

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Studi terdahulu akan menjadi acuan dan pedoman dalam melakukan penelitian tugas akhir ini. Berikut ini merupakan beberapa studi terdahulu yang menjadi acuan penelitian yaitu:

1. Jurnal ini berjudul "**Studi Eksperimental Penerapan Teknik Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) Terhadap Sifat Permeabilitas Tanah Gambut**" yang ditulis oleh Dwira Pandiangan pada tahun 2021. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas teknik MICP, yaitu metode perbaikan tanah menggunakan bakteri *Bacillus subtilis*, dalam meningkatkan permeabilitas tanah gambut. Tanah gambut, yang memiliki sifat fisik dan mekanis yang kurang menguntungkan untuk konstruksi, diuji dengan menambahkan larutan sementasi yang terdiri dari bakteri, urea, dan kalsium klorida ( $\text{CaCl}_2$ ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bakteri *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan koefisien permeabilitas tanah gambut. Nilai koefisien permeabilitas tanah gambut tanpa campuran bakteri adalah  $2,546 \times 10^{-4}$  cm/detik, sedangkan dengan penambahan bakteri 5%, 15%, dan 25%, nilai koefisien permeabilitas meningkat menjadi  $5,109 \times 10^{-4}$  cm/detik,  $7,942 \times 10^{-3}$  cm/detik, dan  $8,855 \times 10^{-3}$  cm/detik secara berturut-turut.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa teknik MICP dapat menjadi solusi ramah lingkungan untuk meningkatkan kualitas tanah gambut, terutama dalam mengurangi kandungan air dan meningkatkan daya dukung tanah. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan bakteri *Bacillus subtilis* dan mengamati perubahan fisik tanah setelah perlakuan. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan inovasi dalam pembuatan larutan sementasi dan menghitung jumlah kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) yang terbentuk selama proses MICP.

2. Jurnal ini berjudul "**Penggunaan Metode MICP dan Biopolimer dalam Rekayasa Pasir yang Diinduksi Mikroba**" yang ditulis oleh Rully Savitri Nurvita pada tahun 2024. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan metode Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dan biopolimer yang diinduksi mikroba untuk meningkatkan sifat mekanik dan hidrolis pasir. MICP bekerja dengan menginduksi presipitasi kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dalam pasir, yang meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi permeabilitas. Sementara itu, biopolimer yang diinduksi mikroba meningkatkan stabilitas agregat pasir dengan mengikat partikel-partikel tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua metode ini efektif dalam meningkatkan kekuatan dan stabilitas pasir, dengan MICP lebih unggul dalam mengurangi permeabilitas, sedangkan biopolimer lebih ramah lingkungan.

Hasil Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode MICP dan biopolimer yang diinduksi mikroba memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam proyek rekayasa sipil, seperti perbaikan tanah, konstruksi jalan, dan pemadatan tanah. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan kedua metode ini, terutama dalam kondisi lapangan yang bervariasi. Dengan demikian, metode ini dapat menjadi solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk tantangan rekayasa geoteknik di masa depan.

3. Jurnal ini berjudul "**Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai Temporary Landfill Cover yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi**" yang ditulis oleh A. Rahmadi, A. M. Indriani, dan G. Utomo pada tahun 2023. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi optimal larutan sementasi yang digunakan dalam metode Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) untuk meningkatkan kualitas tanah lanau sebagai penutup sementara (temporary landfill cover) di tempat pembuangan akhir (TPA). Limbah lumpur dari instalasi pengolahan air minum (IPAM) di Balikpapan digunakan sebagai material utama, yang distabilisasi dengan bakteri *Bacillus subtilis* dan larutan

sementasi dengan variasi konsentrasi 0,25M, 0,5M, dan 0,75M. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan larutan sementasi 0,25M dan bakteri *Bacillus subtilis* mampu menurunkan permeabilitas tanah secara signifikan, dari  $5,04 \times 10^{-4}$  cm/s menjadi  $6,67 \times 10^{-5}$  cm/s setelah 28 hari peraman. Penurunan permeabilitas ini menunjukkan bahwa pori-pori tanah semakin mengecil, sehingga mengurangi risiko kerusakan lingkungan akibat rembesan air lindi.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode MICP dengan larutan sementasi 0,25M dan bakteri *Bacillus subtilis* efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah lanau sebagai penutup sementara di TPA. Penurunan permeabilitas tanah hingga 86,7% menunjukkan potensi besar metode ini dalam mengurangi dampak negatif limbah TPA terhadap lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan metode ini dalam skala yang lebih besar dan kondisi lapangan yang bervariasi. Dengan demikian, metode MICP dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk pengelolaan limbah TPA.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Judul serta pengarangnya	Persamaan	Perbedaan
1.	"Studi Eksperimental Penerapan Teknik Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) Terhadap Sifat Permeabilitas Tanah Gambut" (Dwira Pandingan,tahun 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan MICP sebagai salah satu metode perbaikan tanah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan tanah gambut</li> <li>Menggunakan pengujian permeabilitas</li> </ul>
2.	"Penggunaan Metode MICP dan Biopolimer dalam Rekayasa Pasir yang Diinduksi Mikroba"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan MICP sebagai salah satu metode perbaikan tanah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menggunakan pasir.</li> <li>Menggunakan metode MICP dan Biopolimer..</li> </ul>

	(Rully Savitri Nurvita, tahun 2024)		
3.	"Permeabilitas Tanah Lanau Sebagai Temporary Landfill Cover yang Distabilisasi dengan Bakteri dan Larutan Sementasi" ( A. Rahmadi, A. M Indriani dan G. Utomo, tahun 2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menggunakan tanah lanau sebagai objek penelitiin.</li> <li>• Menghitung nilai kuat geser tanah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menggunakan metode permeabilitas.</li> </ul>

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Tanah

Tanah adalah lapisan permukaan bumi yang terbentuk dari campuran partikel mineral, bahan organik, air, udara, dan organisme hidup. Menurut para ahli, tanah terbentuk melalui proses pelapukan batuan dan bahan organik yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti iklim, organisme, topografi, dan waktu. Tanah bukan hanya sekadar material padat, tetapi juga merupakan sistem yang dinamis dan kompleks yang mendukung kehidupan di bumi.

Tanah memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman dengan menyediakan nutrisi, air, dan udara. tanah juga berfungsi sebagai tempat berkembangnya akar tanaman. Selain itu, tanah berperan dalam siklus air dan nutrisi, serta menjadi habitat bagi berbagai organisme hidup. Dengan demikian, tanah adalah sumber daya alam yang vital bagi kehidupan manusia, hewan, dan tumbuhan.

### 2.2.2 Tanah Lanau

Tanah memiliki ukuran partikel antara 0,002 mm hingga 0,06 mm. Tanah ini memiliki sifat fisik dan mekanik yang berada di antara pasir dan lempung, dengan permeabilitas sedang dan cenderung mudah tererosi.

tanah lanau memiliki sifat mekanik dan hidrolis yang berada di antara pasir dan lempung. Tanah ini memiliki permeabilitas sedang, artinya air dapat

mengalir melalui tanah lanau dengan kecepatan yang lebih lambat dibandingkan pasir. Meskipun tanah lanau tidak terlalu subur seperti tanah lempung, tanah ini masih dapat digunakan untuk pertanian atau konstruksi dengan perlakuan khusus untuk meningkatkan stabilitasnya. Tanah dengan sudut geser dalam ( $\phi$ ) tidak nol dan kohesi ( $c$ ) tidak nol menunjukkan perilaku mekanik yang kompleks, menggabungkan ketahanan geser dari kedua komponen tersebut. ([https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2\\_054253](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054253))

## **2.3 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah**

Sifat fisik tanah adalah hal-hal yang bisa kita lihat dan rasakan, seperti teksturnya (halus atau kasar), warnanya, serta kemampuannya menyerap air dan udara. Sedangkan sifat mekanik tanah berkaitan dengan kekuatannya, seperti seberapa keras atau mudahnya tanah dipadatkan, apakah tanah bisa menahan beban, serta apakah tanah mudah longsor atau tidak.

### **2.3.1 Klasifikasi Tanah**

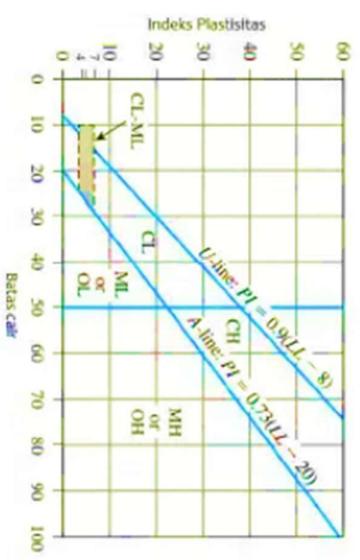
Secara umum, Klasifikasi tanah adalah cara untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat dan karakteristiknya. Pengelompokan ini bisa berdasarkan ukuran butir, seperti tanah berpasir, lempung, dan liat, atau berdasarkan sifat teknisnya, seperti tanah organik dan tanah mineral. Klasifikasi ini membantu dalam memahami bagaimana tanah bisa digunakan untuk pertanian, konstruksi, atau keperluan lainnya.

Selain itu, dalam teknik sipil, tanah juga diklasifikasikan berdasarkan sistem tertentu, seperti Sistem Klasifikasi Tanah Unified (USCS) atau AASHTO. Sistem ini membantu menentukan kekuatan dan kestabilan tanah untuk pembangunan jalan, gedung, atau struktur lainnya. Dengan klasifikasi yang tepat, penggunaan tanah bisa lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan

Berikut adalah tabel pengelompokkan tanah dengan sistem USCS.

Tabel 2.2 sistem klasifikasi tanah USCS

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Jenis	Kriteria Laboratorium
Tanah berbutir kasar, lebih dari 50% tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil bersih (kandungan butir halus < 5%) Kerikil (kandungan butir halus > 12%)	GW	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria GW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$ Tidak memenuhi kriteria SW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$
		GP	
Tanah berbutir halus, 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Pasir bersih (kandungan butir halus < 5%) Pasir (kandungan butir halus > 12%)	GM	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ ; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria SW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$
		GC	
Tanah berbutir halus, 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lempung dan lempung dengan batas cair $\leq 50\%$	SM	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488
		SP	
Tanah berbutir halus, 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lempung dan lempung dengan batas cair $> 50\%$	SW	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488
		SC	
Tanah kadar organik tinggi	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah hingga sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung kelanauan, loam clays	ML	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488
		CL	
Tanah kadar organik tinggi	Lempung organik dengan plastisitas rendah hingga sedang	OL	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488
		MH	
Tanah kadar organik tinggi	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, fat clays	CH	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488
		OH	
Tanah kadar organik tinggi	Peat dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	P <sub>1</sub>	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488



(Sumber : Braja M Das, Mekanika Tanah Jilid I, Hal. 71 )

Klasifikasi tanah dalam sistem USCS juga memiliki beberapa prosedur pekerjaan laboratorium sebagai berikut.

- **Analisis Saringan (*Sieve Analysis*)**

Pengujian ini dilakukan di laboratorium untuk menganalisis sampel tanah berbutir kasar, seperti pasir dan kerikil. Tanah yang telah dikeringkan akan dipisahkan menggunakan saringan dengan ukuran mesh tertentu. Dari proses ini, dapat diketahui bagaimana distribusi ukuran partikel dalam tanah tersebut.

- **Analisis Hidrometer (*Hydrometer Analysis*)**

Pengujian ini dilakukan di laboratorium untuk menganalisis sampel tanah berbutir halus, seperti lanau dan lempung. Sampel tanah dicampur dengan air serta NaOH, yang berperan dalam memisahkan partikel tanah. Selanjutnya, berat jenis suspensi diukur menggunakan hidrometer jar untuk menentukan karakteristik tanah.

- **Batas Atterberg (*Atterberg Limits*)**

Batas Atterberg terbagi menjadi 3 pengujian laboratorium *Liquid Limit* (LL), *Plastic Limit* (PL), dan *Shrinkage Limit* (SL). Pengujian tersebut digunakan untuk menentukan nilai *Plasticity Index* (PI).

Tabel 2. 3 Hubungan Nilai Index Plastisitas dengan jenis Tanah

PI (%)	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesi
<7	Plastis Rendah	Lanau	Kohesi Sebagian
7 - 17	Plastis Sedang	Lempung Berlanau	Kohesi
>7	Plastis Tinggi	Lempung	Kohesi

(Sumber : Braja M. Das, Principles of Geotechnical Engineering, Hal. 93 )

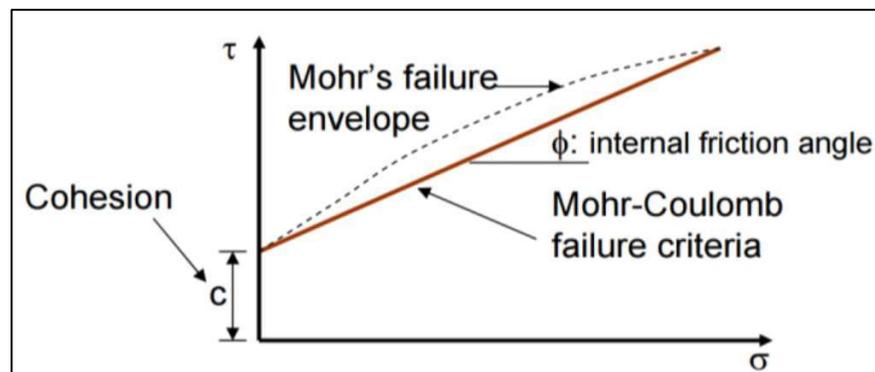
### 2.3.2 Kuat Geser Tanah

Dalam buku *Principles of Geotechnical Engineering* (Edisi Kedelapan, Braja M. Das, 2014), dijelaskan bahwa kekuatan geser tanah mengacu pada resistensi internal tanah per satuan luas terhadap keruntuhan atau deformasi sepanjang bidang gesernya. Parameter ini menggambarkan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser yang timbul akibat beban eksternal sebelum terjadi kegagalan struktural. Kuat geser tanah terutama ditentukan oleh interaksi antarpartikel tanah, termasuk faktor seperti kohesi dan gesekan internal.

Teori *Mohr-Coulomb* (1980) mengemukakan teori mengenai keruntuhan material, yang menyatakan bahwa kegagalan terjadi akibat kombinasi antara tegangan normal dan tegangan geser. Oleh karena itu, hubungan antara kedua tegangan tersebut pada bidang keruntuhan dapat dirumuskan dalam sebuah persamaan.

$$\tau_f = f(\sigma) \dots \dots \dots (2.1)$$

Garis keruntuhan (*failure envelope*) dinyatakan oleh persamaan (2.1) di atas sebenarnya berbentuk garis lengkung seperti terlihat pada Gambar 2.1. garis tersebut cukup didekati dengan sebuah garis lurus yang menunjukkan hubungan linear antara tegangan normal dan geser.



Gambar 2.1 Garis keruntuhan dan hukum keruntuhan dari Mohr-Coulomb.

Garis dan hukum keruntuhan menurut Mohr-Coulomb merupakan model linier yang digunakan untuk menganalisis kekuatan geser tanah. Teori ini menjelaskan hubungan antara tegangan normal, sudut geser dalam ( $\phi$ ), dan

kohesi ( $c$ ) dalam menentukan ketahanan tanah terhadap geser. Persamaan dari model ini sering diterapkan dalam bidang mekanika tanah dan teknik sipil.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan (\phi) \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan

$\tau$  = Kuat geser tanah ( $\text{kN/m}^2$ )

$c$  = Kohesi ( $\text{kN/m}^2$ )

$\phi$  = Sudut geser dalam (derajat)

$\sigma$  = Tegangan normal pada bidang runtuh ( $\text{kN/m}^2$ )

Persamaan diatas juga disebut sebagai kriteria keruntuhan atau kegagalan Mohr-Coulomb, dimana garis selubung kegagalan dari persamaan tersebut digambarkan pada gambar 2.1. Nilai sudut geser dan kohesi tanah memiliki korelasi dengan jenis tanah.

- **Tanah Berbutir Kasar.**

Secara umum, sudut geser ( $\phi$ ) memiliki nilai yang tinggi, berkisar antara  $30^\circ$  hingga  $45^\circ$ , sedangkan kohesi ( $c$ ) sangat kecil karena partikel tanah tidak saling merekat. Akibatnya, kekuatan geser tanah lebih ditentukan oleh gesekan antar butiran atau friksi.

- **Tanah Berbutir Halus.**

Nilai sudut geser ( $\phi$ ) umumnya bernilai rendah, biasanya kurang dari  $30^\circ$ , sementara kohesi ( $c$ ) cenderung tinggi karena partikel halus saling menempel. Akibatnya, kekuatan geser tanah lebih dipengaruhi oleh kohesi dibandingkan gesekan antar butiran.

Nilai dari sudut geser dan kohesi tanah dapat diketahui melalui pengujian laboratorium seperti *Direct Shear*, *Triaxial Compression* dan *Unconfined Compressive strength*.

#### 2.4 Microbially Induce Calcite Precipitation (MICP)

Tanah yang tidak dapat memberikan dukungan fisik dan mekanik yang cukup sering menjadi masalah dalam penggunaannya untuk konstruksi. Salah satu cara yang biasa digunakan untuk mengatasi masalah ini adalah dengan

menambahkan bahan kimia untuk memperbaiki sifat-sifat tanah, seperti kekuatan geser dan kemampuan tanah menahan beban. Selain itu, perbaikan sifat tanah juga (Jong, 2009).bisa dilakukan dengan menggunakan proses biologis alami.

Pada awal 2000-an, para ahli mulai melakukan penelitian tentang MICP untuk menstabilkan tanah. Penggunaan mikroba untuk memperbaiki sifat tanah didasari oleh fakta bahwa beberapa jenis mikroba dapat mengikat partikel tanah, sehingga memperkuat agregat tanah. Selain itu, ada juga mikroba yang dapat mengendapkan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Proses pertama ini disebut *microbially induced calcite precipitation*.

Aplikasi MICP dalam bidang teknik sipil dan rekayasa geoteknik memiliki beragam manfaat, seperti mengurangi erosi tanah dengan mengikat partikel-partikel tanah, menurunkan risiko likuifikasi, serta meningkatkan kekuatan geser dan daya dukung tanah.

#### **2.4.1. Bio-Grouting**

*Bio-grouting* merupakan teknik geoteknik dalam bidang teknik sipil yang menggunakan mikroorganisme untuk memperbaiki karakteristik tanah. Metode ini dijelaskan dalam buku *The Immersion Method for Microbially Induced Calcite Precipitation: Applications for Sustainability* (Lin Li et al., 2025), terkait dengan proses MICP (*Microbially Induced Calcite Precipitation*). Dalam bio-grouting, campuran bakteri dan larutan pengikat diinjeksikan atau diinfiltrasi ke dalam tanah untuk membentuk struktur perekat yang memperkuat tanah.

Di Indonesia, bio-grouting mulai diterapkan sebagai solusi untuk tantangan rekayasa geoteknik, terutama di wilayah yang memiliki tanah lunak atau tanah lanau yang rentan terhadap bencana. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas teknologi ini dalam menstabilkan tanah dan memperbaiki infrastruktur. Dengan potensi yang dimilikinya, bio-grouting dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk berbagai permasalahan geoteknik di Indonesia.

#### 2.4.2. *Bakteri Bacillus Subtilis*

Bakteri *Bacillus subtilis* merupakan mikroorganisme yang berperan penting dalam teknik bio-grouting, di mana ia digunakan untuk meningkatkan stabilitas tanah melalui proses biocementation. Bakteri *Basilus Subtilis* (buku *Principles and Applications of Soil Microbiology* karya Sylvia et al. (2021)) juga termasuk dalam bakteri Gram-positif yang paling sering dijumpai dalam penelitian mikrobiologi. Bakteri ini memiliki ciri khas yaitu, membentuk endospora, sehingga mampu bertahan dalam kondisi ekstrim. Mikroorganisme ini tersebar luas dan dapat ditemukan di berbagai tempat seperti berikut:

- a. Pada tanah bakteri ini cenderung ada pada lapisan *topsoil* (0 – 30 cm) dimana pada kedalaman ini tanah kaya akan kandungan organik.
- b. Rizosfer, adalah zona di sekitar akar tanaman yang di pengaruhi secara biologis dan fisik oleh sekitar akar tanaman, dimana bakteri tersebut menempel pada akar tanaman.

Bakteri ini juga dapat mengalami pertumbuhan, dimana pertumbuhan tersebut meliputi 4 fase yaitu

1. *Fase Lag* (Adaptasi)

Bakteri ini dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan (tanah atau media kultur).

2. *Fase Log* (eksponensial)

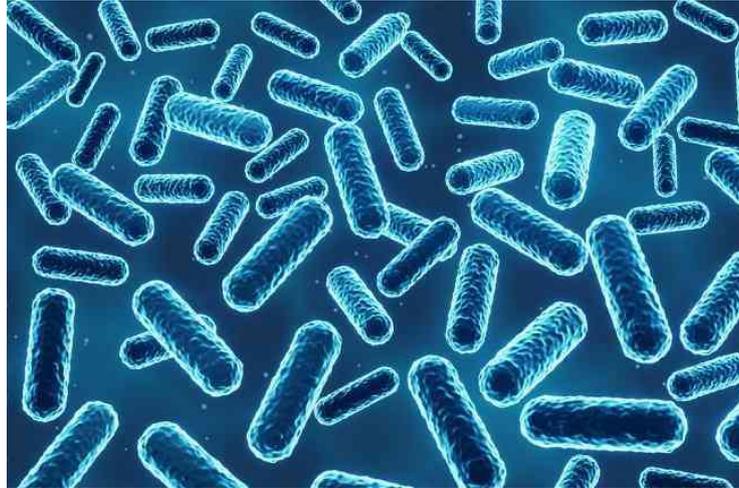
Bakteri ini akan membelah diri dan memproduksi berbagai enzim seperti, protease, urease, dll.

3. *Fase Stasioner*

Di fase ini bakteri akan mengalami perlambatan pertumbuhan karena kehabisan nutrisi.

4. Fase Kematian

Sel vegetatif mati karena kelaparan atau teracunimetabolit.



Gambar 2. 2 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Ciri utama dari bakteri ini berbentuk batang (basil), bacillus subtilis juga dapat tumbuh dengan baik dengan atau tanpa adanya oksigen sehingga tergolong bakteri anaerobik.

Klasifikasi *Bacillus Subtilis* :

- Kingdom : *Bacteria*
- Filum : *Firmicutes*
- Kelas : *Bacilli*
- Ordo : *Bacillales*
- Famili : *Bacillaceae*
- Genus : *Bacillus*
- Spesies : *Bacillus Subtilis*

Pada penelitian kali ini bakteri *Bacillus Subtilis* memiliki peran sebagai penghasil enzim urease, enzim ini akan berperan dalam menghidrolisis urea  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  menjadi karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) dan amonia ( $\text{NH}_4^+$ ) lalu ion karbonat akan bereaksi dengan ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) pada kalsium klorida ( $\text{CaCl}_2$ ) dalam larutan simentasi yang akan membentuk endapan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Berikut adalah reaksi yang terjadi dan tercantum pada buku *The Immersion Method for Microbially Induced Calcite Precipitation: Applications for Sustainability* karya (Lin Li, Shihui Liu, Kejun Wen, dan Xinyu Lu tahun 2025) sebagai berikut.



Dengan

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  = Urea

$\text{H}_2\text{O}$  = Air

$\text{NH}_4^+$  = Ion Amonia

$\text{CO}_3^{2-}$  = Ion Karbonat

$\text{Ca}^{2+}$  = Ion Kalsium

$\text{CaCO}_3$  = Kalsium Karbonat

## 2.5 Pengujian Laboratorium

Penelitian ini akan melakukan uji laboratorium pada sampel tanah lanau sebelum dan setelah injeksi bakteri *Bacillus subtilis* untuk membandingkan hasilnya. Pengujian laboratorium mengacu pada standar SNI atau ASTM, sebagaimana tercantum dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah (Ir. Shirley LH, 1994). Beberapa jenis pengujian laboratorium akan dilakukan untuk mengevaluasi perubahan sifat tanah setelah perlakuan bio-grouting.

### 2.5.1. Kadar Air

Kadar air tanah didefinisikan sebagai rasio antara berat air yang terkandung dalam tanah dan berat partikel padat tanah, yang biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase. Terdapat berbagai metode untuk menguji kadar air tanah, salah satu yang paling dikenal adalah metode oven (*Oven Drying Method*), yang prosedurnya diuraikan dalam SNI 03-1965.1-2000 sebagai berikut..

- Timbangan cawan kosong ( $W_1$ )
- Masukkan sampel tanah yang telah disiapkan ke dalam cawan (sekitar 10-30 gram) lalu ditimbang ( $W_2$ )
- Keringkan sampel dalam oven pada suhu 106-110 °C selama 24 jam.
- Keluarkan cawan dari oven, dinginkan dalam desikator vakum, lalu timbang kembali ( $W_3$ )

Setelah selesai melakukan prosedur diatas, selanjutnya agar mendapat presentase nilai kadar air dipakai rumus dibawah ini :

$$W (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan

$W_1$  = Berat Cawan Kosong

$W_2$  = Berat Cawan + Tanah Basah

$W_3$  = Berat Cawan + Tanah Kering

### 2.5.2. Berat Jenis Tanah

Pengujian berat jenis tanah (*Specific Gravity*) adalah salah satu parameter krusial dalam ilmu geoteknik yang berfungsi untuk menentukan sifat fisik tanah. Berat jenis tanah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat partikel padat tanah dan berat air yang memiliki volume sama pada suhu tertentu. Salah satu metode yang digunakan untuk mengukur berat jenis tanah halus adalah Metode Piknometer (*Pycnometer Method*).

Metode Piknometer ini mengacu dengan pedoman SNI 03-1964-1990 dengan prosedur pekerjaan sebagai berikut.

- Sampel tanah yang telah dikeringkan dalam oven dengan suhu 105-110 °C selama 24 jam.
- Sempel didinginkan dalam desikator vakum.
- Timbang piknometer kosong ( $W_1$ )
- Sempel tanah kering masukan ke dalam piknometer (sekitar 1/3 dari volume piknometer) lalu ditimbang ( $W_2$ )
- Isi piknometer dengan air destilasi (hingga 2/3 dari volume piknometer), lalu masukan piknometer ke panci berisi air panas untuk menghilangkan gelembung udara.
- Isi piknometer hingga penuh dengan air destilasi, dan ditutup.
- Timbang piknometer yang berisi tanah dan air ( $W_3$ ).
- Kosongkan piknometer, bersihkan, lalu isi kembali dengan air destilasi saja hingga penuh dan timbang ( $W_4$ ).

Nilai berat jenis akan didapat dengan perhitungan 2.4 dibawah ini.

$$G_s = \frac{w_2 - w_1}{(w_4 - w_1) - (w_3 - w_2)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan

- $G_s$  = Berat Jenis Tanah Halus
- $w_1$  = Berat Piknometer Kosong
- $w_2$  = Berat Piknometer + Tanah Kering
- $w_3$  = Berat Piknometer + Tanah + Air
- $w_4$  = Berat Piknometer + Air

Tabel 2.2 Korelasi berat jenis tanah dengan macam jenis tanah.

Macam Tanah	Berat Jenis $G_s$
Kerikil	2,65 - 2,68
Pasir	2,65 - 2,68
Lanau Tak Organik	2,62 - 2,68
Lempung Organik	2,58 - 2,65
Lempung Tak Organik	2,68 - 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 - 1,80

(Sumber : Hardiyatmo, Mekanika Tanah I, Hal. 35 )

### 2.5.3. Batas Cair

Pengujian batas cair, atau yang dikenal sebagai *liquid limit test*, adalah salah satu metode dalam ilmu mekanika tanah yang digunakan untuk menentukan kadar air ketika tanah berada dalam kondisi batas antara keadaan plastis dan cair. Metode pengerjaan tercantum dalam standart ASTM-D4318.

Casagrande adalah seorang insinyur dan ilmuwan yang dikenal luas dalam bidang mekanika tanah, terutama karena kontribusinya dalam pengembangan metode pengujian sifat-sifat fisik tanah. Ia terkenal dengan pengenalan konsep batas cair (*liquid limit*) dan batas plastis (*plastic limit*), yang merupakan

parameter penting dalam menentukan perilaku tanah. Metode yang dikembangkan oleh *Casagrande*, yang dikenal sebagai pengujian batas cair, digunakan untuk mengukur kadar air pada saat tanah bertransisi antara keadaan plastis dan cair. Kontribusinya tidak hanya membantu dalam pemahaman sifat tanah, tetapi juga memberikan dasar bagi praktik rekayasa geoteknik modern. Karya-karyanya tetap menjadi referensi penting dalam studi dan aplikasi mekanika tanah hingga saat ini.. Dengan prosedur pekerjaan sebagai berikut.

- Persiapan sampel tanah kering yang telah diayak menggunakan saringan No. 40 untuk memastikan partikel halus.
- Sampel tanah tersebut dicampurkan air lalu dimasukkan ke dalam alat Casagrande.
- Ratakan permukaan tanah dengan spatula, pastikan ketebalan tanah merata
- Gunakan grooving tool untuk membuat alur di tengah sampel tanah.
- Putar engkol alat Casagrande dengan kecepatan konstan.
- Hitung jumlah ketukan yang diperlukan sampai menutup alur sepanjang 13 mm.
- Ambil sebagian sampel tanah untuk ditentukan kadar airnya.
- Ulangi prosedur di atas dengan menambahkan atau mengurangi air pada sampel tanah untuk mendapatkan jumlah ketukan antara 10 hingga 35 ketukan.

#### **2.5.4. Batas Plastis**

Batas plastis, atau *plastic limit*, adalah kadar air minimum di mana tanah masih dapat diproses dan dibentuk tanpa retak atau hancur. Pada titik ini, tanah beralih dari keadaan plastis, di mana ia dapat dibentuk dan dibentuk, menjadi keadaan kering yang lebih rapuh. Batas plastis merupakan salah satu parameter penting dalam pengujian sifat fisik tanah, yang membantu dalam memahami perilaku tanah dalam kondisi yang berbeda. Pengujian batas plastis biasanya dilakukan bersamaan dengan pengujian batas cair untuk menentukan rentang plastisitas tanah, yang dapat memberikan informasi penting dalam analisis dan desain proyek geoteknik.

Pengujian batas plastis dengan metode yang sama seperti batas cair memiliki prosedur sebagai berikut.

- Siapkan sampel tanah yang sama dengan pengujian batas cair.
- Campur tanah dengan air hingga mencapai konsistensi tanah yang tidak dapat digulung tanpa lengket berlebihan.
- Jika gulungan tanah mulai retak atau patah sebelum mencapai diameter 3 mm, tambahkan sedikit air dan ulangi prosesnya.
- Jika sudah mencapai diameter 3 mm, ambil gulungan tanah tersebut dan masukkan ke dalam cawan untuk diambil kadar airnya.

Interpretasi hasil dari pengujian batas plastis dan batas cair dapat dipakai untuk menentukan nilai indeks plastis, Nilai dari *index plastis* dapat digunakan untuk mengetahui jenis tanah sesuai dengan tabel 2.4

$$PI = LL - PL \dots \dots \dots (2.5)$$

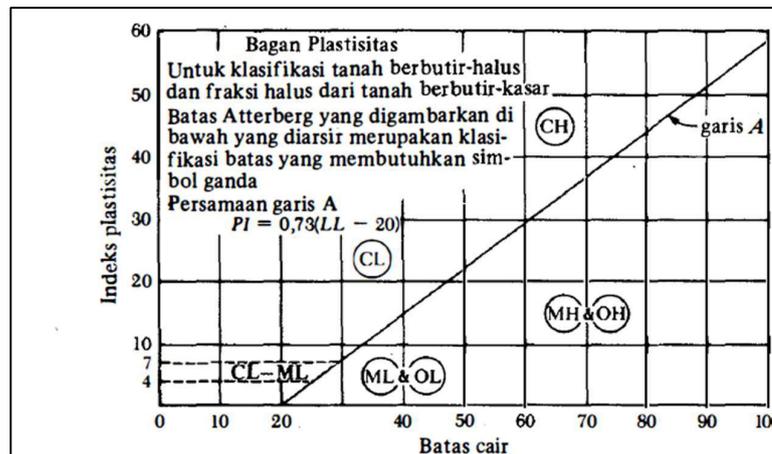
Dimana:

PI = *plastis index*

LL = *liquid limit*

PL = *plastic limit*

Gambar 2.3 Grafik Hubungan antara *Index Plastis* dengan batas cair



(Sumber : Braja M. Das, Mekanika Tanah Jilid I, Hal.54 )

### 2.5.5. Analisa Hidrometer

Pengujian analisis hidrometer adalah metode yang digunakan untuk menentukan distribusi partikel tanah halus, seperti lempung dan lanau, yang tidak dapat diukur melalui pengujian saringan. Metode ini didasarkan pada prinsip sedimentasi partikel tanah dalam cairan, di mana hidrometer digunakan untuk mengukur kepadatan suspensi tanah pada interval waktu tertentu. Analisis hidrometer ini mengikuti standar ASTM-D7928, dengan prosedur pelaksanaan sebagai berikut

- Siapkan sampel tanah berbutir halus yang telah dikeringkan dalam oven.
- Timbang sampel tanah kering tersebut sebesar 50 gram.
- Larutan dispersan ditambahkan (misalnya *sodium hexametaphosphate* atau *Natrium Hidroksida*)
- Sempel tanah dicampur dengan air dalam silinder sedimentasi hingga volume mencapai 1000 mL.
- Untuk memastikan partikel tanah terdispersi dengan baik maka perlu mengaduk sampel dengan kuat dengan alat pengaduk.
- Koreksi suhu pembacaan hidrometer berdasarkan suhu suspensi.
- Lakukan pembacaan dengan memasukan hidrometer jar ke dalam silinder dan catat pembacaan hidrometer.

### 2.5.6. Unconfined Compressive Strength

Pengujian kuat tekan tanah bebas, atau Unconfined Compressive Strength, adalah salah satu metode laboratorium yang digunakan untuk mengukur kekuatan geser tanah kohesif, seperti lempung, dalam kondisi tanpa tegangan lateral. Metode ini juga dapat digunakan untuk menentukan nilai sensitivitas tanah tersebut. Proses pengujian ini tergolong sederhana dan tidak memerlukan peralatan yang kompleks.

Pengujian ini memiliki beberapa standar prosedur, salah satu standar yang umum dipakai adalah standar ASTM-D2166 sebagai berikut.

- Siapkan sampel tanah (biasanya lempung) dengan diameter yang telah ditentukan.
- Pastikan sampel tanah tidak rusak.
- Tempatkan sampel tanah pada alat UCT.
- Berikan beban secara kontinu dengan kecepatan tetap.
- Lakukan pembacaan sesuai dengan interval yang telah ditentukan.
- Lanjutkan pembebanan hingga beban maksimum dan sampel runtuh.

Setelah pengujian dilakukan sesuai dengan prosedur yang telah dijelaskan, akan diperoleh parameter berupa kuat tekan tanah bebas ( $q_u$ ) dan kohesi tanah ( $c$ ), dengan asumsi bahwa sudut geser ( $\phi$ ) sama dengan 0, menggunakan rumus di bawah ini..

$$q_u = \frac{P_{max}}{A} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$c = \frac{q_u}{2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana

$q_u$  = Kuat tekan tanah bebas.

$P_{max}$  = Beban maksimum saat keruntuhan.

$A$  = Luas Penampang sampel tanah.

$c$  = Kohesi tanah.

#### 2.5.7. *Direct Shear Test*

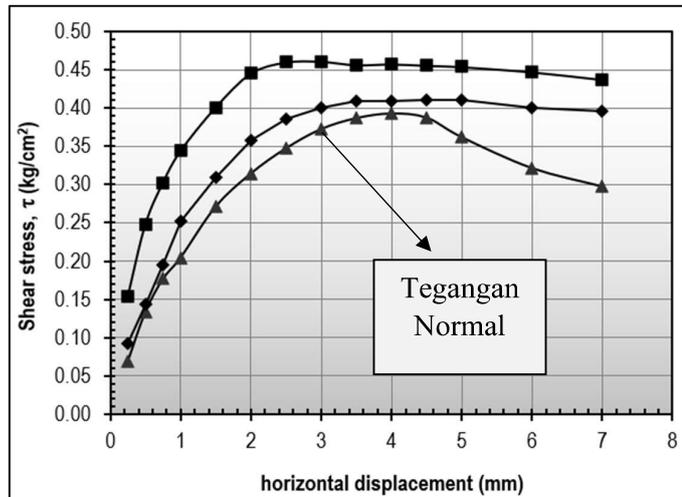
*Direct Shear Test* adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan kekuatan geser tanah. Dalam pengujian ini, sampel tanah ditempatkan dalam sebuah kotak shear yang dibagi menjadi dua bagian. Ketika gaya geser diterapkan secara horizontal pada salah satu bagian, tanah akan mengalami deformasi dan akhirnya mengalami gesekan. Pengujian ini memungkinkan untuk mengukur gaya yang diperlukan untuk menggeser tanah, serta menentukan parameter kekuatan geser, seperti kohesi dan sudut geser. *Direct Shear Test* sering digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng, fondasi, dan struktur lainnya yang berhubungan dengan tanah.

Dalam buku "Soil Mechanics in Engineering Practice," dijelaskan bahwa pengujian direct shear merupakan metode yang sederhana dan efektif untuk menentukan kekuatan geser tanah, khususnya untuk tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil (Terzaghi, 1967). Prosedur pengujian direct shear telah dijelaskan secara rinci dalam standar internasional, seperti ASTM-D3080, sebagai berikut.

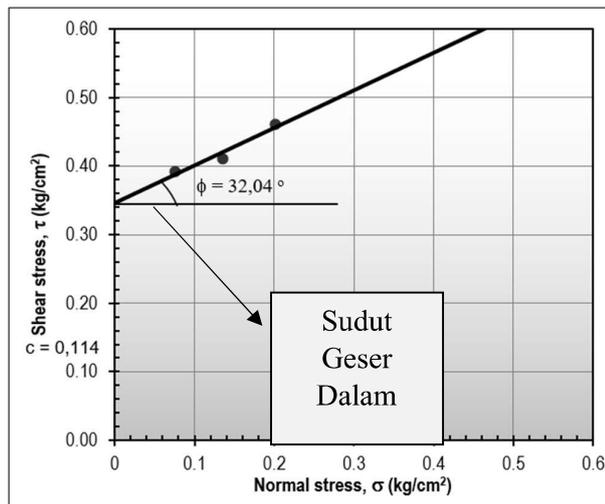
- Persiapan sampel yang diambil langsung dari lapangan.
- Sampel tanah dicetak sesuai dengan ukuran kotak geser (*shear box*).
- Sampel tanah ada dalam kondisi terkonsolidasi atau tidak terkonsolidasi.
- Letakkan sampel tanah pada kotak geser, pastikan sampel tanah rata dan menempel dengan baik pada bagian atas dan bawah kotak geser, lalu pasang batu pori juga pada bagian atas dan bawah sampel tanah.
- Pasang beban normal secara vertikal pada sampel tanah.
- Biarkan sampel tanah terkonsolidasi di bawah tegangan normal.
- Setelah sampel terkonsolidasi, terapkan gaya geser secara horizontal dengan kecepatan konstan.
- Lakukan pembacaan untuk mengamati deformasi horizontal dan vertikal selama pengujian.

Hasil analisis dari pengujian laboratorium ini dapat digambarkan dalam grafik yang menunjukkan hubungan antara tegangan normal dan deformasi horizontal, serta grafik Mohr-Coulomb, untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah dan sudut geser dalam

Gambar 2.4 Grafik Hubungan antara tegangan normal dan deformasi horizontal.



Gambar 2.5 Grafik Mohr-Coulumb



Berikut rumus untuk mendapatkan nilai tegangan normal dan tegangan geser sebagai berikut.

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana:

$\sigma_n$  = Tegangan normal.

$N$  = Beban normal.

$A$  = Luas penampang.

$F$  = Gaya geser

$\tau$  = Tegangan geser.

#### **2.5.8. Triaxial Compression Test**

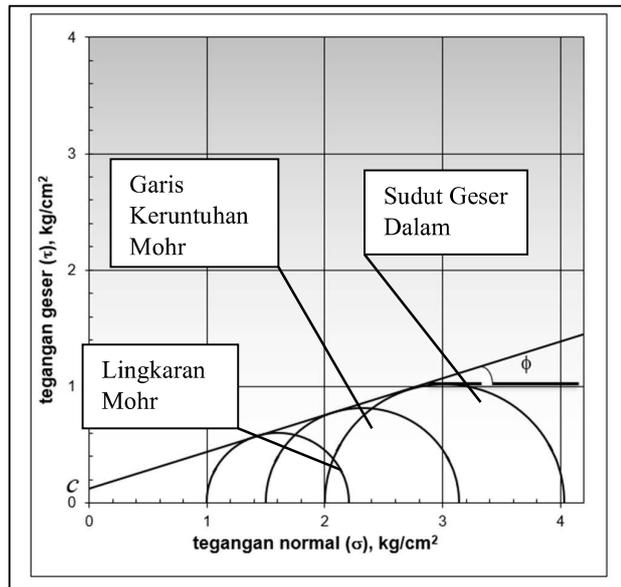
Pengujian ini merupakan salah satu metode analisis laboratorium yang paling krusial dalam bidang mekanika tanah, mirip dengan uji geser langsung. Tujuannya adalah untuk mengetahui parameter kuat geser tanah dengan memberikan tekanan tiga aksial pada sampel tanah, sehingga respons tanah terhadap beban dapat diamati. Pengujian ini dapat dilaksanakan dalam berbagai kondisi, di antaranya Consolidated Undrained (CU), Unconsolidated Undrained (UU), dan Consolidated Drained (CD).

Pada pengujian triaxial ini dilakukan dengan kondisi *Unconsolidated Undrained* (UU) dengan prosedur standar ASTM-D4767 sebagai berikut.

- Siapkan sampel tanah dengan diameter yang telah ditentukan.
- Pasang sampel tanah pada alat uji dengan dibungkus membran karet.
- Berikan tekanan deviator secara bertahap hingga sampel runtuh.
- Catat tekanan deviator dan hasil pembacaannya.

Setelah pengujian selesai data yang didapat bisa diplot dalam kurva tegangan-regangan dan lingkaran mohr seperti pada grafik 2.8 agar dapat menentukan parameter kuat geser tanah.

Gambar 2.6 Grafik Tegangan-regangan dan lingkaran mohr.



Berikut rumus untuk mendapatkan nilai tegangan vertikal maksimal dan kohesi *undrained*.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma \dots \dots \dots (2.11)$$

$$c_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \dots \dots \dots (2.12)$$

dimana :

$\sigma_1$  = Tegangan vertikal.

$\sigma_3$  = Tekanan sel.

$\Delta\sigma$  = Tegangan deviator.

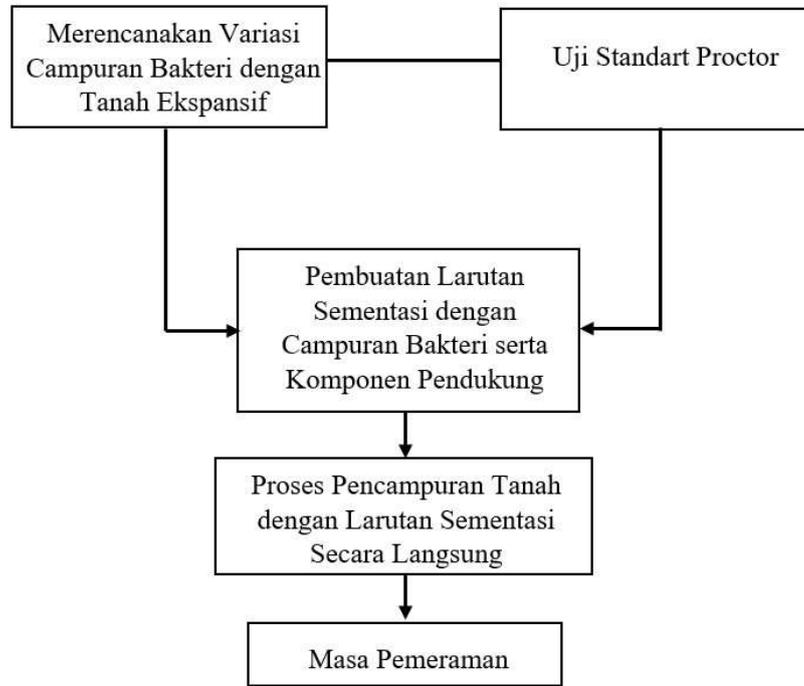
$c_u$  = Kohesi *undrained*.

## 2.6 Proses pencampuran Tanah Lanau dengan Bakteri

Proses stabilisasi tanah dengan bakteri membutuhkan media pembawa berupa larutan yang terdiri dari *Bacillus subtilis* yang dicampur dengan bahan pendukung seperti air, urea, dan kalsium klorida. Campuran ini kemudian akan membentuk larutan sementasi yang berperan dalam memperkuat struktur tanah.

Proses selanjutnya melibatkan pencampuran langsung pada sampel tanah lanau yang akan diuji menggunakan standar proctor. Melalui pengujian ini akan diperoleh data mengenai kadar air optimum yang diperlukan. Data inilah yang

kemudian akan menjadi dasar acuan dalam proses pencampuran tanah dengan larutan sementasi.



Gambar 2.7 Bagan alir proses pencampuran tanah dan bakteri

## 2.7 Uji Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian adalah pendekatan secara sistematis untuk merumuskan dan menguji hipotesis dalam suatu penelitian, hipotesis sendiri ialah pernyataan sementara yang diajukan sebagai jawaban atau penjelasan terhadap masalah dalam penelitian. Rumusan hipotesis sebagai pernyataan yang dapat diuji terbagi menjadi dua. Alternatif ( $H_1$ ) : Pernyataan yang menyatakan ada hubungan atau pengaruh variabel.

Dalam penelitian ini setelah menentukan hipotesis dan pengumpulan data maka selanjutnya adalah menganalisa data dengan metode statistik uji-f atau ANOVA Dua Arah (*Two Way Analysis of Variance*). Analisa tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. Proses perhitungan berfokus pada determinasi nilai mean variabel dependen yang dipengaruhi oleh interaksi dua faktor independen. Variabel analisis dalam studi ini adalah.
  - Variabel Independen (Bebas), Variabel yang dimanipulasi atau diubah.
  - Variabel Dependen (Terikat), Variabel yang diukur sebagai hasil.
  - Variabel Kontrol, Variabel yang dijaga tetap untuk memastikan hasil penelitian tidak terpengaruh oleh faktor lain.
2. Perhitungan *Sum of Squares* (SS) merupakan teknik pengukuran dispersi data yang diterapkan dalam penelitian ini. Terdapat empat komponen SS yang dianalisis: (1) SS Total, (2) SS Faktor A, (3) SS Faktor B, dan (4) SS Error, SS faktor AxB, masing-masing memiliki formula perhitungan khusus seperti yang akan diuraikan berikut ini.

$$SS_{\text{Total}} = \sum Y^2 - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$SS_{\text{Faktor A}} = \frac{\sum TA^2}{nB \times r} - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$SS_{\text{Faktor B}} = \frac{\sum TB^2}{nA \times r} - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$SS_{\text{Faktor AxB}} = \frac{\sum TB^2}{nA \times r} - \frac{G^2}{n} SSA - SSB \dots\dots\dots(2.14)$$

$$SS_{\text{Error}} = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Faktor A}} - SS_{\text{Faktor B}} - SS_{\text{Faktor AxB}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dengan

- Y = Rata rata semua nilai observasi
- G = Grand Total
- n = Total observasi
- b = Jumlah Level Faktor B
- a = Jumlah Level Faktor A
- r = Replikasi
- TA = Total untuk setiap faktor A
- TB = Total setiap faktor B

- Perhitungan Degrees of Freedom (df) merupakan komponen kritis dalam analisis ANOVA. Konsep ini menentukan jumlah informasi independen yang tersedia untuk mengevaluasi variasi data dalam penelitian, dimana nilai df mempengaruhi akurasi estimasi parameter statistik.

$$df_{\text{Total}} = N - 1$$

$$df_{\text{Faktor A}} = a - 1$$

$$df_{\text{Faktor B}} = b - 1$$

$$df_{\text{Faktor AxB}} = (a-1) \times (b-1)$$

$$df_{\text{Error}} = N - (a \times b)$$

- Menentukan nilai *Mean Square* (MS), sebelum menentukan nilai F sebagai pernyataan hipotesis maka diperlukan mengetahui nilai MS dan MSE sebagai pengukur rata-rata variabilitas yang disebabkan oleh faktor tertentu.

$$MS_A = \frac{SSA}{df_A} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$MS_B = \frac{SSB}{df_B} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$MS_E = \frac{SSE}{df_E} \dots \dots \dots (2.21)$$

- Menentukan nilai F sebagai pembanding varians dalam penelitian ini dapat ditentukan dengan rumus dibawah ini.

$$F_A = \frac{MSA}{MSE} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$F_B = \frac{MSB}{MSE} \dots \dots \dots (2.23)$$

- Perbandingan dengan nilai F-Kritis, untuk menentukan nilai F-Kritis dapat ditentukan dengan menggunakan tabel distribusi F pada tingkat signifikan tertentu (misalnya,  $\alpha = 0.05$ ).