

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanah secara umum diklasifikasikan menjadi dua, yaitu tanah tidak kohesif dan tanah kohesif atau tanah berbutir kasar dan berbutir halus. Dalam teknik sipil dapat dibagi menjadi: batu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), dan lempung (*clay*). (Wesley 2010). Salah satu jenis tanah yaitu pasir, merupakan tanah dengan partikel berukuran sedang, lebih besar dari lempung namun lebih kecil dari kerikil atau sebesar 0,06 mm-2,00 mm. Pasir merupakan jenis tanah tidak kohesif, terdiri dari butiran-butiran yang lepas dan tidak saling terikat satu sama lain. Selain itu, tanah pasir memiliki nilai koefisien permeabilitas tinggi sehingga mudah dilalui oleh air.

Kondisi tanah pasir yang termasuk dalam jenis tanah tidak kohesif, menyebabkan tanah pasir memiliki daya dukung yang lemah dan sangat rentan terhadap perubahan, terutama terkait dengan kepadatan partikelnya. Karena daya dukung tanah pasir yang rendah, membuat bangunan yang didirikan di atasnya rentan terhadap penurunan, bahkan longsor. Hal ini tentu menjadi perhatian serius, mengingat banyak proyek konstruksi yang melibatkan tanah dengan kandungan pasir yang tinggi.

Daya dukung suatu tanah diperlukan untuk mengetahui kapasitas suatu tanah dalam menopang beban, diperlukan investigasi tanah untuk memperoleh parameter-parameter tanah yang relevan, seperti kepadatan, jenis tanah, dan kadar air. Selain itu, sifat mekanik tanah pasir seperti kuat geser dan kuat tekan memiliki faktor yang penting untuk memastikan stabilitas dan keamanan struktur yang akan dibangun di atasnya.

Untuk meningkatkan daya dukung tanah tersebut maka diperlukan stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah adalah salah satu rekayasa ilmu teknik sipil yang diperlukan untuk memperbaiki stabilitas tanah terutama terhadap daya dukung. Dan nilai kepadatan tanah merupakan salah satu parameter yang menunjukkan nilai stabilitas tanah. (Sinambela dkk. 2023) Stabilisasi tanah meliputi proses perbaikan tanah

secara mekanis atau penambahan suatu material tanah secara kimiawi, guna memperbaiki sifat-sifat fisis tanah dan sifat mekanis tanah.

Salah satu upaya untuk meningkatkan daya dukung tanah terkhusus tanah pasir, adalah dengan metode pencampuran pasir dengan mikrobakteri, penggunaan mikrobakteri terbukti dapat meningkatkan dan memperbaiki sifat fisis dan mekanis tanah. Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Alkadri dkk. 2022), biosementasi mikrobakteri jenis *Bacillus Subtilis* pada tanah organik dan kohesif dapat meningkatkan nilai kuat tekan tanah 5 kali lipat daripada tanah tanpa bakteri. Maka dari itu, pada penelitian ini digunakan bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai bahan campuran untuk jenis tanah yang berbeda yaitu pasir. *Bacillus subtilis* adalah bakteri gram positif yang tumbuh secara alami di tanah. Bakteri tersebut mampu menghasilkan enzim yang dapat mengubah sifat tanah, seperti meningkatkan kekuatan mekanik dan menurunkan kadar air. Salah satu parameter yang digunakan untuk mengukur sifat mekanis tanah adalah kuat tekan bebas dan kuat geser.

Penggunaan mikrobakteri sebagai bahan stabilisasi merupakan alternatif yang lebih potensial karena lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan menggunakan bahan-bahan kimia dan diharapkan dapat meningkatkan parameter mekanis tanah. Berdasarkan uraian tersebut, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “KARAKTERISTIK KUAT GESER DAN KUAT TEKAN BEBAS TANAH PASIR DENGAN STABILISASI BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, rumusan masalah yang akan dikaji adalah:

1. Bagaimana karakteristik fisis dan mekanis pasir yang digunakan pada penelitian?
2. Bagaimana pengaruh campuran bakteri *bacillus subtilis* terhadap nilai kuat geser pasir pada uji geser langsung?
3. Bagaimana pengaruh campuran bakteri *bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan bebas pasir pada uji kuat tekan bebas?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, maka tujuan penelitian dalam tulisan ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik fisis dan mekanis pasir yang digunakan pada penelitian.
2. Mengetahui pengaruh campuran bakteri *bacillus subtilis* terhadap nilai kuat geser pasir pada uji geser langsung.
3. Mengetahui pengaruh campuran bakteri *bacillus subtilis* terhadap nilai kuat tekan bebas pasir pada uji kuat tekan bebas.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang hasil stabilisasi yang optimum pada penelitian ini.
2. Hasil analisis dapat memberikan informasi bahwa bakteri *Bacillus subtilis* sebagai bahan yang ramah lingkungan dapat digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah jenis pasir yang diukur berdasarkan parameter geser langsung dan kuat tekan bebas.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Ruang lingkup dalam penelitian pengujian stabilisasi tanah ini dibuat untuk menghindari cakupan penelitian yang lebih luas agar penelitian dapat berjalan efektif, serta dapat mencapai sasaran yang diinginkan. Penelitian ini mencakup;

- Pengujian eksperimental laboratorium karakteristik mekanis tanah dengan teknologi biosementasi bakteri meliputi sifat fisis dan mekanik tanah pasir yang distabilisasi dengan bakteri.
- Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah pasir.
- Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis*.
- Menggunakan kultur bakteri 4 hari serta persentase bakteri yang digunakan yaitu 4%, 6% dan 8% dengan pemeraman 3, 7, 14, 28 hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Defenisi Tanah Pasir

Tanah adalah material alam yang terdiri dari campuran mineral anorganik, bahan organik, air, dan udara yang mengisi permukaan bumi. Material ini menjadi media tempat berdirinya segala jenis konstruksi manusia, mulai dari bangunan sederhana hingga infrastruktur besar seperti jembatan dan bendungan. Ukuran partikel yang sangat kecil pada tanah lempung dan lanau memberikan pengaruh dominan terhadap sifat-sifat tanah sehingga disebut tanah halus. Sebaliknya, ukuran partikel yang lebih besar pada pasir dan kerikil menjadikan tanah tersebut bersifat kasar. (Knappett dan Craig 2012)

Menurut Coduto dkk. (2016), tanah dapat dibagi menjadi dua kategori besar: kohesif dan non-kohesif. Pada tanah non-kohesif, seperti pasir bersih, partikel-partikel individu berinteraksi terutama melalui gesekan luncur dan saling mengunci. Sebaliknya, tanah kohesif, seperti lempung, juga dipengaruhi oleh gaya antar partikel lainnya yang seolah-olah membuat partikel-partikel tersebut saling menempel. Karena tanah kohesif, yang terdiri dari lempung dan lanau lempungan, berperilaku sangat berbeda dari tanah non-kohesif, yang terdiri dari lanau non-plastis, pasir, dan kerikil, sebagian besar metode analisis dan perancangan dalam teknik geoteknik, termasuk yang untuk perancangan fondasi yang disajikan dalam buku ini, hanya berlaku untuk tanah kohesif atau tanah non-kohesif.

Biasanya tanah terdiri dari campuran dari beberapa ukuran, biasanya terdiri dari dua rentang ukuran. Semakin panjang rentang gradasinya maka tanah tersebut akan semakin baik, sedangkan tanah yang mempunyai partikel-partikel yang melekat satu sama lain setelah dibasahi dan setelah ering diperlukan gaya yang cukup besar untuk meremas tanah tersebut, maka tanah tersebut disebut tanah kohesif. (Santosa dkk. 1998)

Menurut Hardiyatmo (2002) tanah pasir merupakan tanah yang butirannya dapat terlihat oleh mata, tetapi ukurannya kurang dari 2 mm. Tanah pasir disebut pasir kasar jika diameter butirannya berkisar antara 2 mm – 0.6 mm dan disebut pasir halus bila diameter ukuran butirannya 0.2 mm – 0.06 mm. Tanah granular,

seperti tanah pasir dan kerikil tidak memiliki kohesi atau mempunyai kohesi namun sangat kecil hingga dalam hitungan daya dukung sering diabaikan. Tanah granular memiliki permeabilitas yang besar, karena itu pada tiap-tiap pembebanannya, air selalu terdrainase dari rongga porinya. Maka, hitungan daya dukung pasir selalu didasarkan pada kondisi *drained* dengan penggunaan parameter tegangan efektif ($\phi'=0$ dan $c'=0$). Nilai sudut geser dalam pasir sangat dipengaruhi oleh kerapatan relative yang nilainya berkisar antara 28° - 45° , pada umumnya diambil sekitar 30° - 40° .

2.2 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem yang mengatur beberapa jenis tanah yang berbeda tetapi memiliki 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. Walaupun saat ini terdapat berbagai sistem klasifikasi tanah, tetapi tidak ada satupun dari sistem-sistem tersebut yang benar-benar memberikan penjelasan yang tegas mengenai segala kemungkinan pemakaiannya. Hal ini disebabkan karena sifat-sifat tanah yang sangat bervariasi. (Das 1995)

2.2.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Tekstur

Menurut Das (1995) 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. Tekstur tanah mengacu pada kenampakan permukaannya dan dipengaruhi oleh ukuran masing-masing partikel yang ada di dalamnya. Tabel 1 menunjukkan bahwa tanah dibagi menjadi kerikil, pasir, lanau, dan lempung berdasarkan dari ukuran partikelnya.

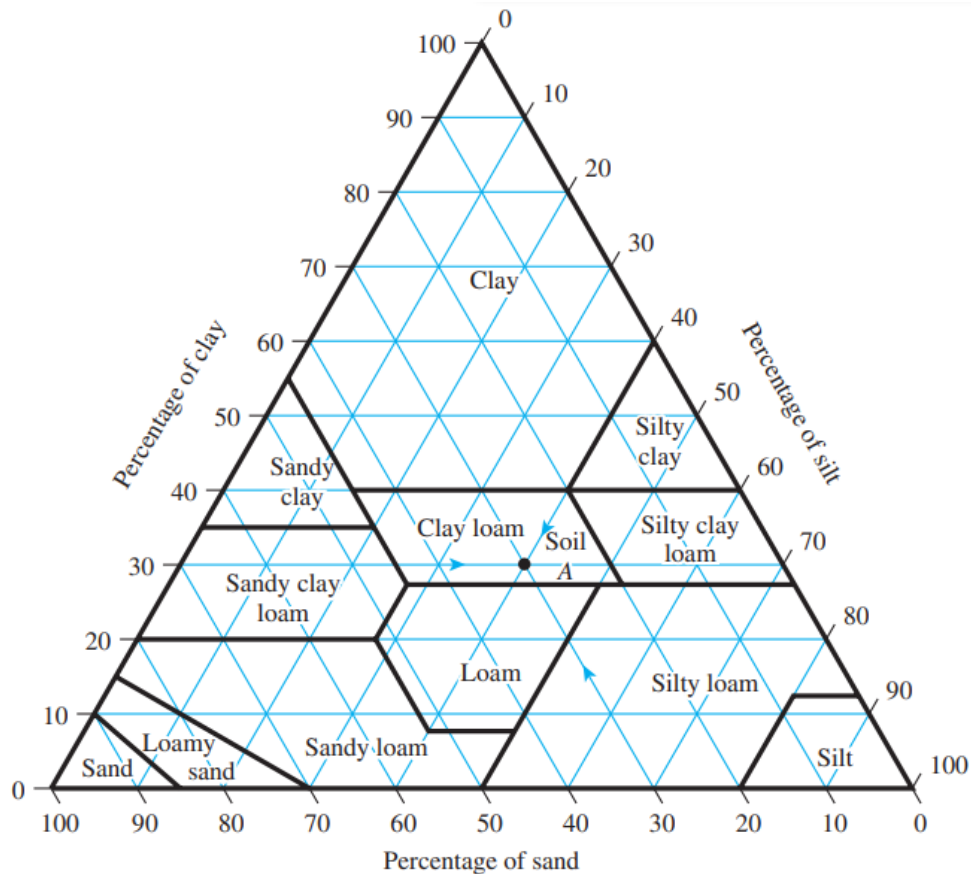
Tabel 1. Klasifikasi Ukuran Partikel

Nama Organisasi	Ukuran Butir (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	>2	2 – 0.06	0.06 – 0.002	< 0.002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	>2	2 – 0.05	0.05 – 0.002	< 0.002
Amerian Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	76.2 - 2	2 – 0.075	0.075 – 0.002	< 0.002
Unified Soil Classification System (USCS)	76.2 – 4.75	4.75 – 0.075	Butir halus (Lanau dan Lempung) < 0.075	

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition (2010)

Dalam kebanyakan kasus, tanah alami merupakan campuran partikel-partikel dari beberapa kelompok ukuran. Dalam sistem klasifikasi tekstur, tanah diberi nama berdasarkan komponen utamanya, seperti lempung berpasir, lempung kelanauan, dan seterusnya. Gambar 1 menunjukkan sistem klasifikasi tekstur yang dikembangkan oleh *U.S. Department of Agriculture (USDA)*. Metode klasifikasi ini didasarkan pada batas ukuran partikel seperti di bawah ini:

- Ukuran Pasir : diameter 2.0 hingga 0.05 mm
- Ukuran Lanau : diameter 0.05 hingga 0.002 mm
- Ukuran Lempung : diameternya lebih kecil dari 0.002 mm



Gambar 1. Klasifikasi menurut USDA

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition (2010)

Penggunaan grafik di atas paling mudah dipahami jika ditunjukkan dengan sebuah contoh. Jika ukuran distribusi partikel tanah A menunjukkan 30% pasir, 40% lanau, dan 30% lempung, klasifikasi tekstur dapat ditentukan dengan melihat arah paruh yang ditunjukkan pada Gambar 1. Tanah ini termasuk dalam zona *clay loam*. Dengan catatan bahwa grafik ini hanya berdasarkan tanah yang lolos saringan No. 10. Oleh karena itu, jika ukuran distribusi partikel suatu tanah sedemikian rupa sehingga persentase tertentu partikel tanah berdiameter lebih besar dari 2 mm, maka perlu dilakukan koreksi.

2.2.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Pada akhir tahun 1920-an, Biro Jalan Umum AS (sekarang Administrasi Jalan Raya Federal) melakukan penelitian ekstensif tentang penggunaan tanah terutama dalam konstruksi jalan lokal atau sekunder, yang disebut jalan "pertanian ke pasar". Dari penelitian tersebut, Sistem Klasifikasi Jalan Umum dikembangkan oleh

Hogentogler dan Terzaghi (1929). Sistem asli didasarkan pada karakteristik stabilitas tanah ketika digunakan sebagai permukaan jalan atau dengan perkerasan aspal tipis. Terdapat beberapa revisi sejak tahun 1929, dan yang terbaru pada tahun 1945 pada dasarnya adalah sistem AASHTO (1978) saat ini. Penerapan sistem ini telah diperluas secara signifikan; AASHTO menyatakan bahwa sistem tersebut harus berguna untuk menentukan kualitas relatif tanah untuk digunakan dalam tanggul, *subgrade*, *subbase*, dan *base*. (Holtz dan Kovacs 1981)

Klasifikasi AASHTO yang digunakan saat ini dapat dilihat di Tabel 2. Menurut sistem ini, tanah diklasifikasikan menjadi tujuh kelompok besar: A-1 hingga A-7. Tanah diklasifikasikan di kelompok A-1, A-2, dan A-3 adalah material kerikil 35% atau kurang dari partikel lolos saringan No. 200. Tanah yang 35% melewati saringan No. 200 dapat diklasifikasikan dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Jenis tanah ini biasanya bertipe lanau dan lempung. Berikut kriteria klasifikasi system ini:

1. Ukuran butir

- a. Kerikil: fraksi yang lolos saringan 75 mm (3") dan tertahan pada saringan No. 10 (2 mm).
- b. Pasir: fraksi yang lolos saringan No. 10 (2 mm) dan tertahan pada saringan No. 200 (0.075 mm).
- c. Lanau dan Lempung: fraksi yang lolos saringan No. 200 (0.075 mm).

2. Plastisitas

Istilah lanau digunakan bila fraksi halus tanah mempunyai indeks plastisitas 10 atau kurang. Istilah lempung digunakan apabila fraksi halusnya mempunyai indeks plastisitas 11 atau lebih.

3. Jika ditemukan batu bulat (*cobbles*) dan bongkahan besar (*boulders*) (ukuran lebih dari 75 mm), maka tidak termasuk dari bagian contoh tanah yang dijadikan dasar klasifikasi. Namun, persentase material tersebut tetap dicatat.

Untuk mengklasifikasikan tanah berdasarkan Tabel 2, data pengujian harus dipilih dari kiri ke kanan. Melalui proses eliminasi, kelompok pertama dari kiri yang cocok dengan data uji adalah kelompok yang benar.

Tabel 2. Klasifikasi Material *Subgrade* Jalan

Klasifikasi Umum	Material kerikil (35% atau kurang dari total sample yang melewati saringan 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 Saringan (persentase lolos)							
No.10	50 max						
No. 40	30 max	50 max	51 min				
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
Karakteristik fraksi yang lolos Saringan No. 40							
Batas Cair				40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks Plastisitas		6 max	NP	10 max	10 max	11 min	11 min
Jenis bahan penyusun secara umum	Batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil kelanauan atau kelepungan dan pasir			
Penilaian Subgrade secara umum	Excellent to good						
Klasifikasi Umum	Material Lanau-Lempung (lebih dari 35% dari total sampel yang melewati saringan No. 200)						
Klasifikasi Kelompok	A-4		A-5		A-6		A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Analisa Saringan (persentase lolos)							
No. 10							
No. 40							
No. 200	36 min		36 min		36 min		36 min
Karakteristik fraksi yang lolos Saringan No. 40							
Batas Cair	40 max		41 min		40 max		41 min
Indeks Plastisitas	10 max		10 max		11 min		11 min
Jenis bahan penyusun secara umum	Tanah kelanauan				Tanah kelepungan		
Penilaian Subgrade secara umum	Fair to poor						

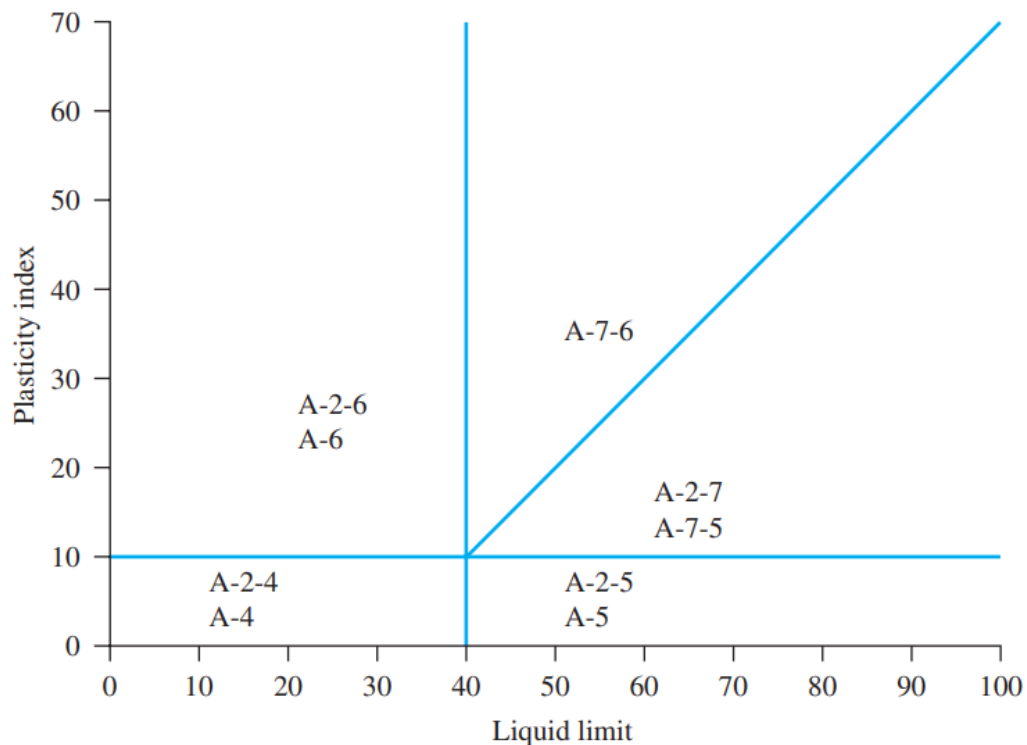
^a Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$ ^b Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition (2010)

Tabel 2 menunjukkan plot kisaran batas cair dan indeks plastisitas untuk tanah yang termasuk dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7. Untuk mengevaluasi kualitas suatu tanah sebagai bahan dasar jalan raya, kita juga harus memasukkan angka yang disebut Indeks Kelompok (*Group Index*) (GI) dengan kelompok dan subkelompok tanah. Indeks ini ditulis dalam tanda kurung setelah penulisan kelompok atau subkelompok. Persamaan GI dapat dilihat di bawah ini:

$$GI = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10) \quad (1)$$

Dimana: F_{200} = persentase lolos saringan No. 200
 LL = batas cair
 PI = indeks plastisitas



Gambar 2. Kisaran nilai batas cair dan indeks plastisitas dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition (2010)

Suku pertama pada persamaan (1) yaitu, $(F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)]$ adalah indeks golongan parsial yang ditentukan dari batas cair. Suku kedua yaitu, $0.01(F_{200} - 15)(PI - 10)$ adalah indeks kelompok parsial yang ditentukan dari indeks plastisitas. Berikut beberapa aturan dalam menentukan GI:

1. Jika persamaan (1) menghasilkan GI negatif, diambil 0
2. Group Index (GI) dihitung dari persamaan (1) dibulatkan ke bilangan bulat terdekat (misalnya GI 3.4 dibulatkan menjadi 3; GI 3.5 dibulatkan menjadi 4).
3. Tidak ada batas atas Group Index (GI).

4. Pada Gambar 2. Kisaran nilai batas cair dan indeks plastisitas dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7 menunjukkan indeks kelompok tanah yang termasuk golongan A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, dan A-3 adalah selalu 0.
5. Saat menghitung Group Index (GI) tanah yang termasuk golongan A-2-6 dan A-2-7, gunakan indeks GI untuk PI, atau

$$GI = 0.01(F_{200} - 15)(PI - 10) \quad (2)$$

Secara umum, kualitas kinerja suatu tanah sebagai bahan dasar Subgrade berbanding terbalik dengan *Group Index* (GI).

2.2.3 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

Sistem ini awalnya dikembangkan oleh Profesor A. Casagrande (1948) untuk digunakan dalam pembangunan lapangan terbang selama Perang Dunia II. Sistem ini dimodifikasi pada tahun 1952 oleh Profesor Casagrande, Biro Reklamasi A.S., dan Korps Insinyur Angkatan Darat A.S. agar sistem ini juga dapat diterapkan pada bendungan, pondasi, dan konstruksi lainnya. Dasar dari USCS adalah bahwa tanah berbutir kasar dapat diklasifikasikan menurut distribusi ukuran butirnya, sedangkan perilaku rekayasa tanah berbutir halus utamanya berkaitan dengan plastisitasnya. Dengan kata lain, tanah yang butiran halus (lanau dan lempung) tidak mempengaruhi kinerja rekayasa diklasifikasikan menurut karakteristik ukuran butirnya, dan tanah yang butiran halus mengontrol perilaku rekayasa diklasifikasikan menurut karakteristik plastisitasnya. Oleh karena itu, hanya analisis saringan dan batas Atterberg yang diperlukan untuk mengklasifikasikan tanah secara lengkap dalam sistem ini. (Holtz dan Kovacs 1981)

Klasifikasi berdasarkan USCS ini dapat dilihat pada Tabel 3. Sistem ini mengklasifikasikan tanah menjadi dua kategori besar:

1. Tanah berbutir kasar yaitu berkerikil dan berpasir dengan material sampel kurang dari 50% lolos saringan No. 200. Simbol grup dimulai dengan awalan G atau S. G singkatan dari kerikil (*gravel*), dan S untuk pasir (*sand*).
2. Tanah berbutir halus yang 50% atau lebih lolos saringan No. 200. Simbol kelompok dimulai dengan awalan M yang berarti lanau anorganik, C untuk

lempung anorganik, atau O untuk lanau organik dan lempung. Simbol Pt digunakan untuk gambut dan tanah organik tinggi lainnya.

Simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi adalah:

- W : bergradasi baik (*well graded*)
- P : bergradasi buruk (*poorly graded*)
- L : plastisitas rendah (batas cair kurang dari 50)
- H : plastisitas tinggi (batas cair lebih dari 50)

Tabel 3. *Unified Soil Classification System (USCS)* (Berdasarkan Material yang Lolos Saringan 76.2 mm)

Kriteria Penamaan Simbol Kelompok				Simbol Kelompok
Tanah berbutir kasar Lebih dari 50% yang tertahan Saringan No. 200	Kerikil Lebih dari 50% fraksi kasar yang tertahan Saringan No. 4	Kerikil bersih kurang dari 5% butir halus	$C_u \geq 4$ dan $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW
			$C_u < 4$ dan/atau $1 > C_c > 3^c$	GP
		Kerikil dengan butir halus lebih dari 12%	$PI < 4$ atau plot grafik di bawah garis "A" (Gambar 3)	GM
			$PI > 7$ dan plot grafik pada atau di atas garis "A" (Gambar 3)	GC
	Pasir 50% atau lebih fraksi kasar yang lolos Saringan No. 4	Pasir bersih kurang dari 5% butir halus	$C_u \geq 6$ dan $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW
			$C_u < 6$ dan/atau $1 > C_c > 3^c$	SP
		Pasir dengan butir halus lebih dari 12%	$PI < 4$ atau plot grafik di bawah garis "A" (Gambar 3)	SM
			$PI > 7$ dan plot grafik pada atau di atas garis "A" (Gambar 3)	SC
	Lanau dan Lempung Batas cair kurang dari 50	Inorganic	$PI > 7$ dan plot grafik pada atau di atas garis "A" (Gambar 3)	CL
			$PI < 4$ atau plot grafik di bawah garis "A" (Gambar 3)	ML
Organic		$\frac{\text{Batas cair} - \text{kering oven}}{\text{Batas cair} - \text{tidak kering}} < 0.75$; lihat Gambar 3; zona OL	OL	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos Saringan No. 200		Inorganic	PI plot grafik pada atau di atas garis "A" (Gambar 3)	CH
		PI plot grafik di bawah garis "A" (Gambar 3)	MH	
	Lanau dan Lempung Batas cair 50 atau lebih	Organic	$\frac{\text{Batas cair} - \text{kering oven}}{\text{Batas cair} - \text{tidak kering}} < 0.75$; lihat Gambar 3; zona OH	OH
Tanah Organik Tinggi	Terutama bahan organik, berwarna gelap, dan berbau organik			Pt

^aKerikil dengan kandungan 5-12% butir halus memerlukan dual simbol: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC

^bPasir dengan kandung 5-12% butir halus memerlukan dual simbol: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dJika $4 \leq PI \leq 7$ dan plot berada dalam area yang ditandai pada Gambar 3, gunakan dual simbol GC-GM atau SC-SM

^eJika $4 \leq PI \leq 7$ dan plot berada dalam area yang ditandai pada Gambar 3, gunakan dual simbol CL-ML

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition (2010)

Untuk klasifikasi yang tepat berdasarkan sistem ini, beberapa atau seluruh informasi berikut harus diketahui:

1. Persentase kerikil-yaitu, fraksi yang lolos saringan 76.2 mm dan tertahan saringan No. 4 (4.75 mm).
2. Persentase pasir-yaitu, fraksi yang lolos saringan No. 4 (4.75 mm) dan tertahan pada saringan No. 200 (0.075 mm).
3. Persentase lanau lempung-yaitu, fraksi yang lebih halus dari saringan No. 200
4. Koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien gradasi (C_c).
5. Batas cair dan indeks plastisitas bagian tanah yang lolos saringan No. 40.

Simbol golongan tanah berbutir kasar-berkerikil adalah GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM, dan GP-GC. Demikian juga dengan simbol tanah berbutir halus adalah CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML, dan Pt. Dalam menggunakan angka-angka ini, kita perlu mengingat bahwa pada tanah:

- Fraksi halus = persentase lolos saringan No. 200
- Fraksi kasar = persentase tertahan saringan No. 200
- Fraksi kerikil = persentase tertahan saringan No. 4
- Fraksi pasir = (persentase tertahan saringan No. 200) – (persentase tertahan saringan No. 4)

2.3 Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik atau properti tanah dasar pada suatu konstruksi sangat mempengaruhi berbagai elemen konstruksi yang akan dibangun di atasnya. Menurut Kusuma dkk. (2016), sifat fisik tanah yaitu sifat yang berhubungan dengan elemen penyusunan massa tanah yang ada. Properti tanah ditunjukkan dengan berbagai parameter yang disebut dengan indeks properti atau indeks sifat-sifat fisik tanah, seperti berat volume, kadar air, porositas, angka pori, derajat kejenuhan, derajat kepadatan, derajat kerapatan, berat jenis, analisis butiran, batas cair, batas plastis, batas susut dan sebagainya.

1. Kadar Air

Kadar air (*water content*) adalah perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s) di dalam massa tanah, yang dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (3)$$

dimana:

w = kadar air

W_w = berat air

W_s = berat tanah kering

2. Berat Jenis Tanah

Berat jenis atau Berat spesifik (*Specific Gravity*) yaitu perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada temperatur 4°C yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (4)$$

dimana:

G_s = berat jenis

γ_s = berat volume *solid*

γ_w = berat volume air

Pada Tabel 4 memperlihatkan berat jenis (G_s) pada berbagai jenis tanah.

Tabel 4. Berat Jenis (G_s) berbagai jenis tanah

Type of Soil	Specific Gravity (G_s)
<i>Gravel</i>	2.65 - 2.68
<i>Sand</i>	2.65 - 2.68
<i>Inorganic Soil</i>	2.62 - 2.68
<i>Organic Clay</i>	2.58 - 2.65
<i>Inorganic Clay</i>	2.68 - 2.75
<i>Humus</i>	1.37
<i>Peat</i>	1.25 - 1.80

Sumber: Hardiyatmo, Mekanika Tanah I (2002)

3. Angka Pori

Angka pori adalah perbandingan antara rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Semakin besar nilai angka pori maka daya dukung tanah semakin kecil.

Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (5)$$

dimana:

e = angka pori

V_v = volume pori

V_s = volume butir padat

4. Porositas

Porositas (*porosity*) adalah perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V). Nilai porositas dapat dinyatakan dalam satuan persen (%) atau dalam satuan desimal. Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (6)$$

5. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (S) adalah perbandingan antara volume air (V_w) dengan volume total rongga pori (V_v). Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (7)$$

Apabila tanah dalam kondisi jenuh air, maka nilai $S = 1$ (100%), jika tanah dalam keadaan kering maka nilai derajat kejenuhannya adalah 0 (0%). Nilai derajat kejenuhan ini dapat digunakan untuk mengklasifikasi konsistensi tanah yang dapat dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. Derajat kejenuhan dan konsistensi tanah

<i>Soil Consistency</i>	<i>Degree of Saturation (S)</i>
<i>Dry Soil</i>	0.00
<i>Slightly damp soil</i>	>0 – 0.25
<i>Moist soil</i>	0.26 – 0.50
<i>Very moist soil</i>	0.51 – 0.75
<i>Wet soil</i>	0.76 – 0.99
<i>Saturated soil</i>	1.00

Sumber: Hardiyatmo, Mekanika Tanah I (2002)

2.4 Sifat Mekanis Tanah

Menurut Rochmawati dan Irianto (2020), sifat mekanis tanah merupakan sifat perilaku dari struktur massa tanah pada dikenai suatu gaya atau tekanan yang dijelaskan secara teknis mekanis dengan tujuan memperbaiki sifat-sifat tanah.

2.4.1 Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah adalah upaya untuk merapatkan susunan butiran tanah melalui cara mekanis. Dengan mengurangi ruang pori di antara butiran tanah tanpa mengubah ukuran butirannya, pemadatan bertujuan untuk meningkatkan kepadatan tanah. Hal ini akan membuat tanah menjadi lebih stabil dan kuat.

Tanah dimanfaatkan sebagai pendukung konstruksi seperti pada *subgrade* jalan, lapisan dasar pondasi untuk berbagai jenis konstruksi, dan lain lain. Kemudian tanah juga digunakan secara langsung sebagai bahan konstruksi seperti *backfill* dinding penahan, *subbase* jalan, material bendung tipe urugan, material tanggul/pematang, dan lain sebagainya. Apabila kondisi tanah kurang baik, maka perlu dilakukan perbaikan, dan metode pemadatan adalah salah satu cara perbaikan tanah yang sering dilakukan, baik untuk tanah yang digunakan sebagai material bangunan maupun tanah yang dimanfaatkan sebagai lapisan dasar pendukung pondasi.

Pada dasarnya pemadatan tanah merupakan salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan geser, serta memperbaiki sifat-sifat fisis pada tanah. Terdapat beberapa rumus yang digunakan dalam pengujian ini, diantaranya:

1. Menghitung kadar air

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (8)$$

2. Menghitung kadar air akhir

$$\omega_{akhir} = \omega_{awal} + \left(\frac{\omega_{awal} + \text{penambahan air}}{\text{berat tanah}} \right) \times 100 \quad (9)$$

3. Menghitung berat volume basah

$$\gamma = \frac{W_w}{V_{mould}} \quad (10)$$

4. Menghitung berat kering

$$W_{dry} = \frac{W_w}{1 + \left(\frac{\omega}{100} \right)} \quad (11)$$

5. Menghitung berat volume kering

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (12)$$

6. Menghitung berat volume total

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} = (\gamma_d) \times \left(1 + \frac{\omega}{100}\right) \quad (13)$$

Kepadatan tanah dapat diukur dengan nilai berat volume kering yang dapat dicapai (γ_d). Pada proses pemadatan akan memperlihatkan fenomena bahwa “berat volume kering” akan bertambah seiring penambahan kadar air. Pada kadar air nol ($w = 0$), berat volume tanah basah (γ_b), akan sama dengan berat volume tanah kering (γ_d). Apabila kadar air ditambahkan secara berangsur-angsur dan pemadatan tetap dilakukan dengan nilai usaha pemadatan yang sama, maka berat butiran tanah per satuan volume juga akan bertambah.

2.4.2 Kuat Geser Langsung (*Direct Shear Test*)

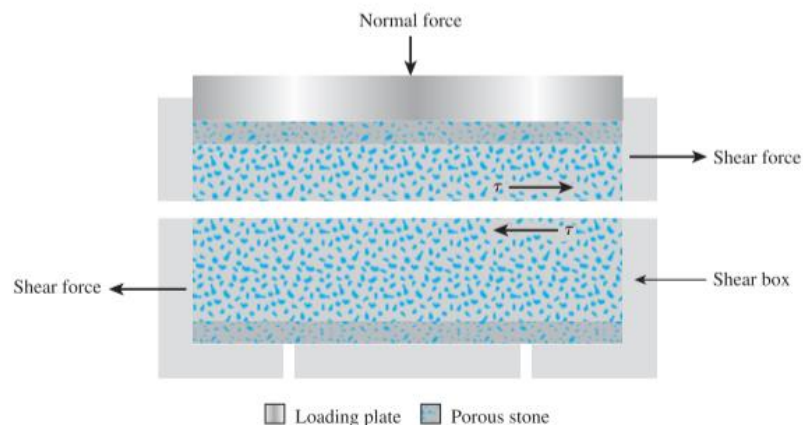
Kekuatan geser tanah merupakan aspek terpenting dalam rekayasa geoteknik. Daya dukung pondasi dangkal atau dalam, stabilitas lereng, desain dinding penahan tanah, dan secara tidak langsung desain perkerasan jalan semuanya dipengaruhi oleh kuat geser tanah pada suatu lereng, di belakang dinding penahan tanah, atau penopang pondasi atau perkerasan. Struktur dan lereng harus stabil dan aman terhadap keruntuhan total ketika menerima beban maksimum yang diantisipasi. Oleh karena itu, metode analisis kesetimbangan batas secara konvensional digunakan dalam perancangannya, dan metode ini memerlukan penentuan ketahanan geser batas (kekuatan geser) tanah. (Holtz dan Kovacs, 1981)

Menurut Bowles (1996), kekuatan tanah untuk menahan gaya geser dipengaruhi oleh dua parameter utama: kohesi (c), yang merupakan gaya tarik-menarik antara partikel tanah, dan sudut gesekan dalam (ϕ), yang mewakili besarnya gaya geser yang diperlukan untuk membuat partikel tanah bergerak relatif satu sama lain. Proses seperti pecahnya butir, resistensi terhadap berguling, dan faktor lainnya secara implisit termasuk dalam kedua parameter ini. Dalam bentuk persamaan, kekuatan geser dalam bentuk tegangan total adalah:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (14)$$

Keterangan:

- τ = kuat geser tanah (kN/m^2)
- σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2)
- c = kohesi tanah efektif (kN/m^2)
- φ = sudut geser dalam tanah ($^\circ$)



Gambar 3 Diagram susunan sampel uji geser langsung

Sumber: Das, Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition, (2010)

Pada diagram alat uji geser langsung ditunjukkan pada Gambar 3, peralatan uji terdiri dari sebuah kotak geser logam tempat sampel tanah ditempatkan. Sampel tanah dapat berbentuk bujur sangkar atau lingkaran. Ukuran sampel yang umumnya digunakan adalah sekitar 51 mm x 51 mm atau 102 mm x 102 mm dengan tinggi sekitar 25 mm. Kotak tersebut terbagi horizontal menjadi dua bagian. Gaya normal pada sampel diterapkan dari bagian atas kotak geser. Tegangan normal pada sampel dapat mencapai 1050 kN/m^2 . Gaya geser diterapkan dengan menggerakkan salah satu bagian kotak relatif terhadap bagian lainnya untuk menyebabkan kegagalan pada sampel tanah. (Das, 2010)

Seperti yang diketahui pengujian yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan sampel tanah yang berupa tanah pasir. Salah satu karakteristik utama tanah pasir ialah memiliki nilai kohesi yang kecil dan permeabilitas yang tinggi. Kedua karakteristik ini membuat tanah pasir termasuk ke dalam jenis material tanah friksi. Tanah friksi adalah jenis tanah yang kekuatan geser utamanya berasal dari

gesekan antar partikel tanah. Partikel-partikel tanah ini, dapat berupa pasir, kerikil, atau bahkan butiran yang lebih besar, saling bersentuhan dan menciptakan gaya gesek ketika ada gaya yang berusaha menggesernya satu sama lain.

Menurut Holtz dan Kovacs (1981), karena pasir merupakan material "friksi", diharapkan faktor-faktor yang meningkatkan ketahanan gesekan pasir akan menyebabkan peningkatan sudut geser dalam. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi yaitu:

- Angka pori atau kepadatan relatif
- Bentuk partikel
- Distribusi ukuran butir
- Kekasaran permukaan partikel
- Air
- *Intermediate principal stress* (σ_2)
- Ukuran partikel
- *Overconsolidation* atau pratekan

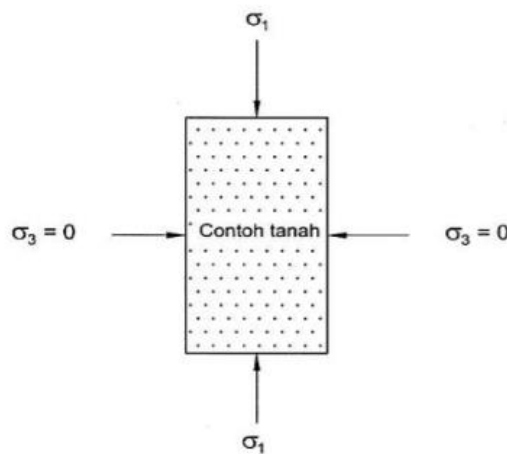
Angka pori tanah berhubungan dengan kepadatan pasir, hal ini merupakan parameter terpenting yang mempengaruhi kekuatan pasir. Secara umum, untuk pengujian *undrained* baik dalam peralatan uji geser langsung atau triaksial, semakin rendah angka pori (densitas lebih tinggi atau kepadatan relatif lebih tinggi), semakin tinggi kekuatan gesernya.

2.4.3 Uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

Unconfined Compression Test adalah pengujian laboratorium untuk mengukur seberapa besar kuat dukung tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai tanah tersebut terpisah dari butiran-butirannya dan juga regangan tanah akibat tekanan tersebut. Metode uji kuat tekan bebas tanah kohesif dimaksudkan untuk menentukan kuat tekan bebas contoh tanah yang memiliki kohesi, baik tanah tidak terganggu (*undisturbed*), dicetak ulang (*remoulded*) maupun contoh tanah yang dipadatkan (*compacted*). Uji tekan bebas termasuk hal yang khusus dari uji triaksial *unconsolidated-undrained* (tak terkonsolidasi-tak terdrainase).

Hardiyatmo (2002) menunjukkan gambar skematik dari prinsip pembebanan dalam percobaan ini pada Gambar 4. Kondisi pembebanan sama dengan yang

terjadi pada uji triaksial, hanya yang membedakan adalah tegangan selnya nol ($\sigma_3 = 0$).



Gambar 4. Skema uji tekan bebas

Sumber: Toyeb dkk. (2017)

Percobaan ini merupakan suatu cara pemeriksaan untuk mendapatkan daya dukung tanah. Dalam percobaan ini didapatkan kuat tekan bebas dari suatu tanah yaitu besarnya tekanan aksial yang diperlukan untuk menekan suatu silinder tanah sampai mengalami keruntuhan atau sebesar 20% dari tinggi tanah mengalami perpempendekan bila tanah tersebut tidak runtuh atau pecah. Menurut Hardiyatmo (2002) pada saat keruntuhan, karena $\sigma_3 = 0$ maka:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta \sigma_f = \Delta \sigma_f = q_u \quad (15)$$

dengan q_u adalah kuat tekan bebas (*unconfined compression strength*). Secara teoritis, nilai $\Delta \sigma_f$ pada tanah lempung jenuh seharusnya sama seperti yang diperoleh dari pengujian-pengujian triaksial *unconsolidated-undrained* dengan benda uji yang sama. Sehingga,

$$c_u = \frac{q_u}{2} \quad (16)$$

dimana:

- σ_1 = tegangan utama *major*, tegangan aksial (kg/cm^2)
- σ_3 = tegangan utama *minor*, tegangan sel (kg/cm^2)
- $\Delta \sigma_f$ = tegangan deviator (kg/cm^2)

- q_u = kuat tekan bebas (kg/cm^2)
 c_u = kohesi tanah *undrained* (kg/cm^2)

Analisis perhitungan pengujian *unconfined compression test*, rumus-rumus yang digunakan untuk pengujian tekan bebas adalah sebagai berikut:

- Regangan Aksial (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{h} \quad (17)$$

- Tegangan Normal Rata-rata (σ_r)

$$\sigma_r = \frac{P}{A_r} \quad (18)$$

- Luas penampang benda uji rata-rata/terkoreksi (A_r)

$$A_r = \frac{A_o}{1 - \varepsilon} \quad (19)$$

dimana:

- ε = regangan aksial (%)
 σ_r = tegangan normal rata-rata (kg/cm^2)
 A_r = luas penampang rata-rata (cm^2)
 h = tinggi benda uji semula (cm)
 P = beban (kg)
 A_o = luas penampang (cm^2)

2.5 Stabilisasi Tanah

Menurut Bowles (1996) stabilisasi tanah adalah suatu proses yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan ketahanan tanah terhadap berbagai pengaruh, seperti beban, air, dan perubahan cuaca. Tujuan utama stabilisasi tanah adalah:

- Meningkatkan daya dukung tanah, agar tanah mampu menahan beban yang lebih berat.
- Menurunkan tingkat kompresibilitas, agar tanah tidak mudah memadat atau menyusut.
- Meningkatkan stabilitas lereng, untuk mencegah terjadinya tanah longsor.

- Meningkatkan ketahanan terhadap air, agar tanah tidak mudah tererosi atau berubah sifat akibat pengaruh air.

Terdapat beberapa metode dalam stabilisasi tanah atau dalam meningkatkan parameter-parameter tanah sebagai berikut:

1. **Stabilisasi mekanis.** Metode ini gradasi ukuran butir tanah pada lokasi diubah. Jika tanah di lokasi didominasi oleh kerikil, bahan pengikat ditambahkan (bahan yang melewati saringan No. 40 atau No. 100) yang berguna untuk mengisi kekosongan dan meningkatkan kohesi.
2. **Pemadatan (*compaction*).** Metode ini merupakan cara yang paling ekonomis untuk mencapai kepadatan tanah yang baik untuk tanah non kohesif maupun tanah kohesif.
3. ***Preloading*.** Langkah ini diambil untuk mengurangi penurunan tanah di masa depan dan juga dapat meningkatkan kekuatan geser. Metode ini biasanya dikombinasi dengan *drainage*.
4. ***Drainase (drainage)*.** Cara ini dilakukan untuk menghilangkan air tanah dan mempercepat penurunan dengan *preloading*. Hal ini juga dapat meningkatkan kekuatan geser, bergantung pada kadar air.
5. ***Densification*.** Metode ini menggunakan peralatan yang bergetar dan sangat berguna pada pasir, pasir kelanauan, dan kerikil kepasiran.
6. **Penggunaan perkuatan *in situ*.** Pendekatan ini digunakan dengan batu, pasir, semen, atau kapur kolom. Metode ini menghasilkan apa yang biasa disebut dengan tanah komposit. Kadang-kadang sejumlah kecil serat plastik atau *fiberglass* pendek dapat dicampur dengan tanah untuk meningkatkan kekuatan tanah.
7. ***Grouting*.** Metode ini dilakukan dengan cara menyuntikkan zat kental cair, kadang bercampur dengan sejumlah volume tanah. Umumnya, cairan yang digunakan adalah campuran air dan semen atau air dan kapur, dan/atau dengan bahan tambahkan seperti pasir halus, tanah lempung *bentonite*, atau *fly ash*.
8. ***Geotextiles*.** Penggunaan geotekstil berfungsi sebagai penguatan tetapi bisa juga berfungsi untuk tujuan lain sesuai dengan produk yang digunakan.

9. **Stabilisasi kimiawi.** Metode ini jarang digunakan karena memakan lebih banyak biaya. Secara umum, bahan kimia yang digunakan adalah asam fosfat, kalsium klorida, dan lain-lain.

2.6 Bakteri *Bacillus Subtilis*

Menurut Sinambela dkk. (2023) Bakteri *Bacillus Subtilis* adalah zat mikro-organisme yang menghasilkan CaCO_3 yang dapat mengisi kekosongan (pori) sekaligus sebagai pengikat partikel tanah. Pengendapan kalsium karbonat (CaCO_3) bertindak sebagai pengikat kristal antar sel untuk merangsang proses sementasi diantara butiran tanah.

Pada awalnya, bakteri *Bacillus subtilis* dikenal dengan nama yang berbeda yaitu, *Vibri Subtilis*. Namun, pada tahun 1872, seorang ilmuwan bernama Ferdinand Cohn mengubah namanya menjadi *Bacillus subtilis*. Nama ini dipilih karena karakteristik bakteri ini yang dianggap 'baik' atau menguntungkan. Bakteri ini berbentuk batang dan memiliki lapisan pelindung yang khas, membuatnya tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras. Sel *Bacillus subtilis* biasanya berbentuk batang, dengan panjang sekitar 4-10 mikrometer (μm) dan berdiameter 0,25-1,0 μm . Bakteri lain dari genus *Bacillus* yaitu *Bacillus subtilis* ini dapat membentuk endospora, guna bertahan hidup dalam kondisi lingkungan yang sekalipun dari suhu dan pengeringan. (Bergey, 2010)

Bacillus subtilis merupakan bakteri berukuran 0.5-2.5 x 1.2-10 mikron, tersusun dalam sepasang atau bentuk rantai, dimana selika meliputi seluruh permukaan sel. Dalam kondisi kritis mampu membentuk spora. Dapat tumbuh pada suhu maksimum 25-75°C. Dapat ditemukan di udara, air, tanah, bulu binatang atau bangkai, pH optimum tumbuh 5.5-8.5 (Cheng dkk 2016). Berikut merupakan klasifikasi dari bakteri *Bacillus Subtilis*:

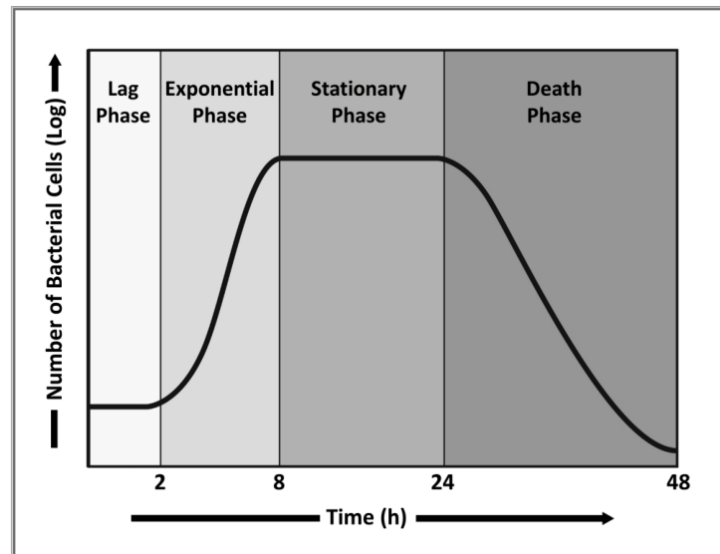
- Kingdom: *Procaryorae*
- Divisi: *Firmicutes*
- Kelas: *Schizomycetes*
- Bangsa (Ordo): *Eubacteriales*
- Suku (Familia): *Bacillaceae*
- Marga (Genus): *Bacillus*

- Jenis (Species): *Bacillus Subtilis*

Mujah dkk. (2019) menuliskan bahwa bakteri *Bacillus* mampu memproduksi enzim *hydrolytic* untuk memecah polisakarida, asam nukleat dan lemak yang memungkinkan organisme menggunakannya sebagai sumber karbon dan elektron. Selain itu bakteri genus *Bacillus* juga mengandung enzim *protease*, *lipase*, *amilase*, dan *cellulose*. Selanjutnya dijelaskan bahwa *Bacillus* termasuk bakteri denitrifikasi, juga tergolong bakteri amonifikasi mampu mengurai penumpukan senyawa nitrogen. (Jeong dkk. 2017)

Penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* dilakukan dengan memperbanyak mikroba atau bakteri dengan metode kultur. Kultur mikrobiologi (*Culture*) adalah metode memperbanyak mikroba pada media kultur dengan pembiakan di laboratorium yang terkendali. Menurut Febyayuningrum dkk. (2021) kultur bakteri merupakan pembiakan mikroorganisme di dalam laboratorium yang memerlukan media berisi zat hara sebagai sumber karbon, biakan berisi air, sumber energi, nitrogen, sulfur, fosfat, oksigen, hidrogen serta unsur-unsur lain, pada bahan dasar media dapat pula ditambahkan faktor pertumbuhan berupa asam amino, vitamin atau nukleotida zat hara serta lingkungan pertumbuhan yang sesuai dengan mikroorganisme.

Kurva pertumbuhan bakteri dapat dipisahkan menjadi empat fase utama: fase *lag* (fase lamban), fase pertumbuhan eksponensial (fase pertumbuhan cepat), fase *stationer* (fase statis) dan fase *decline* (penurunan populasi). Fase-fase tersebut mencerminkan keadaan bakteri dalam kultur pada waktu tertentu. Di antara setiap fase terdapat suatu periode peralihan di mana waktu dapat berlalu sebelum semua sel memasuki fase yang baru. (Rochimi Setiawati dkk. 2014) yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva pertumbuhan bakteri

Sumber: Garrison dan Huigens (2016)

Menurut Purnama (2023), proses pembelahan sel maupun pertumbuhan bertahap suatu mikroorganisme dimulai dari awal pertumbuhan sampai dengan berakhirnya aktivitas yang terdiri atas empat fase utama yaitu:

- **Fase Lag atau Fase Adaptasi.** Fase lag atau fase adaptasi merupakan fase paling awal atau merupakan fase penyesuaian/ pengaturan suatu aktivitas mikrob dalam lingkungan barunya. Pada fase ini penambahan massa atau penambahan jumlah sel belum begitu terjadi, sehingga kurva pertumbuhan pada fase ini pada umumnya mendatar. Selang waktu fase lag tergantung kepada kesesuaian pengaturan aktivitas dan lingkungannya.
- **Fase Eksponensial atau Logaritmik.** Fase eksponensial atau logaritmik merupakan fase peningkatan aktivitas perubahan bentuk maupun penambahan jumlah mencapai kecepatan maksimum sehingga kurvanya dalam bentuk eksponensial. Peningkatan aktivitas tersebut harus diimbangi oleh banyak faktor, antara lain faktor biologi dan non biologi. Termasuk faktor biologi seperti bentuk dan sifat mikroorganisme terhadap lingkungan yang ada, asosiasi kehidupan di antara organisme yang bersangkutan, sedangkan yang termasuk faktor non-biologi seperti kandungan nutrisi di dalam medium pertumbuhan, suhu, dan pH.

- **Fase Stasioner.** Fase ini merupakan fase terjadinya keseimbangan penambahan aktivitas dan penurunan aktivitas atau dalam pertumbuhan koloni terjadi keseimbangan antara yang mati dengan penambahan individu. Oleh karena itu fase ini membentuk kurva datar. Fase ini juga diakibatkan karena sumber nutrisi yang semakin berkurang, terbentuknya senyawa penghambat, dan faktor lingkungan yang mulai tidak menguntungkan.
- **Fase *Decline* atau Kematian.** Fase kematian terjadi ketika laju kematian lebih tinggi dari laju pertumbuhan. Beberapa faktor yang memengaruhinya adalah suhu, kelembaban, cahaya, zat kimia, dan nutrisi.

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai bahan stabilisasi tanah telah dilakukan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Penelitian Terdahulu Terkait Topik Penelitian

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
Megawati Cahaya Putri A. Torano (2022)	Karakteristik Kuat Geser Tanah Sedimen yang Distabilisasi Dengan Bakteri <i>Bacillus Subtilis</i>	Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik tanah sedimen yang akan digunakan dalam penelitian, untuk mengetahui pengaruh variasi campuran bakteri bacillus subtilis terhadap karakteristik tanah sedimen, untuk mengetahui pengaruh masa pemeraman terhadap peningkatan nilai parameter kuat geser tanah sedimen terstabilisasi bakteri bacillus subtilis.	Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Muhammad Nurdin, Yusep Muslih Purwana, Bambang Setiawan (2017)	Pengaruh Mikrobakteri <i>Bacillus Subtilis</i> dan <i>Psidomonas SP</i> Terhadap Penurunan Permeabilitas dan Peningkatan Kuat Geser Tanah Pasir	Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh mikrobakteri terhadap permeabilitas tanah dan meningkatkan nilai kuat geser tanah setelah proses inokulasi selesai. Hasil penelitian ini didukung dengan foto scan hasil uji SEM untuk membuktikan bahwa mikrobakteri dapat hidup pada tanah pasir. Hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa inokulasi mikrobakteri sangat berpengaruh terhadap permeabilitas dan kuat geser.	e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL
Hasriana, Lawalenna Samang, M. Natsir Djide, Tri Harianto (2018)	<i>A Study on Clay Soil Improvement with Bacillus Subtilis Bacteria as The Road Subbase Layer</i>	Tujuan dari penelitian ini adalah menyelidiki daya dukung tanah lempung-plastisitas tinggi dengan stabilisasi bakteri (<i>Bacillus Subtilis</i>). Pertumbuhan bakteri selama 6 hari digunakan sebagai bahan stabilisasi. Penilaian daya dukung didasarkan pada nilai kuat tekan bebas, CBR (<i>California Bearing Ratio</i>), dan modulus reaksi tanah sebagai lapisan <i>subbase</i> .	<i>International Journal of GEOMATE</i> , 114-120, 15(52)

Z E Hashim, L.A Alzubaidi, A.T. Al- Madhhachi (2020)	<i>The Influence of Microbiolog y on Soil Aggregation Stability</i>	Penelitian ini menyelidiki pengaruh dekomposisi bakteri (<i>Bacillus</i> sp.) dan faktor-faktor agregasi biologis (bahan organik, presipitasi kalsium karbonat mikrobial) pada berbagai tahap terhadap stabilitas agregat tanah. Eksperimen dilakukan pada waktu tanam yang berbeda yaitu 2, 5, dan 8 minggu. Sampel tanah dibandingkan antara kontrol (tanah murni) dengan tanah yang diberi perlakuan dengan bakteri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas bakteri berperan penting dalam pembentukan makro-agregat. Namun demikian, pengaruh bahan organik terhadap stabilitas agregat tanah juga penting, yang mungkin terkait dengan aktivitas mikrobial bakteri dalam memecah bahan organik menjadi mineral organik yang terhubung dengan partikel tanah untuk membentuk mikro-agregat yang stabil.	<i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i>
Alkadri, Rahman Djamaluddin , Tri Harianto, Ardy Arsyad (2022)	Pengaruh Biosementas i Bakteri Terhadap Karakteristik Campuran Tanah Kohesif dan Organik	Studi ini bertujuan mengevaluasi karakteristik fisik, dan mekanis tanah dengan metode biosementasi bakteri, pencampuran tanah kohesif dan tanah organik, dengan variasi penambahan tanah organik 10.20 dan 30%, penambahan larutan bakteri 6%, variasi umur kultur bakteri yaitu 4 hari dengan pemeraman 3,7,14 dan 28 hari. Dari hasil pengujian didapatkan, Tanah kohesif dan organik 10% yang di stabilisasi bakteri memiliki nilai kuat tekan sebesar 28,74 kN/m ³ , atau meningkat 5 kali dari tanah tanpa stabilisasi bakteri, variasi 20% tanah organik 20.16 kN/m ³ , dan variasi 30 % nilai tekan 17.92 kN/m ³ , atau meningkat 9 kali dari tanah tanpa stabilisasi.	Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2022, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiya h Surakarta