	38
4.5 Pembuatan Larutan Sementasi (<i>Reagen Bakteri</i>)	39
4.6 Pengujian Pendahuluan.....	42
4.7 Pegujian falling head	Error! Bookmark not defined.
4.8 Pengujian Utama.....	44
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	73
5.1 Deskripsi Umum.....	73
5.2 Pengujian Pendahuluan.....	73
5.2.1 Kadar Air Tanah Gambut	73
5.2.2 Berat Spesifik (Gs)	73
5.2.3 Pengujian Pematatan / <i>proctor test</i>	74
5.3 Sifat-sifat Tanah Gambut.....	75
5.4 Pengujian Kuat Tekan Bebas.....	77
5.4.1 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (<i>Reagen Bakteri</i>) Sebanyak 0%	80
5.4.2 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (<i>Reagen Bakteri</i>) Sebanyak 5%	81

5.4.3 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 10%	82
5.4.4 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 15%	83
5.4.5 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 20%	84
5.4.6 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 25%	85
5.4.7 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5 % Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)	Error! Bookmark not defined.
5.5 Pengujian Permeabilitas Tanah Gambut dengan Metode <i>Falling Head</i>	Error! Bookmark not defined.
5.6 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Bebas Penelitian Ini Dari Stabilisasi Bio-Grouting Dengan Metode Lainnya.....	88
5.7 Perilaku Keruntuhan	91
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	77
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	12
Gambar 3.2 Hubungan antara batas cair dan kadar organik (Panduan Geoteknik 1, 2001)	22
Gambar 3.3 Data tes Odeometer dari Bereng bengkel (Panduan Geoteknik 1, 2001)	23
Gambar 4.1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel (<i>Google Earth, 2020</i>)	31
Gambar 4.2 Denah Penelitian	32
Gambar 4.3 Bagan Alir Penelitian	33
Gambar 4.4 Tanah Gambut	34
Gambar 4.5 Pasir	35
Gambar 4.6 Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	35
Gambar 4.7 Senyawa urea	36
Gambar 4.8 Senyawa CaCl	36
Gambar 4.9 Alat Cawan	37
Gambar 4.10 Alat Timbangan	38
Gambar 4.11 Alat Oven	38
Gambar 4.12 Alat Piknometer dan Timbangan	39
Gambar 4.13 Alat Kompor Gas	39
Gambar 4.14 Alat Cawan	39
Gambar 4.15 Alat Botol Air Suling	40
Gambar 4.16 Alat Uji Pemadatan Tanah	41
Gambar 4.17 Proses Pembuatan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)	44
Gambar 4.18 Proses Penyaringan Larutan	44
Gambar 4.19 Pengujian Kadar Air Tanah Asli	45
Gambar 4.20 Pengujian Berat jenis	46
Gambar 4.21 Pengujian Pemadatan / <i>Proctor Test</i>	47
Gambar 4.22 Pembuatan dan Pengujian Sampel Uji CBR	51
Gambar 5.1 Hubungan Berat Volume Kering dengan Kadar Air	53
Gambar 5.2 Grafik Tanah Asli + 0% pasir + 0% bakteri	56

Gambar 5.3 Kurva Tanah Asli + 5% Pasir dan Setelah Dicampurkan Dengan Larutan Sementasi	57
Gambar 5.4 Hubungan antara persentase dan penambahan larutan sementasi dengan sampel benda uji dengan variasi bakteri 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.	58
Gambar 5.5 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 0%	59
Gambar 5.6 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 5%	60
Gambar 5.7 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 10%	61
Gambar 5.8 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 15%	62
Gambar 5.9 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 20%	63
Gambar 5.10 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 25%	64
Gambar 5.11 Grafik Hubungan Nilai Pengujian CBR Tanah Gambut Dengan Campuran 5% Pasir dan Persentase Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)	66
Gambar 5.12 Grafik Koefisien Permeabilitas Suhu Air 26 ⁰ C	69
Gambar 5.13 Grafik Koefisien Permeabilitas Suhu Air 20 ⁰ C	71
Gambar 5.14 Bentuk Keruntuhan Uji Kuat Tekan Bebas	75

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Sifat-sifat Fisik Tanah Gambut Indonesia (Mochtar, 2002)	16
Tabel 3.2 Sifat Teknik Tanah Gambut (Mochtar, 2002)	17
Tabel 3.3 Berat spesifik tanah (Hardiyatmo, 2002)	21
Tabel 3.4 Permeabilitas (<i>permeability pumping tests</i>) pada titik yang dangkal di hutan gambut Riau. (Sumber: Panduan Geoteknik 1, 2001)	25
Tabel 3.5 Klasifikasi Nilai CBR Tanah (Bowles, 1992)	29
Tabel 4.1 Komposisi Larutan Sementasi	42
Tabel 4.2 Variasi Campuran Pasir Dan Larutan Sementasi Pada Sampel Uji CBR	48
Tabel 4.3 Variasi Campuran Larutan Sementasi Dan Air Pada Sampel Uji CBR Terhadap Kadar Air Optimum Benda Uji	50
Tabel 5.1 Sifat-sifat Tanah Gambut	54
Tabel 5.2 Nilai Hasil Uji UCS Tanah Asli + 0% Pasir + 0% Bakteri.....	55
Tabel 5.3 Nilai Hasil Uji UCS dari Sampel Benda Uji Tanah Asli + 5% Pasir Dengan Yang Telah Dilakukan Dengan Larutan Sementasi	56
Tabel 5.4 Nilai Qmax dari Masing-Masing Sampel Benda Uji	57
Tabel 5.5 Hasil Pengujian CBR <i>Unsoaked</i> Tanah Gambut Campuran 5% Pasir Dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri).....	65
Tabel 5.6 Data Jumlah Air Per 2 Menit Awal Sampel Tanpa Campuran	67
Tabel 5.7 Data Jumlah Air Per 2 Menit Awal Sampel Campuran Pasir	68
Tabel 5.8 Data Jumlah Air Per 2 Menit Awal Sampel Campuran Pasir dan 25% Bakteri	68
Tabel 5.9 Koefisien Permeabilitas Sampel Uji Suhu Air 26°C	69
Tabel 5.10 Koefisien Permeabilitas Sampel Uji Suhu Air 20°C	70
Tabel 5.11 Perbandingan Koefisien Suhu Air 26°C dan 20°C	72
Tabel 5.12 Perbandingan Koefisien Penelitian Permeabilitas dengan Campuran Terak/Klinker	72

Tabel 5.13 Perbandingan Koefisien Penelitian Permeabilitas dengan Pengujian Permeabilitas UMJ 73

Tabel 5.14 Perbandingan q_{umax} Stabilisasi *Bio-Grouting* dengan Stabilisasi Lainnya74



DAFTAR NOTASI

Cm	= Centimeter
cm ³	= Centimeter Kubik
gr	= Gram
gr/cm ³	= Gram/Centimeter Kubik
G _s	= Berat jenis
Kg	= Kilogram
m ³	= Meter Kubik
Mol	= Molekul
OMC	= Kadar Air Optimum (%)
Pt	= <i>Peat</i> (gambut)
V	= Volume (cm ³)
V _s	= Isi tanah basah/asli
V _m	= Isi tabung
W	= Berat (gram)
w	= Kadar air
w _w	= Berat air (gr)
w _s	= Berat butiran padat tanah (gr)
γ _s	= Berat volume butiran padat tanah (gr/cm ³)
γ _w	= Berat volume air (gr/cm ³)
γ _t	= Berat isi tanah/asli
γ _d	= Berat isi tanah kering
±	= Kurang Lebih
%	= Persen
μm	= Mikrometer

PENAMBAHAN MIKROBA *BACILLUS SUBTILLIS* DAN PASIR UNTUK STABILISASI TANAH GAMBUT

MAWARDI
NPM. 183121001

ABSTRAK

Permasalahan tanah gambut dalam dunia konstruksi tidak bisa dipungkiri di era kontemporer. Penurunan tanah (settlement) yang tinggi saat terjadi pembebanan berimplikasi pada tanah gambut yang memiliki nilai CBR dan daya dukung yang rendah. Merupakan suatu keurgensian agar mitigasi terjadinya settlement bisa segera dilakukan dimana akan memberikan manfaat untuk sekarang maupun akan datang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan mikroba *bacillus subtilis* dan pasir untuk stabilisasi tanah gambut.

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *bio-grouting* melalui bakteri *Bacillus subtilis* pada tanah gambut yang berasal dari Desa Buana Makmur km.55 Kecamatan Dayun Kabupaten Siak Provinsi Riau. Eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui nilai CBR dan Uji Tekan Bebas pada tanah gambut dimana telah ditambahkan 5% pasir dan reagen bakteri *Bacillus subtilis* dengan diversifikasi konsentrasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% dengan waktu pemeraman sampel selama 4 hari. Teknik *Bio-grouting* adalah metode stabilisasi ramah lingkungan untuk menstabilkan tanah lunak dengan memanfaatkan mikroorganisme dimana melibatkan induksi *calcium carbonate* (CaCO₃) presipitasi.

Hasil penelitian ini didapatkan uji CBR *unsoaked* yang dicampurkan 5% pasir dan reagen bakteri dengan konsentrasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% masing-masing diperoleh nilai CBR 0,78%, 0,79%, 0,8%, 0,90%, 0,72% dan 0,62% sedangkan nilai Uji tekan bebas diperoleh nilai masing-masing 0,30 kg/cm², 0,31 kg/cm², 0,31 kg/cm², 0,42 kg/cm², 0,41 kg/cm², dan 0,33 kg/cm². Oleh karena itu, nilai CBR maupun nilai kuat tekan beban yang tinggi didapatkan pada reagen bakteri dengan konsentrasi 15%. Selain itu, diperoleh juga koefisien permeabilitas sebesar $1,166 \times 10^{-3}$ cm/detik pada tanah gambut yang telah dicampur dengan 5% pasir dan 25% bakteri.

Kata kunci: *Bio-grouting*, Tanah gambut, Bakteri *Bacillus Subtilis*, stabilisasi, CBR Test, Uji Tekan bebas

**LABORATORY STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF
BACILLUS SUBTILLIS MICROBIALS AND SAND
ON PEAT SOIL STABILIZATION**

MAWARDI
NPM. 183121001

ABSTRACT

The problem of peat soil in the world of construction is undeniable in the contemporary era. The high settlement occurs when loading has implications on peat soil that has low CBR value and carrying capacity. It is an urgency so that mitigation of settlement can be done immediately which will provide benefits for now and in the future. The purpose of this study was to determine the effect of adding bacillus subtilis and pasur microbes to stabilize peat soil.

This research was conducted using bio-grouting method through bacillus subtilis bacteria on peat soil from Buana Makmur Village km.55 Dayun Subdistrict siak Riau Province. This experiment was conducted to determine the CBR value on peat soil where 5% of sand and bacterial reagents of Bacillus subtilis were added with diversified concentrations of 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% with a sample safety time of 4 days. Bio-grouting technique is an environmentally friendly stabilization method to stabilize soft soils by utilizing microorganisms which involve induction of calcium carbonate (CaCO₃) precipitation.

The results of this research obtained unsoaked CBR test mixed with 5% sand and bacterial reagents with concentrations of 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 25% respectively obtained CBR values of 0.78%, 0.79%, 0.8%, 0.90%, 0.72% and 0.62% while the test load press strength values were obtained values of 0.30 kg/cm², 0.31 kg/cm², 0.31 kg/cm², 0.42 kg/cm², 0.41 kg/cm², and 0.33 kg/cm². Therefore, the high CBR value and load press strength value is obtained in bacterial reagents with a concentration of 15%. Moreover, permeability coefficient of 1,6 cm/second was obtained on peat soil that had been mixed with 5% sand and 25% bacteria.

Keywords: Bio-grouting, Peat soil, Bacillus Subtilis bacterial, stabilization

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan memiliki lahan gambut seluas 20 juta hektar dan berada pada urutan keempat setelah Kanada, Rusia dan Amerika Serikat dalam kategori lahan gambut terluas di dunia. Sumatera adalah pulau yang memiliki lahan gambut terbesar di Indonesia dengan persentase 35% diikuti Kalimantan 32%, Sulawesi 3% dan Papua 30%. Pada pulau Sumatera, lahan gambut biasanya terdapat di dataran rendah sepanjang pantai timur dengan luas 7,2 juta hektar. Di Pulau Sumatera, Provinsi dengan lahan gambut terluas yaitu Provinsi Riau dengan luas \pm 4,04 juta Ha atau 56,1% dari luas total lahan gambut di Sumatera (Syarif, F et.al 2020).

Gambut merupakan tanah yang berciri khas warna hitam kecoklatan dimana terbentuk dalam kondisi asam dan dengan kondisi anaerobik lahan basah. Gambut terdiri dari bahan organik yang sebagiannya terurai secara bebas dengan komposisi lebih dari 50% karbon. Gambut juga terdiri dari lumut *Sphagnum*, batang, dan akar rerumputan, sisa-sisa hewan, sisa-sisa tanaman, buah dan serbuk sari. Tanah gambut adalah jenis tanah dengan kandungan bahan organik dan tingkat keasaman tinggi. Tanah gambut mempunyai karakteristik yang berbeda pada tanah lainnya. Pada musim hujan lahan gambut tersebut akan basah dan tergenang air, hal ini dikarenakan lahan gambut terbentuk dari lingkungan yang khas, yaitu rawa atau suasana genangan yang terjadi hampir sepanjang tahun dan kemudian jika musim kemarau akan mengalami kekeringan (Noor, et.al 2006 dalam Irham 2007).

Tanah gambut menjadi salah satu permasalahan yang sering dihadapi dalam dunia konstruksi. Bahkan Tanah gambut termasuk dalam salah satu jenis tanah yang tidak memenuhi syarat sebagai lapisan tanah dasar konstruksi jalan raya. Hal ini disebabkan karena memiliki kandungan organik tinggi, sedikit mengandung kalsium serta memiliki sifat kembang susut yang besar. Menurut (Parlan, et.al 2016) Tanah gambut memiliki daya dukung yang rendah dan dapat

menyebabkan penurunan tanah (*settlement*) yang besar saat terjadi pembebanan, Tanah gambut merupakan tanah yang sangat lunak (*very soft soil*) dengan daya dukung yang sangat rendah dan mempunyai sifat mudah mampat jika terdapat beban yang bekerja di atasnya. Terdapat permasalahan mendasar yang timbul akibat pembebanan pada lapisan tanah gambut adalah semakin tinggi kandungan kadar organiknya, maka semakin rendah daya dukung dan kuat gesernya serta semakin besar pula pemampatannya (Wardana dan Widiarta, 2010). selain itu, menurut (Syarif dkk 2020) Permeabilitas tanah adalah kemampuan tanah untuk mengalirkan suatu cairan. Tanah dengan permeabilitas tinggi dapat meningkatkan laju infiltrasi, sehingga meningkatkan laju air yang mengalir.

Bacillus merupakan salah satu jenis bakteri yang berbentuk batang gram positif dengan suhu optimal untuk pertumbuhan antara 25-35°C. Meskipun *Bacillus* dianggap aerobik yang ketat, ditemukan kemudian bahwa mereka dapat hidup secara anaerob dalam kondisi yang ditentukan. *Bacillus* secara alami terdapat di tanah, bakteri ini berkoloni pada sistem akar dan bersaing dengan mikroorganisme lain seperti jamur. Dalam kondisi yang keras, *Bacillus* dapat membentuk endospora yang tahan stres sebagai mekanisme pertahanan. Spora tahan terhadap paparan panas, radiasi, bahan kimia, dan tahan pengeringan (DeJong et.al., 2006). *Bacillus Subtilis* memiliki fisiologi yang relatif berbeda dari bakteri lain yang bukan patogen, yaitu relatif mudah dimanipulasi secara genetic dan muda pula dibiakkan sehingga dapat dikembangkan pada skala industri (Soesanto, 2008).

Penelitian tesis ini dilakukan dengan metode *bio-grouting* dengan bantuan bakteri *Bacillus subtilis*. *Bio-grouting* merupakan teknik stabilisasi tanah yang melibatkan mikroorganisme yang diinduksi *calcium carbonate* (CaCO₃) presipitasi. Pengendapan *calcium carbonate* bertindak sebagai pengikat kristal antar sel itu merangsang proses sementasi di antara butiran tanah. Jenis tanah yang digunakan untuk implementasi teknologi *bio-grouting* ini adalah tanah gambut dengan campuran pasir dan jenis mikroorganismenya adalah bakteri *Bacillus subtilis*. Perbaikan Nilai CBR dan Kuat Tekan Bebas tanah gambut dengan menggunakan campuran pasir dan teknik *bio-grouting* melalui bantuan

Bakteri *Bacillus subtilis* tersebut yang akan digunakan sebagai improvisasi pada penelitian tesis ini.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian tesis ini memiliki rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana pengaruh bakteri *bacillus subtilis* dan campuran pasir menggunakan teknik *bio-grouting* terhadap kuat tekan bebas tanah gambut?
2. Bagaimana pengaruh bakteri *bacillus subtilis* dan campuran pasir menggunakan teknik *bio-grouting* terhadap nilai CBR tanah gambut?
3. Bagaimanakah korelasi antara kuat tekan bebas dan nilai CBR tanah gambut
4. Apakah tanah gambut yang terstabilisasi bakteri *bacillus subtilis* dan campuran pasir memenuhi syarat sebagai bahan material untuk *subgrade*

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tesis ini adalah:

1. untuk mengetahui pengaruh campuran pasir dan bakteri *bacillus subtilis* menggunakan teknik *bio-grouting* terhadap kuat tekan bebas tanah gambut
2. untuk mengetahui pengaruh campuran pasir dan bakteri *bacillus subtilis* menggunakan teknik *bio-grouting* terhadap nilai CBR tanah gambut
3. Untuk mengetahui korelasi antara Kuat tekan bebas dan Nilai CBR tanah gambut
4. Untuk mengetahui apakah tanah gambut yang terstabilisasi bakteri *bacillus subtilis* dan campuran pasir memenuhi syarat sebagai bahan material untuk *subgrade*

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pengetahuan dan wawasan kepada para pembaca mengenai perbaikan kuat tekan bebas dan koefisien permeabilitas tanah gambut dengan campuran pasir dan bakteri *bacillus subtilis* menggunakan teknik *bio-grouting*.
2. Mengetahui teknik stabilisasi tanah yang melibatkan mikroorganisme yang diinduksi *calcium carbonate* (CaCO_3) presipitasi dengan pemanfaatan bakteri *Bacillus subtilis* dalam metode perbaikan tanah gambut.
3. Memberikan gambaran kepada pihak-pihak yang bergerak dalam bidang industri konstruksi dalam upaya meningkatkan daya dukung tanah terhadap bangunan struktur teknik sipil.

1.5 Batasan Masalah

Pada penelitian tesis ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan menggunakan campuran pasir dan bakteri *bacillus subtilis* dengan teknik *bio-grouting* dengan variasi campuran +5% pasir dan larutan sementasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.
2. Penelitian ini menggunakan skala laboratorium.
3. Tanah gambut yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Desa Buana Makmur Km 55 Kecamatan Dayun Kabupaten Siak Propinsi Riau.
4. Untuk mengetahui kuat tekan bebas tanah gambut dilakukan perbaikan menggunakan campuran pasir dan bakteri *bacillus subtilis* dengan teknik *bio-grouting*.
5. Untuk mengetahui nilai CBR tanah gambut yang telah dilakukan perbaikan menggunakan campuran pasir dan teknik *bio-grouting* melalui bantuan bakteri *Bacillus subtilis*.
6. Setelah benda uji dicampurkan dengan larutan sementasi dilakukan pemeraman selama 14 hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu (*State of art*)

Penelitian telah dilakukan Syarif, F., dkk. (2020) dengan judul “Penerapan Teknik *Biocementation* Oleh *Bacillus Subtilis* dan Pengaruhnya Terhadap Permeabilitas Pada Tanah Organik”. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh teknik *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) / *Bio-grouting* dalam sifat permeabilitas gambut, Dari hasil tes permeabilitas ditemukan bahwa sampel 1 (dengan Reagen) memiliki waktu yang lama untuk mengeluarkan air dari tabung / permeabilitas lebih rendah dari pada sampel 2 (tanpa reagen). Pada sampel 1 (dengan reagen) waktu untuk mengeluarkan air dari tabung/permeabilitas didapat nilai durasi selama 42 jam, sedangkan pada sampel 2 (tanpa reagen) mendapatkan nilai durasi permeabilitas selama 20 jam. Hal ini disebabkan oleh penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* yang dapat membuat pori-pori partikel tanah organik tertutup atau diisi bakteri sehingga tanah tidak mudah mengalir.

Penelitian telah dilakukan oleh Saputra, N. A. (2018) tentang stabilisasi tanah gambut Kota Palangka Raya dengan bahan campuran tanah non organik dan kapur untuk meningkatkan nilai CBR tanah gambut. Tanah gambut yang akan dicampurkan dengan bahan material non organik (tanah granit) dan penambahan kapur dengan variasi campuran sebanyak 5%, 10% dan 15%. Proses stabilisasi yang akan dilakukan bertujuan memperkuat satu atau beberapa parameter dari sifat fisik maupun sifat mekanik terhadap tanah asli. Campuran tanah kapur dan tanah non organik yang akan digunakan mempunyai proporsi 40% tanah gambut dan 60% tanah non organik. Hasil pengujian yang dilakukan yaitu dengan menambahkan variasi kapur pada campuran stabilisasi tanah gambut dan non organik terbukti mampu meningkatkan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) yang diperoleh walaupun dengan penambahan variasi pertama mengalami penurunan. Nilai CBR campuran tanah gambut dan non organik tanpa kapur mendapat nilai sebesar 7,79%. Pada penambahan kapur 5% didapat nilai CBR turun menjadi

5,89%. Selanjutnya dengan variasi penambahan kapur sebanyak 10% dan 15% secara berturut-turut mendapatkan hasil nilai CBR yang mengalami peningkatan masing-masing dengan nilai 9,74% dan 11,59%. Dengan hasil yang ada tersebut, secara umum nilai CBR tanah campuran tanah gambut dan non organik termasuk dalam memenuhi syarat sebagai bahan timbunan pilihan/*subbase*. Yaitu berdasarkan klasifikasi tanah untuk CBR tanah timbunan pilihan berkisar antara 7% - 20%, kecuali pada nilai CBR dengan penambahan kapur sebanyak 5%.

Penelitian telah dilakukan oleh DeJong, J.T. (2006) mengenai teknologi *grouting* secara biologi yang dikenal dengan teknologi *bio-grouting* melalui mekanisme pengendapan *calcium carbonate*. *Bio-grouting* memiliki keuntungan utama yaitu pemberian substrat dapat dipindahkan dalam bentuk inaktif ke daerah yang jauh dari titik injeksi. Teknologi *bio-grouting* ini adalah teknologi yang mensimulasikan proses diagenesis, yaitu mentransformasikan butiran pasir menjadi batuan pasir (*calcarenite* atau *sandstone*). Kristal *calcium carbonate* (CaCO_3) yang terbentuk dari teknologi *bio-grouting* yang akan menjadi jembatan antara butiran-butiran pasir sehingga terjadi proses sementasi dan mengubah pasir jadi batuan pasir. Proses ini memerlukan waktu jutaan tahun dalam bentuk proses alami. Oleh sebab itu digunakan bakteri untuk mempercepat proses secara *in situ* dengan memanfaatkan proses presipitasi *calcium carbonate* dari hasil aktivitas metabolisme bakteri.

Penelitian telah dilakukan J. Widjajakusuma (2019) tentang studi stabilisasi tanah organik tropis berdasarkan *bio-grouting*. Penerapan *Bacillus subtilis* melalui injeksi meningkatkan sifat teknik dari tanah organik tropis. Semakin lama tanah disembuhkan dan semakin tinggi jumlah *Bacillus subtilis* disuntikkan ke tanah, kekuatan tanah yang lebih tinggi diperoleh. Setelah 28 hari waktu penyembuhan, injeksi 6 ml dan 12 ml kultur cair *Bacillus subtilis* meningkatkan nilai kohesi tegangan efektif sebesar 180% dan 270% masing-masing. Namun, nilai optimal untuk waktu pengeringan dan jumlah *Bacillus subtilis* adalah masih belum diperoleh. Disarankan untuk mempelajari lebih lanjut tentang nilai-nilai optimal tersebut. Untuk pekerjaan di masa mendatang, dianjurkan untuk memantau pH untuk menciptakan lingkungan yang optimal

untuk Spesies *Bacillus*. Tes *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction test* (XRD) adalah diperlukan untuk mempelajari struktur mikro dari tanah yang tidak dirawat dan dirawat.

Penelitian telah dilakukan Putra, H. (2016) mengenai pengaruh magnesium sebagai bahan pengganti pada pengendapan kalsit enzim yang dimediasi untuk teknik peningkatan tanah. Hasil presipitasi *carbonate* yang berasal dari mineral kalsit ini adalah mineral yang tersebar secara luas di bumi dan juga banyak ditemukan pada bebatuan seperti batu marmer, batu pasir diperairan dan di daratan. Ada 3 faktor yang menentukan pengendapan kalsit yaitu (1) konsentrasi *calcium*, (2) konsentrasi *carbonate* dan (3) pH lingkungan (Hammes dan Verstraete, 2002; Hammes et al., 2003). Secara teori presipitasi *carbonate* dapat terjadi pada lingkungan alami dengan meningkatkan konsentrasi *calcium* dan atau *carbonate* terhadap larutan atau menurunkan daya larut *calcium* dan atau *carbonate*.

Juga penelitian telah dilakukan oleh Whiffin, V.S. (2007) tentang pengendapan *carbonate* mikroba sebagai teknik perbaikan tanah. Adapun metode *grouting*, teknik presipitasi kalsit membutuhkan banyak sumur injeksi untuk merawat dalam volume besar. Sejumlah besar kalsit diperlukan untuk meningkatkan kekuatan keropos media. Pada 60 kg bahan endapan harus diendapkan dalam 1 m³ tanah untuk mendapatkan kekuatan yang cukup 300 kPa. Ini sesuai dengan bahan yang diendapkan terdiri sekitar 4% dari massa tanah di pasir yang diolah. Namun, sangat terkonsentrasi urea dan CaCl₂ (>0,5 mol/L) menurunkan efisiensi presipitasi kalsit. Urea dan CaCl₂, dengan konsentrasi 0,05-0,50 mol/L, dicatat paling efisien dalam aplikasi teknik presipitasi kalsit. Sejumlah besar bahan endapan harus diproduksi oleh sejumlah injeksi dan karenanya, efisiensi presipitasi kalsit di tinggi konsentrasi urea dan CaCl₂ harus ditingkatkan.

2.2 Legalitas Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan eksperimental di laboratorium. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya seperti pengujian pemadatan

standar, kadar air tanah gambut, berat jenis tanah gambut kuat tekan bebas dan pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) tanah gambut. Bahan pengujian utama pada penelitian ini adalah tanah gambut, serta bahan tambahan lainnya adalah pasir, bakteri *Bacillus subtilis*, urea, dan CaCl_2 . Metode pada penelitian ini menggunakan teknologi *bio-grouting* dengan bantuan bakteri *Bacillus subtilis* untuk memperbaiki nilai CBR pada tanah gambut yang telah dicampurkan pasir dengan persentase yang telah ditentukan.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah terletak pada teknik perbaikan tanahnya, yaitu dengan menggunakan teknologi *bio-grouting* dan melalui bantuan bakteri *Bacillus subtilis* untuk memperbaiki nilai kuat tekan bebas dan CBR pada tanah gambut yang telah dicampurkan pasir dengan persentase yang telah ditentukan.

BAB III

LANDASAN TEORI

Alhamdulillah kita telah diberi kesempatan oleh Allah Subhanahu wa ta'ala untuk menjalani kehidupan di bumi ini dengan segala rahmat dan nikmat rezeqi- Nya yang telah tersedia, yang dimana telah diciptakannya langit dan bumi sebagai mana Allah Subhanahu wa ta'ala telah berfirman dalam QS. Saad ayat:27 yang artinya:” Dan kami tidak menciptakan langit dan bumi dan apa yang ada antara keduanya tanpa hikmah, yang demikian itu adalah anggapan orang-orang kafir maka celakalah orang-orang kafir itu, karena mereka akan masuk neraka”.

Dimana pada QS AL-Mulk ayat 15 menyatakan bahwa “Dia-lah yang menjadikan bumi untuk kalian yang mudah dijelajahi,maka jelajahilah di segala penjurunya dan makanlah sebagian dari rezekinya-lah kamu (kembali setelah) dibangkitkan” dari beberapa ayat tersebut mengisyaratkan bahwasanya allah telah menciptakan langit dan bumi untuk kita manusia hidup dan pada ayat berikutnya yang dimana mengatakan bahwasanya Allah Subhanahu wa ta'ala telah menjadikan bumi ini mudah untuk dijelajahi agar manusia mampu untuk bekerja dan berusaha mendapatkan rezeqi darinya.

3.1 Umum

Menurut (Terzaghi,1987) Tanah adalah kumpulan (agregat) butiran mineral alami yang bisa dipisahkan oleh suatu cara mekanik bila agregat termaksud diaduk dalam air, sedangkan batuan merupakan agregat mineral yang satu sama lainnya diikat oleh gaya-gaya kohesif yang permanen dan kuat. Tanah diartikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran-butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995).

CBR (*California Bearing Ratio*) merupakan perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan terhadap bahan standard dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama secara umum. Menurut Badan Standarisasi Nasional (SNI 1744-2012) CBR adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu jenis material

dan beban standar pada kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Perkerasan jalan harus memenuhi 2 syarat, yaitu:

1. Perkerasan jalan harus cukup kuat untuk memikul berat kendaraan-kendaraan yang akan melewatinya.
2. Pada permukaan jalan harus dapat menahan gaya gesekan dan keausan dari roda-roda kendaraan yang melewatinya, serta terhadap pengaruh air dan hujan.

Namun jika perkerasan jalan tidak mempunyai kekuatan yang cukup, maka jalan tersebut akan mengalami penurunan dan pergeseran, baik pada perkerasan jalan ataupun pada tanah dasarnya. Oleh sebab itu jalan tersebut akan memiliki gelombang besar dan berlubang-lubang, hingga rusak sama sekali. Pada perkerasan jalan yang tidak mempunyai lapisan yang cukup kuat, maka permukaan jalan akan mengalami kerusakan yaitu berupa lubang-lubang kecil dan akhirnya akan bertambah banyak hingga bertambah besar sampai seluruh perkerasan jalan menjadi rusak.

3.2 Bio-grouting

Bio-groutin merupakan metode stabilisasi ramah lingkungan baru untuk menstabilkan tanah lunak dengan menerapkan mikroorganisme. Mikroorganisme menghasilkan CaCO_3 , yang mengisi kekosongan partikel tanah dan mengikat partikel tanah. Teknik stabilisasi tanah ini melibatkan mikroorganisme yang diinduksi *calcium carbonate* (CaCO_3) presipitasi. Pengendapan *calcium carbonate* bertindak sebagai pengikat kristal antar sel untuk merangsang proses sementasi diantara butiran tanah. Dewasa ini sedang dikembangkan teknologi *grouting* secara biologi yang diketahui dengan teknologi *bio-grouting* melalui mekanisme atau cara pengendapan *calcium carbonate*. *Bio-grouting* memiliki keuntungan utama yaitu pemberian substrat yang dapat dipindahkan dalam bentuk inaktif ke daerah yang jauh dari titik injeksi. Teknik *bio-grouting* ini merupakan teknologi yang dapat mensimulasikan proses diagenesis, yaitu mentransformasikan butiran-butiran pasir menjadi batuan pasir. Pada kristal *calcium carbonate* (CaCO_3) yang terbentuk dari teknik *bio-grouting* tersebut akan menjadi perantara atau yang menjembatani butiran-butiran pasir hingga menyebabkan proses sementasi dan akan mengubah pasir menjadi batuan pasir.

Proses ini memerlukan waktu jutaan tahun jika secara proses yang alami. Oleh sebab itu difungsikan bakteri untuk akselerasi proses secara *in situ* yang memanfaatkan proses presipitasi *carbonate* dari hasil aktivitas metabolisme bakteri (De Jong et al., 2006; Lee, 2003).

Menurut (Hammes dan Verstraete, 2002; Hammes et al., 2003) Mineral kalsit yang dihasilkan oleh proses presipitasi *carbonate* ini merupakan mineral yang tersebar sangat luas di bumi dan banyak dijumpai pada bebatuan seperti batu marmer, batu pasir di daratan dan di perairan. Proses presipitasi dan atau pengendapan kalsit ini minimal ditentukan oleh 3 faktor diantaranya:

- (1) konsentrasi *calcium*,
- (2) konsentrasi *carbonate*
- (3) pH lingkungan.

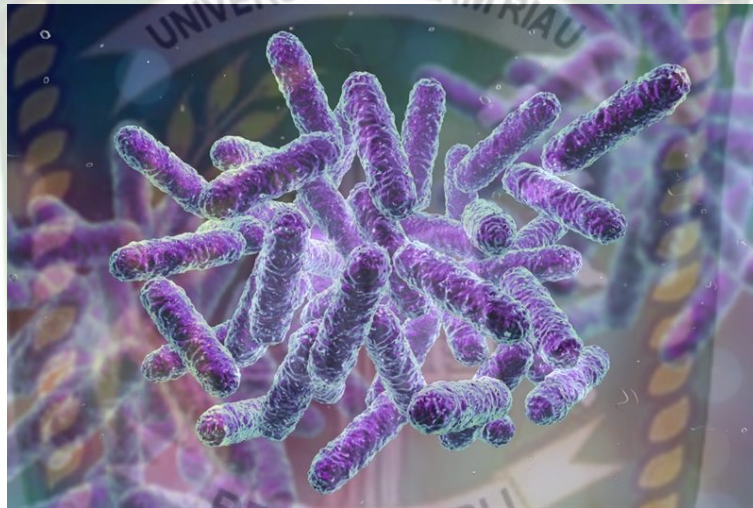
Proses presipitasi *carbonate* ini secara teori bisa terjadi pada lingkungan yang alami dengan cara menaikkan konsentrasi *calcium* atau *carbonate* pada larutannya atau menurunkan daya larut *calcium* dan atau *carbonate*. Peran bakteri pada proses *bio-grouting* ini memiliki kaitan yang erat dengan kemampuan bakteri untuk dapat bertahan dan toleran dari konsentrasi urea dan *calcium* yang tinggi. Untuk menghasilkan enzim urease, bakteri tersebut harus mampu bertahan pada aktivitas yang tinggi. Bakteri yang akan menghasilkan urease dapat dibedakan menjadi 2 jenis kelompok yang didasarkan pada respon dari amonium yaitu, (1) kelompok dengan aktivitas enzim urease yang ditekan oleh keberadaan amonium seperti pada jenis *Pseudomonas aeruginosa*, *Alcaligenes eutrophus*, *Bacillus megaterium* (Kaltwasser et al., 1972) dan *Klebsiella aerogenes* (Friedrich dan Magasanik, 1977) dan (2) kelompok dengan aktivitas enzim urease yang tidak terpengaruh oleh amonium seperti *Sporosarcina pasteurii* (*Bacillus pasteurii*), *Helicobacter pylori*, *Proteus vulgaris* (Whiffin et al., 2007).

Pada proses teknik *bio-grouting* dampak dari konsentrasi urea yang tinggi dihidrolisis selama proses sementasi, hanya bakteri dengan aktivitas enzim urease tidak dapat ditekan oleh amonium saja yang cocok untuk digunakan. Hingga saat ini, bakteri dari genus *Sporosarcina* (*Bacillus*) mulai dapat diaplikasikan pada proses teknik *bio-grouting* karena mempunyai aktivitas urease yang cukup tinggi dan tidak pathogen (Fujita et al., 2000; Mobley et al., 1995). Sedangkan menurut

Harkes et al (2009), bakteri jenis *Sporosarcina pasteurii* (DSMZ 33) yang dapat melakukan presipitasi kalsit.

3.3 Bacillus Subtilis

Bacillus subtilis adalah salah satu jenis bakteri gram-positif yang berbentuk batang dan katalase-positif. Pada awalnya bakteri ini dinamai *Vibri subtilis* oleh Christian Gottfried Ehrenberg dan nama bakteri ini diubah oleh Ferdinand Cohn menjadi *Bacillus subtilis* pada tahun 1872 (*subtilis* berasal dari bahasa Latin yang berarti 'baik'). Sel *Bacillus subtilis* biasanya berbentuk batang, dengan panjang sekitar 4-10 mikrometer (μm) dan berdiameter 0,25-1,0 μm .



Gambar 3.1 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Bakteri lain dari genus *Bacillus* yaitu *Bacillus subtilis* ini dapat membentuk endospora, guna bertahan hidup dalam kondisi lingkungan yang sekalipun dari suhu dan pengeringan. *Bacillus subtilis* adalah anaerob fakultatif dan telah dianggap sebagai aerob obligat sampai pada tahun 1998. *Bacillus subtilis* memiliki banyak flagela, sehingga memberikan kemampuan untuk bergerak cepat didalam cairan.

Bakteri *Bacillus subtilis* terbukti sangat mudah dalam memanipulasi genetik dan telah banyak diambil sebagai pilihan untuk dijadikan organisme model untuk bahan penelitian di laboratorium, terutama dari sporulasi yang merupakan contoh sederhana dari diferensiasi seluler. Pada hal popularitas dalam organisme model laboratorium, *Bacillus subtilis* juga sering dianggap sebagai ekuivalen gram-positif dari *Escherichia coli*, suatu bakteri gram-negatif.

3.3.1 Klasifikasi *Bacillus Subtilis*

Menurut *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology 2nd edition* (2001) dalam Madigan, et al. (2000) *Bacillus* memiliki jenjang klasifikasi sebagai berikut:

Kingdom: Bacteria

Phylum: Firmicutes

Class: Bacilli

Order: Bacillales

Family: Bacillaceae

Genus: *Bacillus*

3.3.2 Karakteristik *Bacillus Subtilis*

Bacillus termasuk pada kelompok bakteri batang dan kokus yang membentuk endospora dengan ciri-ciri mempunyai bentuk sel batang, motil yang memiliki satu flagel, gram positif, bersifat aerobik, membentuk endospore, memiliki habitat pada lingkup tanah, air, lingkungan akuatik, juga pencernaan hewan (termasuk manusia), beberapa spesies bersifat patogenesitas terhadap manusia dan hewan lain (Holt et al., 2000).

3.4 Tanah Gambut

Berdasarkan ASTM D4427-92 (2002) Tanah gambut merupakan tanah yang memiliki kandungan organik tinggi yang terjadi atas dekomposisi material tumbuhan dan dibedakan dari material tanah organik lainnya dari kandungan abunya, <25% abu dari berat tanah keringnya. Ciri tanah gambut dapat dilihat dari visualnya yang berwarna coklat kehitaman. Hal ini disebabkan kandungan bahan organik yang ada pada tanah tersebut. Selain itu dapat diamati bahwa tanah gambut memiliki tekstur berserat, karena tanah gambut berasal dari sisa tumbuhan atau vegetasi yang mengalami pelapukan.

Menurut (Dunn dkk, 1980) Tanah gambut adalah bahan organis setengah lapuk berserat atau suatu tanah yang mengandung bahan organis berserat dalam jumlah besar. Gambut mempunyai angka pori yang sangat tinggi dan sangat kompresibel. Tanah gambut umumnya berwarna coklat tua sampai dengan

hitam karena terbentuk dari proses pelapukan dan pembusukan tumbuh-tumbuhan, maka tanah gambut memiliki bau yang khas.

3.4.1 Klasifikasi Tanah Gambut

Menurut ASTM D4427-92 (2002), tanah gambut diklasifikasikan pada beberapa aspek yaitu berdasarkan kandungan serat, kandungan abu (ASTM D2974), tingkat keasaman (ASTM D2976), dan tingkat absorpsinya (ASTM D2980). Dan pada ASTM D5715-00 tanah gambut diklasifikasikan berdasarkan tingkat humifikasinya. Berdasarkan kandungan serat pada tanah gambut dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Fibric*, yaitu tanah gambut yang belum melapuk, bahan asalnya masih bisa dikenali, berwarna coklat hitam dengan kandungan serat $> 75\%$,
2. *Hemic*, yaitu tanah gambut yang setengah lapuk, berwarna coklat dengan kandungan serat antara 15% dan 75% ,
3. *Sapric*, yaitu tanah gambut yang sudah melapuk lanjut dan bahan asalnya tidak dikenali, berwarna coklat tua sampai hitam dengan kandungan serat $< 15\%$.

Serat merupakan material penyusun tanah gambut yang merupakan senyawa C, dapat berupa dalam bentuk lignin atau selulosa. Lalu berikut jenis tanah gambut diklasifikasikan berdasarkan kandungan abu :

1. *Low ash*, yaitu tanah gambut dengan kandungan abu $< 5\%$,
2. *Medium ash*, yaitu tanah gambut dengan kandungan abu antara 5% dan 15% ,
3. *High ash*, yaitu tanah gambut dengan kandungan abu $> 15\%$

Tanah gambut yang diklasifikasikan berdasarkan tingkat absorpsinya dapat dibagi menjadi 4 tingkatan:

1. *Extremely absorbent*, yaitu tanah gambut yang dapat menampung air $>1500\%$,
2. *Highly absorbent*, yaitu tanah gambut yang dapat menampung air antara 800% hingga 1500% ,
3. *Moderately absorbent*, yaitu tanah gambut yang dapat menampung air antara 300% hingga 800% , dan

4. *Slightly absorbent*, yaitu tanah gambut yang dapat menampung air < 300%.

3.4.2 Sifat Fisik Tanah Gambut

Tanah gambut memiliki sifat fisik dengan kandungan organik yang sangat tinggi, dimana pada proses pembentukan tanah itu sendiri berasal dari tumbuhan. Kandungan air yang tinggi dan nilai angka pori yang besar menyebabkan harga koefisien rembesan tanah gambut menyerupai pasir, hal ini dikarenakan pori yang besar menyebabkan air dalam pori mudah keluar terutama apabila terdapat beban di atasnya. Angka volume tanah gambut yang kecil menunjukkan bahwa kepadatan tanah gambut tidak seperti tanah pada umumnya dan jika dihubungkan dengan kadar airnya yang tinggi, berat air yang terkandung dalam tanah gambut mempunyai 6 (enam) kali lebih berat dibandingkan berat butiran tanah gambut itu sendiri. Sifat tanah gambut dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Sifat Fisik Tanah Gambut Indonesia (Mochtar,2002)

NO	Sifat Fisik	Nilai
1	Kandungan Organik (Oc)	95 - 99%
2	Berat volume (t)	0,9 - 1,25 t/m ³
3	Kadar air (W)	200% - 900%
4	Angka pori (e)	5 - 15
5	Ph	4 - 7
6	Kadar abu (Ac)	1 - 15%
7	Spesifik gravity (Gs)	1,2 - 1,95
8	Rembesan (k)	2^{-02} s/d $1,2^{-06}$

Secara umum sifat fisik suatu material akan sangat berpengaruh pada sifat teknis material itu sendiri, hal yang sama pula terjadi pada tanah gambut. Tabel 3.2 menunjukkan sifat teknis tanah gambut, dimana sifat teknis yang paling menjadi perhatian adalah daya dukungnya yang sangat rendah dengan tingkat kemampuannya yang tinggi seperti tertera pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Sifat Teknik Tanah Gambut (Mochtar, 2002)

No	Sifat	Nilai	Keterangan
1	Kohesi tanah/kuat geser	0	non cohesive
2	Compressibility/kemampatan	Sangat tinggi	Sensitif thd
3	Bearing capacity/kapasitas dukung	5 – 7 kpa	Skandinavia
4	Sudut geser dalam	> 50 derajat	Terutama fibrous
5	Ko/koefisien tek tanah at rest	Maks 0,5	Lbh kecil dr
6	Konsolidasi	Sangat lama	4

Kemampuan tanah gambut untuk menyerap dan menyimpan air yang sangat tinggi akan berpengaruh pada sifat teknik tanah gambut, dimana semakin besar kadar air yang terkandung pada tanah gambut semakin kecil daya dukung kekuatannya. Selain itu, tanah gambut mempunyai harga pemampatan yang tinggi (*High Compressibility*), yang dilakukan dengan perilaku terhadap beban yang bekerja di atasnya.

Menurut (Mutalib, et al., 1991) Tanah gambut mempunyai sifat fisik dan kimia sebagai berikut:

1. Sifat kimia

Sifat kimia pada areal gambut di Indonesia khusus di Provinsi Riau ditentukan pada ketebalan, kandungan mineral, jenis mineral pada dasar gambut atau *substratum* dan tingkat ketebalan pelapukan atau dekomposisi pada gambutnya. Gambut mengandung mineral pada umumnya < 5% dan selebih mengandung organik. Bahwa 10% sampai 20% merupakan senyawa humat seperti senyawa *selulosa*, *hemiselulosa*, *protein*, *resi*, *lignin* dan sebagainya.

2. Sifat fisik

Tanah gambut memiliki kadar air 100%-1.300%, mengakibatkan tanah gambut menjadi lunak dan menahan bebannya yang rendah. Lapisan atas tanah gambut bulk density 0,1 s/d 0,2 gr/cm³ sesuai tingkat pelapukannya atau dekomposisi *Bulk density* < 0,1 gr/cm³ dikategorikan gambut *fibrik* pada lapisan bawah. *Bulk density* > 0,2 gr/cm³ dikategorikan *saprik* disebabkan pengaruh mineral tanah.

3.4.3 Faktor yang Mempengaruhi Perilaku Gambut

Tanah gambut dan tanah lempung organik sangat berbeda, meskipun sama-sama memiliki kandungan organik. Yang menjadikan tanah-tanah tersebut berbeda dipengaruhi oleh jumlah material organik serta bagaimana proses terbentuknya tanah tersebut, meskipun dalam penglihatan kasat mata bisa dilihat perbedaannya. Dilihat juga dari karakteristik tanah seperti berat jenis, berat isi, isi pori, derajat kejenuhan dan kadar air.

A. Kadar Air Tanah

Menurut (Nugroho et.al, 1997) Kemampuan tanah gambut untuk menyerap dan menyimpan air sangat besar. Kadar air tanah gambut ini bisa mencapai 900% dan besar penyerapan tergantung dari derajat komposisi yang bersangkutan. Apabila gambut bercampur dengan tanah anorganik, kadar air gambut bisa menurun drastis. Kadar air tanah gambut berkisar 100%-1300% dari berat keringnya karena kapasitasnya dalam menahan air (Mutalib *et al*, 1991). Artinya bahwa gambut mampu menyerap air sampai 13 kali bobotnya, sehingga gambut dikatakan bersifat hidrolifik. Kadar air yang tinggi menyebabkan BD menjadi rendah, gambut menjadi lembek dan daya menahan bebannya rendah.

Kadar air tanah merupakan salah satu parameter terpenting untuk menentukan korelasi antara perilaku tanah dengan sifat fisik tanah, yang dilakukan secara rutin dalam pelaksanaan pengujian di laboratorium. Yang dimaksud dengan kadar air tanah adalah perbandingan antara berat air yang terkandung dalam massa tanah terhadap berat butiran padat (tanah kering), dan dinyatakan dalam persen. Tanah terdiri dari tiga unsur, yaitu butiran tanah atau partikel padat (*solid*), air (*water*) dan udara (Das, 1988: 28).

Pedoman pengujian kadar air mengikuti prosedur ASTM D-2216-71. kadar air dinyatakan dalam persen (%), dimana terjadi transisi dari keadaan padat ke keadaan semipadat didefinisikan sebagai batas susut (*shrinkage limit*). Kadar air di mana transisi dari keadaan semi - padat ke keadaan plastis terjadi dinamakan batas plastis (*plastic limit*) dan dari keadaan plastis ke keadaan cair dinamakan batas cair (*liquid limit*). Batas-batas ini dikenal juga sebagai batas-batas konsistensi (Das, 1988: 43).

Tingginya kemampuan tanah gambut dalam mengikat air dikarenakan struktur tanah yang di tandai dengan partikel kasar organik (serat) yang dapat menampung banyak air karena serat tanah sangat longgar dan berongga. Tingginya kadar air juga disebabkan gambut yang memiliki daya dukung yang rendah akibat dari daya apung dan volume pori yang tinggi.

Kadar air merupakan perbandingan antara berat air dengan berat butiran padat. Kadar air biasanya dinyatakan dalam persen (%). Kadar air dapat dirumuskan ke dalam suatu persamaan sebagai berikut:

$$w = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Dimana:

- w = Kadar air (%)
- w_w = Berat air (gr)
- w_s = Berat butiran padat tanah (gr)

B. Berat Spesifik (*Specific Gravity*)

Tanah gambut memiliki *specific gravity* lebih besar dari 1,0 dimana untuk menentukan harga *specific gravity* dengan menggunakan minyak kerosin (Akroyd, 1957). Besaran *specific gravity* gambut di Indonesia bervariasi antara 1,0 – 2,0. Untuk nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel 3.2. Dimana tanah gambut tergolong tanah dengan *specific gravity* 1,25 – 1,80.

Nilai berat jenis untuk tanah mineral tersebut bervariasi antara 2,7 hingga 2,9 dan untuk tanah gambut bervariasi antara 1,4 hingga 1,7 berdasarkan hasil data dari Rahadian., dkk., (2001). Berikut ini adalah beberapa faktor yang berpengaruh pada berat jenis tanah gambut:

1. Bahan organik tanah

Bahan organik tanah adalah timbunan dari sisa berbagai macam tanaman dan hewan yang sebagiannya telah lama mengalami proses pelapukan dan pembentukan kembali. Bahan organik memiliki berat jenis tanah. Jika kandungan bahan organik tanah semakin banyak, hal ini akan menyebabkan semakin rendahnya berat jenis tanah (Rahardjo, 2001).

2. Tekstur tanah

Ukuran partikel kasar pada partikel-partikel tanah mempunyai nilai berat jenis yang tinggi, misalnya pasir. Ukuran partikel pada pasir lebih besar dibandingkan dengan ukuran partikel liat, sehingga menyebabkan berat jenis pasir lebih tinggi dari liat dan sebaliknya (Darmawijaya, 1997).

Berat spesifik adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air. Berat jenis dapat dirumuskan kedalam suatu persamaan berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.2)$$

Dimana:

G_s = Berat jenis

γ_s = Berat volume butiran padat tanah (gr/cm^3)

γ_w = Berat volume air (gr/cm^3)

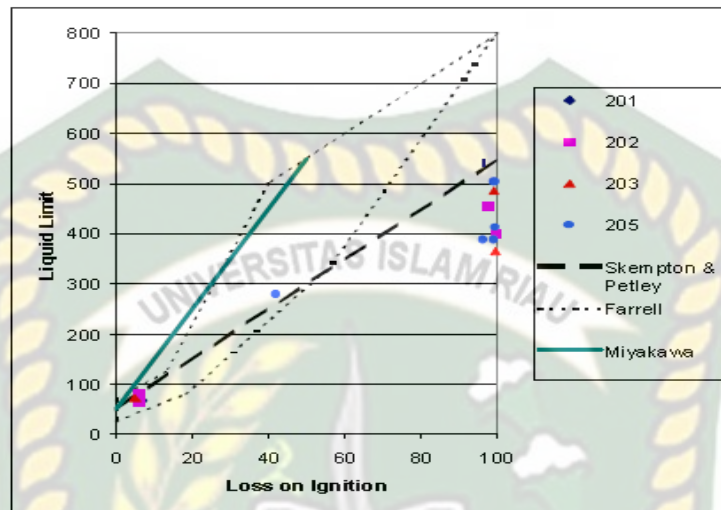
Tabel 3.3 Berat Spesifik Tanah (Hardiyatmo, 2002)

Jenis Tanah	Berat Spesifik (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

C. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Peremasan tanah membutuhkan pengujian batas cair sehingga kemas (*fabric*) gambut dan terutama kadar serat, jauh menurun. Oleh karenanya pengujian ini memiliki nilai yang sangat terbatas sebagai petunjuk (*indicator*) sifat-sifat gambut, terutama gambut berserat yang ditemukan di Indonesia. Beberapa hasil

uji untuk lempung anorganik dan lempung organik mendekati hubungan-hubungan yang diberikan oleh Skemton & Petley (1970), sementara sampel-sampel gambut murni memperlihatkan nilai-nilai yang berada di dibawah nilai yang ditunjukkan oleh Skempton & Petley.



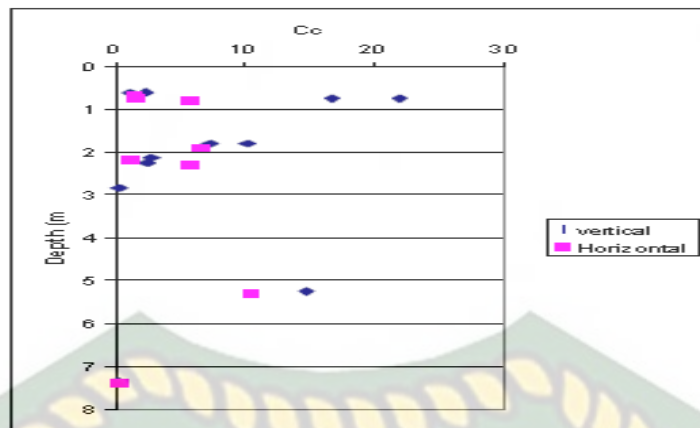
Gambar 3.2 Hubungan Antara Batas Cair dan Kadar Organik (Panduan Geoteknik 1, 2001)

D. Kompresibilitas (*Compressibility*)

Menurut (Farrell et.al 1994) kompresibilitas C_c berhubungan dengan batas cair dengan menggunakan hubungan yang terkenal yaitu:

$$C_c = k (wL - 10) \quad (3.3)$$

Dengan nilai-nilai k berada diantara 0,007 sampai 0,009 dan untuk gambut berserat hubungan yang seperti itu tidak dapat diterapkan. Hasil pengujian konsolidasi dengan tanah gambut berserat dari tempat uji timbunan di daerah Berengbengel didapat nilai-nilai C_c sampai 20 seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Data Tes Odeometer dari Berengbengkel (Panduan Geoteknik 1, 2001)

Sampel yang diuji secara horizontal mengindikasikan hasil kompresibilitas yang amat rendah. Pada gambar 3.3 dapat dilihat dengan mengabaikan nilai pada kedalaman yaitu lebih dari 7 meter, yang merupakan nilai kompresibilitas yang terlalu rendah. Tanah gambut memiliki lebih kurang dua kali lebih kompresibel dengan cara vertikal dibandingkan dengan cara horizontal, hal tersebut cenderung mendukung pendapat bahwa gambut-gambut itu memiliki kecenderungan serat yang berorientasi secara horizontal sebagai akibat dari pada kondisi pada gambut tersebut terbentuk.

E. Permeabilitas (*Permeability*)

Permeabilitas adalah kemampuan aliran untuk mengalir melalui suatu media poros. Secara kuantitatif permeabilitas diberi batasan dengan koefisien permeabilitas. Menurut (Hanafiah,2005) Beberapa faktor yang mempengaruhi permeabilitas diantaranya tekstur tanah, bahan organik tanah, kerapatan massa tanah, kerapatan partikel tanah, porositas tanah serta kedalaman efektif tanah.

Pada sifat tanah, sifat aliran ada 2 jenis yaitu laminar atau turbulen. Tahanan terhadap aliran bergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori. Tempertur juga sangat memengaruhi tahanan aliran. Walaupun secara teoritis, semua jenis tanah mempunyai rongga pori, dalam kenyataannya istilah untuk tanah yang mudah meloloskan air (permeable) dimaksudkan untuk tanah yang memang benar-benar mempunyai sifat meloloskan air. Sebaliknya, tanah disebut kedap air (impermeable), bila tanah

tersebut mempunyai kemampuan meloloskan air yang sangat kecil. Menurut (Hardiyatmo, Hary Christady. 2012) Tanah adalah granul struktur yang membentuk pori-pori yang saling berhubungan. Kemampuan air untuk menembus tanah media dilambangkan sebagai koefisien permeabilitas (k).

Tes pemompaan (*pumping test*) yang dilakukan pada gambut tropis berserat diserawak menunjukkan hasil korelasi yang terbatas antara pengurangan nilai permeabilitas dengan harapan derajat pembusukan yang terjadi (*humification*) menurut penelitian Ong & Yogeswaran (1991). Berdasarkan hasil identifikasi Ong & Yogeswaran (1991) menunjukkan berbagai masalah penting yang dapat terjadi dalam pemasangan pompa didalam kandungan gambut yang berserat serta menjelaskan bagaimana cara mengatasi tersumbatnya sumur.

Pada pengujian pemompaan guna mendukung permeabilitas (*permeability pumping test*), menurut (Barry et.al 1992) pada titik dangkal di hutan gambut Provinsi Riau (H5 sampai dengan H6) didapatkan nilai permeabilitas antara 10-2 m/detik hingga 10-4 m/detik. Barry dkk. (1992) juga melakukan perbandingan hasil tersebut dengan data pada tanah gambut yang telah dilaksanakan oleh peneliti sebelumnya, yang dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.4 Permeabilitas (*permeability pumping tests*) Pada Titik yang Dangkal di Hutan Gambut Riau. (Sumber: Panduan Geoteknik 1, 2001)

Deskripsi Gambut	Permeabilitas m/detik	Referensi	
Pemukaan	> 10-1	Hobbs	(1986)
Dasar dari "raised bo "g yang membusuk sedikit	3×10^{-5}	Hobbs	(1986)

Tabel Lanjutan 3.4 Permeabilitas (*permeability pumping tests*) Pada Titik yang Dangkal Di Hutan Gambut Riau. (Sumber: Panduan Geoteknik 1, 2001)

Fen acrotelm di Rusia: di dekat permukaan di dekat dasar	3×10^{-5} 9×10^{-7}	Hobbs	(1986)
Tahapan Gambut Mandia yang sangat membusuk dan bersifat seperti Agar-agar	3×10^{-8} hingga 10^{-7}	Hobbs	(1986)
Gambut Sphagnum H8 sampai H10 H3	6×10^{-8} 10^{-5}	Hobbs	(1986)
Gambut Sedge H3 sampai H5	10^{-5}	Hobbs	(1986)
Gambut Brushwood H3 sampai H8	10^{-5}	Hobbs	(1986)
Gambut Malaysia yang Asam dan Berserat (Fibrous acidic)	2×10^{-5} to 6×10^{-9}	Toh et al	(1990)

F. Berat Isi dan Angka Pori

Menurut Foth (1986) berat isi merupakan perbandingan berat tanah kering dengan suatu volume tanah termasuk volume pori-pori tanah, umumnya dinyatakan dalam gram/cm³. Besaran ini menyatakan bobot tanah, yaitu padatan air persatuan isi. Yang paling sering di pakai adalah bobot isi kering yang umumnya disebut bobot isi saja. Nilai bobot isi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya pengolahan tanah, bahan organik, pemadatan alat-alat pertanian, tekstur, struktur, dan kandungan air tanah. Nilai ini banyak dipergunakan dalam perhitungan-perhitungan seperti dalam penentuan kebutuhan air irigasi pemupukan dan, pengolahan tanah.

3.5 Kuat Tekan Bebas (UCS)

Kuat tekan bebas adalah pengujian yang umum dilakukan dan dipakai dalam proses penyelidikan sifat-sifat stabilisasi tanah. Pengujian secara *unconfined compression strength* sangatlah praktis, cepat serta akurat. Menurut (Hardiyatmo, 2002) Pengujian *sample* bersifat *undrained*, karena penekanan dilakukan relatif cepat, sehingga tidak ada air yang keluar dari pori *sample* tanah selama pengujian.

Disamping implementasinya yang praktis, sampel yang dibutuhkan juga tidak banyak. Dalam pembuatan benda uji sebagai dasar adalah kepadatan

maksimum yang diperoleh dari percobaan pemadatan. Pengujian ini merupakan cara yang dilakukan dilaboratorium untuk menghitung kekuatan geser tanah. Uji kuat tekan bebas ini mengukur seberapa kuat tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai sampel tanah berbentuk silinder yang bebas bagian sampingnya tersebut terpisah dari butiran-butirannya (pecah) juga mengukur regangan tanah akibat tekanan. Pengujian kuat tekan bebas ini dilakukan pada tanah kondisi tidak asli atau tercampur bahan lainnya. Namun untuk tanah yang sudah diberi campuran lainnya, pengujian dilaksanakan pada waktu peram 14 hari. Pembacaan tegangan pada pengujian kuat tekan bebas ini dibatasi sampai regangan 20%.

Pada pengujian ini sampel benda uji yang berbentuk silinder akan diberi beban, sehingga mendapatkan nilai kekuatan maksimum tanah tersebut dalam keadaan kuat tekan bebas sampai mencapai keruntuhan dan juga mengukur regangan tanah tersebut akibat tekanan yang diberikan. Setiap material apabila dikenai beban, maka akan mengalami perubahan deformasi atau bentuk. Gaya atau tekanan persatuan luas disebut sebagai *stress* atau penekanan. Selain *stress*, perubahan bentuk dalam hal ini dibuktikan dengan perubahan dalam satuan panjang atau ΔL yang dibanding dengan panjang semula, disebut sebagai *strain* atau regangan (ϵ). Pengujian ini menggunakan mesin tekan untuk menekan benda uji yang dibentuk silinder dari satu arah (uniaksial). Perbandingan antara tinggi dan diameter benda uji mempengaruhi nilai kuat tekan bebas benda uji (Gogot S. B., 2011). Untuk pengujian kuat tekan bebas secara umum digunakan perbandingan $L= 2D$. L adalah *length* atau panjang dari benda uji sedangkan D adalah diameter dari *sample* tanah yang akan diuji.

Sebagai standard pengujian berpedoman pada standar ASTM D 2166 mengenai *Unconfined Compressive Strength*.

$$\text{Kuat tekan bebas } (q_u) = \frac{K \times R}{A} \quad (3.5)$$

Dimana:

- Q_u = kuat tekan bebas
- k = kalibrasi proving ring
- R = pembacaan maksimum – pembacaan awal
- A = luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan (cm^2)

Kohensi undrained atau regangan tanah akibat beban tersebut dapat dihitung dengan persamaan c_u (kuat geser undrained). Kuat geser undrained (c_u) adalah didapat dari setengah hasil uji kuat tekan bebas.

$$C_u = \frac{qu}{2} \quad (3.6)$$

Dimana :

c_u = kuat geser undrained

qu = kuat tekan bebas

Kekuatan geser tanah dapat diartikan sebagai kemampuan maksimum tanah untuk bertahan terhadap usaha perubahan bentuk pada kondisi tekanan (*pressure*) dan kelambapan tertentu (head 1982). Kekuatan geser tanah dapat diukur dilapangan maupun dilaboratorium. Data kekuatan geser tanah pada awalnya hanya digunakan untuk keperluan teknik bangunan dalam mengevaluasi kemampuan tanah menompang konstruksi bangunan, seperti gedung dan bendungan. Penggunaannya dalam bidang pertanian dikaitkan dengan waktu dan teknik yang tepat dalam pengolahan tanah.

Konsep kekuatan geser tanah teori geser maksimum yaitu bahwa keruntuhan pada nilai tekanan pada saat terjadinya perubahan bentuk tetap, terjadi jika tekanan yang diberikan mencapai nilai kritis dari kemampuan tanah. Hukum mohr-coulomb menyatakan bahwa kekuatan geser tanah (T), mempunyai hubungan dengan kohesi tanah (c), dan jika priksi antar partikel yang dikemukakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma n \tan \varphi \quad (3.7)$$

Dimana :

τ = kekuatan geser (kPa)

c = kohesi tanah (kPa)

σn = tekanan normal (stress: kPa) tegak lurus bidang keruntuhan

φ = sudut priksi internal partikel (derajat)

3.6 CBR (California Bearing Ratio)

Menurut Badan Standarisasi Nasional (SNI 1744-2012) CBR merupakan perbandingan antara beban penetrasi suatu jenis material dan beban standar pada

kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. *California Bearing Ratio* merupakan suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standard load*) dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama dan dinyatakan dalam persentase, dan tujuan dari percobaan CBR adalah untuk menentukan nilai daya dukung tanah dalam kepadatan maksimum (Soedarmo dan Purnomo, 1997). Pada percobaan (*California Bearing Ratio*) CBR ini dapat dilakukan dengan 2 jenis cara berikut ini:

1. Percobaan (*California Bearing Ratio*) CBR terendam (*Soaked*)
2. Percobaan (*California Bearing Ratio*) CBR tak terendam (*Unsoaked*)

Tujuan dilakukan pengujian CBR ini adalah untuk mengetahui nilai CBR pada variasi kadar air pemadatan. Untuk menentukan kekuatan lapisan tanah dasar dengan cara percobaan CBR diperoleh nilai yang kemudian dipakai untuk menentukan tebal perkerasan yang diperlukan di atas lapisan yang nilai CBRnya tertentu (Wesley, 1977).

3.6.1 CBR Laboratorium

Tanah dasar (*subgrade*) pada konstruksi jalan baru dapat berupa tanah asli, tanah timbunan atau tanah galian yang sudah dipadatkan sampai mencapai kepadatan 95% kepadatan maksimum. Dengan demikian daya dukung tanah dasar tersebut merupakan nilai kemampuan lapisan tanah memikul beban setelah tanah tersebut dipadatkan. Berarti nilai CBR ini adalah nilai yang diperoleh dari contoh tanah yang dibuatkan mewakili keadaan tanah tersebut dipadatkan.

CBR ini disebut CBR Laboratorium, karena disiapkan di Laboratorium atau disebut juga CBR rencana titik. Makin tinggi nilai CBR tanah (*subgrade*) maka lapisan perkerasan di atasnya akan semakin tipis dan semakin kecil nilai CBR (daya dukung tanah rendah), maka akan semakin tebal lapisan perkerasan di atasnya sesuai beban yang akan dipikulnya, Klasifikasi nilai CBR tanah dapat dilihat pada tabel 3.5 berikut ini:

Tabel 3.5 Klasifikasi Nilai CBR Tanah (Bowles, 1992)

CBR (%)	Tingkatan Umum	Kegunaan
0 – 3	<i>Very poor</i>	<i>Subgrade</i>
3 – 7	<i>Poor to fair</i>	<i>Subgrade</i>

7 – 20	<i>Fair</i>	<i>Subbase</i>
20 – 50	<i>Good</i>	<i>Base or subbase</i>
> 50	<i>Exelent</i>	<i>Base</i>

CBR Laboratorium dapat dibedakan menjadi atas dua macam, yaitu:

1. CBR terendam (*soaked design CBR*)

CBR terendam merupakan pengujian CBR yang menyimulasikan keadaan terburuk dilapangan, dan untuk mencapai kondisi yang seperti ini, sampel CBR akan direndam didalam bak perendam selama minimal 4 hari sebelum pengujian.

2. CBR tak terendam (*unsoaked design CBR*)

CBR tak terendam merupakan pengujian CBR yang menyimulasikan keadaan normal dilapangan, dan untuk mencapai kondisi yang seperti ini, sampel CBR akan langsung diuji setelah dipadatkan.

3.6.2 CBR Lapangan (*CBR field*)

Pengujian CBR lapangan dilakukan untuk mendapatkan nilai CBR langsung ditempat (*in place*) yang digunakan untuk perencanaan tebal perkerasan maupun lapis tambah perkerasan (*overlay*). Pengujian CBR lapangan dilakukan dengan bantuan truk sebagai penahan beban penetrasi (SNI 1738, 2011).

Berikut ini adalah tujuan pengujian CBR lapangan:

- a. Untuk mendapatkan nilai CBR asli dilapangan. Sesuai dengan kondisi tanah dasar saat itu. Pada umumnya digunakan untuk sebuah perencanaan tebal perkerasan dengan lapisan tanah dasar yang tidak perlu dilakukan pemadatan. Jenis pemeriksaannya dilaksanakan dengan kondisi kadar air tanah yang tinggi atau pada kondisi terburuk yang mungkin bisa terjadi.
- b. Guna memeriksa apakah untuk hasil kepadatan yang didapatkan sesuai dengan yang diharapkan. Pada pemeriksaan jenis ini tidak banyak digunakan, yang lebih sering digunakan adalah pemeriksaan dengan kerucut pasir (*sand cone*) dan lainnya.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Metodologi penelitian pada Tesis ini bersifat eksperimen (*research*). Pada bab ini dijelaskan metode penelitian yang mencakup lokasi, bahan, alat, tahapan penelitian, serta prosedur dari penelitian pengujian pendahuluan dan pengujian utama. Dimana pada penelitian pengujian pendahuluan merupakan pengujian dari tanah gambut dan pengujian utama juga merupakan pengujian pada tanah gambut yang telah ditambahkan dengan campuran pasir serta pengaplikasian *biogrouting* teknik dengan bantuan bakteri *bacillus subtilis*.

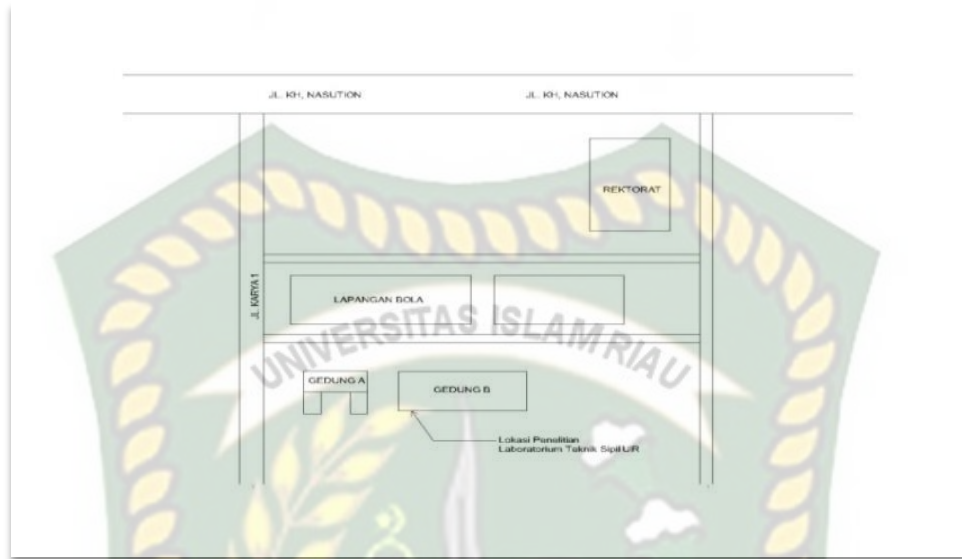
4.2 Lokasi Penelitian dan Lokasi Pengambilan Sampel

Penelitian Tesis ini dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Riau. Seluruh tahapan proses pengujian, baik pada pengujian pendahuluan maupun pengujian utama dilaksanakan di Laboratorium. Lokasi pengambilan sampel Tanah Gambut diambil dari Desa Buana Makmur Km. 55, Kecamatan Dayun Kabupaten Siak Provinsi Riau. Peta lokasi pengambilan sampel tanah gambut dapat dilihat pada gambar 4.1. Untuk pengadaan bakteri *Bacillus subtilis* ini berasal dari Laboratorium Pertanian Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Riau.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel (*Google Earth, 2020*)

Adapun denah lokasi penelitian ini seperti pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Denah Penelitian

4.3 Bahan Eksperimen

Pada penelitian ini bahan – bahan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Tanah gambut

Sampel tanah yang akan digunakan peneliti dalam penelitian ini adalah tanah gambut yang kondisinya sudah terganggu, dimana tanah tersebut diambil pada kedalaman ± 50 cm dari permukaan tanah atas dengan menggunakan cangkul, kemudian tanah tersebut diangkat ke laboratorium untuk dikerikan dengan cara dijemur dibawah sinar matahari secara terbuka. Kemudian tanah tersebut diayak hingga lolos saringan no 4.



Gambar 4.4 Tanah Gambut

2. Pasir

Pasir yang digunakan peneliti untuk penelitian ini adalah pasir warna putih yang telah diayak hingga lolos menggunakan saringan nomor 40.



Gambar 4.5 Pasir

3. Bakteri *Bacillus Subtilis*



Gambar 4.6 Bakteri *Bacillus Subtilis*

4. Urea

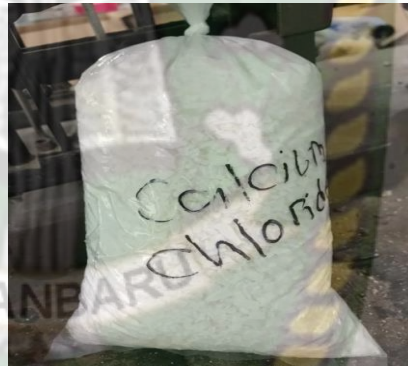
Urea adalah senyawa kimia mengandung Nitrogen (N) berkadar tinggi. Unsur Nitrogen merupakan zat hara yang sangat diperlukan tanaman. Urea berbentuk butir-butir kristal berwarna putih. Urea dengan rumus kimia NH_2CONH_2 merupakan produk yang mudah larut dalam air dan sifatnya sangat mudah menghisap air (higroskopis). Urea mengandung unsur hara N sebesar 46% dengan pengertian setiap 100 kg mengandung 46 kg Nitrogen, Moisture 0,5%, Kadar Biuret 1%, ukuran 3,35MM 90% Min serta berbentuk Prill. Standar urea SNI-02-2801-1998.



Gambar 4.7 Senyawa Urea

5. CaCl

Merupakan senyawa kimia yang digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah yang mudah larut dalam air dan mampu mengalirkan arus listrik dengan cukup baik dan juga mampu mengikat partikel tanah.



Gambar 4.8 Senyawa CaCl

6. Air

Air yang digunakan peneliti untuk penelitian ini adalah air bersih yang berasal dari sumur bor Fakultas Teknik Universitas Islam Riau, Pekanbaru.

4.4 Peralatan Pengujian Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan pada pengujian ini disesuaikan dengan ketersediaan peralatan yang di laboratorium Teknik Sipil Universitas Islam Riau.

A. Peralatan Pengujian Pendahuluan

Berikut adalah peralatan – peralatan untuk uji sifat – sifat tanah:

1. Peralatan uji kadar air,

Alat-alat yang akan digunakan pada pengujian kadar air adalah :

a. Cawan untuk wadah tanah gambut pengujian kadar air



Gambar 4.9 Alat Cawan

b. Timbangan untuk menimbang berat tanah dan lain-lainnya



Gambar 4.10 Alat Timbangan

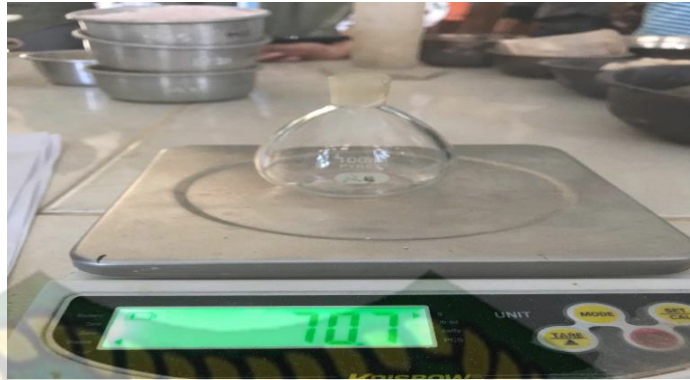
c. Oven dengan pengatur suhu untuk pengeringan agar mendapatkan hasil kering maksimal.

2. Peralatan uji berat spesifik (Gs),

Alat-alat yang akan digunakan pada pengujian berat jenis adalah :

a. Piknometer kapasitas 100 ml untuk wadah pengujian berat jenis tanah yang lolos saringan no 40.

b. Timbangan



Gambar 4.11 Alat Piknometer dan Timbangan

- c. Kompor gas untuk memanaskan sampel uji agar bisa mengangikatkan udara dalam pori-pori tanah
- d. Cawan untuk wadah tanah gambut sampel benda uji



Gambar 4.12 Alat Cawan

- e. Botol tempat air suling untuk menambahkan air dalam pikno yang sedang dipanaskan



Gambar 4.13 Alat Botol Air Suling

3. Peralatan uji pemadatan (*proctor test*),

Alat-alat yang digunakan adalah:

- a. Mold pemadatan \varnothing 4"
 - b. Palu pemadatan standar dengan berat 2,45 kg (5,5 lb)
 - c. Extruder mold
 - d. Pisau pemotong
 - e. Palu karet
 - f. Kantong plastic
 - g. Cawan
 - h. Pan
 - i. Gelas ukuran 1000 ml
 - j. Saringan no.4
- a. Mold untuk wadah tanah gambut
 - b. Palu standar untuk penumbuk tanah yang ada dalam mold



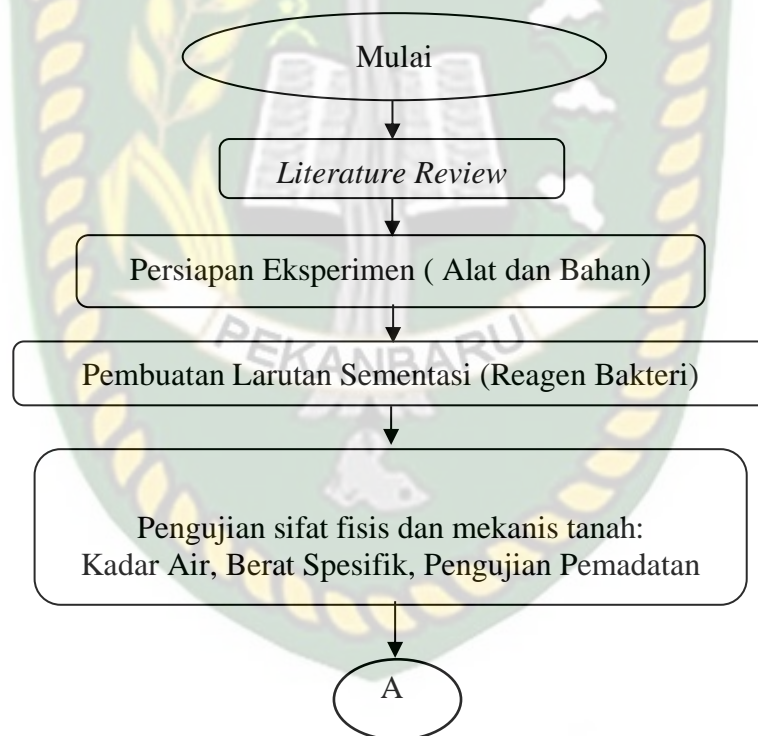
Gambar 4.14 Alat Uji Pemadatan Tanah

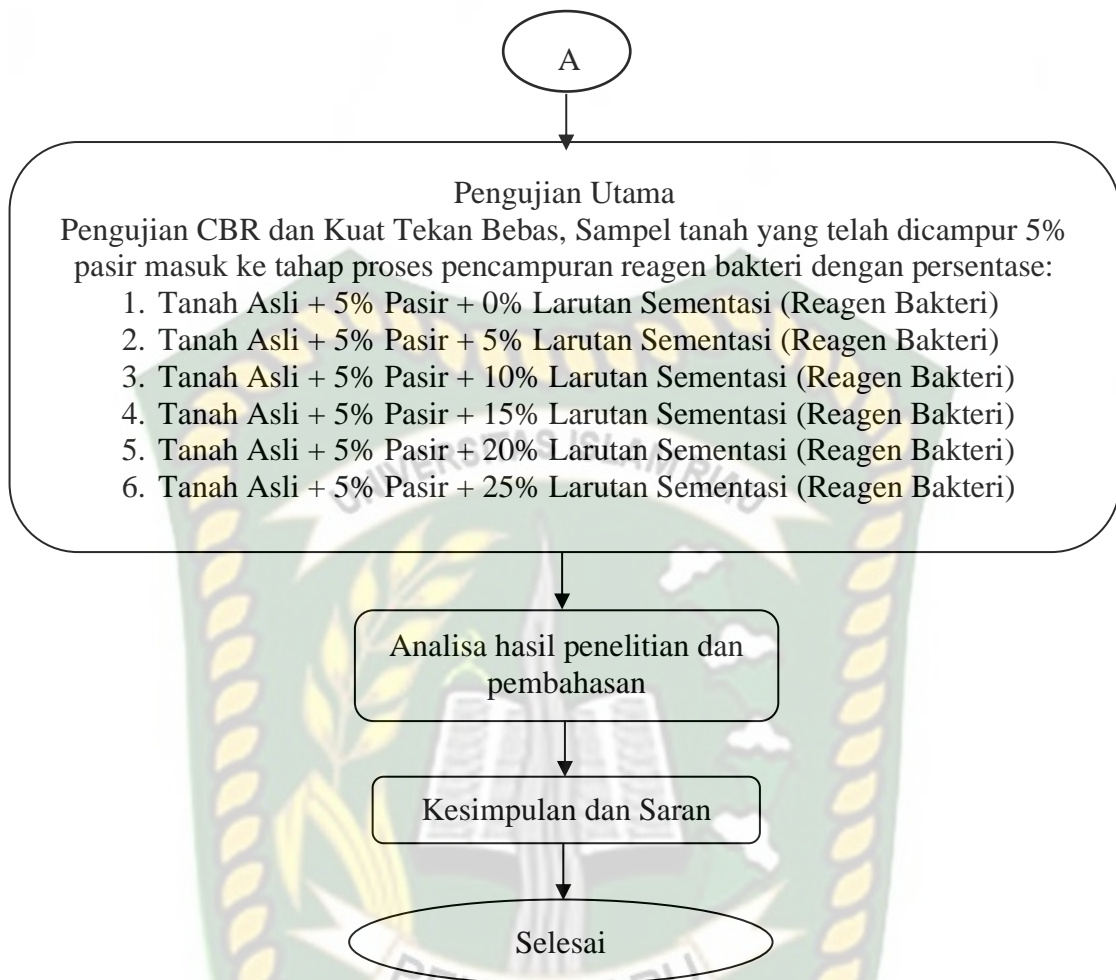
B. Peralatan Pengujian Utama (kuat Tekan Bebas Dan Uji CBR)

Adapun peralatan yang digunakan untuk penelitian Kuat Tekan Bebas cbr adalah:

1. Timbangan
2. Cawan
3. Stopwatch
4. Oven
5. Satu set alat *unconfined compression strength test* (UCS)
6. Satu set alat uji CBR

4.5 Bagan Alir Penelitian





Gambar 4.15 Bagan Alir Penelitian

4.6 Pembuatan Larutan Sementasi (*Reagen Bakteri*)

Pada proses ini dilakukan pencampuran dengan bakteri *Bacillus subtilis*.

Bahan-bahan yang digunakan pada proses ini adalah sebagai berikut:

- a. Bakteri *Bacillus subtilis*
- b. Urea
- c. CaCl_2
- d. Air

Larutan sementasi merupakan larutan campuran yang terdiri dari urea dan CaCl_2 yang berguna oleh bakteri untuk menghasilkan kalsit / CaCO_3 (*calcium*

carbonate). Pada penelitian ini dimanfaatkan larutan sementasi dengan komposisi Urea, CaCl_2 , bakteri *Bacillus Subtilis* dan Air.

Untuk pembuatan larutan sementasi (reagen bakteri) harus disiapkan alat-alat dan bahannya, alat-alat yang dipakai yaitu, cawan, sendok, timbangan digital, botol (wadah penampung larutan), tabung piknometer, gelas ukur, cerocok dan kertas saring. Sedangkan untuk bahannya adalah Urea, CaCl_2 , Bakteri *Bacillus subtilis* dan air.

Pada tabel 4.1 berikut ini adalah campuran / konsentrat sebagai bahan larutan sementasi (reagen bakteri)

Tabel 4.1 Komposisi Larutan Sementasi

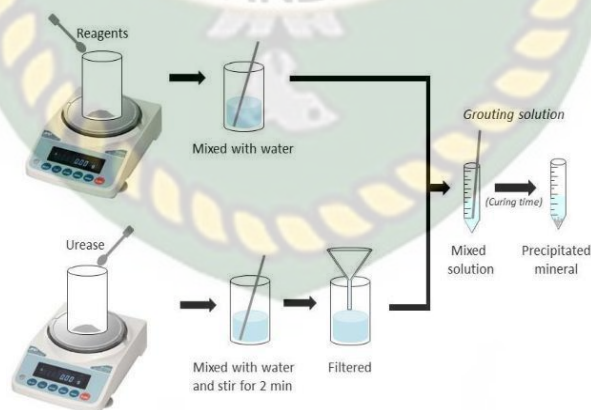
No	Bahan	Kuantitas
1	Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	10 ml
2	Urea	1000 gr
3	CaCl_2	10 gr
4	Air	50 ml

Berikut ini adalah prosedur dan tahapan pembuatan larutan sementasi (reagen bakteri):

- Langkah pertama adalah dengan melarutkan 100 gr urea dengan air sebanyak 50 ml kedalam cawan pertama, air diambil dengan jumlah 50 ml dan dimasukkan kedalam wadah, kemudian Urea diambil dan ditimbang seberat 100 gram. Lalu urea yang telah ditimbang sebesar 100 gram tadi dimasukkan kedalam wadah yang sudah ada air sebanyak 50 ml, urea tersebut diaduk agar kemudian larut pada air tersebut.
- Lalu larutkan 10 gr CaCl_2 dengan air sebanyak 50 ml kedalam cawan kedua. Sama dengan proses pembuatan Urea, langkah pertama untuk pembuatan larutan CaCl_2 adalah dengan mengambil air sebanyak 50 ml dan dimasukkan kedalam wadah, kemudian CaCl_2 diambil dan ditimbang seberat 10 gram. Lalu CaCl_2 yang telah ditimbang sebesar 10 gram tadi

dimasukkan kedalam wadah yang sudah ada air sebanyak 50 ml, CaCl_2 tersebut diaduk agar kemudian larut pada air tersebut.

3. Larutkan 10 ml bakteri dengan air sebanyak 50 ml ke dalam cawan ketiga. Pada proses ini disiapkan air sebanyak 50 ml dan dimasukkan kedalam wadah, kemudian bakteri *Bacillus subtilis* diambil dan ditakar sebanyak 10 ml, lalu air sebanyak 50 ml dan bakteri sebanyak 10 ml ini dicampurkan dengan cara diaduk.
4. Setelah semua bahan larut, campurkan semua bahan tersebut kedalam cawan keempat, komposisinya 10 ml pada setiap bahannya.
5. Tahap selanjutnya adalah larutan Urea, larutan CaCl_2 dan larutan Bakteri kemudian dicampurkan dan atau diaduk didalam tabung piknometer. Setelah ketiga bahan tersebut dicampurkan dan menjadi sebuah larutan, lalu larutan ini disaring menggunakan kertas saringan. Kertas saringan ini lalu ditimbang berat bersihnya agar mendapatkan berat larutan hasil sarigan tersebut, larutan yang sudah disaring kemudian dicampurkan dengan air. Komposisinya adalah, pada setiap 250 ml air, dicampurkan 0,1 gram larutan yang sudah tersaring tersebut. Hasil dari pencampuran air sebanyak 250 ml dan larutan hasil saringan seberat 0,1 gram ini adalah larutan sementara (reagen bakteri) *bio-grouting* tersebut.



Gambar 4.17 Proses Pembuatan Larutan Sementara (Reagen Bakteri)



Gambar 4.18 Proses Penyaringan Larutan

4.6 Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan ini dilakukan dengan mengambil sampel tanah gambut yang telah tersedia atau yang akan digunakan sesuai keperluan pengujian yang akan dilaksanakan. Berikut ini adalah prosedur pengujian pendahuluan:

1. Pengujian kadar air (ASTM D 2216-98). Tanah dalam kondisi yang basah dari lapangan dimasukkan ke dalam wadah, kemudian tanah tersebut ditimbang, lalu dimasukkan ke dalam *oven* selama ± 24 jam dengan suhu 80°C . Setelah dibiarkan didalam *oven* untuk menunggu proses pengeringan, lalu tanah tersebut ditimbang lagi, tahap selanjutnya dilakukan proses membandingkan berat air dengan berat tanah kering.



Gambar 4.19 Pengujian Kadar Air Tanah Asli

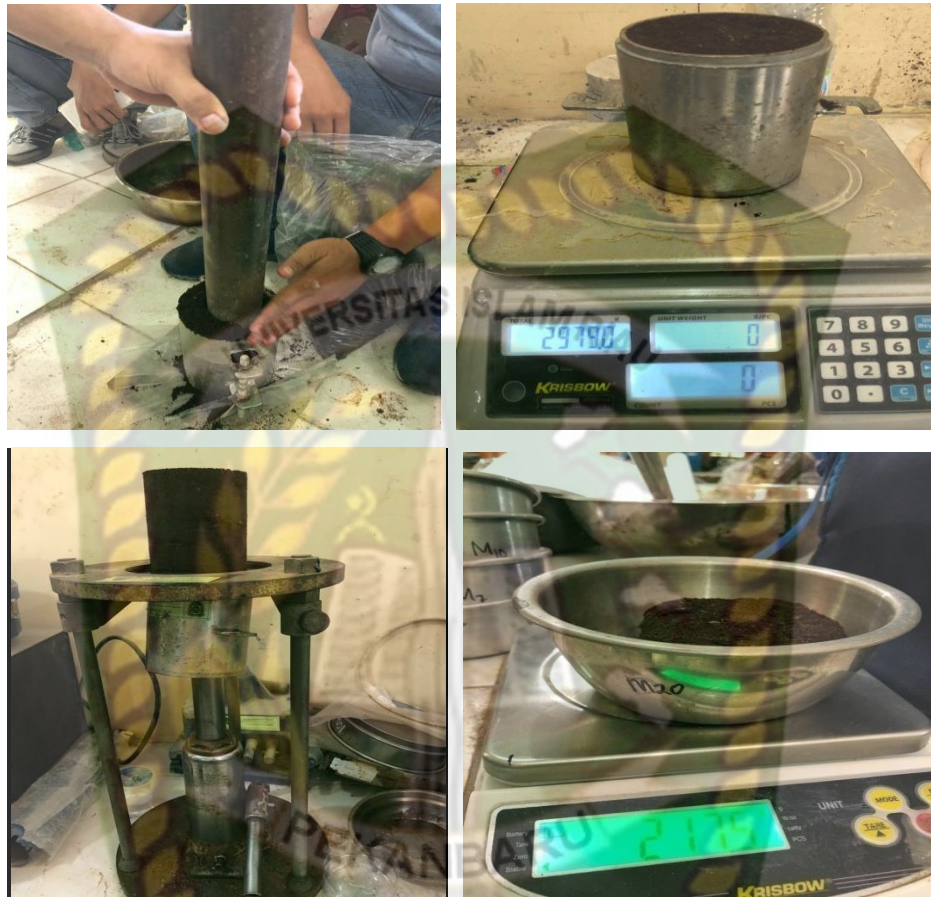
2. Pengujian berat spesifik (ASTM D 854-2). Sampel tanah diambil secukupnya untuk dimasukkan kedalam *oven* selama ± 24 jam dengan suhu 80°C . Tanah yang sudah mengering akibat proses di *oven* tadi, lalu disaring menggunakan saringan no. 40 dan diambil secukupnya. Kemudian tanah diambil secukupnya dimasukkan kedalam piknometer 100 ml dan ditimbang beratnya. Pada piknometer tersebut ditambahkan air hingga tanah terendam. Untuk mengangkat udara dalam pori – pori tanah, sampel uji dipanaskan diatas pasir dengan menggunakan kompor. Setelah udara dalam pori tanah menghilang, lalu ditambahkan air hingga ke bibir piknometer, lalu ditimbang.



Gambar 4.20 Pengujian Berat Jenis

3. Uji sifat mekanis tanah dilakukan dengan Uji Pemadatan / *Proctor Test* (ASTM D 698). Sampel tanah yang sudah dikeringkan dengan dijemur panas matahari, ditimbang dengan berat 2,5 kg persampel, dibuat sebanyak 5 sampel. Kemudian ditambahkan air pada tanah dan diaduk rata, dicari kondisi tanah mendekati padat dengan cara menggenggam tanah tersebut. Setelah didapat perkiraan tambahan air tanah padat, sampel yang lain ditambah air dengan rentang 10%. Proses pemadatan dilakukan pada *mold proctor* dan ditumbuk 25 kali per lapisan, lapisan ini dibuat sebanyak 3 lapis menggunakan alat penumbuk. Setelah dipadatkan diambil sampel dari tanah yang padat untuk dicari kadar airnya. Kemudian setelah didapat kadar airnya, data kadar air dan

kepadatan kering dimasukkan kedalam grafik kadar air vs kepadatan untuk mencari puncaknya.



Gambar 4.21 Pengujian Pemadatan / *Proctor Test*

4.7 Pengujian Utama (*CBR unsoaked Laboratorium*)

Pengujian utama ini merupakan pengujian *California Bearing Ratio (CBR) unsoaked* Laboratorium, dilakukan setelah pembuatan larutan sementasi dan semua pengujian pendahuluan selesai agar mengetahui properties tanah gambut.

Di laboratorium Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Riau dilakukan pencampuran tanah dengan pasir untuk seluruh sampel sebanyak 5% dari berat tanah serta larutan sementasi yang didalamnya sudah terkandung larutan bakteri *Bacillus subtilis*, dengan beberapa variasi persentase pencampuran yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dengan pengujian *CBR unsoaked*, kemudian di peram dengan waktu peram selama 4 hari.

. Larutan sementasi dan air disesuaikan dengan jumlah kadar air optimum, lalu kemudian dicampurkan dengan tanah gambut yang telah dicampurkan pasir untuk dicetak menggunakan alat cetakan CBR yang menjadi pengujian utama pada penelitian ini. Berikut ini adalah tabel variasi campuran larutan sementasi pada setiap sampel CBR:

Tabel 4.2 Variasi Campuran Pasir Dan Larutan Sementasi Pada Sampel Uji CBR

No	Sampel Uji CBR	Masa pemeraman	Persentase Pasir (terhadap volume tanah benda uji CBR)	Persentase Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Terhadap volume kadar optimum air pada benda uji CBR	Jumlah Sampel (Buah)
1	Sampel 1	4 hari	5 %	0 %	1
2	Sampel 2	4 hari	5 %	5 %	1
3	Sampel 3	4 hari	5 %	10 %	1
4	Sampel 4	4 hari	5 %	15 %	1
5	Sampel 5	4 hari	5 %	20 %	1
6	Sampel 6	4 hari	5 %	25	1

4.7.1 Prosedur Pengujian Utama (**CBR *unsoaked* Laboratorium**)

Berikut ini adalah prosedur-prosedur dari pengujian utama atau pengujian CBR *unsoaked*:

1. Persiapan sampel tanah.

Tanah gambut yang kering udara diambil dan ditimbang sebanyak 2000 gram, lalu dimasukkan pasir sebanyak 5% (terhadap volume benda uji CBR) pada masing-masing sampel. Untuk pengujian CBR Laboratorium *unsoaked* ini sampel tanah gambut yang dibutuhkan adalah sebanyak 6 buah sampel.

2. Pencampuran sampel tanah dengan larutan sementasi.

Tanah gambut yang bercampur 5% pasir dan telah dipersiapkan sebelumnya

memiliki kadar air optimum 157 %. Bahan tanah gambut tersebut kemudian dicampurkan dengan larutan sementasi dan air (terhadap kadar air optimum).

Berikut ini adalah variasi persentase larutan sementasi pada setiap sampel:

- a. Sampel 1 = 0% larutan sementasi + 100% air
- b. Sampel 2 = 5% larutan sementasi + 95% air
- c. Sampel 3 = 10% larutan sementasi + 90% air
- d. Sampel 4 = 15% larutan sementasi + 85% air
- e. Sampel 5 = 20% larutan sementasi + 80% air
- f. Sampel 6 = 25% larutan sementasi + 75% air

Tabel 4.3 Variasi Campuran Larutan Sementasi Dan Air Pada Sampel Uji CBR Terhadap Kadar Air Optimum Benda Uji

No	Sampel Uji CBR	Persentase Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)	Persentase Air
1	Sampel 1	0 %	100 %
2	Sampel 2	5 %	95 %
3	Sampel 3	10 %	90 %
4	Sampel 4	15 %	85 %
5	Sampel 5	20 %	80 %
6	Sampel 6	25 %	75 %

3. Pencetakan sampel.

Setelah seluruh bahan benda uji selesai dicampurkan (adukan), pasang CBR mold pada keping alas dan ditimbang, masukkan keping pemisah (*spacer disc*), lalu letakkan kertas saring di atasnya. Padatkan masing-masing sampel tanah tersebut didalam CBR mold dengan jumlah tumbukan 65 kali per lapis (3 lapis). Karena pengujian CBR *unsoaked*, pemeriksaan kadar airnya dilakukan setelah benda uji dikeluarkan dari cetakan. Kemudian, lepasan *colar* lalu ratakan

permukaan contoh dengan alat perata, tambal lubang-lubang yang mungkin terjadi pada permukaan karena lepasnya butir-butir kasar dengan bahan yang lebih halus. Selanjutnya keluarkan piring pemisah (*spacer disc*) dan kertas saring, balikkan dan pasang kembali mold yang berisi sampel tanah pada alas kemudian ditimbang.

4. Tahapan pengujian.

- a. Letakkan keping beban seberat 10 lbs / 4,5 kg diatas permukaan benda uji, letakkan mold diatas piringan penekan pada alat penetrasi CBR.
- b. Atur piston penetrasi supaya menyentuh permukaan benda uji, kemudian lakukan penetrasi sampai arloji beban menunjukkan beban permukaan sebesar 4,5 kg/10 lbs. Pembebanan permulaan ini diperlukan untuk menjamin bidang sentuh yang sempurna antara arloji pengukur penetrasi sampai dengan nol.
- c. Berikan pembebanan dengan teratur sehingga kecepatan penetrasi mendekati kecepatan 1,27 mm/menit atau 0,05 inch/menit.
- d. Lakukan pencatatan bacaan dial beban pada penetrasi sebesar 0.0125 inch, 0.025 inch, 0.050 inch, 0.075 inch, 0.100 inch, 0.150 inch, 0.200 inch dan 0.300 inch.



Gambar 4.22 Pembuatan dan Pengujian Sampel Uji CBR

4.8 Pengujian Utama (Uji Tekan Bebas)

Pada pengujian utama ini adalah merupakan pengujian Kuat Tekan Bebas tanah gambut di Laboratorium, dilakukan setelah pembuatan larutan sementasi dan semua pengujian pendahuluan selesai agar mengetahui properties tanah gambut.

Di laboratorium Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Riau dilakukan pencampuran tanah dengan pasir untuk seluruh sampel sebanyak 5% dari berat tanah serta larutan sementasi yang didalamnya sudah terkandung larutan bakteri *bacilius subtilis*, dengan beberapa variasi persentase pencampuran dan variasi waktu peram yaitu sampel 1 = 0%, sampel 2 = 5%, sampel 3 = 10%, sampel 4 15%, sampel 5 = 20%, sampel 6 = 25% dengan pengujian kuat tekan, kemudian di peram dengan waktu peram selama 14 hari. Berikut ini adalah prosedur-prosedur dari pengujian utama atau pengujian Kuat Tekan Bebas:

1. Persiapan benda uji.

Tanah gambut yang kering udara diambil dan ditimbang sebanyak 48,7 gram + pasir sebanyak 5% dari berat tanah pada masing-masing benda uji + air sebanyak 41.3 ml. Untuk pengujian Kuat tekan bebas ini benda uji yang dibutuhkan adalah sebanyak 12 buah benda uji.

2. Pencetakan benda uji.

Setelah tanah ditimbang 48,7 gram + 5% pasir dari berat tanah dan air sebanyak 41.3 ml lalu diaduk. Kemudian dibagi menjadi 3 bagian kedalam cawan, lalu masukan tanah kedalam ring pencetak benda uji, setiap bagian diberi penekanan yang sama menggunakan alat modifikasi dari alat sondir sehingga diperoleh kepadatan yang merata dengan volume dan ukuran yang sama. Kemudian benda uji dikeluarkan dengan bentuk silinder dan ukuran benda uji dengan diameter 3,64 cm dan area 10,75 cm, kemudian dimasukan kedalam plastis kedap udara supaya kadar air nya tidak berkurang.



Gambar 4.20 pembuatan sampel

3. Pencampuran benda uji dengan larutan sementasi.

Langkah-langkah pencampuran benda uji dengan larutan sementasi dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- a. Ambil benda uji yang ada didalam plastik, lalu dikeluarkan dan ditimbang beratnya, kemudain dimasukan kembali benda uji kedalam plastik semula
- b. Hasil dari benda uji yang sudah ditimbang tadi kemudian dikalikan persen larutan sementasi tadi, pada penelitian ini menggunakan campuran sementasi sebanyak (5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%), hal ini dilakukan untuk mendapatkan berapa ml larutan sementasi yang akan diteteskkan pada benda uji menggunakan pipet tetes khusus.
- c. Untuk setiap persen campuran larutan sementasi digunakan 3 benda uji.
- d. Setelah itu simpan dan peram benda uji yang telah diteteskkan larutan sementasi selama 14 hari



Gambar 4.21 pencampuran sementasi dengan benda uji

4. Prosedur pengujian
 - a. Contoh benda uji dipasang pada rangka beban alat uji UCS dan diatur hingga sentris terhadap dongkraknya.
 - b. Kemudian stel proving ring dial dan pengukur regangan pada nol stand. Tentukan kecepatannya.
 - c. Kecepatan regangan diambil 35 mm per 15 detik.
 - d. Mulai diadakan penekanan hingga terjadi keruntuhan sambil dikontrol atau dicatat pada setiap interval regangan tersebut.
 - e. Setelah runtuh contoh sampel benda uji difoto dan dikeluarkan dan digambar bentuk keruntuhannya.



Gambar 4.22 alat *unconfined compression test*

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Deskripsi Umum

Pada bab ini membahas mengenai hasil penelitian yaitu hasil pengujian pendahuluan berupa karakteristik sifat-sifat fisik tanah gambut dan sifat-sifat mekanik tanah gambut serta pembahasan hasil pengujian utama yaitu *California Bearing Ratio* (CBR) *unsoaked* Laboratorium terhadap penambahan larutan sementasi (reagen bakteri) pada sampel uji CBR dengan kadar air optimum dan pengujian permeabilitas tanah gambut dengan metode *falling head* (ASTM D 5084).

5.2 Pengujian Pendahuluan

Sebelum dilakukannya pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) tak terendam/*unsoaked* Laboratorium dan Uji Tekan Bebas, terlebih dahulu dilakukan pengujian pendahuluan. Pengujian yang dilakukan diantaranya: pengujian kadar air tanah asli (tanah gambut), berat spesifik (*G_s*), dan pengujian pemadatan / *proctor test*.

5.2.1 Kadar Air Tanah Gambut

Pengujian kadar air dilakukan sesuai prosedur pada ASTM D2216-98. Hasil dari pengujian kadar air yang dilakukan pada tanah gambut didapatkan nilai kadar air sebesar 407,5 % dapat dilihat pada lampiran A-1. Hal ini disebabkan karena tanah asli yang diuji terdiri dari kandungan serat organik (gambut) yang dapat menyerap air sangat banyak sehingga mengandung kadar air yang tinggi, menurut (Mochtar 2002) kadar air tanah gambut berkisaran antara 200% hingga mencapai 900%.

5.2.2 Berat Spesifik (*G_s*)

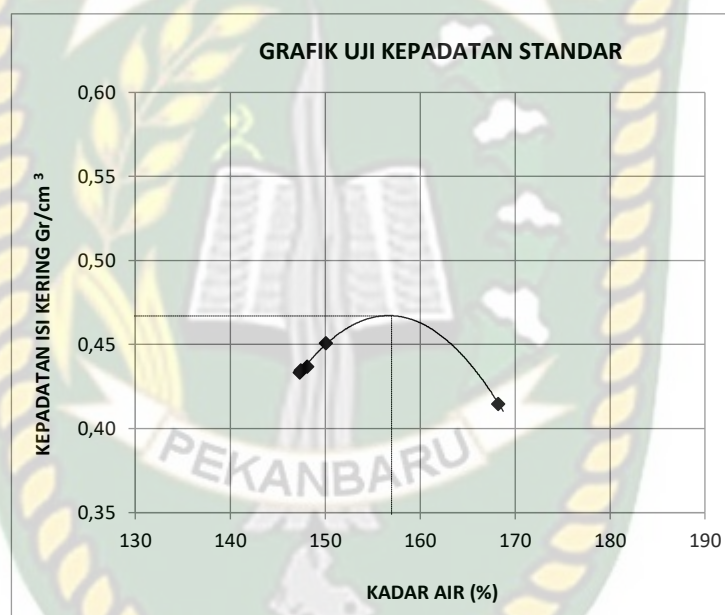
Pengujian Berat Spesifik (*Specific Gravity*) dilakukan sesuai ASTM D 854-02. Dari pengujian yang telah dilakukan terhadap tanah asli, nilai berat spesifik (*G_s*) tanah yang digunakan adalah sebesar 1,30. Hal ini dapat dilihat

pada lampiran A-2. Nilai berat spesifik (Gs) diakibatkan karena adanya serat-serat kayu dan kandungan organik lainnya yang terdapat pada tanah gambut.

5.2.3 Pengujian Pemadatan / *proctor test*

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai berat isi kering maksimum (γ_d maks) tanah asli sebesar $0,467 \text{ gr/cm}^3$ dan kadar air optimum (OMC) tanah asli sebesar 157 %, dapat dilihat pada Lampiran A-3.

Grafik pengujian pemadatan dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Hubungan Berat Volume Kering dengan Kadar Air

Tingginya nilai kadar air optimum (OMC) disebabkan karena besarnya pori-pori tanah hal ini disebabkan tanah terdiri dari serat-serat tumbuhan (organik) menyebabkan tanah menyerap banyak air untuk mencapai kepadatan yang optimum. Kadar air optimum (OMC) yang diperoleh dari pengujian pemadatan pada tanah asli ini dijadikan sebagai pembanding terhadap kondisi tanah yang digunakan pada pengujian permodelan. sesuai dengan berat volume kering yang didapat maka klasifikasi gambut berdasarkan berat volume kering pada tingkat pelapukannya atau dekomposisi $> 0,2 \text{ gr/cm}^3$. Menurut (Mutalib, et al.,1991) Berdasarkan sifat fisik dan kimia tanah gambut yang memiliki klasifikasi gambut

berdasarkan berat volume pada tingkat pelapukannya $> 0,2 \text{ gr/cm}^3$ maka tanah gambut yang berasal dari siak ini (penelitian ini) dikategorikan termasuk gambut saprik hal ini karena disebabkan oleh pengaruh mineral tanah.

5.3 Sifat-sifat Tanah Gambut

Berdasarkan dari pengujian-pengujian sebelumnya, didapatkan nilai dari sifat-sifat fisis tanah gambut kabupaten siak provinsi Riau.

Tabel 5.1 Sifat-sifat Tanah Gambut (Mochtar,2002)

No	Sifat-Sifat	Besaran	Satuan
1	Berat Spesifik, G_s	0,544	-
2	Kadar Air, w	407,5	%
3	Berat Volume Basah, γ	0,983	kN/m^3
4	Berat Volume Kering, γ_d	0,168	kN/m^3
5	Berat Isi Kering Maksimum, (γ_d maks)	0,467	Gr/cm^3
6	Kadar Air optimum, (OMC)	157	%

Dari tabel 5.1 diatas didapat sifat-sifat fisis tanah gambut yang didapat dari hasil pengujian pendahuluan yaitu kadar air, berat jenis dan pemadatan / *proctor test*.

5.4 Pengujian Sifat Fisik Terstabilisasi Larutan Bakteri + pasir

5.4.1 Kadar Air Terstabilisasi Larutan Bakteri

Uji kadar air pada sampel benda uji dicampurkan dengan penambahan larutan sementasi dapat dilihat pada tabel 5.2.

Tabel 5.2. Nilai Kadar Air (W) Terhadap Penambahan Larutan Sementasi

No	Perlakuan Larutan Bakteri (%)	Kadar Air (%)
1	0%	166,6
2	5%	172,7
3	10%	177,2
4	15%	164,6
5	20%	169,7
6	25%	162,5

Melihat hasil pada Tabel 5.2 hubungan kadar air (W) dengan pencampuran larutan bakteri dapat disimpulkan bahwa penambahan larutan bakteri sebanyak 5% dan 10% mengalami kenaikan kadar air (W) pada saat penambahan larutan bakteri 15% terjadi penurunan sebesar 6% dari kadar air (W), pada penambahan larutan bakteri 20% mengalami kenaikan kembali sebesar 3.1% kadar air (W) dan pada penambahan larutan bakteri 25% terjadi penurunan kadar air (W) kembali sebesar 4,1%. kadar air (W) tertinggi terjadi pada perlakuan penambahan larutan bakteri 10 % dengan nilai (W) = 177,2% dengan kenaikan 10,6% dari sampel benda uji tanpa perlakuan atau 0%. Diperlakukan 0% terjadi kenaikan kadar air dikarenakan adanya penambahan pasir pada penelitian ini yaitu sebesar 5% dari berat sampel benda uji pada setiap perlakuan.

5.4.2 Berat Jenis Terstabilisasi Larutan Bakteri

Pengujian berat jenis pada sampel tanah gambut yang dicampur dengan larutan bakteri dapat dilihat pada tabel 5.3

Tabel 5.3 Nilai Berat Jenis (Gs) Tanah Gambut Terhadap Penambahan Larutan Bakteri

No	Perlakuan Larutan Bakteri (%)	Berat Jenis Tanah
1	0	1,56
2	5	1,62
3	10	1,27
4	15	1,67
5	20	1,77
6	25	1,80

Hasil dari table 5.3 diatas memperlihatkan bahwa hubungan berat jenis (Gs) terhadap penambahan larutan bakteri dapat disimpulkan bahwa penambahan larutan bakteri 5% terjadi kenaikan berat jenis (Gs) sebesar = 0,06 dari sampel benda uji tanpa perlakuan. Pada saat penambahan larutan bakteri 10% terjadi penurunan berat jenis sebesar = 0,35 dari penambahan larutan bakteri 5%, pada

penambahan larutan bakteri 15%, 20% dan 25% terus mengalami kenaikan berat jenis (Gs) dari penambahan 10%. Nilai berat jenis (Gs) tertinggi terjadi pada penambahan larutan bakteri 25% dengan nilai berat jenis (Gs) = 1,80 dengan kenaikan (Gs) = 0,25 dari nilai (Gs) benda uji tanpa perlakuan.

5.5 Pengujian Kuat Tekan Bebas

Pengujian Kuat Tekan Bebas dengan menggunakan metode *biogrouting* adalah dengan cara mencampurkan bakteri *bacillus subtilis* yang dibuat menjadi sebuah larutan (larutan sementasi) dengan tanah gambut bercampur dengan pasir. Persentase pasir pada sampel benda uji ini adalah sebanyak 5% dari berat sampel tanah gambut. Pada penelitian ini, uji kuat tekan bebas dilakukan pada tanah kondisi tidak asli (*disturbed sample*) atau dalam keadaan sudah tecampur bahan lain nya. Sedangkan untuk benda uji yang sudah diberi campuran larutan sementasi harus disimpan dalam waktu 14 hari. Hal ini digunakan agar dapat mengukur kemampuannya masing-masing sampel benda uji terhadap kuat tekan bebas.

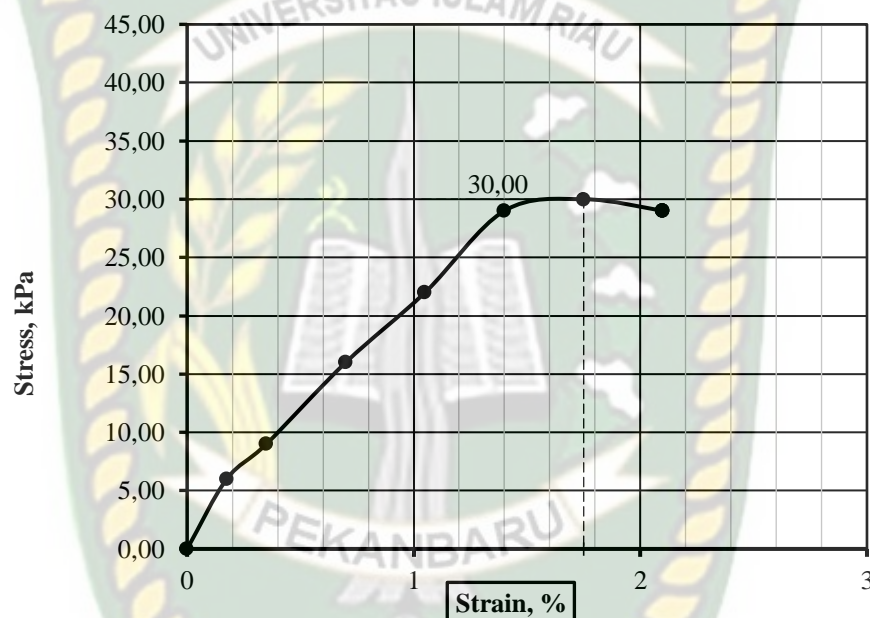
Nilai uji Kuat Tekan Bebas pada sampel benda uji tanah asli + 0% pasir dan + 0% bakteri, kemudian dilanjutkan dengan benda uji tanah asli + 5% pasir dan dengan yang telah dicampurkan penambahan larutan sementasi dengan variasi persentase penambahan 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dapat dilihat dari tabel 5.4 dan tabel 5.5

Tabel 5.4 Nilai hasil uji UCS tanah asli + 0% pasir + 0% bakteri.

No	Regangan %	Kuat tekan bebas (kPa)
1	0,00	0,00
2	0,175	60
3	0,35	90
4	0,70	160
5	1,05	220

6	1,4	290
7	1,75	300
8	2,10	270

Dari tabel 5.2 nilai pengujian kuat tekan bebas (UCS) tanah asli (tanah gambut + 0% pasir + 0% bakteri) dijelaskan pada grafik berikut ini.



Gambar 5.2 Grafik tanah asli + 0% pasir + 0% bakteri

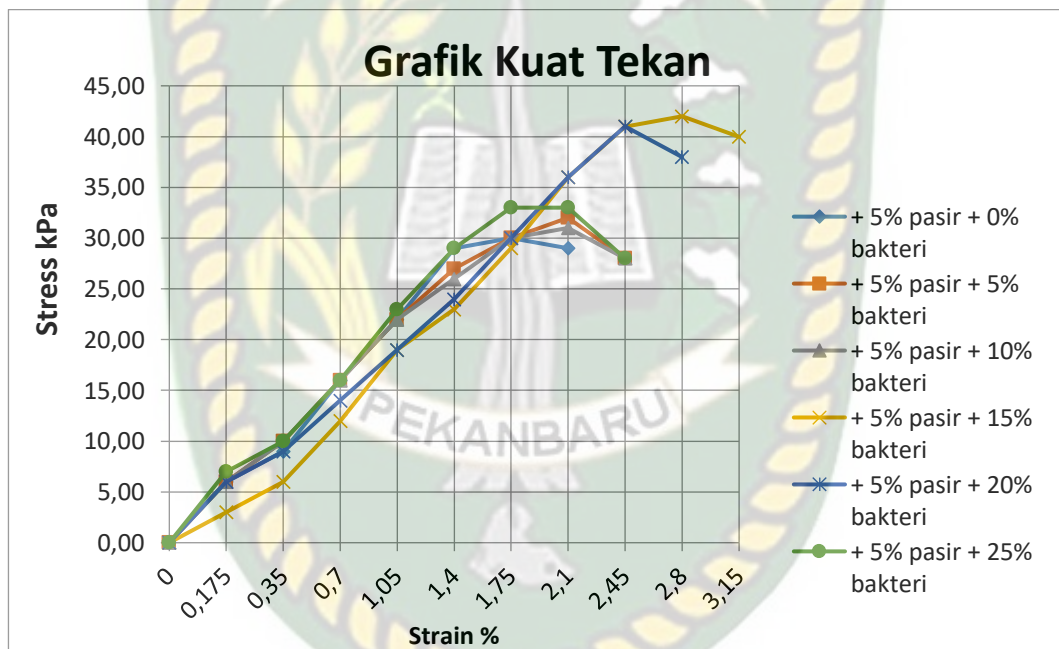
Berdasarkan grafik diatas, pada pengujian tanah asli +0% pasir + 0% bakteri didapat nilai kuat tekan bebas (q_{umax}) sebesar 0,30 kg/cm².

Tabel 5.5 Nilai Hasil Uji UCS dari Sampel Benda Uji Tanah Asli + 5% Pasir Dengan yang Telah Dicampurkan Dengan Larutan Sementasi.

No	Regangan %	Kuat Tekan Bebas (kPa)					
		0%	5%	10%	15%	20%	25%
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,175	6,00	6	6,00	3,00	6,00	7,00
3	0,35	9,00	10,00	10,00	6,00	9,00	10,00
4	0,70	16,00	16	16,00	12,00	14,00	16,00

5	1,05	22,00	22	22,00	19,00	19,00	23,00
6	1,40	29,00	27	26,00	23,00	24,00	29,00
7	1,75	30,00	30,00	30,00	29,00	30,00	33,00
8	2,10	29,00	32	31,00	36,00	36,00	33,00
9	2,45		28	28,00	41,00	41,00	28,00
10	2,80				42,00	38,00	
11	3,15				40,00		

Pada tabel ini, hasil dari nilai uji UCS terhadap penambahan larutan sementasi dari 0% sampai dengan 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dapat digambarkan pada grafik berikut ini .



Gambar 5.3 Kurva Tanah Asli + 5% Pasir dan Setelah Dicampurkan Dengan Larutan Sementasi

Pada gambar diatas terjadi inklinsi kekuatan nilai kuat tekan bebas tanah gambut dari sampel benda uji tanah asli + 5% pasir dengan yang sudah tercampur larutan sementasi bakteri dengan variasi penambahan 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Dalam hal ini dengan penambahan bakteri terjadi kekuatan daya dukung pada tanah gambut tersebut.

Kemudian dari grafik 5.3 didapat pula nilai tertinggi dari masing-masing sampel benda uji yaitu nilai q_{umax} (kPa) dan dapat dilihat pada tabel 5.6

Tabel 5.6 Nilai q_{umax} Dari Masing-Masing Sampel Benda Uji

Penambahan sementasi	Regangan saat runtuh %	q_{umax} (kPa)
0%	2,10	30
5%	2,45	31
10%	2,45	31
15%	3,15	42
20%	2,80	41
25%	2,45	33

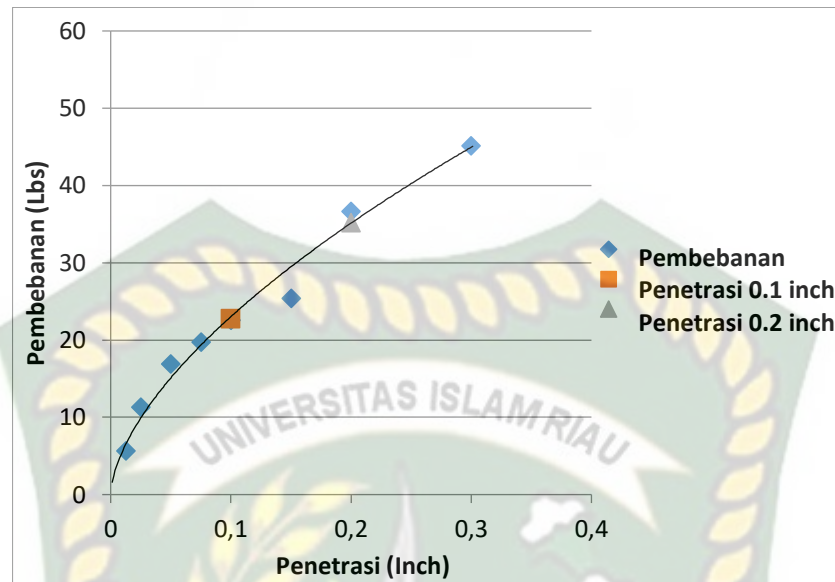
Dari Tabel 5.6 didapatkan bahwa hubungan antara nilai kuat tekan bebas (q_{umax}) sampel benda uji tanah asli + 5% pasir dengan variasi campuran larutan sementasi bakteri masih terjadi fluktuasi baik itu kenaikan dan penurunan $Q_{u_{max}}$ pada persentase 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Nilai kuat tekan bebas benda uji tanah asli + 5% pasir sebesar 300 kPa, sedangkan dengan penambahan variasi bakteri 5% = 310 kPa, 10% = 300 kPa, 15% = 420 kPa, 20% = 410 kPa, dan 25% = 330 kPa. Nilai kuat tekan bebas tertinggi terdapat pada penambahan larutan sementasi 15% sebesar 420 kPa dari sampel benda uji tanah asli + 5% pasir yang nilai kuat tekan bebasnya sebesar 300 kPa.

Dari hasil tes kuat tekan bebas sampel uji tanah gambut menggunakan alat UCS dengan penambahan variasi penambahan + 5% pasir dan bakteri 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% terdapat inklinasi maupun deklinasi pada kekuatan tanah gambut tersebut. Hal ini disebabkan oleh penambahan larutan sementasi *bakteri subtilis* yang dapat membuat pori-pori partikel tanah gambut tertutup atau terisi oleh bakteri sehingga tanah gambut tidak mudah terjadi penurunan.

5.5 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut

5.5.1 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 0%

Dari hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 0% didapatkan nilai CBR 0,78%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Lampiran A-4. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:

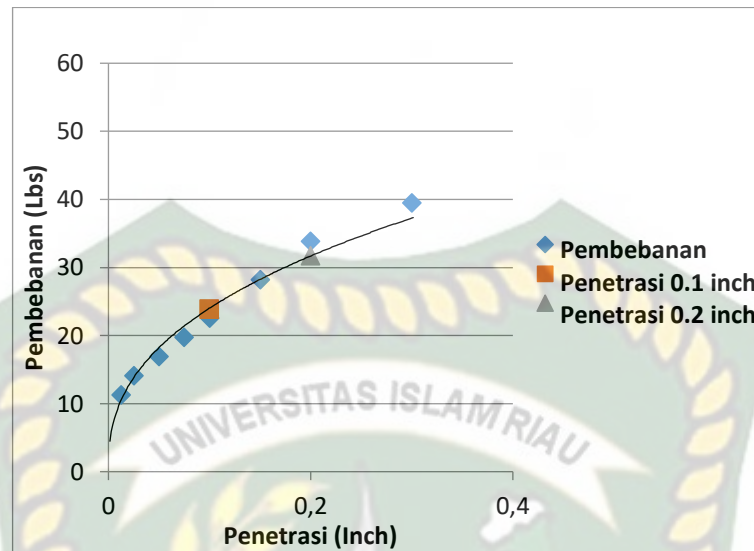


Gambar 5.5 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 0%

Pada grafik diatas, digambarkan pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 0%. Pada penetrasi 0,1 inci didapat nilai CBR sebesar 0,76%, sedangkan pada penetrasi 0,2 inci didapat nilai CBR sebesar 0,78%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,78%.

5.5.2 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 5%

Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 5% didapatkan nilai CBR 0,79%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Lampiran A-5. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:

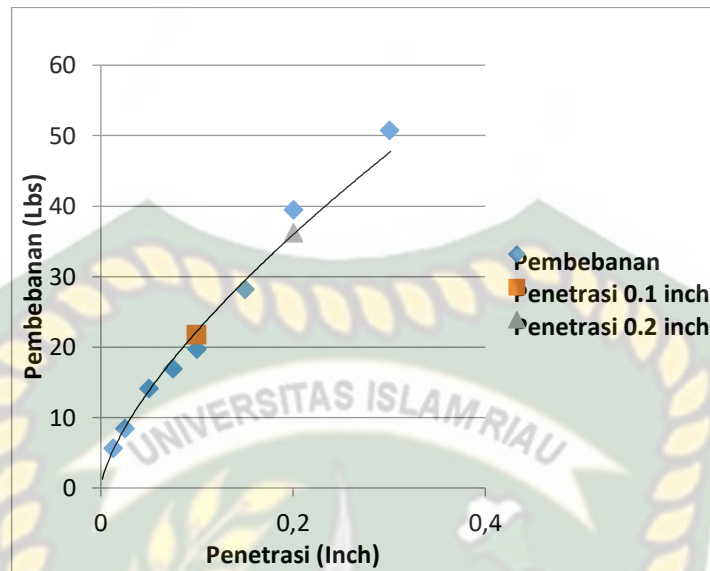


Gambar 5.6 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 5%

Pada grafik diatas menampilkan hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 5%. Pada penetrasi 0,1 inci didapat nilai CBR sebesar 0,79%, sedangkan pada penetrasi 0,2 inci didapat nilai CBR sebesar 0,70%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,79%.

5.5.3 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 10%

Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 10% didapatkan nilai CBR 0,80%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Lampiran A-6. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:

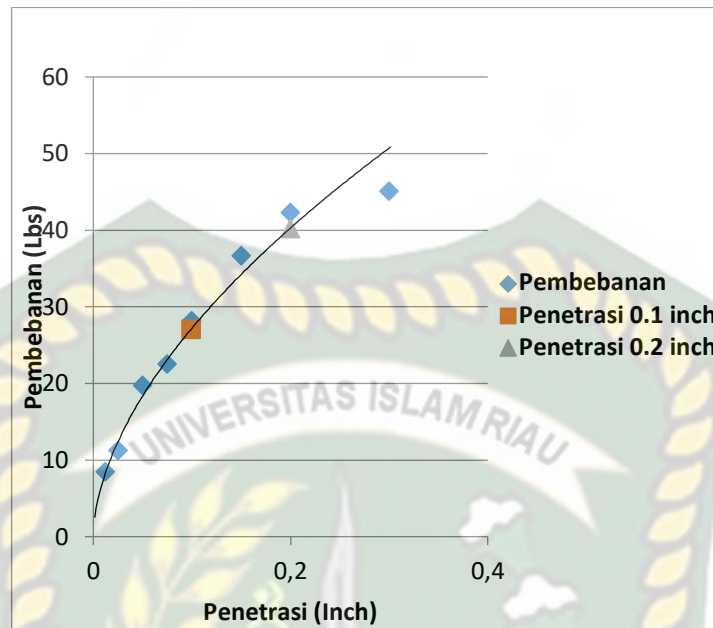


Gambar 5.7 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 10%

Pada grafik 5.7 dapat ditilik hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 10%. Pada penetrasi 0,1” didapat nilai CBR sebesar 0,72%, sedangkan pada penetrasi 0,2” didapat nilai CBR sebesar 0,80%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,80%.

5.5.4 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 15%

Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 15% didapatkan nilai CBR 0,90%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat Lampiran A-7. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:

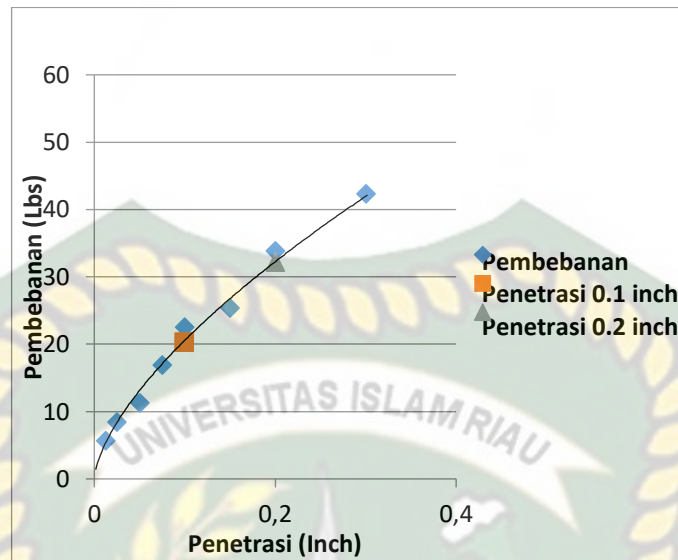


Gambar 5.8 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 15%

Pada gambar 5.8 menunjukkan hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 15%. Pada penetrasi 0,1” didapat nilai CBR sebesar 0,90%, sedangkan pada penetrasi 0,2” didapat nilai CBR sebesar 0,89%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,90%.

5.5.5 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 20%

Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 20% didapatkan nilai CBR 0,72%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat Lampiran A-8. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:

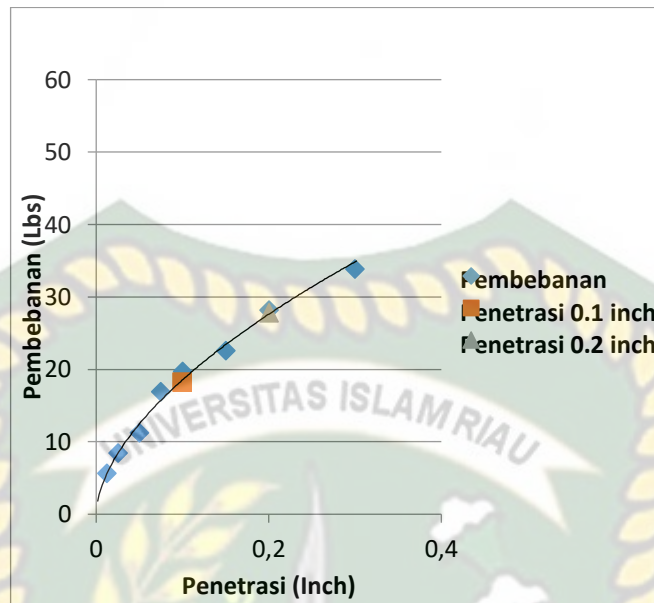


Gambar 5.9 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 20%

Pada gambar diatas menunjukkan hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 20%. Pada penetrasi 0,1” didapat nilai CBR sebesar 0,67%, sedangkan pada penetrasi 0,2” didapat nilai CBR sebesar 0,72%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,72%.

5.5.6 Hasil Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 25%

Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi sebanyak 25% didapatkan nilai CBR 0,62%. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat Lampiran A-9. Grafik pengujian CBR ini dapat dilihat pada Gambar dibawah ini:



Gambar 5.10 Grafik Pengujian CBR Tanah Gambut Campuran 5% Pasir dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri) Sebanyak 25%

Pada grafik diatas menunjukkan hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah gambut dengan campuran pasir sebanyak 5% dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 25%. Pada penetrasi 0,1” didapat nilai CBR sebesar 0,61%, sedangkan pada penetrasi 0,2” didapat nilai CBR sebesar 0,62%. Dengan hasil tersebut, nilai CBR yang diambil adalah nilai tertinggi yaitu 0,62%.

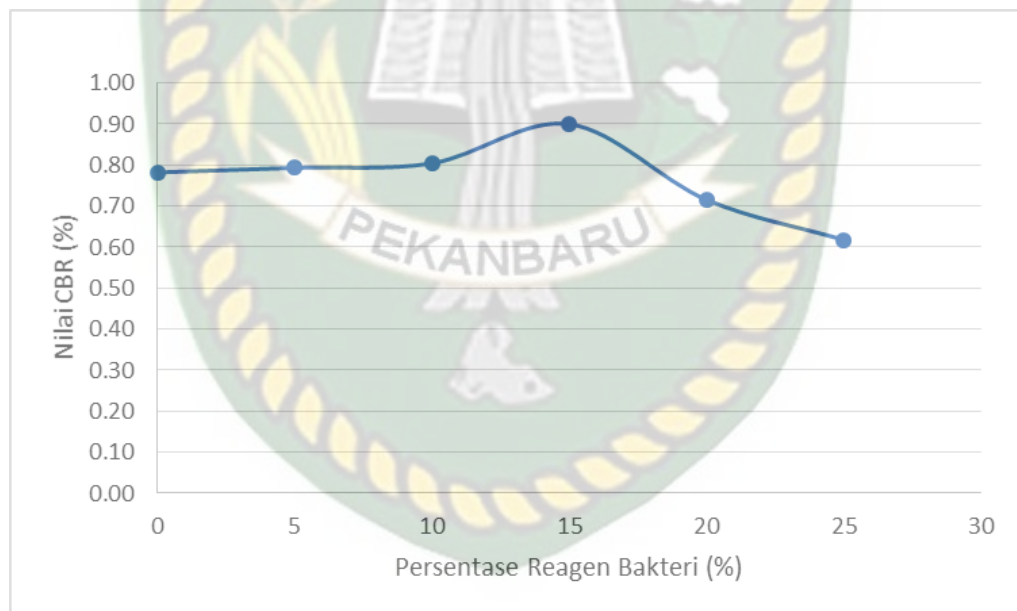
Hasil pengujian CBR dengan campuran pasir dan larutan sementasi ini dapat dilihat pada grafik yang ditampilkan pada gambar 5.11 Pada tabel 5.5 dapat dilihat besaran nilai persentase campuran larutan sementasi (reagen bakteri) dan hasil pengujian CBR *unsoaked* pada sampel pengujian CBR.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian CBR *Unsoaked* Tanah Gambut Campuran 5% Pasir Dan Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)

No	Variasi Campuran	Persentase Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)	Nilai CBR (%)
1	Tanah Gambut + 5% Pasir	0 %	0,78

2	Tanah Gambut + 5% Pasir	5 %	0,79
3	Tanah Gambut + 5% Pasir	10 %	0,80
4	Tanah Gambut + 5% Pasir	15 %	0,90
5	Tanah Gambut + 5% Pasir	20 %	0,72
6	Tanah Gambut + 5% Pasir	25 %	0,62

Dengan hasil pengujian yang didapat dari Tabel 5.2 ini dapat dilakukan perbandingan hasil pengujian yang dilakukan dan dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini:



Gambar 5.11 Grafik Hubungan Nilai Pengujian CBR Tanah Gambut Dengan Campuran 5% Pasir dan Persentase Larutan Sementasi (Reagen Bakteri)

Pada grafik diatas menunjukkan hasil dengan nilai CBR semakin meningkat ketika penambahan campuran larutan sementasi (reagen bakteri). Peningkatan nilai CBR ini disebabkan oleh campuran larutan sementasi (reagen bakteri) pada sampel CBR tersebut. Peningkatan maksimum terjadi pada sampel dengan

campuran 5% pasir dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 15% yaitu sebesar 0,90%, pada sampel dengan campuran 5% pasir dan larutan sementasi (reagen bakteri) 20% dan 25% nilai CBR cenderung mengalami penurunan, yaitu sebesar 0,72% pada sampel dengan campuran 5% pasir dan larutan sementasi (reagen bakteri) 20% dan 0,62% pada sampel dengan campuran 5% pasir dan larutan sementasi (reagen bakteri) 25%. Jadi, terjadi peningkatan nilai CBR dari tanah gambut yang telah bercampur 5% pasir dengan perbandingan pada sampel CBR tanah gambut dengan campuran 5% pasir tanpa larutan sementasi (reagen bakteri) 0% dengan nilai CBR 0,72% menjadi 0,90% pada sampel dengan campuran 5% pasir dan larutan sementasi (reagen bakteri) sebanyak 15%.

5.6 Hubungan antara kuat tekan bebas tanah gambut dengan nilai CBR

Salah satu bentuk perilaku tanah gambut yang tersatobilisasi dengan bakteri terlihat pada table 5.6 gambar 5.12 yaitu hubungan antara kadar air tanah gambut dengan hasil kuat tekan bebasnya.

Table 5.6 Hubungan antara kadar air dengan kuat tekan bebas tanah gambut terstabilisasi bakteri

No	Perlakuan Larutan Bakteri (%)	CBR (%)	q_{umax} (Kpa)
1	0%	0,78	29,42
2	5%	0,79	30,40
3	10%	0,80	30,40
4	15%	0,90	41,19
5	20%	0,72	40,21
6	25%	0,62	32,36

Dari table 5.6 terlihat bahwa dengan terjadinya pengurangan kadar air pada larutan sementasi 15 % reagen bakteri dan 5 % pasir mengalami kuat tekan bebas yang tinggi dan juga nilai CBR tertinggi. Hal ini disebabkan karena peningkatan kadar air berbanding lurus dengan nilai kuat tekan bebas ($q_{u_{max}}$) dan nilai CBR. Perilaku tanah Gambut yang mudah terpengaruh pada perubahan kadar air dari siklus pembasahan dan pengeringan sehingga pada saat kadar airnya berkurang

atau tanah menuju kondisi kering kuat tekan tanah akan mengalami kenaikan (Siregar, S, dkk, 2018)

5.7 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Bebas Penelitian Ini Dari Stabilisasi Bio-Grouting Dengan Metode Lainnya.

1. Waruwu. A (2013)

Tanah yang diambil untuk objek penelitian adalah tanah gambut bagan siapiapi kabupaten rokan hilir provinsi riau yang merupakan peningkatan nilai kuat tekan tanah gambut akibat preloading.

Dari hasil pengujian sifat fisik tanah gambut didapat nilai kadar abu rendah berkisaran 6,28%, kadar serat diantara 33% - 67%, kadar air optimum sebesar 623,33%, dan berat isi kering 0,160 gr/cm³.

2. Prabowo. A (2018)

Objek penelitian yang diteliti adalah tanah gambut dari desa semurep kecamatan Tuntang kabupaten semarang yang merupakan gambut matang sedang dengan distabilisasi 10 % kapur ditambah 8% matos.

Dari hasil pengujian sifat fisik tanah gambut didapat hasil dengan kadar air sebesar 551,12 %, berat spesifik 1,12, berat volume kering sebesar 0,158 gm/cm³ dan kadar air optimum sebesar 127,5%

Perbandingan antara stabilisasi *bio-grouting* dengan stabilisasi dan material lainnya dapat dilihat pada tabel 5.13

Tabel 5.14 Perbandingan q_{umax} Stabilisasi *Bio-Grouting* Dengan Stabilisasi Lainnya

No	10% Kapur + 8% Matos Prabowo. A (2018)		Pasir dan <i>Bio-grouting</i> Penelitian ini		<i>Akibat Preloading</i> Waruwu. A (2013)	
	Beban	q_{umax} (kPa)	Persentase	q_{umax} (kPa)	Waktu	q_{umax} (kPa)
1	1 kg	1100	0%	300	10 kpa 1 hari	90

2	2 kg	1600	5%	310	20 kpa 1 hari	110
3	3 kg	1800	10%	310	10 kpa 2 hari	120
4			15%	420	20 kpa 2 hari	140
5			20%	410		
6			25%	330		

Dari tabel diatas, dapat dianalisis bahwa nilai kuat tekan bebas maksimal (qumax) tertinggi pada tanah gambut dengan stabilisasi 10% kapur + 8% matos sementara nilai (qumax) terendah pada akibat preloading, dan ternyata pada penambahan pasir dan bio-grouting dengan variasi penambahan bakteri 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% terjadi peningkatan nilai kuat tekan bebas tanah gambut tersebut.

Selain terhadap kuat tekan bebas perbandingan juga dilakukan terhadap nilai CBR. Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan, nilai CBR yang diperoleh pada metodologi stabilisasi *bio-grouting* (penelitian ini) dibandingkan dengan hasil penelitian pada pengujian stabilisasi dengan bahan campuran tanah non organik dan kapur ini dapat dilihat pada tabel 5.5 berikut:

Tabel 5.5 Nilai CBR Hasil Penelitian Stabilisasi Metodologi *Bio-grouting* Dan Stabilisasi Dengan Bahan Campuran Tanah Non Organik Dan Kapur

No.	Metodologi Stabilisasi	Nilai CBR (%)
1.	Stabilisasi dengan <i>Bio-grouting</i>	
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 0 %	0,78
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 5 %	0,79
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 10 %	0,80
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 15 %	0,90
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 20 %	0,72
	Tanah Gambut + 5 % Pasir + Reagen Bakteri 25 %	0,62
2.	Stabilisasi dengan bahan campuran tanah non organik dan kapur	
	Tanah Gambut + Granit + Kapur 0 %	7,79
	Tanah Gambut + Granit + Kapur 5 %	5,89
	Tanah Gambut + Granit + Kapur 10 %	9,74

	Tanah Gambut + Granit + Kapur 15 %	11,59
--	------------------------------------	-------

Penambahan kapur yang dilakukan pada campuran stabilisasi tanah gambut dan tanah granit terbukti dapat meningkatkan nilai *California Bearing Ratio*/ CBR yang diperoleh walaupun pada penambahan variasi pertama mengalami penurunan. Nilai CBR campuran tanah gambut dan tanah granit tanpa kapur diperoleh sebesar 7,79%. Sedangkan pada penambahan kapur 5% nilai CBR turun menjadi 5,89%. Untuk selanjutnya pada penambahan kapur 10% dan 15% secara berturut-turut CBR campuran tanah mengalami peningkatan masing-masing sebesar 9,74% dan 11,59%.

Secara umum nilai CBR tanah campuran tanah gambut dan granit telah memenuhi persyaratan sebagai bahan timbunan pilihan /*subbase*, kecuali untuk nilai CBR penambahan kapur 5% pada campuran tanah. Sebagaimana Klasifikasi tanah berdasarkan nilai CBR bahwa CBR tanah timbunan pilihan berkisar dari 7% - 20%.

5.7 Perilaku Keruntuhan

Proses Analisis bentuk keruntuhan pada pengujian kuat tekan bebas pada sampel benda uji dilakukan dengan mengamati sketsa bentuk keruntuhan pada benda uji. Bentuk keruntuhan yang terjadi pada benda uji sangat bervariasi pada setiap sampel benda uji.

Pada pengujian ini, sampel benda uji diletakan pada alat kuat tekan bebas (UCS). Pada pembebanan sampel benda uji terdesak turun kebawah dan ukuran benda uji akan berubah. Semakin bertambah bebannya, maka semakin mendesak pulak tanah dan pasir pada sampel benda uji. Hal ini disebabkan karena tanah dan pasir pada sampel benda uji mengalami desakan yang turun akibat pembebanan.



Gambar 5.14 Bentuk Keruntuhan Uji Kuat Tekan Bebas

Pada pengujian ini, objek sampel benda yang diuji terletak ditengah alat yang akan mendapatkan beban. Dikiri kanan sampel benda uji terlihat pergeseran dengan jelas disebabkan karena pembebanan yang diberikan. Tetapi penurunan yang terjadi sebelum keruntuhan cukup besar dan bidang runtuh yang kontinu tidak berkembang, karena penambahan beban belum maksimal. Model benda uji yang kecil bila dibandingkan dengan pengujian lainnya menjadi kendala dalam pengujian ini, sehingga tidak bisa memberikan hasil yang maksimal, tetapi sudah menunjukkan kecenderungan terjadinya keruntuhan geser umum (*general shear failure*). hal yang demikian juga ditandai pada saat keruntuhan akibat beban

secara bertahap turun kebawah dan selanjutnya tanah dan pasir pada sampel benda uji mengembang kesamping. Kemudian terjadi retakan dan gerakan pada sampel benda uji. Karena pembebanan hanya dibatasi sampai dengan penurunan kekuatan sampel benda uji dan tidak terjadi penggulingan. Meskipun pola keruntuhan tidak terlihat dengan jelas tetapi sudah menunjukkan gejala terjadi keruntuhan geser umum.

Bakteri subtilis pada rekayasa tanah gambut belum sepenuhnya ditemukan. Karena tanah gambut memiliki kandungan organik yang sangat tinggi, sehingga semakin besar kadar air yang terkandung pada tanah gambut semakin kecil daya dukung kekuatannya. Selain itu, tanah gambut mempunyai harga pemampatan yang tinggi yang dilakukan dengan perilaku terhadap beban yang bekerja di atasnya. Dilihat dari karakteristik tanah gambut tersebut, dikhawatirkan konstruksi akan mengalami kegagalan karena daya dukung tanah gambut yang sangat rendah.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Tesis ini, dapat diambil kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Nilai CBR tanah gambut Desa Buana Makmur km.55 Kecamatan Dayun Kabupaten Siak, Riau yang distabilisasikan menggunakan metode *bio-grouting* dengan campuran 5% pasir dan larutan sementasi (bakteri *Bacillus subtilis*) mengalami perbaikan pada reagen bakteri konsentrasi 15 % dengan nilai CBR maksimum yaitu 0,90%, dibandingkan dengan tanpa penambahan larutan sementasi (reagen bakteri) dengan nilai CBR 0,78%.
2. Nilai kuat tekan bebas benda uji tanah asli + 5 % pasir sebesar 0,30 kg/cm², sedangkan dengan penambahan variasi bakteri 5% = 0,31 kg/cm², 10% = 0,31 kg/cm², 15% = 0,42 kg/cm², 20% = 0,41 kg/cm², dan 25% = 0,33 kg/cm².
3. Hubungan nilai CBR dan Kuat Tekan Bebas tanah gambut yang terstabilisasi dengan bakteri didapatkan kesimpulan bahwa pada saat variasi reagen bakteri 15 % terjadi penurunan kadar air sehingga mengakibatkan kuat tekan bebas dan nilai CBR mengalami kenaikan.
4. Tanah gambut tidak memenuhi syarat tidak bisa digunakan sebagai bahan material *subgrade*, hal ini disebabkan klasifikasi nilai CBR masuk kedalam kategori sangat buruk (*very poor*) menurut Bowles (1992).

6.2 Saran

Berdasarkan konklusi yang diperoleh, penulis menyarankan sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya diharapkan melakukan diversifikasi sampel agar memperoleh hasil yang optimal.

2. Diharapkan penelitian selanjutnya melakukan estimasi jumlah *Calcium Carbonate* (CaCO_3) pada setiap sampel untuk dapat menentukan nilai optimum dari reagen yang biasa digunakan pada metode stabilisasi



Dokumen ini adalah Arsip Miik :

Perpustakaan Universitas Islam Riau

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials. *Standard Test Method for Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing*. ASTM designation: D-4427. 1992. Philadelphia. PA.
- American Society for Testing and Materials. 2000. *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. ASTM designation: D-2974-00. Philadelphia. PA.
- ASTM Standart (1994), *Section 4, Construction*: Volume 04.08 dan 04.09, *Soils and Rock*, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA.
- Bowles, J. E. (1986). *Sifat-sifat fisis dan geoteknis tanah*. (J. K. Hainim, Trans). Jakarta: Erlangga.
- Bowles, J. E. (1992). *Analisa dan Desain Pondasi Edisi Keempat Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- Budi (2011). *Pengujian Tanah di Laboratorium Penjelasan dan Panduan*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Darmawijaya. (1997). *Klasifikasi Tanah*. UGM Press: Yogyakarta.
- Das, B. M. (1988). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*, Erlangga: Jakarta.
- Das, B. M. (1988). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*, Erlangga: Jakarta.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah dan Prinsip Rekayasa Geoteknis*. Penerbit Erlangga: Jakarta
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). *Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(11):1381-1392.

- Departement Pekerjaan Umum, Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Standard Nasional Indonesia. *Metode Uji CBR Laboratorium*. SNI 1744:2012.
- Dion, P. dan Nautiyal, C. S. (Eds). (2008). *Microbiology of Extreme Soils*. Soil Biology 13. Springer-Verlag Heidelberg. Berlin.
- Hammes, F., and W. Verstraete. (2002). *Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation*. Re. Environ. Sci. Bio/Technol. 1:3–7.
- Hammes, F., A. Seka, S. De Knijf, and W. Verstraete. (2003). *A novel approach to calcium removal from calcium-rich industrial wastewater*. Water Res. 37:699–704.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I. Edisi ketiga*. Penerbit Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardjowigeno, S. (1989). *Sifat dan Potensi Tanah Gambut Sumatera untuk Pengembangan Pertanian*. Prosiding Seminar Tanah Gambut untuk Perluasan Pertanian. Fakultas Pertanian UISU. Medan. Hal 43-79.
- Harkes, M. P., Van Paassen, L. A., Booster, J. L., Whiffin, V. S., Van Loosdrecht, M.C.M. *Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement*. Ecol. Eng. 2010, 36, 112–117.
- Holt, J. G., et al. (1994). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Ninth Ed. A Wolters Kluwer Company. Philadelphia. Hal 562-570.
- Holt. J. G., et al. (2000). *Bergey's Manual Determinative Bacteriology*. Baltimore: Williamn and Wilkins Baltimore.
- Laporan Praktikum Mekanika Tanah. Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Islam Riau.

- Madigan, M. T., J. M. Martinko, dan J. Parker. (2000). *Brock Biology of Microorganism*. Prentice Hall Inc. New Jersey.
- Mochtar, R. 2002. *Sinopsis Obstetri Patologi*. Jakarta: EGC.
- Noor, M. 2001. *Pertanian Lahan Gambut: Potensi dan Kendala*. Kanisius. Yogyakarta.
- Putra, H.; Yasuhara, H.; Kinoshita, N.; Neupane, D.; Lu, C.-W. *Effect of Magnesium as Substitute Material in Enzyme-Mediated Calcite Precipitation for Soil-Improvement Technique*. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2016, 4, 37.
- Rahardjo, B. (2001). *Akuntansi dan Keuangan Untuk Manajer Non Keuangan*. Yogyakarta: Andi.
- Saputra, N. A. dan Respati, R. (2018). *Stabilisasi tanah gambut Palangka raya dengan bahan campuran tanah non organik dan kapur*. *Media Ilmiah Teknik Sipil*. Volume 06 Nomor 02, Juni 2018: 124-131.
- SK SNI-5-04-1989-F. Pasir Yang Baik Digunakan Untuk Sebuah Konstruksi
- SNI 1964-2008 Cara Uji Berat Jenis Tanah
- SNI 1965-2008 Cara Uji Penentuan Kadar Air Untuk Tanah dan Batuan Di Laboratorium
- SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik
- SNI-02-2801-1998. Standar Urea
- Soesanto, L, 2008, Pengantar Pengendalian Hayati Penyakit Tanaman, PT Raja Grafindo Persada, Jakarta 574 hlm
- Skempton, A. W. dan Petley, D.J. (1970). *Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's Lynn and Cranberry Moss*. *Geotechnique*, 20(4), 343-56.
- Soedarmo, G. D. & Purnomo, S. J. E. (1997). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Kanisius.

- Syarif, F., Davino, G. M. dan Ardianto, M. F. (2020). *Penerapan Teknik Biocementation Oleh Bacillus Subtilis dan Pengaruhnya Terhadap Permeabilitas Pada Tanah Organik*. Jurnal Saintis. Volume 20 Nomor 01, April 2020: 47-52.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. (1987) *Mekanika Tanah Dalam. Praktek Rekayasa Jilid 1*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Van Passen, La, 2009, *Bio-Grouting, Ground Improvement By Microbial Indured Carbonate Precipitation*, Delft University Of Technology, Pp 202.
- Wardana IGN., Wardata I., 2010, Korelasi Strain Rate dengan Kadar Organik Pada Test Konsolidasi Metode *Constant Rate Of Strain*, Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Volume 14, Nomor 1 : 43-56.
- Waruwu, A, 2013, Peningkatan Kuat Tekan Tanah Gambut Akibat *Preloading*.
- Willy, 2015, Pengujian Kuat Geser Langsung Dengan Mencampurkan Tanah Lempung Dengan Pasir Dengan Persentase Campuran 10%, 20%, 30% dan 40%.
- Wesley, L. D. (1997) *Mekanika Tanah*. Cetakan VI, Badan Penerbit Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Whiffin V. S., Van Paassen L. A., and Harkes M. P. (2007). *Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique*. *Geomicrobiology Journal* 24(5):417-23.
- Widjajakusuma, J. and Winata H. *Influence of rice husk ash and clay in stabilization of silty soils using cement*.