

**TUGAS AKHIR**

**EVALUASI NILAI KUAT TEKAN BEBAS TANAH EKSPANSIF  
TERSTABILISASI BACILLUS SUBTILLIS**

***EVALUATION OF UNCONFINED COMPRESSION  
STRENGTH OF EXPANSIVE SOIL STABILIZING BY  
BACILLUS SUBTILLIS***

**ALIF CANDRA CHLARAH  
D011 18 1001**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
2023**

**LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)**

**EVALUASI NILAI KUAT TEKAN BEBAS TANAH EKSPANSIF TERSTABILISASI  
BACILLUS SUBTILLIS**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**ALIF CANDRA CHLARAH**

**D011 18 1001**


Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

  
**Prof. Dr. Ir. Abd. Rahman Djamaluddin, MT**  
NIP: 195910101987031003

  
**Ir. Sitti Hijraini Nur, ST, MT**  
NIP: 197711212005012001

Ketua Program Studi,

  
  
**Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng**  
NIP: 196805292002121002

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Alif Candra Chlarah, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Evaluasi Nilai Kuat Tekan Bebas Tanah Ekspansif Terstabilisasi Bacillus Subtilis**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, Januari 2023

Yang membuat  
Pernyataan,



Alif Candra Chlarah  
NIM: D011 18 1001

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur atas kehadiran Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas Akhir yang berjudul **“Evaluasi Nilai Kuat Tekan Bebas Tanah Ekspansif Terstabilisasi Bacillus Subtilis”** merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi di Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua dan **Bapak Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T.**, selaku Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Bapak Prof. Dr. Ir. Abd. Rachman Djamaluddin, M.T.**, selaku dosen pembimbing I sekaligus Kepala Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan **Ibu Sitti Hijraini Nur, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, yaitu Bapak **La Sakka** dan Ibu **Sitti Umrah** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu. Begitu juga untuk kakak saya, **Dian Permata Chlarah**.

2. Teman-teman KKD Geoteknik, **Asmud, Bara, Charlie, Egi, Rahul, Shafwan, Sopian, Ana, Asti, Feby, Ipa, Meca, Novi**, dan **Upe** yang selalu menjadi teman diskusi yang luar biasa dan menghasilkan masukan-masukan demi rampungnya tugas akhir ini.
3. **Asmud, Hari, Manaf, Ricky, Rifki, Ucil** dan **Ulla** sebagai rekan dan sahabat penulis yang selalu memberikan bantuan dan dukungan baik di dunia perkuliahan ataupun diluar perkuliahan.
4. **SCIEXPERTWO** yang selalu menjadi penyemangat dan memberikan dukungan bagi penulis.
5. **SEMUT 2018** yang selalu menjadi penyemangat dan teman-teman terbaik penulis.
6. Saudara-saudari **TRANSISI 2019** atas waktu, cerita, kenangan, dan semangatnya yang tak lekang oleh masa, semoga tetap solid dan maju, terima kasih karena telah menjadi salah satu pendukung setia dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas semua dukungan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhirnya semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Januari 2023

Alif Candra Chlarah

## ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang mempunyai potensi kembang susut yang tinggi dan mempunyai daya dukung yang baik pada kondisi tidak jenuh air tetapi jelek pada kondisi jenuh air. Indonesia sebagai negara tropis memiliki dua musim yaitu musim hujan dan kemarau, kondisi ini berdampak terhadap tanah lempung ekspansif, dimana pada musim kemarau tanah akan mengalami penyusutan dan retakan akibat berkurangnya air, sedangkan pada saat musim hujan tanah akan mengalami pengembangan akibat bertambahnya kadar air pada tanah. Permasalahan pada tanah dapat diatasi dengan melakukan stabilisasi baik menggunakan bahan kimia ataupun dengan bahan alami yang lebih ramah lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh Bio Grouting atau Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* terhadap perubahan sifat mekanis tanah ekspansif. Metode stabilisasi dengan MICP lebih ramah lingkungan karena memanfaatkan jalur metabolisme bakteri untuk membentuk kalsit.

Pengujian *Unconfined Compression Test* dipilih sebagai metode untuk menguji nilai kuat tekan bebas tanah yang telah distabilisasi pada penelitian ini. Stabilisasi tanah ekspansif dilakukan dengan variasi penambahan larutan bakteri mulai dari 3%, 4.5%, dan 6% terhadap berat sampel, dimana kultur bakteri yang digunakan adalah kultur 3 hari dan 6 hari. Sampel dibentuk dengan menggunakan mould berbentuk silinder dengan ukuran  $h = 2D$ . Sampel yang telah dibuat dengan variasi campuran bakteri yang telah ditentukan kemudian diperam selama 3 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari kemudian diuji dengan metode *Unconfined Compression Test*.

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan bahwa metode MICP dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas tanah ekspansif. Dimana nilai kuat tekan bebas optimum didapatkan pada sampel tanah dengan penambahan 4.5% larutan bakteri kultur 6 hari dengan masa pemeraman 28 hari sebesar  $16.46 \text{ kg/cm}^2$  atau 51 kali lipat lebih tinggi dari nilai kuat tekan bebas tanah tanpa stabilisasi.

Kata kunci: Tanah Ekspansif, MICP, *Bacillus Subtilis*, Kuat Tekan Bebas

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK .....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	2
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Batasan Masalah.....	3
E. Sistematika Penulisan .....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Pengertian dan Klasifikasi Tanah .....	6
B. Tanah Lempung Ekspansif.....	15
C. Stabilisasi Tanah .....	20
D. Bacillus Subtilis .....	24
E. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) .....	25
F. Kuat Tekan Bebas .....	28
G. Penelitian Terdahulu .....	30
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	34
A. Lokasi dan Waktu Penelitian .....	34
B. Metode Pengumpulan Data.....	34
C. Kerangka Alir Penelitian .....	35
D. Material.....	37
E. Standar Pengujian .....	38
F. Pengujian Karakteristik Tanah Asli.....	39
G. Optimalisasi Bahan Stabilisator.....	40

H. Pengujian Sampel .....	40
I. Proses Pembuatan Benda Uji .....	42
J. Pengujian Kuat Tekan Bebas dengan Metode Pemeraman.....	43
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
A. Karakteristik Fisik dan Mekanis Tanah.....	45
B. Karakteristik Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas Tanah Ekspansif Terstabilisasi Bacillus Subtilis .....	55
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	62
A. Kesimpulan.....	62
B. Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA.....	64



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA) (Das, 1995).....	8
Gambar 2. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 (Das, 1995)....	10
Gambar 3. Grafik Hubungan antara Persentase Tanah dan Aktifitas .....	18
Gambar 4. Mekanisme Reaksi Biosementasi (Dejong et al., 2010) .....	26
Gambar 5. Lokasi Pengambilan Sampel Tanah.....	34
Gambar 6. Bagan Alir Penelitian.....	36
Gambar 7. Tanah Asli .....	37
Gambar 8. Larutan Bakteri.....	38
Gambar 9. Contoh Benda Uji.....	43
Gambar 12. Penggolongan Klasifikasi Tanah Asli Menurut Sistem USCS .....	47
Gambar 13. Grafik Klasifikasi Potensi Pengembangan .....	51
Gambar 14. Grafik Hubungan Kadar Air dengan Berat Isi Kering.....	53
Gambar 15. Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan Pada Pengujian Kuat Tekan Bebas Tanah Asli.....	54
Gambar 16. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 3% Bakteri Kultur 3 Hari.....	56
Gambar 17. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 4.5% Bakteri Kultur 3 Hari.....	56
Gambar 18. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 3 Hari.....	57
Gambar 19. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 3% Bakteri Kultur 6 Hari.....	58
Gambar 20. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 4.5% Bakteri Kultur 6 Hari.....	59
Gambar 21. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Tanah dengan Penambahan 6% Bakteri Kultur 6 Hari.....	59

Gambar 24. Grafik Hubungan $q_u$ dengan Variasi Campuran Bakteri Kultur 3 dan 6 Hari .....	60
--	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO .....	11
Tabel 2. Sistem Klasifikasi Tanah Unified (USCS).....	14
Tabel 3. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan	17
Tabel 4. Hubungan nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan .....	17
Tabel 5. Klasifikasi Potensi Pengembangan .....	19
Tabel 6. Karakteristik Morfologi dan Biokimia <i>Bacillus subtilis</i> .....	25
Tabel 7. Klasifikasi Konsistensi Tanah Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas .....	30
Tabel 8. Standar Pengujian Sifat Fisis dan Mekanis Berdasarkan ASTM	39
Tabel 9. Jumlah Benda Uji untuk Pengujian Tanah Asli .....	39
Tabel 10. Variasi Penambahan Bahan Stabilisasi .....	40
Tabel 11. Standar Pengujian Sifat Fisis Tanah .....	41
Tabel 12. Klasifikasi Tanah untuk Lapisan Tanah Dasar Jalan Raya (Sistem AASHTO) .....	48
Tabel 13. Klasifikasi Keandalan tanah Berdasarakan AASHTO .....	49
Tabel 14. Rekapitulasi Identifikasi Tanah Ekspansif .....	52

## **BAB 1. PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Dalam suatu pekerjaan konstruksi bangunan selalu berkaitan dengan tanah. Banyak permasalahan bangunan yang terjadi karena tidak memperhatikan kondisi tanah dimana konstruksi tersebut dibangun. Salah satu jenis tanah yang memerlukan perlakuan khusus adalah tanah lempung, hal ini dikarenakan tanah lempung khususnya lempung ekspansif adalah tanah yang mempunyai potensi kembang susut tinggi dan mempunyai daya dukung yang baik pada kondisi tidak jenuh air tetapi jelek pada kondisi jenuh air.

Indonesia sebagai negara tropis memiliki dua musim yaitu musim hujan dan kemarau. Kondisi ini berdampak terhadap tanah lempung ekspansif, dimana pada musim kemarau tanah akan mengalami penyusutan dan retakan akibat berkurangnya air, sedangkan pada saat musim hujan tanah akan mengalami pengembangan akibat bertambahnya kadar air pada tanah.

Ada banyak metode perbaikan atau perkuatan tanah yang dapat dilakukan, salah satunya adalah perbaikan tanah dengan bahan kimia. Namun penggunaan bahan kimia memiliki dampak yang buruk karena dapat mencemari air serta merusak ekosistem. Sehingga diperlukan suatu metode perbaikan tanah yang ramah lingkungan.

Salah satu metode perbaikan tanah yang ramah lingkungan adalah Bio Grouting. Bio Grouting atau Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) adalah metode perbaikan tanah yang memanfaatkan metabolisme mikroorganisme untuk membentuk kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ), dimana kalsit ini akan berfungsi sebagai pengikat partikel tanah sehingga daya dukung pada tanah akan meningkat. Adapun bakteri yang dapat digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*. Penggunaan MICP dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan untuk diteliti, khususnya dalam meningkatkan sifat mekanis pada tanah ekspansif.

Berdasarkan uraian diatas, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “**Evaluasi Nilai Kuat Tekan Bebas Tanah Ekspansif Terstabilisasi Bacillus Subtilis**”.

## **B. Rumusan Masalah**

Beberapa rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik tanah ekspansif yang digunakan untuk penelitian?
2. Bagaimana pengaruh variasi penambahan *Bacillus subtilis* terhadap karakteristik mekanis tanah ekspansif?
3. Bagaimana pengaruh masa pemeraman terhadap nilai kuat tekan bebas tanah ekspansif terstabilisasi *Bacillus subtilis*?

### **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik dan klasifikasi tanah ekspansif yang digunakan dalam penelitian.
2. Mengetahui pengaruh variasi penambahan *Bacillus subtilis* terhadap karakteristik mekanis tanah ekspansif.
3. Mengetahui pengaruh masa pemeraman terhadap nilai kuat tekan bebas tanah ekspansif terstabilisasi *Bacillus subtilis*.

### **D. Batasan Masalah**

Agar penelitian dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran yang diinginkan maka penelitian ini dibatasi pada:

1. Penelitian ini adalah penelitian skala laboratorium.
2. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah ekspansif yang berlokasi di Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan.
3. Pengujian dilakukan terhadap variasi penambahan *Bacillus subtilis*.
4. Penelitian ini hanya meneliti sifat fisis dan sifat mekanis, tidak meneliti unsur kimia tanah tersebut.
5. Sifat-sifat fisis dan mekanis tanah yang dianalisis adalah:
  - a. Pengujian Berat Jenis
  - b. Pengujian Kadar Air
  - c. Pengujian Batas-Batas Atterberg

- d. Pengujian Analisa Saringan dan Hidrometer
- e. Pengujian Pemadatan (Kompaksi)
- f. Pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT)
- g. Persentase penambahanlarutan *Bacillus subtilis* pada benda uji adalah 3%, 4.5%, dan 6% terhadap berat tanah.
- h. Waktu pemeraman setelah pencampuran tanah ekspansif dengan larutan *Bacillus subtilis* adalah 3 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dengan kondisi laboratorium.

## **E. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan disusun agar pemabahasan lebih terarah dan tetap menjurus pada pokok permasalahan dan kerangka isi. Dalam tugas akhir ini sistematika penulisan disusun dalam lima bab yang secara berurutan menerangkan hal-hal sebagai berikut:

### **BAB 1. PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan penelitian.

### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan teori-teori dan tinjauan umum yang digunakan untuk membahas dan menganalisa tentang permasalahan dari penelitian.

### **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan tentang tahap demi tahap prosedur pelaksanaan penelitian serta cara pengolahan data hasil penelitian. Termasuk juga kerangka alir penelitian.

#### **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

#### **BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini menerangkan tentang kesimpulan beserta saran yang diperlukan untuk penelitian lebih lanjut dari tugas akhir ini.



## **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

### **A. Pengertian dan Klasifikasi Tanah**

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995).

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (loose), yang terletak di atas batuan dasar (bedrock). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya (Hardiyatmo, 2002).

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terinci. Sebagian besar sistem klasifikasi tanah yang telah dikembangkan untuk tujuan rekayasa didasarkan pada

sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas (Das, 1995).

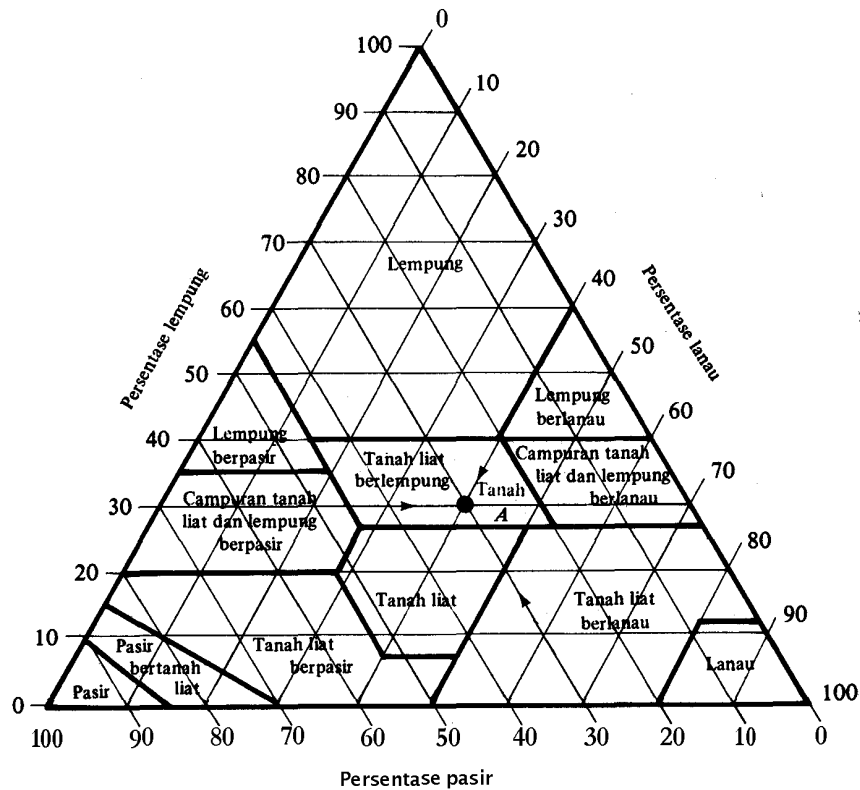
Das (1995) menjelaskan dua jenis klasifikasi tanah yaitu klasifikasi tanah berdasarkan tekstur dan klasifikasi tanah berdasarkan pemakaian.

### **A.1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur**

Dalam arti umum, yang dimaksud dengan tekstur tanah adalah keadaan permukaan tanah yang bersangkutan. Tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir yang ada di dalam tanah. Gambar 1 membagi tanah dalam beberapa kelompok: kerikil (gravel), pasir (sand), lanau (silt), dan lempung (clay), atas dasar ukuran butir-butirnya. Pada umumnya, tanah asli merupakan campuran dari butir-butir yang mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur, tanah diberi nama atas dasar komponen utama yang dikandungnya, misalnya lempung berpasir (sandy clay), lempung berlanau (silty clay), dan seterusnya.

Gambar 1 menunjukkan sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah yang dikembangkan oleh Departemen Pertanian Amerika (USDA). Sistem ini didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah seperti yang diterangkan oleh sistem USDA dalam Gambar 1, yaitu :

- a. *pasir*: butiran dengan diameter 2,0 sampai dengan 0,05 mm
- b. *lanau*: butiran dengan diameter 0,05 sampai dengan 0,002 mm
- c. *lempung*: butiran dengan diameter lebih kecil dari 0,002 mm



Gambar 1. Klasifikasi Berdasarkan Tekstur oleh Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA) (Das, 1995)

## A.2. Klasifikasi Berdasarkan Pemakaian

Karena sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tidak memperhitungkan sifat plastisitas tanah, dan secara keseluruhan tidak menunjukkan sifat-sifat tanah yang penting, maka sistem tersebut dianggap tidak memadai untuk sebagian besar dari keperluan teknik. Pada saat sekarang ada lagi dua buah sistem klasifikasi tanah yang selalu dipakai oleh para ahli teknik sipil. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Sistem-sistem tersebut adalah: Sistem Klasifikasi AASHTO dan Sistem Klasifikasi Unified. Sistem

klasifikasi AASHTO pada umumnya dipakai oleh departemen jalan raya di semua negara bagian di Amerika Serikat. Sedangkan sistem klasifikasi Unified pada umumnya lebih disukai oleh para ahli geoteknik untuk keperluan-keperluan teknik yang lain.

#### 1. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan dalam tahun 1929 sebagai Public Road Administration Classification System. Sistem klasifikasi AASHTO yang dipakai saat ini diberikan dalam Tabel 1. Pada sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Tanah di mana lebih dari 35% butirannya lolos ayakan No. 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

##### a) Ukuran butir:

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm).

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm).

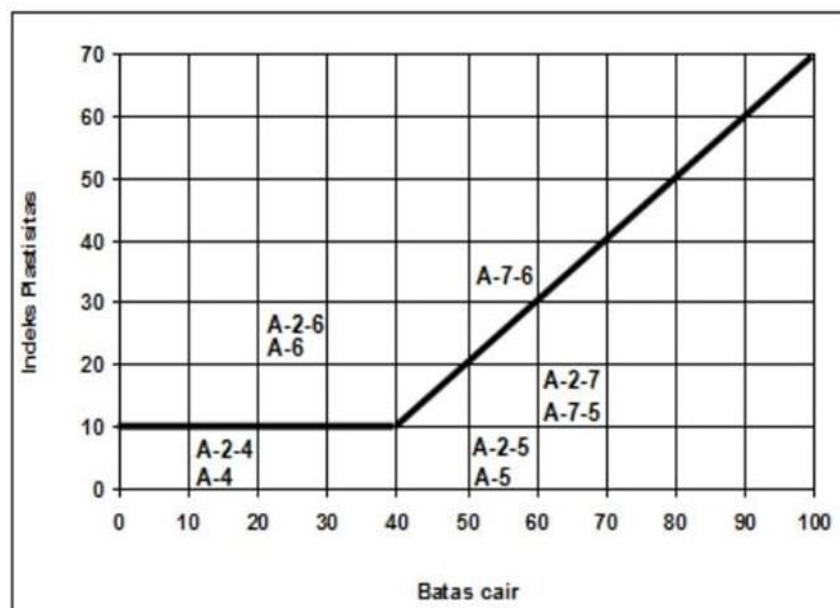
Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.

##### b) Plastisitas

Nama *berlanau* dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas [plasticity index (PI)] sebesar 10 atau kurang. Nama *berlempung* dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih.

- c) Apabila *batuan* (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Gambar 2 menunjukkan suatu gambar dari senjang batas cair (liquid limit, *LL*) dan indeks plastisitas (*PI*) untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.



Gambar 2. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 (Das, 1995).

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO

Klasifikasi tanah	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A - 1		A - 3	A - 2			
	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7
Analisa ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Maks.50 Maks.30 Maks.15	Maks.50 Maks.25	Maks.51 Maks.10	Maks.35	Maks.35	Maks.35	Maks.35
Sifat fraksi yang lolos Ayakan No.40 Batas cair (LL) Indeks plastisitas (PI)	Maks. 6		NP	Maks.40 Maks.10	Min. 41 Maks.10	Maks.40 Min. 11	Min. 41 Min. 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlannau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik						
Klasifikasi tanah	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7-5* A - 7-6**			
Analisa ayakan (% lolos) No.10 No.40 No.200	Min. 36	Min. 36	Min. 36	Min. 36			
Sifat fraksi yang lolos Ayakan No.40 Batas cair (LL) Indeks Plastisitas (IP)	Maks. 40 Maks. 10	Min. 41 Maks. 10	Maks. 40 Min. 11	Min. 41 Min. 11			
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah berlempung				
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek						

\* A-7-5,  $PI \leq LL - 30$ \*\* A-7-6,  $PI > LL - 30$

## 2. Sistem Klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*)

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande dalam tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh The Army Corps of Engineers selama Perang Dunia II. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

- a) Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir di mana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal **G** atau **S**. **G** adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan **S** adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
- b) Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal **M** untuk lanau (*silt*) anorganik, **C** untuk lempung (*clay*) anorganik, dan **O** untuk lanau-organik dan lempung-organik. Simbol **PT** digunakan untuk tanah gambut (*peat*), muck, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi USCS adalah:

- W** = well graded (tanah dengan gradasi baik)
- P** = poorly graded (tanah dengan gradasi buruk)
- L** = low plasticity (plastisitas rendah) ( $LL < 50$ )
- H** = high plasticity (plastisitas tinggi) ( $LL > 50$ )

Tanah berbutir kasar ditandai dengan simbol kelompok seperti: **GW**, **GP**, **GM**, **GC**, **SC**, **SP**, **SM**, dan **SC**. Untuk klasifikasi yang benar, faktor-faktor berikut ini perlu diperhatikan:

- a) Persentase butiran yang lolos ayakan No. 200 (ini adalah fraksi halus)
- b) Persentase fraksi kasar yang lolos ayakan No. 40
- c) Koefisien keseragaman (uniformity coefficient,  $C_u$ ) dan koefisien gradasi (gradation coefficient,  $C_c$ ) untuk tanah dimana 0-12% lolos ayakan No. 200
- d) Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (untuk tanah di mana 5% atau lebih lolos ayakan No. 200)

Menurut Hadiyatmo (2017) tanah diklasifikasikan dalam jumlah kelompok dan subkelompok yang dapat dilihat dalam Tabel 2.



Tabel 2. Sistem Klasifikasi Tanah Unified (USCS)

UNIFIED SOIL CLASSIFICATION AND SYMBOL CHART		LABORATORY CLASSIFICATION CRITERIA		
<p align="center"><b>COARSE-GRAINED SOILS</b> (more than 50% of material is larger than No. 200 sieve size.)</p>				
<p><b>GRAVELS</b> More than 50% of coarse fraction larger than No. 4 sieve size</p>	<p align="center">Clean Gravels (Less than 5% fines)</p>	<p>GW Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines</p>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3	
	<p>GP Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines</p>	<p>GP Not meeting all gradation requirements for GW</p>		
	<p align="center">Gravels with fines (More than 12% fines)</p>	<p>GM Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures</p>	<p>GM Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4 Above "A" line with P.I. between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols</p>	
	<p>GC Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures</p>	<p>GC Atterberg limits above "A" line with P.I. greater than 7</p>		
	<p><b>SANDS</b> 50% or more of coarse fraction smaller than No. 4 sieve size</p>	<p align="center">Clean Sands (Less than 5% fines)</p>	<p>SW Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines</p>	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3
		<p>SP Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines</p>	<p>SP Not meeting all gradation requirements for GW</p>	
<p align="center">Sands with fines (More than 12% fines)</p>		<p>SM Silty sands, sand-silt mixtures</p>	<p>SM Atterberg limits below "A" line or P.I. less than 4 Limits plotting in shaded zone with P.I. between 4 and 7 are borderline cases requiring use of dual symbols.</p>	
<p>SC Clayey sands, sand-clay mixtures</p>		<p>SC Atterberg limits above "A" line with P.I. greater than 7</p>		
<p align="center"><b>FINE-GRAINED SOILS</b> (50% or more of material is smaller than No. 200 sieve size.)</p>		<p>Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentage of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows:</p> <p>Less than 5 percent ..... GW, GP, SW, SP                      More than 12 percent ..... GM, GC, SM, SC                      5 to 12 percent ..... Borderline cases requiring dual symbols</p>		
<p><b>SILTS AND CLAYS</b> Liquid limit less than 50%</p>		<p>ML Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty of clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity</p>		
	<p>CL Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays</p>			
	<p>OL Organic silts and organic silty clays of low plasticity</p>			
<p><b>SILTS AND CLAYS</b> Liquid limit 50% or greater</p>	<p>MH Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts</p>			
	<p>CH Inorganic clays of high plasticity, fat clays</p>			
	<p>OH Organic clays of medium to high plasticity, organic silts</p>			
<p><b>HIGHLY ORGANIC SOILS</b></p>	<p>PT Peat and other highly organic soils</p>			
		<p align="center"><b>PLASTICITY CHART</b></p>		

## B. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah ekspansif (*expansive soil*) adalah istilah yang digunakan untuk tanah yang memiliki potensi pengembangan atau penyusutan yang tinggi karena pengaruh perubahan kadar air. Tanah ekspansif akan menyusut pada saat kadar air berkurang, dan akan mengembang jika kadar air bertambah (Hardiyatmo, 2017).

Istilah untuk tanah ekspansif dan potensi pengembangan (*swelling potential*) digunakan untuk menunjukkan tanah yang mudah mengalami kembang-susut tersebut. Tanah yang mudah berubah volumenya adalah tanah yang banyak mengandung lempung, terutama yang mengandung mineral *monmorillonite* (Hardiyatmo, 2017).

Mineral yang terdapat pada tanah ekspansif adalah *kaolinite*, *illite* dan *montmorillonite*. Ketiganya merupakan bentuk kristal Hidros Aluminium Silikat, tetapi sifat dan struktur ketiganya memiliki perbedaan. Perbedaan sifat dan struktur kristal yang ada pada mineral memberikan kelemahan untuk mengalami pengembangan. Pengembangan akan terjadi pada lempung ketika air masuk diantara partikel lempung yang mengakibatkan terjadinya pemisahan partikel (Gunarso et al., 2017).

Ada beberapa cara untuk mengidentifikasi suatu tanah bersifat ekspansif, yaitu:

1. Visual

Cara awal yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tanah lempung ekspansif yaitu dengan diamati secara visual. Ketika mengering

karakteristik bongkahan tanahnya sangat keras, ketika dipotong akan licin dan ketika basah terasa lembut dan lengket. Meninggalkan sisa ketika diremas dengan tangan.

## 2. Identifikasi Tidak Langsung

Cara ini dilakukan di laboratorium dan membagi tanah ekspansif ke dalam berbagai potensi pengembangan. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian batas-batas atterberg dan nilai aktivitas. Beberapa cara identifikasi tanah ekspansif cara tidak langsung adalah sebagai berikut:

### a. Cara Chen (1988)

Beberapa cara dalam melakukan identifikasi tanah ekspansif, ada dua cara yang dikemukakan Chen, yaitu : cara pertama, Chen menggunakan indeks tunggal yaitu Plasticity Index (PI) dan cara kedua yaitu menggunakan korelasi antara fraksi lempung lolos saringan no. 200, batas cair (LL), dan nilai N dari hasil uji Standart Penetration Test (SPT).

Tabel 3 menunjukkan hubungan antara harga PI dengan potensi pengembangan yang dibagi menjadi 4 kategori, yaitu : potensi pengembangan rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Tanah ekspansif dengan tingkat pengembangan tinggi sampai sangat tinggi yaitu nilai Plasticity Index  $> 55\%$  .

Tabel 3. Korelasi nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan

<b>Indeks Plastisitas (PI) %</b>	<b>Potensi Pengembangan</b>
0 – 15	Rendah
10 – 35	Sedang
20 – 55	Tinggi
>55	Sangat tinggi

Sumber: Das (1995)

b. Cara Skempton (1953)

Identifikasi lempung ekspansif juga sering dilakukan dengan memperhatikan nilai aktivitasnya. Skempton (1953) mendefinisikan aktivitas (A) sebagai:

$$A = \frac{PI}{c} \quad (1)$$

dimana,

A = aktivitas

PI = indeks plastisitas

C = persen fraksi ukuran lempung (diameter butiran <0,002 mm)

Tabel 4 dibawah menunjukkan hubungan antara potensi pengembangan dengan nilai aktivitas.

Tabel 4. Hubungan nilai indeks plastisitas dengan tingkat pengembangan

<b>Nilai Aktifitas Tanah</b>	<b>Tingkat Keaktifan</b>	<b>Potensi Pengembangan</b>
<0,75	Tidak Aktif	Rendah
0,75<Ac<1,25	Aktif	Sedang
>1,25	Sangat Aktif	Tinggi

Sumber: Skempton (1953)

## c. Cara Seeds (1962)

Cara ini menggunakan aktiviti Skempton yang dimodifikasi, yaitu:

$$Ac = \frac{PI}{C-10} \quad (2)$$

dimana,

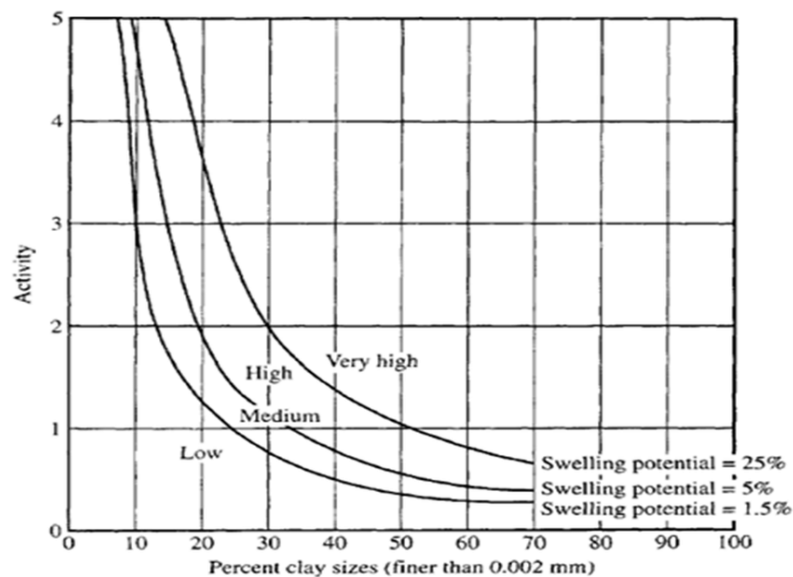
Ac = aktivitas

PI = indeks plastisitas (%)

C = persentase lolos saringan No. 200

angka 10 adalah faktor reduksi

Pada Gambar 3 dibawah ini menunjukkan grafik hubungan antara persentase tanah lolos saringan No. 200 dan aktivitas serta potensial swelling.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Persentase Tanah dan Aktifitas

Dalam Hardiyatmo (2014) Seed et al. (1962) juga mengusulkan hubungan empiris yang lain antara potensi pengembangan dan indeks plastisitas tanah:

$$S = 60K(PI)^{2,44} \quad (3)$$

dimana,

S = swell potential

PI = plasticity index

K =  $3,6 \times 10^{-5}$

Tabel 5. Klasifikasi Potensi Pengembangan

<b>Derajat Pengembangan</b>	<b>Potensi Pengembangan, S (%)</b>
Rendah	0 – 1,5
Sedang	1,5 – 5
Tinggi	5,0 – 25
Sangat Tinggi	>25

### 3. Identifikasi Langsung

Dilakukan test langsung pada tanah dengan cara *uji pengembangan bebas* dan *uji oedometer*.

### 4. Identifikasi Mineralogi

Seperti yang dijelaskan dalam Hardiyatmo (2017) Mineralogi lempung merupakan faktor yang penting dalam identifikasi sifat-sifat ekspansifnya. Beberapa cara identifikasi mineralogi dikembangkan dalam penelitian laboratorium untuk menyelidiki sifat-sifat lempung, hanya cara ini

tidak praktis dan tidak ekonomis bila diaplikasikan di lapangan. Menurut Chen (1975), lima cara dapat digunakan, yaitu:

- a. Difraksi sinar X (*X-ray diffraction*).
- b. Analisis beda suhu (*differential thermal analysis*).
- c. Serapan pewarna (*dye adsorption*).
- d. Analisis kimia (*chemical analysis*).
- e. Resolusi mikroskop elektron (*electron microscope resolution*).

Beberapa metode tersebut di atas, penggunaannya biasanya digabungkan. Dengan penggabungan tersebut, mineral-mineral lempung yang berbeda di dalam tanah dapat dievaluasi secara kualitatif.

### **C. Stabilisasi Tanah**

Seperti yang dijelaskan dalam Darwis (2017), Semua tindakan untuk dapat mengubah sifat pada tanah, untuk didapatkan sifat sesuai dengan kebutuhan konstruksi adalah tindakan yang dapat dikategorikan sebagai upaya stabilisasi tanah. Secara khusus pengertian stabilisasi tanah dapat dilihat dari definisi yang dikemukakan beberapa ahli, antara lain:

1. Jon A. Epps et al. (1971), menjelaskan bahwa stabilisasi tanah adalah tindakan untuk meningkatkan sifat atau karakteristik rekayasa tanah (*soil properties*).
2. Winterkorn (1975), menyatakan bahwa Stabilisasi tanah adalah istilah untuk metode fisik, kimia, atau biologi, yang dapat digunakan

untuk meningkatkan sifat tertentu dari tanah agar dapat sesuai dengan tujuan rekayasa yang tepat.

Stabilisasi tanah adalah metode rekayasa yang memiliki tujuan untuk meningkatkan dan/atau mempertahankan sifat tertentu pada tanah, agar dapat memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan (Darwis, 2017).

Secara garis besar, apabila ditinjau berdasarkan mekanisme global yang terjadi pada tindakan stabilisasi tanah, maka klasifikasi tindakan stabilisasi tanah diklasifikasikan atas dua macam, yaitu:

1. Perbaikan tanah (*soil improvement*) ; adalah salah satu jenis stabilisasi tanah yang digunakan untuk memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah berdasarkan syarat teknis yang dibutuhkan, dengan penggunaan bahan additive (kimiawi), pencampuran tanah (*re-gradation*), pengeringan tanah (*dewatering*) atau dengan pemberian energi statis/dinamis ke dalam lapisan tanah (fisik).
2. Perkuatan tanah (*soil reinforcement*) ; adalah salah satu jenis stabilisasi tanah yang digunakan untuk memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dan kinerja tanah berdasarkan syarat teknis yang dibutuhkan, dengan pemberian material sisipan ke lapisan tanah.

Dari kedua pengklasifikasian di atas, terlihat korelasi antara keduanya, bahwa:



1. Perbaikan tanah (*soil improvement*), relevan dengan stabilisasi kimia dan stabilisasi fisik.
2. Perkuatan tanah (*soil reinforcement*), relevan dengan stabilisasi mekanis.

Namun jika ditinjau berdasarkan proses yang terjadi dalam pelaksanaan stabilisasi tanah, maka stabilisasi tanah dapat dibedakan atas tiga jenis, yaitu:

1. Stabilisasi kimia yaitu penambahan bahan kimia tertentu pada material tanah, sehingga terjadi reaksi kimia antara tanah dan bahan pencampurnya, sehingga menghasilkan material baru yang memiliki karakteristik yang lebih baik.
2. Stabilisasi fisik yaitu menggunakan energi dari beban dinamis atau beban statis pada lapisan tanah, sehingga terjadi dekomposisi baru dalam massa tanah, hal ini akan memperbaiki karakteristik lapisan tanah sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai.
3. Stabilisasi mekanis yaitu stabilisasi dengan menggunakan material sisipan ke dalam lapisan tanah, sehingga terjadi peningkatan karakteristik teknis dalam massa tanah sesuai dengan tujuan tindakan stabilisasi yang diinginkan. Karena keberadaan material sisipan ke dalam lapisan tanah inilah, sehingga stabilisasi mekanis diistilahkan sebagai “perkuatan tanah (*soil reinforcement*)”. Contohnya stabilisasi dengan *metal strip*, *geotextile*, *geomembrane*, *geogrid*, *vertical drain*, dan lain sebagainya.

Sebagaimana dengan tujuan dari setiap tindakan stabilisasi tanah, maka tujuan umum dari perbaikan tanah adalah untuk:

1. Meningkatkan daya dukung tanah.
2. Meningkatkan kuat geser tanah.
3. Memperkecil kompresibilitas dan penurunan tanah.
4. Memperkecil permeabilitas tanah (kasus: tanggul).
5. Memperbesar permeabilitas tanah (kasus: *dewatering* dan *sand lense*)
6. Memperkecil potensi kembang susut pada tanah (*swelling potential*)
7. Menjamin kelestarian dan keberlanjutan sumber daya alam dan lingkungan.

Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan di dalam memilih jenis dan tipe perbaikan tanah yang akan diterapkan dalam setiap tindakan perbaikan tanah, antara lain:

1. Jenis dan karakteristik tanah, termasuk sifat-sifat kimia dan fisik, termasuk mineralogi tanah yang akan diperbaiki.
2. Jenis dan karakteristik konstruksi yang akan dibangun, terutama beban konstruksi.
3. Parameter tanah yang perlu diperbaiki, sesuai kebutuhan konstruksi.
4. Kedalaman lapisan tanah yang akan diperbaiki.
5. Sifat kimia dan sifat fisik dari bahan *stabilizer* yang akan digunakan.
6. Harga bahan *stabilizer* yang akan digunakan, terutama dikaitkan dengan efisiensi biaya perbaikan.

7. Ketersediaan bahan dan peralatan di lokasi perbaikan tanah.
8. Kondisi lingkungan di sekitarnya (*existing environmental*).

#### **D. Bacillus Subtilis**

*Bacillus subtilis* adalah jenis bakteri yang pada umumnya ditemukan di tanah, air, udara dan materi tumbuhan yang terdekomposisi. *Bacillus subtilis* merupakan bakteri gram positif yang dapat membentuk endospora berbentuk oval di bagian sentra sel. Klasifikasi *Bacillus sp.* Adalah sebagai berikut (Antoni, 2019):

Kingdom : Procaryotae  
Divisi : Bacteria  
Kelas : Schizomycetes  
Bangsa : Eubacteriales  
Suku : Bacillaceae  
Marga : *Bacillus*  
Jenis : *Bacillus sp.*

*Bacillus subtilis* merupakan bakteri gram positif yang dapat membentuk endospora yang berbentuk oval di bagian sentral sel. Hasil uji pewarnaan gram menunjukkan bahwa *Bacillus subtilis* merupakan bakteri gram positif karena menghasilkan warna ungu saat ditetesi dengan larutan KOH. Warna ungu yang muncul pada pewarnaan gram tersebut dikarenakan dinding sel *Bacillus subtilis* mampu mempertahankan zat warna kristal violet (Djaenuddin dan Muis, 2015).

Tabel 6. Karakteristik Morfologi dan Biokimia *Bacillus subtilis*

Pengujian	Reaksi
Sifat Gram	+
Flagela	+
Katalase	+
Endospora (sentral)	+
Pembengkakan sel berspora	-
Tumbuh pada suhu 45°C	+
Tumbuh pada pH 5,70	+
Tumbuh pada kandungan NaCl 1%	+
Penggunaan sitrat	+
Hidup dalam medium glukosa pada kondisi tanpa oksigen	-
Produksi asam dari karbon: arabinosa, manitol dan xylosa	+
Produksi indol	-
VP test	+
Hidrolisis pati	+
Hidrolisis gelatin	+

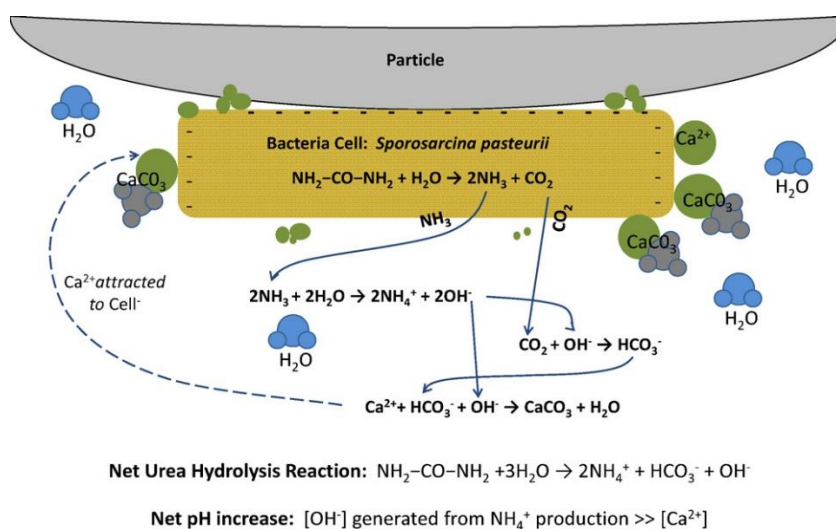
Bakteri *Bacillus subtilis* dapat mempercepat proses sementasi karena mempunyai enzim urease yang bersifat biokatalisator dengan menghidrolisis urea menjadi amonia yang akan merubah kalsium menjadi kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ).

#### **E. Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)**

Pengaruh mikroorganisme pada banyak mineral seperti karbonat, sulfat, fosfat dan silikat telah terbukti. Salah satu proses yang umum di alam adalah Microbially Induced Calcium Carbonate (Calcite) Precipitation (MICP) (Ghalandarzadeh et al., 2022). MICP adalah teknologi pengendapan kalsium karbonat (kalsit atau  $\text{CaCO}_3$ ) yang digerakkan secara biologis, yang mencakup dua mekanisme pengendapan  $\text{CaCO}_3$

yang dikendalikan secara biologis dan diinduksi secara biologis. Dalam mekanisme yang dikendalikan secara biologis, organisme mengontrol nukleasi dan pertumbuhan partikel mineral, dan secara independen mensintesis mineral dalam bentuk yang unik, terlepas dari kondisi lingkungan. Dalam mekanisme yang dikendalikan secara biologis, organisme mengontrol nukleasi dan pertumbuhan partikel mineral, dan secara mandiri mensintesis mineral dalam bentuk yang unik untuk spesies terlepas dari kondisi lingkungan (Mujah et al., 2017).

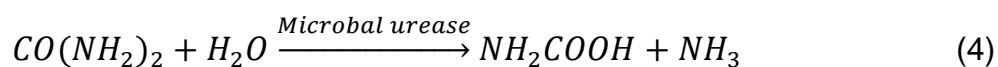
Untuk contoh mineralisasi yang dikendalikan secara biologis dijelaskan oleh Barabesi et al. (2007) dalam Mujah et al. (2017), yang menunjukkan bahwa mineralisasi  $\text{CaCO}_3$  dicapai secara molekuler menggunakan *Bacillus subtilis*. Di sisi lain, dalam mekanisme yang diinduksi secara biologis, produksi  $\text{CaCO}_3$  tergantung pada kondisi lingkungan.



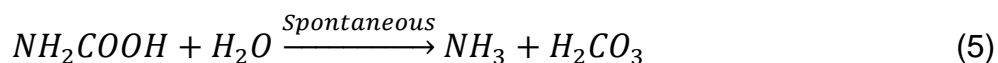
Gambar 4. Mekanisme Reaksi Biosementasi (Dejong et al., 2010)

Aktivitas metabolisme bakteri menghasilkan enzim urease yang menghidrolisis urea menjadi amonia dan karbon dioksida. Amonia dan karbon dioksida terdifusi melalui dinding sel bakteri dan sekeliling bakteri. Reaksi keduanya berjalan spontan dengan adanya air. Amonia dikonversi menjadi amonium dan karbon dioksida menyeimbangkan reaksi kimia menjadi asam karbonat, ion karbonat, dan ion bikarbonat (Antoni, 2019).

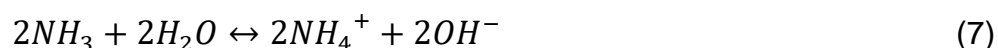
Proses MICP yang lebih detail dijelaskan dalam Ghalandarzadeh et al. (2022) dengan berfokus pada hidrolisis urea. Hidrolisis urease mengkatalisis urea menjadi amonium dan karbonat. Dalam reaksi ini, satu mol urea dihidrolisis menjadi satu mol amonia dan satu mol asam karbonat, sebagai berikut (Ghalandarzadeh et al., 2022):



yang secara spontan terhidrolisis menjadi mol lain dari amonia dan asam karbonat:

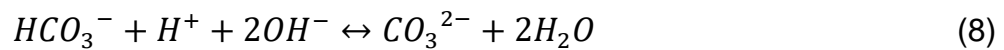


Kedua produk tersebut, NH<sub>3</sub> dan H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, seimbang dalam air untuk membentuk bikarbonat dan dua mol amonium dan dua mol ion hidroksida, sebagai berikut:

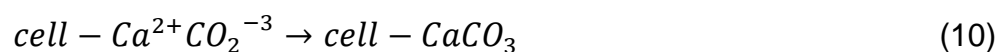
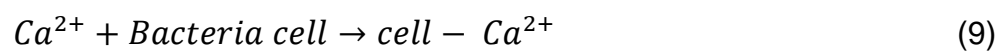


Ion hidroksida (OH<sup>-</sup>) meningkatkan pH lingkungan, yang dapat menggeser keseimbangan bikarbonat menjadi ion karbonat. Pergeseran ini

kemudian dapat mengendapkan ion logam seperti pengendapan  $\text{Ca}^{2+}$ . Produksi  $\text{NH}_4^+$  juga meningkatkan pH, dan bereaksi secara spontan menghasilkan kalsium karbonat.



Pengendapan  $\text{CaCO}_3$  di dinding sel bakteri terjadi jika terdapat cukup konsentrasi ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{CO}_3^{2-}$  dalam larutan:



Presipitasi  $\text{CaCO}_3$  yang dihasilkan dipengaruhi oleh 4 parameter utama: (i) konsentrasi kalsium, (ii) konsentrasi karbonat, (iii) pH dan (iv) ketersediaan situs nukleasi (Hammes dan Verstraete, 2002 dalam Whiffin et al., 2013)

## F. Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas adalah tekanan aksial benda uji pada saat mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial mencapai 20%. Uji kuat tekan bebas adalah salah satu cara untuk mengetahui geser tanah. Uji kuat tekan bebas bertujuan untuk menentukan kekuatan tekan bebas suatu jenis tanah yang bersifat kohesif, baik dalam keadaan asli (undisturbed), buatan (remoulded) maupun tanah yang dipadatkan (compacted). Kuat tekan bebas ( $q_u$ ) adalah harga tegangan aksial maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji silindris (sampel tanah) sebelum mengalami

keruntuhan. Nilai kuat tekan bebas (unconfined compressive strenght) didapat dari pembacaan proving ring dial dengan tegangan maksimum.

$$q_u = \frac{k \times R}{A} \quad (11)$$

dimana,

$q_u$  = kuat tekan bebas

$k$  = kalibrasi proving ring

$R$  = pembacaan maksimum

$A$  = luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan  $R$

Uji kuat tekan bebas (Unconfined Compression Strength) merupakan cara yang dilakukan di laboratorium untuk menghitung kekuatan geser tanah. Uji kuat ini mengukur seberapa kuat tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai tanah tersebut terpisah dari butiran-butirannya juga mengukur regangan tanah akibat tekanan tersebut. Uji tekan bebas ini dilakukan pada contoh tanah asli dan contoh tanah tidak asli lalu diukur kemampuannya masing-masing contoh terhadap kuat tekan bebas. Dari nilai kuat tekan maksimum yang dapat diterima pada masing-masing contoh akan didapat sensitivitas tanah. Nilai sensitivitas ini mengukur bagaimana perilaku tanah jika terjadi gangguan dari luar.



Tabel 7. Klasifikasi Konsistensi Tanah Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas

Sifat Tanah	Unconfined Compression Test
Very soft (sangat lunak)	< 0,25 kg/cm <sup>2</sup>
Soft (lunak)	0,25 – 0,50 kg/cm <sup>2</sup>
Firm/Medium (tengah)	0,50 – 1,00 kg/cm <sup>2</sup>
Stiff (kenyal)	1,00 – 2,00 kg/cm <sup>2</sup>
Very stiff (sangat kenyal)	2,00 – 4,00 kg/cm <sup>2</sup>
Hard (keras)	> 4,00 kg/cm <sup>2</sup>

Sumber: Das, 1995

### G. Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai stabilisasi tanah dengan menggunakan bakteri telah dilakukan. Diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. Hasriana et al. (2018): A Study on Clay Soil Improvement with *Bacillus Subtilis* Bacteria As The Road Subbase Layer.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daya dukung tanah lempung dengan plastisitas tinggi yang terstabilisasi bakteri (*Bacillus subtilis*). Untuk bakteri yang digunakan adalah bakteri dengan usia kultur 6 hari. Hasilnya menunjukkan bahwa untuk pengujian California Bearing Ratio (CBR) dan Uji Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compressive Strength) dengan penambahan bakteri 2%, 4%, dan 6% menunjukkan bahwa nilai kuat tekan cenderung meningkat dan menurun pada penambahan 8% bakteri. Kurva kuat tekan juga mengalami kenaikan seiring dengan waktu pemeraman yaitu 3, 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian ini menunjukkan

bahwa penggunaan *Bacillus subtilis* sebagai bahan stabilisasi meningkatkan daya dukung pada tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Daya dukung (unconfined compressive strenght = 382 kN/m<sup>2</sup> dan nilai California Bearing Ratio (CBR) = 72.23%) menurun pada penggunaan bakteri melebihi 6%.

2. Sara Ghalandarzadeh et al. (2022): Application of Nature-Based Nanotechnology for Enhancing Biocementation in Clay by Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation.

Microbially Induced Calcium Carbonat Precipitation (MICP) adalah teknik stabilisasi tanah berbasis alam. Adapun tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis tanah lempung, dimana penggunaan metode MICP untuk stabilisasi tanah lempung kurang mendapat perhatian, sehingga diperlukan penelitian untuk memastikan efek dan efisiensinya. Penggunaan metode MICP dengan penambahan bahan nano alami dapat menjadi cara untuk meningkatkan kinerja MICP. Dalam penelitian ini, pengaruh dari penambahan nano-CaCO<sub>3</sub> dan nano-SiO<sub>2</sub> dalam meningkatkan proses MICP pada tanah lempung kaolinit diselidiki.

Adapun penambahan bakteri yang digunakan adalah 19%, 22%, 25%, dan 30% dengan penambahan nano-SiO<sub>2</sub> dan nano-CaCO<sub>3</sub> sebesar 1%, 1.5%, dan 2%. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa jumlah kalsium karbonat dan UCS meningkat pada semua penambahan bahan nano dengan waktu pemeraman 1 minggu, 2 minggu, dan 4 minggu.

Untuk sampel yang hanya menggunakan metode MICP (bakteri tanpa penambahan bahan nano alami) didapatkan nilai maksimum pada penambahan 25%. Penambahan 1.5% nano-CaCO<sub>3</sub> dengan waktu pemeraman satu minggu tidak menunjukkan efek yang signifikan terhadap metode MICP. Tetapi, hasil uji kuat tekan bebas dengan penambahan bahan nano alami meningkat jauh setelah waktu pemeraman dua minggu.

Penambahan 30% bakteri dan 1.5% nano-SiO<sub>2</sub> menunjukkan hasil uji kuat tekan bebas yang lebih baik dibandingkan dengan penambahan 1.5% nano-CaCO<sub>3</sub>. Untuk sampel dengan penambahan 30% bakteri dan 1.5% nano-SiO<sub>2</sub> menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan sampel dengan penambahan 1% dan 2% nano-SiO<sub>2</sub>. Namun, pada waktu pemeraman empat minggu, menunjukkan bahwa penambahan nano-SiO<sub>2</sub> lebih tinggi dibandingkan 1.5% nano-SiO<sub>2</sub>. Pengaruh waktu pemeraman dapat menunjukkan efek nano-SiO<sub>2</sub> pada pengendapan kristal kalsit yang berkelanjutan dari waktu ke waktu.

3. M Sugata et al. (2020): The Use of Eggshell Powder as Calcium Source in Stabilizing Expansive Soil Using *Bacillus subtilis*.

Pada penelitian ini, stabilisasi tanah ekspansif menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dimana tepung cangkang telur digunakan sebagai sumber kalsium. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus subtilis* dapat menggunakan kalsium dari tepung kulit telur dan membentuk endapan kalsium karbonat. Berdasarkan hasil pengujian Uji Kuat Tekan Bebas (UCS) didapatkan peningkatan 19.47% untuk tanah dengan

penambahan medium, 62.05% untuk tanah dengan penambahan bakteri (1x) dan 74.32% untuk tanah dengan penambahan bakteri (4x) setelah 90 hari pemeraman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak sel bakteri yang diinjeksikan ke dalam tanah dan semakin lama waktu pemeraman maka semakin tinggi peningkatan kekuatan tanah. Kalsium dalam media digunakan oleh *Bacillus subtilis* atau bakteri asli dalam sampel tanah untuk membentuk endapan kalsium karbonat.

4. Andi Marini Indriani et al. (2021): Bioremediation of Coal Contaminated Soil As The Road Foundations Layer.

Efek penambahan bakteri dengan umur kultur yang berbeda dan persentasi volume bakteri yang berbeda diharapkan dapat terlihat dari hasil pengujian Uji Kuat Tekan Bebas (UCT) sehingga dapat diketahui perubahan kekuatan tanah yang terjadi. Dari penambahan bakteri dengan umur kultur 3 hari dan 6 hari kemudian dilakukan perawatan selama 3, 7, 14 dan 28 hari lalu dilakukan pengujian Uji Kuat Tekan Bebas (UCT). Penambahan bakteri dengan persentasi 3%, 4.5% dan 6% dari berat tanah juga dilakukan dengan perawatan 14 dan 28 hari kemudian dilakukan Uji Kuat Tekan Bebas, diharapkan tren perkembangan atau perubahan kekuatan yang terjadi.