

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mengacu pada beberapa studi sebelumnya yang disajikan pedoman dalam pelaksanaannya. Berikut merupakan ringkasan penelitian terdahulu yang relevan:

1. Athaya Zhafirah, Muslimah Asril Holifatil tahun 2021 dengan judul **“Pengaruh Penambahan Abu Daun Bambu dan Semen Terhadap Stabilitas Tanah”** diterbitkan oleh Sekolah Tinggi Teknologi Garut. Penelitian ini mengkaji efektivitas penambahan abu daun bambu (BLA) dan semen sebagai stabilisator tanah, khususnya pada tanah pasir berlanau dengan plastisitas sedang. Melalui pengujian laboratorium seperti sifat fisik, pemadatan, dan CBR, ditemukan bahwa kombinasi 5% semen dan 5% BLA secara signifikan meningkatkan berat isi kering maksimum dan nilai CBR, menunjukkan peningkatan daya dukung dan kekuatan tanah. Penambahan BLA juga berkontribusi pada penurunan kadar air optimum dan berpotensi mengurangi penggunaan semen serta emisi gas rumah kaca. Meskipun secara umum campuran semen dan BLA efektif meningkatkan kekuatan, potensi pengembangan (swelling) tetap menjadi perhatian; namun, kombinasi optimal 5% semen dan 5% BLA terbukti efektif dalam menurunkan potensi pengembangan tersebut. Penting juga dicatat bahwa penambahan BLA yang terlalu tinggi justru dapat meningkatkan potensi pengembangan tanah. Kesimpulannya, variasi 5% semen dan 5% BLA merupakan kombinasi yang efektif untuk meningkatkan stabilitas tanah. Berdasarkan penelitian ini, kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut:

- 1) Klasifikasi tanah menurut USCS termasuk ke dalam kelompok SC (pasir berlanau, campuran pasir-lempung) dengan plastisitas sedang. Sedangkan menurut AASHTO, sampel tanah termasuk ke dalam kelompok A-2-7 (kerikil atau pasir lanauan atau lempungan).

- 2) Kadar air optimum pada sampel S0 (tanah asli) adalah 36,62% dengan berat isi kering maksimum 1,20 gram/cm³. Setelah tanah distabilisasi, berat isi kering maksimum menjadi 1,24% pada sampel S1 (tanah asli + 5% semen + 5% abu daun bambu). Nilai kadar air optimum mengalami penurunan seiring bertambahnya variasi penambahan abu daun bambu.
 - 3) Nilai CBR sampel S0 (tanah asli) diperoleh 8,94% dengan potensi *swelling* 0,380%, sedangkan nilai CBR pada sampel S1 (tanah asli + 5% semen + 5% abu daun bambu) diperoleh 31,84% dengan potensi *swelling* 0,303%. Hal ini menunjukkan bahwa pada sampel S1 mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap nilai CBR untuk kekuatan tanah.
 - 4) Potensi *swelling* yang terjadi setelah penambahan bahan stabilisator meningkat dari potensi rendah menjadi potensi sedang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan semen dan abu daun bambu kurang mampu mengurangi potensi pengembangan *swelling*.
2. Harley Tamme, dkk tahun 2023, dengan judul **“Pengaruh Penambahan Daun Bambu pada Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Lempung”** diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil, Prodi Studi Rekayasa Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Samarinda. Penelitian ini menyelidiki efektivitas abu daun bambu sebagai bahan stabilisasi untuk tanah lempung lunak berklasifikasi A-7-5, dengan tujuan meningkatkan sifat fisik dan mekanisnya untuk keperluan konstruksi jalan. Abu daun bambu, yang dibakar pada suhu 600°C dan kaya akan silika serta pozzolan, ditambahkan ke tanah dalam variasi 0%, 2%, 6%, dan 10% dari berat tanah kering, dengan waktu pemeraman 0, 7, dan 21 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu daun bambu secara signifikan memperbaiki karakteristik tanah. Indeks plastisitas tanah menurun hingga 15,89% pada penambahan 10% abu. Kekuatan tekan bebas (UCS) mencapai puncaknya pada penambahan 2% abu daun bambu dengan pemeraman 21 hari, mencapai 2,516 kg/cm². Demikian pula, nilai California Bearing Ratio (CBR) tidak rendaman optimal pada variasi 2% abu daun bambu setelah 21

hari pemeraman, yaitu sebesar 12%. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa abu daun bambu merupakan bahan stabilisasi tanah yang efektif dan ramah lingkungan, dengan penambahan 2% dan pemeraman 21 hari memberikan hasil optimal dalam meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah lempung.

3. William Wijaya tahun 2021, dengan judul **“Pengaruh Stabilisasi Abu Daun Bambu dan Semen Terhadap Kembang Susut (*Swelling*) Tanah Lempung Ekspansif”** diterbitkan oleh Program Studi Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta. Penelitian ini mengkaji stabilisasi tanah lempung ekspansif di Indonesia, yang memiliki potensi kembang susut tinggi, menggunakan kombinasi abu daun bambu dan semen. Tanah lempung asli menunjukkan nilai swelling sebesar 15,71%. Dengan penambahan semen sebesar 12% dari massa tanah dan variasi persentase abu daun bambu (0% hingga 100% dari berat semen), ditemukan bahwa abu daun bambu, yang kaya akan SiO₂ (79,68%) dan tergolong pozzolan kelas N, sangat efektif dalam mengurangi potensi kembang susut. Penambahan 100% abu daun bambu bersama semen berhasil menurunkan nilai swelling secara signifikan menjadi sekitar 4,33%, sementara campuran 75% abu daun bambu dan semen menurunkannya menjadi sekitar 6,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi semen dan abu daun bambu dapat meningkatkan kestabilan tanah lempung ekspansif dan menawarkan alternatif stabilisasi tanah yang ramah lingkungan, meskipun abu daun bambu belum sepenuhnya dapat menggantikan semen. Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium, kesimpulan dari jurnal ini adalah sebagai berikut:

- 1) Sampel tanah asli diklasifikasikan sebagai tanah lempung berplastisitas tinggi (CH) dengan kandungan mineral montmorillonite sebesar 67,40% dan nilai *swelling* sebesar 15,71%. Hal ini menempatkan tanah tersebut dalam kelompok tanah dengan potensi kembang susut yang tinggi.
- 2) Penggunaan abu daun bambu dan semen sebagai bahan stabilisasi berhasil mengurangi nilai kembang susut tanah. Hal ini dibuktikan

dengan penurunan nilai kembang susut *swelling* pada semua variasi sampel yang diuji.

4. Edgar V. Kaunang, dkk tahun 2025, dengan judul **“Analisis Kestabilan Tanah dengan Campuran Bakteri *Bacillus subtilis* Di Daerah Aktivitas Geotermal Lahendong”** diterbitkan oleh Prodi Teknik Lingkungan, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia. Berdasarkan hasil penelitian, tanah geotermal yang digunakan memiliki karakteristik fisik berupa kadar air 8.86%, berat jenis 2.5 gr/cm³, dan diklasifikasikan sebagai tanah berpasir dengan butiran kasar (SW) atau A-2-7. Penambahan bakteri *Bacillus subtilis* terbukti secara signifikan meningkatkan daya dukung tanah, ditunjukkan oleh peningkatan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ°) yang berbanding lurus dengan konsentrasi larutan bakteri yang ditambahkan. Selain itu, peningkatan masa pemeraman juga berkontribusi pada peningkatan kuat geser tanah yang distabilisasi, dengan penambahan bakteri 15% dan pemeraman 14 hari memberikan kenaikan yang paling besar dibandingkan tanah tanpa stabilisasi.
5. Andi Marini Indriani, dkk tahun 2023, dengan judul **“Pengaruh Siklus Basah Kering terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi dengan Bakteri *Bacillus subtilis*”** diterbitkan oleh Teknik Sipil, Universitas Balikpapan, Indonesia. Penelitian ini secara komprehensif mengkaji efektivitas stabilisasi tanah lempung menggunakan bakteri 6 melalui metode biosementasi, menunjukkan peningkatan signifikan pada nilai California Bearing Ratio (CBR) baik pada kondisi tanpa perendaman (unsoaked) maupun terendam (soaked). Peningkatan optimal tercapai dengan penambahan 6% bakteri dan masa peram 14 hari, menghasilkan peningkatan CBR unsoaked hingga tiga kali lipat dan CBR soaked hingga lima kali lipat dari nilai awal. Metode perendaman (soaked) dan siklus basah-kering, khususnya metode satu siklus A dengan waktu perendaman lebih lama, terbukti paling efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah. Hasil ini menegaskan potensi besar penggunaan bakteri untuk meningkatkan kekuatan tanah secara efektif, terutama di daerah dengan dua musim seperti Indonesia, dan berkontribusi pada bidang rekayasa sipil

dalam pengembangan teknik stabilisasi tanah inovatif seperti MICP dan bio-stabilisasi.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No .	Judul dan Pengarangnya	Persamaan	Perbedaan	Kesimpulan
1.	Athaya Zhafirah, Muslimah Asril Holifatil tahun 2021 dengan judul “Pengaruh Penambahan Abu Daun Bambu dan Semen Terhadap Stabilitas Tanah” diterbitkan oleh Sekolah Tinggi Teknologi Garut	-Memiliki tujuan utama untuk meningkatkan karakteristik atau stabilitas tanah -Penggunaan abu daun bambu sebagai stabilisator -Fokus pada tanah kohesif	- Stabilisator kedua yang digunakan berbeda, pada jurnal menggunakan semen -Jenis tanah yang digunakan pada jurnal yaitu pasir berlanau	Kombinasi 5% semen dan 5% abu daun bambu merupakan formulasi paling efektif untuk stabilisasi tanah pasir berlanau. Campuran ini secara signifikan meningkatkan nilai CBR dan kekuatan tanah, serta menurunkan kadar air optimum. Meskipun potensi pengembangan (swelling) tetap menjadi perhatian umum, kombinasi optimal ini terbukti mampu menurunkannya.
2.	Harley Tamme, dkk tahun 2023, dengan judul “Pengaruh Penambahan Daun Bambu	- Memiliki tujuan meningkatkan karakteristik tanah lempung - Menggunakan	- Pada jurnal hanya menggunakan abu daun bambu sebagai	Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan abu daun bambu yang dibakar pada

	<p>pada Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Lempung” diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil, Prodi Studi Rekayasa Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Samarinda.</p>	<p>abu daun bambu sebagai bahan stabilisasi - Menggunakan tanah lempung</p>	<p>bahan stabilisasi - Pada skripsi ini menggabungkan stabilisasi kimiawi/fisik abu daun bambu dengan bakteri <i>Bacillus subtilis</i></p>	<p>600°C efektif dalam menstabilkan tanah lempung lunak A-7-5. Penambahan 2% abu daun bambu dengan pemeraman 21 hari memberikan hasil optimal, secara signifikan menurunkan indeks plastisitas, serta meningkatkan kekuatan tekan bebas (mencapai 2,516 kg/cm²) dan nilai CBR tidak rendaman (mencapai 12%), menjadikannya solusi stabilisasi tanah yang ramah lingkungan dan efisien untuk konstruksi.</p>
3.	<p>William Wijaya tahun 2021, dengan judul “Pengaruh Stabilisasi Abu Daun Bambu dan Semen Terhadap Kembang Susut (Swelling)</p>	<p>-Jenis tanah yang distabilisasi sama -Menggunakan abu daun bambu sebagai salah satu bahan stabilisasi -Meniliki tujuan untuk meningkatkan</p>	<p>Menggunakan semen sebagai bahan stabilisasi sekunder</p>	<p>Tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang susut tinggi berhasil distabilisasi secara signifikan menggunakan kombinasi abu daun bambu dan semen. Abu daun</p>

	<p>Tanah Lempung Ekspansif” diterbitkan oleh Program Studi Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta</p>	<p>stabilisasi tanah lempung</p>		<p>bambu, sebagai bahan pozzolanik, efektif mengurangi kembang susut, namun semen menunjukkan efektivitas tertinggi. Meskipun demikian, abu daun bambu merupakan alternatif ramah lingkungan yang menjanjikan untuk stabilisasi tanah.</p>
4.	<p>Edgar V. Kaunang, dkk tahun 2025, dengan judul “Analisis Kestabilan Tanah dengan Campuran Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> Di Daerah Aktivitas Geothermal Lahendong” diterbitkan oleh Prodi Teknik Lingkungan, Universitas Sam Ratulangi, Manado</p>	<p>-Memiliki tujuan umum untuk meningkatkan karakteristik dan stabilisasi tanah - Menggunakan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> sebagai salah satu agen stabilisasi tanah</p>	<p>-Jurnal hanya menggunakan satu jenis bahan stabilisasi, bakteri <i>Bacillus subtilis</i></p>	<p>Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan bakteri <i>*Bacillus subtilis*</i> secara efektif meningkatkan kekuatan geser (kohesi dan sudut geser dalam) serta daya dukung tanah geothermal berpasir. Peningkatan ini berbanding lurus dengan persentase bakteri dan waktu pemeraman, menjadikannya</p>

				metode stabilisasi tanah yang ramah lingkungan dan menjanjikan.
5.	Andi Marini Indriani, dkk tahun 2023, dengan judul “Pengaruh Siklus Basah Kering terhadap Perilaku Mekanik Tanah Lempung Stabilisasi Biosementasi dengan Bakteri <i>Bacillus subtilis</i>” diterbitkan oleh Teknik Sipil, Universitas Balikpapan	<ul style="list-style-type: none"> - Berfokus pada stabilisasi tanah lempung - Menggunakan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> sebagai agen stabilisasi - Merupakan penelitian eksperimental yg dilakukan di laboratorium 	Hanya menggunakan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> sebagai agen stabilisasi tunggal	Stabilisasi tanah lempung menggunakan bakteri <i>Bacillus subtilis</i> secara signifikan meningkatkan nilai CBR, dengan peningkatan optimal hingga tiga kali lipat (unsoaked) dan lima kali lipat (soaked) pada penambahan 6% bakteri dan masa peram 14 hari. Metode perendaman dan siklus basah-kering, terutama dengan waktu perendaman lebih lama, terbukti paling efektif, menegaskan potensi bakteri ini untuk perbaikan tanah di daerah beriklim dua musim.

Berdasarkan hasil kajian dari lima jurnal yang dianalisis, dapat disimpulkan bahwa penggunaan abu daun bambu dan bakteri *Bacillus subtilis* terbukti memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kestabilan serta daya dukung tanah, khususnya pada tanah lempung dan tanah berpasir.

Penambahan abu daun bambu dalam jumlah optimal, seperti yang ditunjukkan oleh Athaya & Muslimah (2021) dan Tamme dkk. (2023), mampu menurunkan nilai indeks plastisitas hingga 15,89%, meningkatkan nilai CBR, serta memperbaiki karakteristik fisis dan mekanis tanah.

Hasil serupa juga dikemukakan oleh William Wijaya (2021) yang menemukan bahwa kombinasi semen dan abu daun bambu dapat menurunkan potensi kembang susut tanah ekspansif dari 15,71% menjadi 4,33%, didukung oleh kandungan silika tinggi sebesar 79,68% yang berperan sebagai bahan pozzolan. Di sisi lain, penelitian Kaunang dkk. (2025) serta Indriani dkk. (2023) menunjukkan bahwa metode stabilisasi biologis menggunakan *Bacillus subtilis* efektif dalam meningkatkan parameter kuat geser tanah dan nilai CBR hingga lima kali lipat dibandingkan tanah asli. Proses biosementasi yang dihasilkan bakteri mampu membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang memperkuat ikatan antarpartikel tanah.

Secara keseluruhan, kelima penelitian tersebut menegaskan bahwa kombinasi pendekatan kimiawi (abu daun bambu) dan biologis *Bacillus subtilis* dapat menjadi alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan bahan konvensional dalam upaya stabilisasi tanah, sekaligus mendukung konsep konstruksi berkelanjutan di bidang teknik sipil.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Tanah

Tanah berasal dari pelapukan batuan dengan bantuan organisme, membentuk tubuh unik yang menutupi batuan. Proses pembentukan tanah dikenal sebagai pedogenesis. Proses yang unik ini membentuk tanah sebagai tubuh alam yang terdiri atas lapisan-lapisan atau disebut sebagai horizon tanah. Setiap horizon menceritakan mengenai asal dan proses-proses fisika, kimia, dan biologi yang telah dilalui tubuh tanah tersebut.

Menurut Hans Jenny (1899-1992), seorang pakar tanah asal Swiss yang bekerja di Amerika Serikat, menyebutkan bahwa tanah terbentuk dari bahan induk yang telah mengalami modifikasi/pelapukan akibat dinamika faktor iklim, organisme (termasuk manusia), dan relief permukaan bumi (topografi)

seiring dengan berjalannya waktu. Berdasarkan dinamika kelima faktor tersebut terbentuklah berbagai jenis tanah dan dapat dilakukan klasifikasi tanah.

Tanah terbentuk dari batuan dan batuan memerlukan waktu jutaan tahun untuk berubah menjadi tanah. Batuan menjadi tanah karena pelapukan yaitu proses hancurnya batuan menjadi tanah. Batuan dapat mengalami pelapukan karena berbagai faktor, di antaranya cuaca dan kegiatan makhluk hidup. Faktor cuaca yang menyebabkan pelapukan batuan, misalnya suhu dan curah hujan.

Pelapukan yang disebabkan oleh faktor cuaca ini disebut pelapukan fisika. Adapun makhluk hidup yang menyebabkan pelapukan, misalnya pepohonan dan lumut yang disebut pelapukan biologi. Tanah terbentuk dari beberapa faktor : batuan, iklim, jasad hidup, topografi dan waktu. Adanya berbagai perbedaan dari faktor-faktor tersebut, maka proses pelapukan dan pembentukan tanah berbeda-beda. Hal ini menyebabkan adanya perbedaan jenis tanah antara satu daerah dengan daerah lainnya.

Tekstur tanah adalah klasifikasi secara kualitatif mengenai kondisi suatu tanah berdasarkan tekstur fisiknya. Pengujian dan penerapan tekstur tanah diterapkan di lapangan maupun di laboratorium. Kategori utama dari tekstur tanah yaitu tanah berpasir, liat atau lempung, dan geluh atau lanau. Berdasarkan distribusi ukuran partikel tanah yang didapatkan dengan pengayakan. Kualitas tekstur tanah yang didapatkan bisa digunakan untuk berbagai penerapan, misal komoditas pertanian yang cocok untuk ditanam hingga kondisi dan perubahan lingkungan. Klasifikasi berdasarkan USDA.

Berdasarkan ASTM D653, klasifikasi tanah dilakukan dengan mempertimbangkan ukuran butir penyusunnya. Tanah secara umum dibagi ke dalam beberapa kelompok sebagai berikut:

1. Kerikil merupakan partikel batuan yang lolos dari saringan berukuran 3 inci (75 mm) namun tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm).
2. Pasir adalah material berbutir yang melewati saringan No. 4 dan tertahan pada saringan No. 200, sehingga termasuk dalam kategori berbutir sedang hingga halus.

3. Lanau (*silt*) terdiri atas partikel halus yang seluruhnya melewati saringan No. 200. Jenis tanah ini bersifat nonplastis dan memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan pasir.
4. Lempung (*clay*) juga terdiri dari butiran yang melewati saringan No. 200, namun berbeda dari lanau karena menunjukkan sifat plastis pada kadar air tertentu.

Selain klasifikasi berdasarkan ukuran butir, tanah juga dapat dikelompokkan menurut karakteristik fisiknya menjadi tiga kategori utama, yaitu tanah kohesif, tanah non-kohesif, dan tanah organik. Yaitu:

1. Tanah kohesif merupakan jenis tanah yang mengandung fraksi lempung dalam jumlah cukup besar, sehingga memiliki daya ikat antarp butir yang kuat dan umumnya memperlihatkan sifat plastisitas.
2. Tanah non-kohesif adalah tanah yang tidak mengandung atau hanya memiliki sedikit fraksi lempung, sehingga tidak menunjukkan kohesi yang berarti antarpartikel. Contohnya adalah pasir dan kerikil.
3. Tanah organik dikategorikan sebagai tanah yang mengandung material organik dalam jumlah signifikan, di mana keberadaan bahan organik tersebut mempengaruhi perilaku fisik maupun mekanik tanah secara substansial.

2.3 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Sifat fisik tanah merupakan karakteristik yang berkaitan dengan komponen penyusun dan kondisi massa tanah secara alami, seperti ukuran butir, kadar air, serta kerapatan tanah. Sementara itu, sifat mekanis tanah menggambarkan respon atau perilaku tanah ketika menerima beban atau tekanan dari luar, yang umumnya dianalisis melalui pendekatan mekanika tanah untuk memahami kekuatan, deformasi, dan stabilitas strukturnya.

2.3.1 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengelompokkan berbagai jenis tanah dengan karakteristik berbeda ke dalam kategori atau subkategori tertentu berdasarkan kesamaan sifat dan tujuan penggunaannya. Konsep ini

dijelaskan secara komprehensif dalam Principles of Geotechnical Engineering edisi kedelapan oleh Braja M. Das (2014), yang membahas berbagai pendekatan dalam pengelompokan tanah.

Pada penelitian ini, digunakan sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) dan USDA (*United States Department of Agriculture*) sebagai acuan utama. Pemilihan kedua sistem tersebut didasarkan pada

ketersediaan hasil uji laboratorium, seperti analisis ukuran butir dengan metode hidrometer serta pengujian batas cair dan batas plastis tanah (*Atterberg Limits*), yang keduanya merupakan parameter penting dalam menentukan karakteristik dan klasifikasi jenis tanah.

Tabel 2.2 Sistem klasifikasi tanah *USCS*

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Jenis	Kriteria Laboratorium	
Tanah berbutir kasar, lebih dari 50% terdahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil bersih (kandungan butir halus < 5%)	GW	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria GW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$	
		GP		
	Kerikil (kandungan butir halus > 12%)	GM	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria SW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$	
		GC		
	Pasir, 50% atau lebih dari fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tanpa butiran halus Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tanpa butiran halus Pasir berlanau, campuran pasir-lanau Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Kriteria Laboratorium $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria GW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$
		SP		
		SM		
	Pasir (kandungan butir halus > 12%)	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Kriteria Laboratorium $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria SW Batas Atterberg dibawah garis A atau $IP < 4$ Batas Atterberg diatas garis A atau $IP > 7$
		SC		
		SC		
Tanah berbutir halus, 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	lanau dan lempung dengan batas cair $\leq 50\%$	ML	Manual untuk identifikasi visual dapat dilihat pada ASTM D-2488	
		CL		
	lanau dan lempung dengan batas cair $> 50\%$	OL		
		MH		
	Tanah kadar organik tinggi	CH		Lembing tak organik dengan plastisitas tinggi, <i>fat cloy</i> Lembing organik dengan plastisitas sedang hingga tinggi, lanau organik
		OH		

(Sumber: Braja M. Das & Sobhan K., 2014, Foundation Engineering for Expansive Soils, hal.131)

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS dan USDA memerlukan serangkaian pengujian laboratorium untuk memperoleh parameter-parameter yang dibutuhkan. Prosedur tersebut meliputi beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Analisis Butiran dengan Saringan (*Sieve Analysis*)

Pengujian ini dilakukan terhadap sampel tanah berbutir kasar,

seperti pasir dan kerikil, dengan tujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran melalui proses penyaringan bertingkat.

2. Analisis Butiran dengan Hidrometer (*Hydrometer Analysis*)
Pengujian ini diterapkan pada sampel tanah berbutir halus, seperti lanau dan lempung, guna mengetahui proporsi partikel berukuran sangat kecil yang tidak dapat diukur menggunakan metode penyaringan biasa.
3. Pengujian Batas Atterberg (*Atterberg Limits Test*) Uji batas Atterberg terdiri atas tiga parameter utama, yaitu batas cair (*Liquid Limit/LL*), batas plastis (*Plastic Limit/PL*), dan batas susut (*Shrinkage Limit/SL*). Hasil dari pengujian ini digunakan untuk menentukan indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*), yang menjadi indikator penting dalam menilai perilaku plastisitas dan potensi kembang-susut tanah lempung.

Tabel 2.3 Hubungan nilai index plastisitas dengan jenis tanah

<i>PI</i>	Description
0	Nonplastic
1–5	Slightly plastic
5–10	Low plasticity
10–20	Medium plasticity
20–40	High plasticity
>40	Very high plasticity

(*Sumber:* Braja M. Das & Sobhan K., 2014, *Foundation Engineering for Expansive Soils*, hal.93)

2.3.2 Kuat Geser Tanah

Kuat geser adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan besarnya tegangan geser yang dapat ditahan oleh tanah. Parameter ini memiliki peranan krusial dalam analisis geoteknik, terutama pada evaluasi stabilitas lereng, kapasitas daya dukung pondasi, serta perencanaan struktur dinding penahan tanah. Hal ini disebabkan karena mekanisme keruntuhan tanah umumnya terjadi sepanjang bidang geser di dalam massa tanah, sehingga pemahaman

terhadap parameter tersebut menjadi sangat penting dalam menjamin keamanan dan kestabilan konstruksi.

Dalam buku *Principles of Geotechnical Engineering* edisi kedelapan (Braja M. Das, 2014) dijelaskan bahwa kekuatan geser suatu massa tanah merupakan gaya perlawanan internal tanah per satuan luas terhadap kemungkinan keruntuhan atau pergeseran yang terjadi di sepanjang bidang geser dalam tanah tersebut. Kuat geser tanah menunjukkan kemampuan tanah untuk menahan gaya geser antarpartikel yang timbul akibat adanya pengaruh gaya eksternal.

Menurut Teori Mohr (1980) yang juga dikutip dalam buku tersebut, keruntuhan pada suatu material terjadi karena kombinasi antara tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) yang bekerja pada bidang keruntuhan. Oleh sebab itu, hubungan antara kedua tegangan tersebut pada saat material mengalami keruntuhan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

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

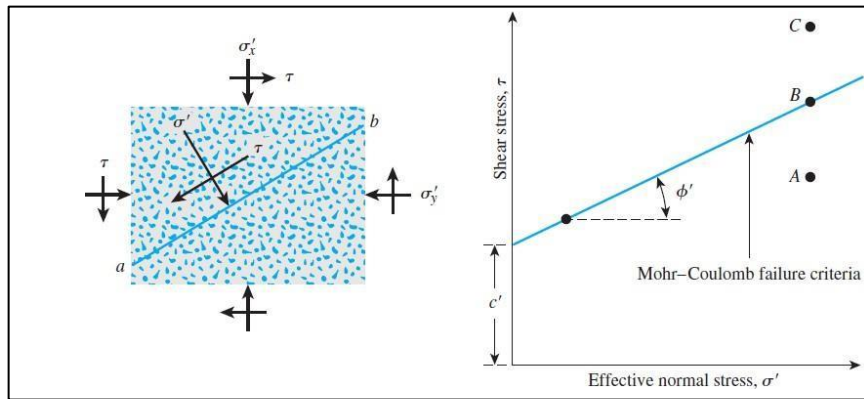
Dengan,

τ = Kuat geser tanah

$f(\sigma)$ = Tegangan normal pada bidang runtuh

Garis keruntuhan (failure envelope) yang dinyatakan pada Persamaan (2.1) secara teoritis memiliki bentuk kurva, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.1. Namun, dalam praktik analisis geoteknik, kurva tersebut umumnya didekati dengan garis lurus yang merepresentasikan hubungan linear antara tegangan normal dan tegangan geser pada kondisi keruntuhan.

Gambar 2.1 Garis keruntuhan dan hukum keruntuhan dari Mohr-Coulomb



(Sumber: Braja M. Das & Sobhan K., 2014, *Principles of Geotechnical Engineering*, hal. 249)

Kriteria ini merupakan pendekatan linier yang digunakan untuk menentukan kuat geser tanah dengan mempertimbangkan hubungan antara tegangan normal, sudut geser dalam (ϕ), serta kohesi (c). Persamaan Mohr–Coulomb, sebagaimana dijelaskan dalam *Principles of Geotechnical Engineering* edisi kedelapan oleh Braja M. Das (2014), merupakan model yang paling umum digunakan dalam analisis mekanika tanah dan perancangan geoteknik, karena mampu menggambarkan perilaku tanah terhadap beban geser secara sederhana namun representatif.

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

Dengan keterangan:

τ = Kuat geser tanah (kN/m²)

c = Kohesi (kN/m²)

ϕ = Sudut geser dalam (derajat)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

Persamaan ini dikenal sebagai kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb, dimana representasi garis selubung keruntuhan dapat dilihat pada Gambar 2.1. Nilai sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi (c) yang dihasilkan dari persamaan tersebut memiliki hubungan yang signifikan dengan klasifikasi jenis tanah, yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Tanah dengan butiran kasar

Secara umum, tanah berbutie kasar memiliki nilai sudut geser dalam (ϕ) yang relatif tinggi, berkisar antara 30°–45°, sedangkan nilai

kohesi (c) sangat rendah. Hal ini disebabkan oleh minimnya ikatan antar partikel, sehingga kekuatan geser utamanya ditentukan oleh gaya gesekan (friksi) antar butiran tanah.

2. Tanah dengan butiran halus

Sebaliknya, tanah berbutir halus nilai sudut geser dalam (ϕ) yang lebih rendah, umumnya dibawah 30° , namun kohesi (c) cukup tinggi. Kondisi ini terjadi karena partikel halus cenderung saling melekat, menjadikan kohesi sebagai factor dominan dalam menentukan kekuatan geser dibandingkan friksi antar butir.

Nilai sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi (c) tersebut dapat diperoleh melalui pengujian laboratorium geoteknik, antara lain *Direct Shear Test*, *Triaxial Compression Test*, dan *Unconfined Compressive Strength Test* (UCS).

2.4 Abu Daun Bambu

Abu daun bambu merupakan material yang memiliki kandungan senyawa pozzolan dan silika yang tinggi, serta mengandung unsur kapur bebas yang berpotensi untuk mengalami proses pengerasan secara alami. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Mina dkk. (2019) dalam jurnal Untirta, abu daun bambu diketahui mampu meningkatkan kekuatan tanah, karena komposisi kimianya dapat berperan sebagai pengikat antarpartikel tanah, sehingga menghasilkan struktur tanah yang lebih padat dan kuat. Dalam penelitian tersebut, variasi campuran abu daun bambu sebesar 0%, 2%, 6%, dan 10% diuji dengan masa pemeraman 0, 7, 14, dan 28 hari, dan diperoleh peningkatan nilai kuat tekan bebas hingga $4,01 \text{ kg/cm}^2$ pada campuran 2% dengan lama pemeraman 28 hari.

Selanjutnya, penelitian oleh Amu dan Adetuberu (2010) menunjukkan bahwa komposisi kimia abu daun bambu memiliki kesamaan dengan material semen, menjadikannya potensial sebagai bahan stabilisasi tanah. Abu daun bambu diperoleh melalui proses pembakaran terbuka, kemudian pembakaran tertutup pada suhu 600°C selama dua jam dalam tungku, menghasilkan material dengan kandungan silika tinggi yang efektif sebagai bahan campuran

tanah. Karakterisasi abu dilakukan melalui analisis kimia dan uji difraksi sinar-X (XRD), yang menunjukkan bahwa reaksi antara abu dan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) menandakan adanya sifat pozzolan aktif.

Selain itu, hasil penelitian juga mengindikasikan bahwa reaktivitas pozzolan meningkat seiring waktu dan suhu, serta memberikan dampak signifikan terhadap perbaikan sifat fisik dan mekanik tanah. Penambahan abu daun bambu terbukti mampu menurunkan indeks plastisitas tanah, mengurangi kadar air alami, dan meningkatkan nilai densitas kering maksimum (MDD). Selain itu, nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dan kekuatan geser tanah juga menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan penambahan abu daun bambu. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa abu daun bambu berpotensi besar sebagai bahan stabilisasi tanah laterit, khususnya dalam konstruksi perkerasan jalan.

Tabel 2.4 unsur kandungan abu daun bambu

Oksida	Abu Daun Bambu (%)
SiO ₂	75.9
Al ₂ O ₃	4.13
Fe ₂ O ₃	1.22
CaO	7.47
MgO	1.85
K ₂ O	5.62
Na ₂ O	0.21
TiO ₂	0.2
SO ₃	1.06
LOI	-

2.5 *Microbially Induce Calcite Precipitation* (MICP)

Karakteristik tanah yang memiliki kemampuan terbatas dalam memberikan dukungan fisik maupun mekanik sering menjadi kendala dalam penerapan konstruksi. Dalam buku *The Immersion Method for Microbially Induced Calcite Precipitation: Applications for Sustainability* (Lin Li dkk., 2025), diperkenalkan metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) sebagai pendekatan bioteknologi ramah lingkungan untuk perbaikan

tanah. Prinsip utama metode ini adalah aktivitas biologis bakteri pengurai urea, seperti *Bacillus subtilis* atau *Sporosarcina pasteurii*, yang menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) berfungsi memperkuat struktur internal material, baik tanah maupun beton.

Dalam bidang teknik sipil dan geoteknik, penerapan MICP menunjukkan potensi yang luas, seperti mengurangi erosi melalui penguatan ikatan antarpartikel tanah, menekan risiko likuifaksi pada tanah berpasir, serta meningkatkan kekuatan geser dan kapasitas dukung tanah.

2.5.1 Bakteri *Bacillus subtilis*

Dalam buku *Principles and Applications of Soil Microbiology* yang ditulis oleh Sylvia et al. (2021) dijelaskan bahwa *Bacillus subtilis* merupakan salah satu jenis bakteri Gram-positif yang banyak dikaji dalam bidang mikrobiologi. Mikroorganisme ini dikenal memiliki kemampuan membentuk endospora, sehingga mampu bertahan pada kondisi lingkungan ekstrem seperti perubahan suhu, tekanan, maupun kekeringan. Keberadaan bakteri ini dapat ditemukan pada berbagai habitat alami, diantaranya:

1. Lapisan Tanah (Topsoil)

Sebagian besar populasi *Bacillus subtilis* ditemukan pada lapisan permukaan tanah dengan kedalaman sekitar 0-30 cm, karena pada zona ini terkandung bahan organik dan unsur hara yang mendukung aktivitas mikroba.

2. Zona Rizofe

Zona ini merupakan wilayah disekitar perakaran tanaman yang dipengaruhi oleh aktivitas biologis dan kimia akar. Di daerah tersebut, *Bacillus subtilis* dapat menempel pada permukaan akar serta berinteraksi secara simbiotik dengan tanaman melalui pertukaran nutrisi dan senyawa metabolit. Proses pertumbuhan *Bacillus subtilis* umumnya berlangsung melalui empat tahapan utama, yaitu:

- Fase awal (*Lag Phase*/Adaptasi)

Pada tahap ini, bakteri melakukan penyesuaian terhadap kondisi lingkungan baru, baik dalam tanah maupun media kultur, sehingga aktivitas pembelahan sel belum signifikan.

- Fase Pertumbuhan Cepat (*Log/Exponential Phase*)

Bakteri mengalami perkembangbiakan pesat melalui pembelahan sel aktif, disertai produk enzim penting seperti urease dan protease yang berperan dalam proses biokimia tanah.

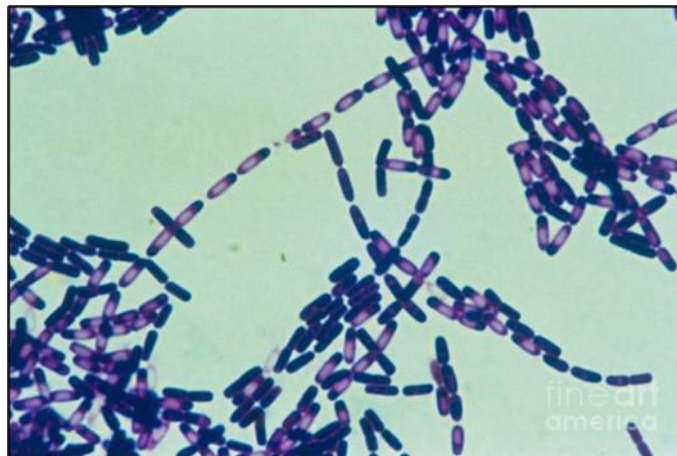
- Fase stasioner

Pertumbuhan mulai berkurang kecepataannya karena nutrisi terbatas, menyebabkan jumlah total sel hidup relative stabil.

- Fase Penurunan (*Death Phase*)

Pada tahap ini, populasi bakteri menurun akibat kematian sel, baik karena kekurangan nutrisi maupun akumulasi senyawa toksik hasil metabolisme.

Gambar 2.2 Bakteri *bacillus subtilis*



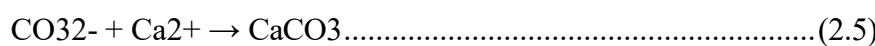
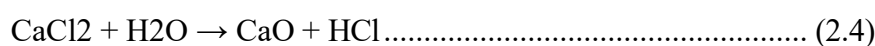
(Sumber: Sylvia et al., 2021, *Principles and Applications of Soil Microbiology*, 2021)

Bacillus subtilis merupakan mikroorganisme berbentuk batang (basil) yang memiliki kemampuan untuk tumbuh baik pada kondisi aerob maupun anaerob. Karena fleksibilitas metaboliknya tersebut, bakteri ini digolongkan sebagai bakteri fakultatif anaerob

(Sylvia et al., 2021). Adapun klasifikasi taksonomi dari *Bacillus subtilis* menurut Sylvia et al. (2021) adalah sebagai berikut:

- Domain : Bacteria
- Filum : Firmicutes
- Kelas : Bacilli
- Ordo : Bacillales
- Famili : Bacillaceae
- Genus : Bacillus
- Spesies : *Bacillus subtilis*

Pada penelitian ini, *Bacillus subtilis* berfungsi sebagai penghasil enzim urease yang berperan dalam proses hidrolisis urea [CO(NH₂)₂] menjadi ion karbonat (CO₃²⁻). Ion karbonat yang terbentuk kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca²⁺) pada larutan sementasi dan membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO₃). Endapan tersebut bertindak sebagai agen pengikat antarpartikel tanah melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP).



Dengan keterangan:

- CO(NH₂)₂ = Urea
- H₂O = Air
- NH₄⁺ = Amonia
- urease = Enzim yang dihasilkan oleh bakteri
- CO₃²⁻ = Ion Karbonat
- CaCl₂ = Kalsium Klorida
- Ca²⁺ = Ion Kalsium
- CaO = Kalsium Oksida
- HCl = Asam Klorida
- CaCO₃ = Kalsium Karbonat

2.6 Pengujian Laboratorium

Pada penelitian ini, *Bacillus subtilis* berfungsi sebagai penghasil enzim urease yang berperan dalam proses hidrolisis urea [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] menjadi ion karbonat (CO_3^{2-}). Ion karbonat yang terbentuk kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) pada larutan sementasi dan membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3). Endapan tersebut bertindak sebagai agen pengikat antarpartikel tanah melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP).

2.6.1 Kadar Air

Kadar air tanah merupakan rasio antara berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat butiran padat tanah, yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Terdapat berbagai metode untuk menentukan kadar air tanah, namun salah satu yang paling umum digunakan adalah metode pengeringan oven (*Oven Drying Method*), dengan prosedur pengujian yang diatur dalam SNI 03-1965.1-2000 sebagai berikut:

1. Timbang terlebih dahulu cawan kosong untuk memperoleh berat awal (W1)
2. Masukkan sampel tanah yang telah disiapkan ke dalam cawan dengan berat sekitar 10-30 gram, kemudian lakukan penimbangan Kembali (W2)
3. Lakukan proses pengeringan terhadap sampel menggunakan oven pada suhu 106- 110°C selama kurang lebih 24 jam
4. Setelah proses pengeringan selesai, keluarkan cawan dari oven, biarkan dingin di dalam desikator hingga mencapai suhu ruang, lalu timbang kembali untuk memperoleh berat akhir (W3)
5. Setelah seluruh tahapan pengujian selesai dilaksanakan, perhitungan persentase kadar air tanah dilakukan dengan menggunakan persamaan yang dirujuk dari Shirley (1994) dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah, sebagaimana ditunjukkan pada rumus berikut:

$$W (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan keterangan:

W = Kadar Air Tanah Asli

W1 = Berat Cawan Kosong

$$W2 = \text{Berat Cawan} + \text{Tanah Basah}$$

$$W3 = \text{Berat Cawan} + \text{Tanah Kering}$$

2.6.2 Berat Jenis Tanah

Uji berat jenis tanah (*Specific Gravity*) diartikan sebagai perbandingan antara berat partikel padat tanah dengan berat air dengan volume yang sama pada suhu tertentu. Salah satu metode yang digunakan pada berat jenis tanah halus ini adalah metode Piknometer (*Pycnometer Method*). Berikut prosedur pelaksanaan metode tersebut:

1. Sampel dikeringkan oven pada suhu 105–110 °C selama 24 jam.
2. Timbang piknometer kosong (W1).
3. Masukkan sampel tanah kering ke dalam piknometer (sekitar 1/3 dari volume piknometer), kemudian ditimbang (W2).
4. Isi piknometer dengan air destilasi (hingga 2/3 dari volume piknometer), lalu masukkan piknometer ke panci berisi air panas untuk menghilangkan gelembung udara.
5. Isi piknometer sampai penuh dengan air destilasi, dan tutup rapat.
6. Timbang piknometer yang berisi tanah dan air (W3).
7. Kosongkan piknometer, bersihkan, lalu isi kembali dengan air destilasi hingga penuh dan timbang (W4).

Nilai berat jenis tanah diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan rumus empiris yang dirumuskan oleh Shirley (1994) dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah. Berdasarkan acuan tersebut, nilai berat jenis rata-rata tanah umumnya berada pada kisaran 2,7, sebagaimana ditunjukkan persamaan berikut:

$$G_s = \frac{W2 - W1}{(W4 - W1) - (W3 - W2)} \quad (2.7)$$

Dengan keterangan:

$$G_s = \text{Berat Jenis Tanah Halus}$$

$$W1 = \text{Berat Piknometer Kosong}$$

$$W2 = \text{Berat Piknometer} + \text{Tanah Kering}$$

$$W3 = \text{Berat Piknometer} + \text{Tanah} + \text{Air}$$

$$W4 = \text{Berat Piknometer} + \text{Air}$$

Tabel 2.5 Korelasi berat jenis tanah dengan macam jenis tanah

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

(Sumber: Hardiyatmo, 2012, Mekanika Tanah I, hal.35)

2.6.3 Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (*Liquid Limit*) didefinisikan sebagai kadar air maksimum pada kondisi tanah mulai kehilangan sifat plastisnya dan beralih menjadi bersifat cair. Pengujian parameter ini mengacu pada standar ASTM D4318, yang mengatur prosedur penentuan batas cair dengan menggunakan alat *casagrande apparatus* atau *cone penetrometer*. Tahapan pelaksanaannya meliputi:

1. Persiapan sampel tanah halus yang telah melewati saringan No. 40 agar diperoleh distribusi partikel homogen.
2. Pencampuran tanah dengan air hingga mencapai konsistensi plastis, kemudian dimasukkan ke dalam mangkuk Casagrande.
3. Perataan permukaan tanah dengan spatula hingga ketebalannya seragam.
4. Pembuatan alur pada bagian tengah sampel dengan *grooving tool*.
5. Pemutaran engkol casagrande pada kecepatan konstan hingga alur menutup sepanjang $\pm 1,25$ cm.
6. Pengambilan sebagian sampel untuk pengujian kadar air.
7. Pengulangan prosedur dengan variasi kadar air yang berbeda untuk mendapatkan hubungan antara jumlah ketukan dan kadar air

2.6.4 Batas Platis (*Plastic Limit*)

Pengujian batas plastis (*Plastic Limit Test*) merupakan bagian dari rangkaian pengujian batas Atterberg yang bertujuan untuk menentukan kadar air minimum ketika tanah masih dapat dibentuk secara plastis tanpa mengalami retakan. Pada kondisi kadar air di bawah nilai tersebut, tanah akan kehilangan kemampuan deformasi plastisnya dan cenderung rapuh. Prosedur pelaksanaan uji batas plastis memiliki prinsip serupa dengan uji batas cair, dengan langkah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan sampel tanah yang sama dengan yang digunakan pada pengujian batas cair.
2. Mencampurkan tanah dengan air hingga mencapai konsistensi yang memungkinkan pembentukan gulungan tanpa menempel secara berlebihan.
3. Jika gulungan pecah atau retak sebelum mencapai diameter ± 3 mm, dilakukan penambahan air sedikit demi sedikit hingga diperoleh hasil yang stabil.
4. Setelah mencapai diameter ± 3 mm, sampel gulungan tersebut diambil dan ditempatkan ke dalam cawan untuk diuji kadar airnya.

Hasil dari pengujian batas cair dan batas plastis digunakan untuk menghitung indeks plastisitas (*Plasticity Index, PI*), yang menjadi acuan dalam menentukan klasifikasi jenis tanah. Kriteria klasifikasi ini didasarkan pada pedoman yang dirangkum oleh Shirley (1994) dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah.

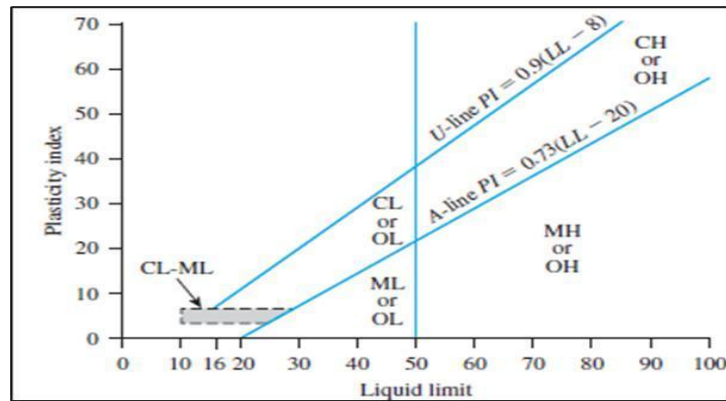
$$PI = LL - PL \dots\dots\dots(2.8)$$

Dengan Keterangan:

PI = Plasticity Index (Indeks Plastis)

LL = Liquid Limit (Batas Cair)

PL = Plastic Limit (Batas Plastis)



Gambar 2.3 Grafik Hubungan antara Index Plastis dengan batas
(*Sumber*: Braja M. Das & Sobhan K., 2014, *Principles of Geotechnical Engineering*, hal.132)

2.6.5 Analisa Butiran Tanah (Hidrometer)

Pengujian analisis hidrometer (*Hydrometer Analysis*) merupakan metode laboratorium yang digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel tanah berbutir halus seperti lanau dan lempung, yang tidak dapat dianalisis melalui uji saringan konvensional. Prinsip kerja pengujian ini didasarkan pada hukum Stokes, yaitu proses pengendapan partikel tanah dalam media cair, di mana perbedaan kerapatan suspensi diukur menggunakan hidrometer pada interval waktu tertentu.

Pelaksanaan uji ini mengacu pada standar ASTM D7928, dengan tahapan sebagai berikut:

- Menimbang sampel tanah kering sebanyak ± 50 gram.
- Menambahkan larutan dispersan, seperti sodium hexametaphosphate atau natrium hidroksida, untuk mencegah penggumpalan partikel halus.
- Mencampurkan tanah dengan air di dalam silinder sedimentasi hingga mencapai volume 1000 mL.
- Mengaduk campuran secara intensif agar seluruh partikel tanah terdispersi merata di dalam suspensi.
- Melakukan koreksi terhadap hasil pembacaan hidrometer berdasarkan suhu suspensi yang terukur.
- Memasukkan hidrometer ke dalam silinder dan mencatat hasil pembacaan pada interval waktu yang telah ditentukan.

2.6.6 Unconfined Compressive Strength

Pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength Test / UCS*) merupakan salah satu metode laboratorium yang digunakan untuk menilai kemampuan tanah dalam menahan beban tekan aksial tanpa adanya tekanan pengekang eksternal hingga mencapai kondisi keruntuhan. Uji ini umumnya diterapkan pada tanah kohesif, khususnya tanah lempung, untuk mengetahui sejauh mana kekuatan geser tanah tersebut tanpa pengaruh tekanan samping. Pelaksanaan pengujian mengacu pada standar ASTM D2166, dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan sampel tanah, biasanya berupa lempung, dengan ukuran diameter dan tinggi sesuai standar pengujian.
- b. Memastikan kondisi sampel tidak mengalami kerusakan atau gangguan struktur alami.
- c. Menempatkan sampel pada alat Unconfined Compression Tester (UCT).
- d. Memberikan beban aksial secara kontinu dengan laju pembebanan konstan hingga terjadi deformasi yang signifikan.
- e. Melakukan pencatatan beban dan deformasi secara berkala pada interval waktu yang telah ditentukan.
- f. Melanjutkan pembebanan hingga tercapai beban maksimum dan sampel mengalami keruntuhan.

Menurut Shirley (1994) dalam buku Geoteknik dan Mekanika Tanah, hasil pengujian yang dilakukan sesuai dengan prosedur standar akan menghasilkan dua parameter utama, yaitu kuat tekan bebas tanah (q_u) dan kohesi tanah (c). Dalam proses perhitungannya, diasumsikan bahwa sudut geser dalam (ϕ) bernilai nol, yang berarti pengaruh gaya geser internal diabaikan. Berdasarkan asumsi tersebut, hubungan antara kedua parameter dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

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

$$S_u = q_u/2 \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana

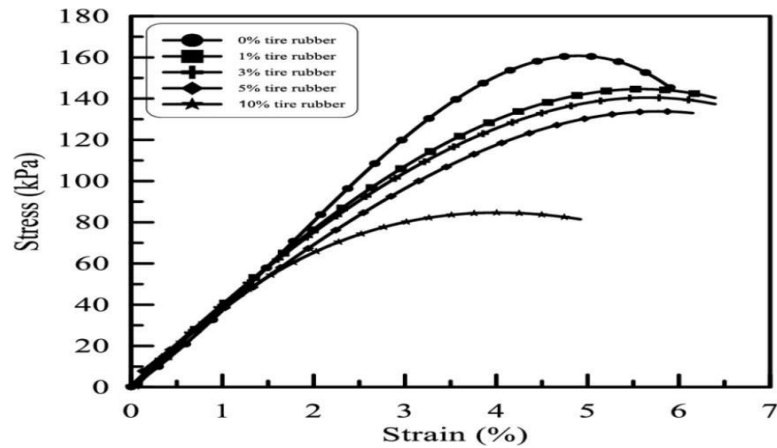
q_u = Kuat tekan tanah bebas.

P_{max} = Beban maksimum saat keruntuhan.

A = Luas penampang sampel tanah.

Su = Kuat geser tanah

Gambar 2.4 Grafik tegangan-regangan kuat tekan tanah bebas.



(Sumber: IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020 by Hadeel Ammar)

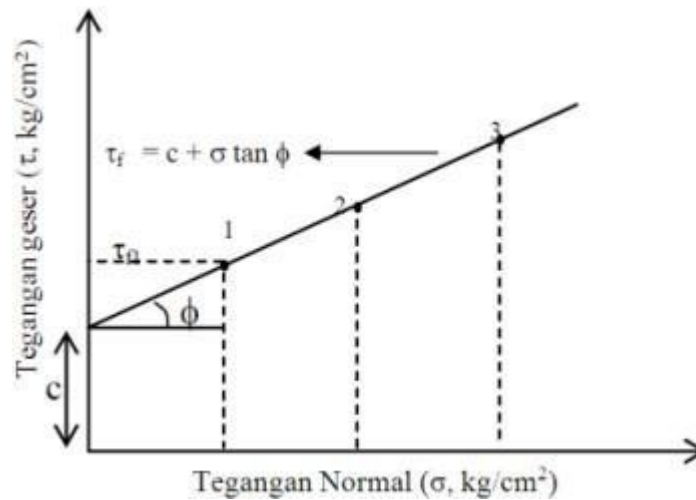
2.6.7 Direct Shear Test

Uji Geser Langsung (*Direct Shear Test*) merupakan salah satu metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah akibat pengaruh gaya geser horizontal yang bekerja pada suatu bidang tertentu. Prosedur pengujian ini mengacu pada standar ASTM D3080, dengan tahapan pelaksanaan sebagai berikut:

1. Sampel tanah diambil dari lapangan dan dipersiapkan untuk pengujian.
2. Sampel kemudian dicetak sesuai dengan dimensi kotak geser (shear box).
3. Pengujian dapat dilakukan pada kondisi tanah yang telah terkonsolidasi maupun belum terkonsolidasi.
4. Sampel ditempatkan di dalam kotak geser dengan posisi rata dan melekat baik pada bagian atas serta bawah kotak, lalu dipasang batu pori di kedua sisi tersebut.
5. Beban normal diterapkan secara vertikal di atas sampel tanah.
6. Sampel dibiarkan mengalami proses konsolidasi di bawah tegangan normal yang diberikan.
7. Setelah proses konsolidasi selesai, gaya geser diterapkan secara horizontal dengan kecepatan konstan.
8. Selama proses pengujian, dilakukan pembacaan terhadap deformasi horizontal dan vertikal untuk memantau perubahan bentuk sampel.

Hasil dari uji geser langsung ini kemudian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser, yang digunakan untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah, seperti kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Gambar 2.5 Grafik Hubungan Tegangan Geser dan Tegangan Normal



(Sumber: Reffanda dan Amiwarti, 2017, Karakteristik Kuat Geser Tanah)

hubungan antara tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) pada uji geser langsung dapat dinyatakan melalui persamaan berikut, sebagaimana digambarkan pada grafik hasil pengujian sebelumnya:

$$\sigma_n = N/A \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\tau = F/A \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana

σ_n = Tegangan normal.

N = Beban normal.

A = Luas penampang.

F = Gaya geser

τ = Tegangan geser.

2.6.8 Triaxial Compression Test

Pengujian triaxial merupakan salah satu metode laboratorium yang memiliki peranan penting dalam bidang mekanika tanah. Sama halnya dengan uji geser langsung, pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah, namun dilakukan dengan cara memberikan tekanan seragam dari tiga arah untuk mempelajari respons tanah terhadap kondisi pembebanan. Uji triaxial dapat dilakukan dalam beberapa kondisi, yaitu *Consolidated Undrained* (CU), *Unconsolidated Undrained* (UU), dan *Consolidated Drained* (CD).

Dalam penelitian ini digunakan metode *Unconsolidated Undrained* (UU), yaitu pengujian tanpa proses konsolidasi serta tanpa drainase selama pembebanan berlangsung. Prosedur pelaksanaannya mengacu pada ASTM D4767, dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel tanah dengan dimensi sesuai spesifikasi standar pengujian.
2. Memasang sampel pada alat triaxial dan membungkusnya menggunakan membran karet untuk mencegah kebocoran air.
3. Memasang sel triaxial (*triaxial cell*) dan mengisinya dengan air hingga
4. seluruh bagian sampel tertutup sempurna.
5. Memberikan tekanan deviator (beban aksial) secara bertahap pada sampel hingga terjadi keruntuhan.
6. Mencatat tekanan deviator maksimum serta data pembacaan selama proses pembebanan untuk analisis kekuatan geser tanah.

Setelah pengujian selesai, data hasil pencatatan digunakan untuk membuat kurva hubungan antara tegangan dan regangan, kemudian direpresentasikan dalam bentuk lingkaran Mohr, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.5. Dari grafik tersebut, diperoleh nilai parameter kuat geser tanah, meliputi kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

2.6.9 Pemasatan Standar (*Standard Proctor Test*)

Pemasatan adalah proses pengeluaran udara pada pori-pori tanah dengan cara mekanis. Semakin besar kadar air maka sifat tanah semakin lunak, namun jika kadar air sangat tinggi Tingkat kepadatan akan turun karena pori-pori tanah berisi

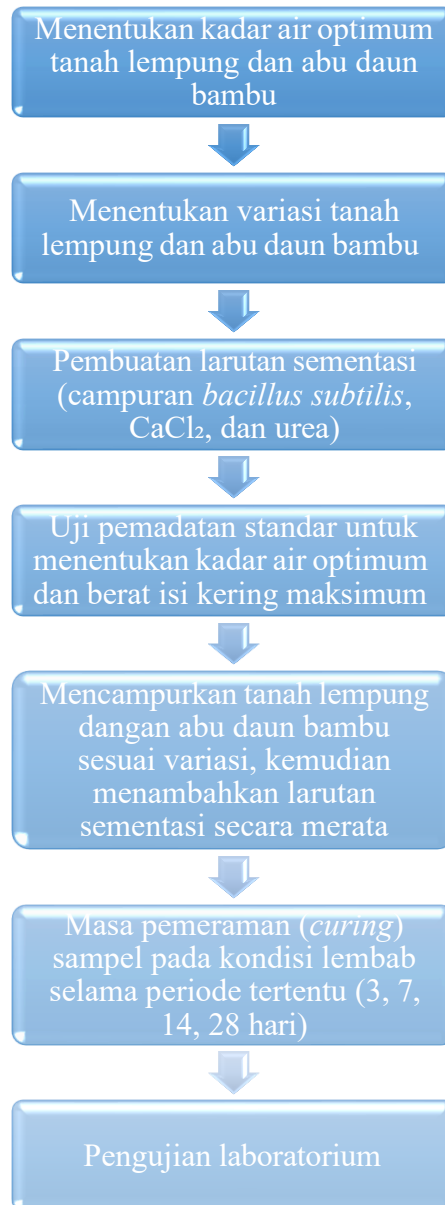
air. Berikut adalah Langkah-langkahnya:

1. Tanah yang telah dikeringkan kemudian disaring menggunakan saringan no. 4 guna memperoleh fraksi tanah yang seragam.
2. Sampel tanah selanjutnya dibagi menjadi 6 bagian, dan pada masing-masing bagian ditambahkan air dengan kadar yang telah ditentukan.
3. Cetakan standar (mold) disiapkan, kemudian salah satu bagian sampel dimasukkan ke dalam cetakan untuk dilakukan proses pemadatan.
4. Pemadatan dilakukan sesuai standar dengan menggunakan penumbuk seberat 2,5 kg dan tinggi jatuh 30,5 cm, dilaksanakan dalam tiga lapisan, di mana setiap lapisan mendapatkan 25 kali tumbukan.
5. Setelah pemadatan selesai, benda uji ditimbang, kemudian diambil sebagian tanahnya untuk penentuan kadar air.

2.7 Proses Pencampuran

Pencampuran abu daun bambu dan *Bacillus subtilis* pada tanah lempung merupakan metode stabilisasi tanah yang memanfaatkan kombinasi reaksi kimia dan biologis untuk meningkatkan kekuatan serta kestabilan tanah. Abu daun bambu berperan sebagai bahan pozzolan karena mengandung silika dan alumina yang dapat bereaksi dengan kalsium membentuk senyawa pengikat seperti kalsium silikat hidrat (C–S–H). Sementara itu, *Bacillus subtilis* berfungsi sebagai agen biologi yang menghasilkan endapan kalsit (CaCO_3) melalui proses *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), yang membantu menyatukan partikel tanah.

Ketika keduanya dicampurkan ke dalam tanah lempung, abu memperkuat struktur tanah melalui reaksi pozzolanik, sedangkan bakteri memperkuatnya melalui pengendapan mineral. Interaksi kedua mekanisme ini menghasilkan tanah yang lebih padat, memiliki daya dukung lebih tinggi, dan berkurang sifat plastisitas maupun kembang-susutnya dibandingkan tanah lempung asli.



Gambar 2.6 Bagan Proses Pencampuran Abu Daun Bambu dan Bakteri *Bacillus subtilis* Pada Tanah Lempung

2.8 Uji Hipotesis Penelitian

Uji hipotesis merupakan pendekatan dalam analisis statistik yang berfungsi untuk menguji kebenaran suatu dugaan mengenai parameter populasi berdasarkan data yang diperoleh melalui sampel penelitian. Melalui prosedur ini, peneliti dapat menilai apakah data yang tersedia memberikan dasar yang cukup kuat secara statistik untuk menerima atau menolak hipotesis yang telah dirumuskan. Pada penelitian ini, hipotesis dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Hipotesis Nol (H_0): Penambahan abu daun bambu dan bakteri *Bacillus subtilis* tidak memberikan perbedaan atau pengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat fisik dan mekanik tanah lempung
2. Hipotesis Alternatif (H_1): Penambahan abu daun bambu dan bakteri *Bacillus subtilis* memberikan perbedaan atau pengaruh terhadap peningkatan sifat fisik dan mekanik tanah lempung

Setelah menentukan hipotesis dan pengumpulan data selesai, selanjutnya adalah menganalisis data dengan metode ANOVA (*Analysis of Variance*) dua arah. Metode ANOVA dua arah ini bertujuan untuk menguji apakah 2 faktor independen (bebas) berpengaruh secara signifikan terhadap satu variabel dependen (terikat), baik secara terpisah (*main effect*) maupun secara bersamaan (interaksi). Pada penelitian ini, hipotesis dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. Menghitung nilai rata-rata variabel dependen berdasarkan kombinasi dua faktor variabel independen yang diuji. Dalam penelitian ini digunakan beberapa jenis variabel yang dapat dijelaskan sebagai berikut:
 - a. Variabel Independen (Bebas): variabel yang dimanipulasi atau diberikan perlakuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat teknis tanah. Pada penelitian ini, variabel bebas meliputi:
 - Variasi kadar abu daun bambu terhadap berat kering tanah (% dari berat tanah kering).
 - Variasi waktu (dalam kurun hari)
 - b. Variabel Dependen (Terikat): variabel yang diamati sebagai respon atau akibat dari perlakuan terhadap variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel terikat mencakup parameter sifat fisik dan mekanik tanah.
 - c. Variabel Kontrol: variabel yang dijaga tetap selama penelitian agar hasil tidak dipengaruhi oleh faktor luar selain variabel utama. Variabel kontrol pada penelitian ini antara lain:
 - Jenis dan karakteristik tanah lempung yang digunakan
 - Prosedur pemadatan sampel
 - Persentase optimum MICP (6%)

2. Menghitung *Sum of Squares* (SS)

Tahapan ini bertujuan untuk menentukan besarnya variasi data yang timbul akibat pengaruh dua faktor yang diuji maupun akibat kesalahan eksperimental. Nilai *Sum of Squares* (SS) berfungsi untuk menggambarkan sejauh mana penyimpangan data terhadap nilai rata-rata keseluruhan.

Dalam analisis ANOVA dua arah, terdapat empat komponen utama SS yang dihitung, yaitu:

$$SS_{\text{Total}} = \sum Y^2 - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$SS_{\text{Faktor A}} = \frac{\sum TA^2}{nB \times r} - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$SS_{\text{Faktor B}} = \frac{\sum TB^2}{nA \times r} - \frac{G^2}{n} \dots\dots\dots(2.18)$$

$$SS_{\text{Faktor Ax B}} = \frac{\sum TB^2}{nA \times r} - \frac{G^2}{n} - SSA - SSB \dots\dots\dots(2.19)$$

$$SS_{\text{Error}} = SST - SSA - SSB - SSAB \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan Keterangan:

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

3. Menghitung *Degrees of Freedom* (F)

Pada analisis ANOVA, degrees of freedom digunakan untuk menunjukkan jumlah informasi independen yang dapat dimanfaatkan dalam memperkirakan tingkat variasi yang terdapat pada data penelitian.

$$df_{\text{Total}} = n - 1 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$df_{\text{Faktor A}} = a - 1 \dots\dots\dots(2.22)$$

$$df_{\text{Faktor B}} = b - 1 \dots\dots\dots(2.23)$$

$$df_{\text{Faktor Ax B}} = (a - 1) \times (b - 1) \dots\dots\dots(2.24)$$

$$df_{\text{Error}} = n - (na \times nb) \dots\dots\dots (2.25)$$

Dengan Keterangan:

df = *Degrees of Freedom*

n = Total observasi

b = Jumlah level faktor B

a = Jumlah level faktor A

4. Menghitung *Mean Square* (MS) dan *Mean Square Error* (MSE) Sebelum menentukan nilai F dalam pengujian hipotesis, terlebih dahulu dilakukan perhitungan terhadap nilai *Mean Square* (MS) dan *Mean Square Error* (MSE). Nilai *Mean Square* merepresentasikan rata-rata variasi data yang dihasilkan oleh masing-masing faktor, sedangkan *Mean Square Error* menggambarkan rata-rata variasi yang muncul akibat kesalahan atau faktor acak. Tahapan ini bertujuan untuk menilai sejauh mana pengaruh faktor yang diuji dibandingkan dengan variasi acak yang terdapat dalam data penelitian.

$$MS_A = \frac{SSA}{dfA} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$MS_B = \frac{SSB}{dfB} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$MS_{AB} = \frac{SSAB}{dfAB} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$MS_E = \frac{SSE}{dfE} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dengan Keterangan:

MS = Mean Square

SS = Sum of Squares

5. Nilai F berfungsi sebagai dasar perbandingan varians antar faktor dalam penelitian untuk menilai apakah perbedaan antar perlakuan menunjukkan signifikansi secara statistik atau tidak. Setelah nilai *Mean Square* (MS) diperoleh, nilai F hitung dapat ditentukan melalui rumus berikut:

$$F_A = \frac{MSA}{MSE} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$F_B = \frac{MSB}{MSE} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$F_{AB} = \frac{MSAB}{MSE} \dots\dots\dots (2.32)$$

6. Perbandingan Nilai F Hitung dengan F Kritis. Nilai F Kritis diperoleh

melalui tabel distribusi F pada tingkat signifikansi tertentu (contohnya $\alpha = 0,05$). Langkah ini dilakukan untuk membandingkan nilai F hitung dengan F Kritis guna mengetahui apakah perbedaan yang muncul antar perlakuan memiliki makna signifikan secara statistik.

Tabel 2.6 Distribusi nilai F dengan signifikasi $\alpha = 0,05$

df untuk penyebut (N2)	df untuk pembilang (N1)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.10	2.08	2.06
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01
31	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20	2.15	2.11	2.08	2.05	2.03	2.00
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	2.10	2.07	2.04	2.01	1.99
33	4.14	3.28	2.89	2.66	2.50	2.39	2.30	2.23	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	2.00	1.98
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	2.08	2.05	2.02	1.99	1.97
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	2.07	2.04	2.01	1.99	1.96
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	2.07	2.03	2.00	1.98	1.95
37	4.11	3.25	2.86	2.63	2.47	2.36	2.27	2.20	2.14	2.10	2.06	2.02	2.00	1.97	1.95
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	2.05	2.02	1.99	1.96	1.94
39	4.09	3.24	2.85	2.61	2.46	2.34	2.26	2.19	2.13	2.08	2.04	2.01	1.98	1.95	1.93
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92
41	4.08	3.23	2.83	2.60	2.44	2.33	2.24	2.17	2.12	2.07	2.03	2.00	1.97	1.94	1.92
42	4.07	3.22	2.83	2.59	2.44	2.32	2.24	2.17	2.11	2.06	2.03	1.99	1.96	1.94	1.91
43	4.07	3.21	2.82	2.59	2.43	2.32	2.23	2.16	2.11	2.06	2.02	1.99	1.96	1.93	1.91
44	4.06	3.21	2.82	2.58	2.43	2.31	2.23	2.16	2.10	2.05	2.01	1.98	1.95	1.92	1.90
45	4.06	3.20	2.81	2.58	2.42	2.31	2.22	2.15	2.10	2.05	2.01	1.97	1.94	1.92	1.89

(Sumber: Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*)