

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Dalam penelitian ini penulis menjadikan beberapa penelitian terdahulu sebagai referensi, perbandingan, serta tolak ukur untuk mempermudah penulis dalam melakukan penelitian.

Penelitian pertama yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul *Effect of Soil Stabilization on Subgrade Soil Using Cement, Lime and Fly Ash* (Saleh & Hussein, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki sifat tanah *subgrade* sampel dengan menstabilkannya menggunakan tiga bahan aditif yang berbeda dengan sifat dan kuantitas yang berbeda agar proses stabilisasi tanah hemat biaya, ramah lingkungan, dan memberikan hasil yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan tanah dan nilai CBR meningkat setelah menambahkan berbagai jenis aditif. Untuk yang merupakan jenis tanah *Silty, Clayey Gravel* dan *Sand*, setelah menambahkan (3%, 6%, 10%) semen, nilai CBR berubah dari 5,25% menjadi (44,3%, 71%, 102,5%) masing-masing. Menambahkan *Fly ash* berubah menjadi (8,75%, 9%, 10,2%).

Penelitian kedua yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul *Research Article Effect of Fly Ash and Cement on the Engineering Characteristic of Stabilized Subgrade Soil: An Experimental Study* (Rai *et al.*, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas penggunaan limbah *fly ash* (FA) dan semen (OPC) dalam stabilisasi tanah *subgrade* dan hal-hal yang mempengaruhi tingkat stabilisasi. Hasil pengujian untuk tanah *subgrade* menggambarkan bahwa batas Atterberg dan indeks plastisitas menurun dengan penambahan proporsi *fly ash* dan semen yang berbeda, yaitu, masing-masing 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dan 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%. Nilai CBR tanah yang tidak diolah adalah 2,91%, sedangkan nilai CBR terbaik dari *fly ash* dan tanah yang diolah campuran semen adalah 10,12% (20% FA+8% OPC), yang meningkat 71,34% dari nilai awal.

Penelitian ketiga yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul *Engineering Properties Soil Stabilized with Cement and Fly Ash Sustainable Road*

Construction (Nguyen & Phan, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki sifat rekayasa tanah yang distabilkan dengan berbagai konsentrasi kadar semen dan *fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan tanah signifikan setelah penambahan semen dan *fly ash* secara bersamaan dan dapat memenuhi persyaratan untuk lapisan *base* konstruksi jalan.

Penelitian keempat yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul Kinerja *Fly Ash* Terhadap Stabilisasi Tanah Lunak Sebagai Material Perbaikan Tanah Dasar (*Subgrade*) (Wahyuni et al., 2021). Penelitian ini berusaha untuk memperbaiki kualitas sifat fisis dan mekanis tanah lunak dengan mengetahui penambahan pengaruh *fly ash* variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan waktu pemeraman 0 hari, 7 hari, dan 14 hari terhadap nilai CBR (*California Bearing Ratio*) dengan kondisi suhu ruang, agar dapat memenuhi kriteria sebagai tanah dasar (*subgrade*) untuk konstruksi jalan. Hasil penelitian menunjukkan nilai CBR meningkat seiring penambahan persentase *fly ash* serta lamanya pemeraman. Peningkatan nilai CBR optimum terjadi pada penambahan 15% *fly ash* dengan waktu pemeraman 14 hari sebesar 23,89% di suhu ruang.

Penelitian kelima yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul Pengaruh Penggunaan Semen dan *Fly ash* Terhadap Nilai CBR Tanah Lempung Muara Fajar (Nugroho & Satibi, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh pemakaian campuran abu terbang dan semen pada lempung Muara Fajar Kota Pekanbaru. Penelitian meliputi perubahan plastisitas karena penambahan aditif, perubahan kadar air dan berat volume serta perubahan nilai CBR. Penggunaan semen sebesar 3% sampai dengan 5% dan abu terbang sebesar 5% sampai dengan 15%, merubah lempung plastisitas tinggi menjadi lanau dengan plastisitas tinggi. Panas hidrasi sebagai hasil reaksi antara mineral lempung dengan semen dan abu terbang menyerap air. Stabilisasi lempung plastisitas tinggi dengan semen 5% dan abu terbang (5%-15%) bisa digunakan sebagai lapis tanah dasar (*subgrade*) perkerasan jalan. Penambahan semen 5% dan abu terbang 10%-15% dengan pemeraman minimal 7 hari dan direndam 4 hari bisa digunakan sebagai lapis pondasi bawah (*subbase*) atau material timbunan lereng perkerasan jalan raya.

Penelitian keenam yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul Pengaruh Pemakaian Difa *Soil Stabilizer* terhadap Daya Dukung Tanah Lempung untuk Konstruksi Jalan (Karami & Diana, 2013). Tujuan penelitian adalah melihat sifat mekanik yang berhubungan dengan daya dukung (nilai CBR) dan potensi pengembangan tanah lempung yang distabilisasi dengan bahan tambah Difa *Soil Stabilizer*. Untuk itu, tanah lempung dibagi menjadi lima variasi yaitu variasi 1 (tanah asli), variasi 2 (tanah asli ditambah 8% semen dan 0% Difa), variasi 3 (tanah asli ditambah 4% semen dan 3% Difa), variasi 4 (tanah asli ditambah 6% semen dan 3% Difa) dan variasi 5 (tanah asli ditambah 8% semen dan 3% Difa). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan Difa *Soil Stabilizer* dapat meningkatkan nilai CBR tanpa rendaman dan CBR rendaman untuk semua variasi pemeraman dan menurunkan potensi pengembangan tanah lempung. Perubahan nilai CBR dan potensi pengembangan tanah lempung ini menyebabkan berkurangnya ketebalan lapisan pondasi pada struktur perkerasan jalan.

Penelitian ketujuh yang dijadikan referensi yaitu penelitian dengan judul Stabilisasi Tanah Lempung Organik Menggunakan Semen dan Difa *Soil Stabilizer* (Siboro *et al.*, 2018). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kandungan organik (bervariasi dari 3, 6, 9, dan 12% dengan berat kering) terhadap nilai CBR tanah liat, dan untuk menganalisis peningkatan kekuatannya setelah distabilkan menggunakan semen dan Difa SS (5% dan 1% dengan berat kering). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CBR dari tanah liat pencampuran menurun secara signifikan dari 16,89% menjadi 10,39% karena penambahan kandungan organik sebesar 3%. Setelah 14 hari, nilai CBR tanah liat yang distabilkan semen menghasilkan peningkatan menjadi 141,04% sedangkan nilai CBR tanah liat dengan penambahan semen dan Difa SS meningkat menjadi 97,17%. Selanjutnya, semakin tinggi jumlah kandungan organik yang ditambahkan ke tanah, semakin rendah nilai CBR dari tanah yang distabilkan. Dari hasil tersebut disimpulkan bahwa kandungan organik sangat mempengaruhi efektivitas perlakuan semen dan Difa SS terhadap tanah.

2.2 Lapis Pondasi Jalan

Lapis pondasi adalah bagian dari perkerasan jalan raya yang terletak diantara lapis permukaan jalan dan tanah dasar. Salah satu fungsi utama lapis pondasi pada perkerasan lentur adalah untuk menyebarkan beban kendaraan agar tegangan yang sampai ke tanah dasar tidak melampaui tegangan yang mampu menimbulkan deformasi yang berlebih, sedangkan pada perkerasan kaku, fungsi utama lapis pondasi adalah untuk mencegah pemompaan.

Lapis pondasi dapat terdiri atas dua bagian, yaitu lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah. Pada perkerasan kaku, istilah lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah kadang-kadang digunakan secara bergantian. Karena letak lapisan ini berada langsung di bawah lapis permukaan sehingga menerima tegangan yang besar akibat beban roda kendaraan, maka lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah pada perkerasan lentur harus mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap deformasi. lapis pondasi bawah dapat mempunyai mutu yang lebih rendah daripada mutu untuk lapis pondasi atas, karena posisinya yang terletak di bawah lapis pondasi atas.

Lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah dapat dibuat dari berbagai jenis bahan, tergantung pada ketersediaan bahan, efisiensi pengerjaan serta fungsi lainnya. Lapis pondasi jalan dapat dibuat dari berbagai jenis bahan, tergantung pada ketersediaannya, efisiensi pengerjaan serta fungsi lainnya. Jenis-jenis lapis pondasi dapat dibuat dari agregat, stabilisasi semen, stabilisasi kapur, stabilisasi aspal dan lapis pondasi stabilisasi lain (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2006). Setiap jenis lapisan pondasi jalan memiliki sifat-sifat yang harus dipenuhi, untuk standar sifat-sifat lapis pondasi agregat dapat dilihat pada Tabel 2.1, sedangkan sifat-sifat untuk lapis pondasi stabilisasi akan dibahas lebih lanjut pada pembahasan stabilisasi tanah.

Tabel 2. 1 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat dan Lapis Drainase

Sifat-sifat	Lapis Pondasi Agregat			Lapis Drainase
	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 2417:2008)	0-40%	0-40%	0-40%	0-40%
Butiran pecah, tertahan ayakan No.4 (SNI 7619:2012)	95/90	55/50	55/50	80/75
Batas Cair (SNI 1966:2008)	0-25	0-35	0-35	-
Indeks Plastisitas	0-6	4-10	4-15	-

Sifat-sifat	Lapis Pondasi Agregat			Lapis Drainase
	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
Gumpalan Lempung dan Butiran-Butiran Mudah Pecah (SNI 4141:2015)	0-5%	0-5%	0-5%	0-5%
CBR rendam (SNI 1744:2012)	Min. 90%	Min 60%	Min 50%	-

(Sumber: Spesifikasi Umum Kementerian PUPR, 2020)

2.3 Tanah

Tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (Hardiyatmo, 2002). Tanah berasal dari bahan organik yang telah melapuk atau padat disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel padat tersebut (Hardiyatmo, 2010). Proses pelapukan yang membentuk tanah dapat berasal dari batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi. Pembentukan tanah yang berasal dari pelapukan batuan terjadi secara fisik maupun kimia. Proses pelapukan secara fisik didasari oleh adanya pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau akibat perubahan suhu serta cuaca yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil berbentuk bulat, bergerigi maupun bentuk-bentuk diantaranya. Sedangkan pelapukan secara kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbondioksida, air (terutama yang mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia yang lain (Hardiyatmo, 2002).

2.4 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan suatu sistem yang mengatur beberapa jenis tanah yang berbeda-beda akan tetapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok- kelompok dan sub kelompok berdasarkan penggunaannya (Das, 1991). Klasifikasi tanah bertujuan untuk memberikan keterangan mengenai sifat-sifat teknis dari tanah itu sendiri, sehingga dapat diberikan nama serta istilah yang tepat sesuai dengan sifatnya, selain itu klasifikasi tanah menggambarkan karakteristik mekanis dari tanah, serta menentukan kualitas tanah untuk tujuan perencanaan maupun dalam pelaksanaan suatu konstruksi. Proses klasifikasi tanah dapat dilakukan secara sistematis yang didasarkan pada hasil-hasil percobaan

laboratorium serta dilakukan secara visual. Klasifikasi tanah berdasarkan hasil percobaan laboratorium dapat dilakukan menggunakan 2 sistem yang ada yaitu *Unified Soil Classification System* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)*. Sistem-sistem ini menggunakan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas.

2.4.1 Sistem klasifikasi tanah *unified*

Sistem klasifikasi tanah *unified* diusulkan oleh Casagrande pada tahun 1942 dan kemudian direvisi oleh kelompok teknisi dari USBR (*United State Bureau of Reclamation*) dan USACE (*United State Army Corps of Engineer*). Sistem USCS pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 dipakai sebagai metode standar guna mengklasifikasikan tanah oleh ASTM (*American Standard Testing of Materials*).

Tabel 2. 2 Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System*

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama jenis		
tanah berbutir kasar Lebih dari 50% butiran tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan no. 4 (4,75 mm)	GW	Kerikil Gradasi baik dan campuran pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4, C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3		
		GP	Kerikil Gradasi buruk dan campuran pasir kerikil, atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau $PI < 4$ batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$		
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		bila batas Atterberg berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai doble simbol	
	pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir Gradasi baik, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6, C_c = \frac{(D_{20})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			SP	Pasir Gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
		Pasir dengan butiran halus	SM	pasir berlanau, campuran pasir lanau	Batas-batas Atterberg dibawah garis A atau $PI < 4$ batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
			SC	pasir berlempung, campuran pasir-lempung		bila batas Atterberg berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai doble simbol
		klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan no. 200 : GW, GP, SW, SP, lebih dari 12% lolos saringan no. 200 : GM, GC, SM, SC, 5% - 12% lolos saringan no. 200, batasan klasifikasi yang mempunyai simbol doble				

(Sumber: Mekanika Tanah I edisi keenam Hary Christady Hardiyatmo,2014)

Tabel 2. 3 Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System* (lanjutan)

tanah berbutir halus $\geq 50\%$ lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')	
	Lanau dan lempung batas cair > 50%	OL	lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
		MH	lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elasis.	
		CH	lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fatclays')	
		OH	lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt	Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

(Sumber: Mekanika Tanah I edisi keenam Hary Christady Hardiyatmo, 2014)

Sistem USCS membagi tanah ke dalam dua kategori utama yaitu:

- Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir dengan persentase kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$). Simbol kelompok tanah berbutir kasar diawali dengan huruf G untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil (*gravelly soil*) dan S untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir (*sandy soil*).
- Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) dengan persentase lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$). Simbol kelompok tanah berbutir halus diawali dengan huruf C untuk lempung (*anorganic clay*), M untuk lanau (*anorganic silt*), O untuk lanau atau lempung organik, dan Pt untuk tanah gambut atau tanah organik tinggi (*peat*). Kategori-kategori tersebut selanjutnya diberi kode berupa huruf W untuk tanah dengan gradasi baik (*well-graded*), P untuk

gradasi buruk (*poorly graded*), H untuk tanah dengan plastisitas tinggi (*high-plasticity*), dan L untuk tanah dengan plastisitas rendah (*low-plasticity*).

2.4.2 Sistem klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials Classification*) membagi tanah ke dalam 8 kelompok yaitu A-1 sampai dengan A-8. Sistem ini digunakan untuk menentukan kualitas tanah dalam perencanaan timbunan jalan, *subbase* dan *subgrade*. Setiap kelompok tanah dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg.

Tanah dalam tiap kelompok akan dievaluasi lebih lanjut dengan Indeks kelompok (*group index*) (GI). Semakin indeks kelompok (GI) suatu tanah, maka tanah semakin berkurang ketepatan penggunaan. Tanah yang kurang dari 35% lolos saringan nomor 200 maka diklasifikasikan ke dalam A-1 sampai A-3. Tanah A-1 adalah tanah granular yang bergradasi baik, tanah A-2 termasuk tanah granular yang mengandung lanau dan lempung, sedangkan tanah A-3 merupakan pasir bersih bergradasi buruk. Tanah yang lebih dari 35% lolos saringan nomor 200 diklasifikasikan dari A-4 sampai A-7, yaitu tanah lempung-lanau. Tanah organik tinggi seperti tanah gambut (*peat*) diklasifikasikan ke dalam kelompok A-8. Nilai indeks kelompok atau *Group Indeks* (GI) ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$GI = (F - 35) [0.2 + 0,005 (LL - 40)] + 0.01(F - 15) (PI - 10) \quad (2.1)$$

Keterangan:

F adalah persentase butiran yang lolos saringan No.200 (%)

LL adalah batas cair (*liquid limit*) (%)

PI adalah indeks plastisitas (%)

Tabel 2. 4 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

Klasifikasi Umum	Material Granuler (< 35% lolos saringan No.200)							Tanah Lanau - Lempung (> 35% lolos saringan No.200)			
	A-1		A-3	A-2-4	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi Kelompok	A-1-a	A-1-b									
					A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5/ A-7-6
Analisa ayakan (100%) No. 10 No. 40 No. 200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Maks 10	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Min 36	Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos Saringan No. 40 Batas cair (LL) Indeks Plastisitas (PI)	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 41 Min 11	Min 41 Min 41	Maks 40 Maks 10	Maks 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek										

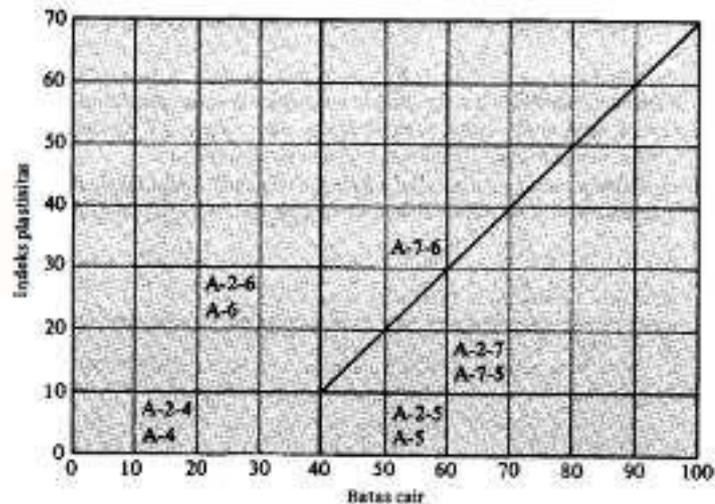
(Sumber: Mekanika Tanah I edisi keenam Hary Christady Hardiyatmo,2014)

Catatan:

Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisitasnya

Untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-5

Untuk PL < 30, klasifikasinya A-7-6



Gambar 2. 1 Rentang (*range*) dari Batas Cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) untuk Tanah Dalam Kelompok A-2, A-4, A-5, A-6 dan A-7

Terdapat beberapa kriteria penting yang harus diperhatikan terkait klasifikasi tanah dengan sistem AASHTO, kriteria tersebut diantaranya adalah:

- 1) Ukuran butiran
 - a. Kerikil adalah bagian tanah yang tertahan pada ayakan no.4 (4,75 mm)
 - b. Pasir adalah fraksi tanah yang lolos ayakan no.4 (4,75 mm) dan yang tertahan ayakan no.200 (0.075 mm)
 - c. Lanau adalah fraksi tanah yang berukuran 0,002 mm – 0,0075 mm
 - d. Lempung adalah fraksi tanah yang diameternya < 0,002 mm
- 2) Apabila terdapat batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan dalam contoh tanah maka batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu dan persentase batuan tersebut dicatat.

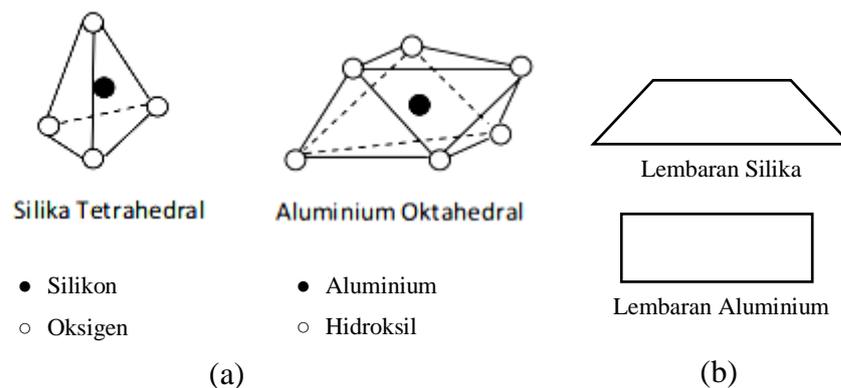
2.5 Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan tanah yang terbentuk dari hasil pelapukan akibat reaksi kimia yang menghasilkan partikel- partikel mikroskopis dan sub mikroskopis serta berbentuk lempeng dengan kandungan mineral-mineral lempung dengan diameter butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm. Pada tanah lempung, variasi kadar air dapat mempengaruhi sifat-sifat plastisitas tanah, keberadaan air membuat luas permukaan tanah (*specific surface*) akan menjadi lebih besar. Tanah lempung akan

menjadi sangat keras saat kadar air yang terkandung kecil (dalam keadaan kering), tanah lempung dapat juga bersifat plastis dalam kadar air sedang, sedangkan pada kadar air yang tinggi, tanah lempung bersifat lengket dan sangat lunak. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut:

1. Ukuran butiran halus, kurang dari 0,002 mm
2. Permeabilitas rendah
3. Kenaikan air kapiler tinggi
4. Bersifat sangat kohesif
5. Proses konsolidasi lambat

Tanah lempung pada umumnya tersusun dari silika tetrahedral dan aluminium oktahedra. Kedua senyawa tersebut digambarkan pada Gambar 2.2.a Untuk memudahkan di dalam penggambaran komposisi senyawa lempung, mineral silika dan aluminium dalam tanah lempung dapat disimbolkan sebagaimana tergambar pada Gambar 2.2.b.



Gambar 2. 2 Mineral-mineral Lempung

Tanah lempung terdiri dari berbagai mineral, mineral yang paling dominan adalah mineral *kaolinite*, *Halloysite*, *montmorillonite* dan *illite*. Masing-masing mineral lempung terbentuk dari kombinasi tumpukan dan susunan lembaran silika tetrahedral dan aluminium oktahedra dengan bentuk dan dimensi yang berbeda-beda.

Kaolinite merupakan mineral yang terdiri dari susunan satu lembar silika tetrahedra dan satu lembar aluminium oktahedra. Kedua lembaran tersebut terikat bersama-sama, ujung dari lembaran silika dan satu lapisan lembaran oktahedra

membentuk suatu lapisan tunggal. Dalam kombinasi lembaran silika dan aluminium, keduanya terikat oleh ikatan hidrogen yang relatif stabil, sehingga mineral *kaolinite* lebih stabil dan antara lempengan mineral tidak dapat dimasuki air.

Halloysite adalah mineral yang hampir serupa dengan *kaolinite*, akan tetapi memiliki kesatuan urutan yang lebih acak ikatannya serta dapat dipisahkan oleh lapisan tunggal molekul air. Hilangnya lapisan tunggal air akibat proses penguapan, akan menyebabkan mineral ini berkelakuan lain. Sifat tanah berbutir halus yang mengandung *halloysite* mengalami perubahan drastis saat tanah dipanaskan sampai menghilangkan lapisan tunggal molekul airnya. Sifat khusus lainnya yang dimiliki mineral ini adalah bentuk partikelnya yang menyerupai silinder-silinder memanjang, tidak seperti *kaolinite* yang berbentuk pelat.

Montmorillonite atau *smectite*, adalah mineral lempung yang dibentuk oleh dua lembar silika dan satu lembar aluminium. Lembaran oktahedra diapit di antara dua lembaran silika, dengan ujung tetrahedra bercampur dengan hidroksil dari lembaran oktahedra untuk membentuk satu lapisan aluminium melalui magnesium. keberadaan ikatan Van der Waals yang lemah di antara ujung lembaran silika serta adanya kekurangan muatan negatif yang terkandung dalam lembaran oktahedra, air dan ion-ion yang berpindah-pindah dapat masuk dan memisahkan lapisannya. Sehingga, kristal *montmorillonite* yang berukuran sangat kecil, pada waktu tertentu mampu memiliki gaya tarik yang kuat dengan air. Tanah-tanah yang mengandung *montmorillonite* sangat mudah mengembang dengan penambahan kadar air.

Illite adalah mineral lempung yang terdiri dari susunan sebuah lembaran aluminium oktahedra yang terikat di antara dua lembaran silika tetrahedra. Pada lempung *Illite*, lembaran oktahedra bersubstitusi parsial terhadap aluminium oleh magnesium dan besi, dan dalam lembaran tetrahedral dapat pula terjadi substitusi silikon aluminium. Lembaran-lembaran *Illite* terikat bersama-sama oleh ikatan lemah ion-ion kalium yang terdapat di antara lembaran tersebut. Ikatan-ikatan ion kalium (K^+) lebih lemah dari ikatan hidrogen yang mengikat satuan kristal *kaolinite*, namun memiliki kekuatan yang lebih besar dari pada ikatan ionik yang

membentuk *montmorillonite*. Susunan *Illite* memiliki sifat yang tidak mudah mengembang oleh air di antara lembaran-lembarannya.

2.6 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah suatu metode rekayasa tanah yang bertujuan untuk mempertahankan dan/atau meningkatkan sifat-sifat tertentu pada tanah, sehingga lapisan tanah tersebut dapat memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan (Panguriseng, 2017). Syarat-syarat teknis lapisan tanah yang dibutuhkan dalam mengoptimalkan kinerja konstruksi, antara lain adalah kapasitas daya dukung tanah, kuat geser tanah (*shear strength*), penurunan (*settlement*), permeabilitas tanah, dan lain sebagainya, yang mana syarat teknis tersebut disesuaikan dengan jenis dan fungsi konstruksi yang akan dibangun.

Secara garis besar, klasifikasi stabilisasi tanah dapat dibedakan atas dua macam, yaitu perbaikan tanah (*soil improvement*) dan perkuatan tanah (*soil reinforcement*). Perbaikan tanah (*soil improvement*) adalah suatu metode stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan *additive* (kimiawi), pencampuran tanah (*re-gradation*), pengeringan tanah (*dewatering*) atau melalui penyaluran energi statis/dinamis ke dalam lapisan tanah. Perbaikan tanah (*soil improvement*) relevan dengan stabilisasi kimia dan stabilisasi fisik. Sedangkan, perkuatan tanah (*soil reinforcement*) adalah suatu metode stabilisasi tanah dengan memberikan material sisipan ke dalam lapisan tanah tersebut. Perkuatan tanah (*soil reinforcement*) ini relevan dengan jenis stabilisasi mekanis.

Bila ditinjau dari proses pelaksanaan stabilisasi tanah, maka stabilisasi tanah dapat dibedakan atas tiga jenis, yakni:

1. Stabilisasi Kimia

Stabilisasi Kimia adalah metode stabilitas tanah dengan menambahkan bahan kimia tertentu dengan material tanah, sehingga terjadi reaksi kimia antara material tanah dengan bahan pencampurnya, yang akan membentuk material baru yang memiliki sifat teknis yang lebih baik.

2. Stabilisasi Fisik

Stabilisasi Fisik adalah metode stabilitas tanah dengan memberi energi dari beban dinamis atau beban statis ke dalam lapisan tanah, sehingga terjadi dekomposisi baru dalam massa tanah. Proses ini akan memperbaiki karakteristik lapisan tanah sesuai dengan tujuan stabilisasi yang ingin dicapai.

3. Stabilisasi Mekanis

Stabilisasi Mekanis atau yang sering disebut perkuatan tanah (*soil reinforcement*) adalah metode stabilisasi dengan memasukkan material sisipan ke dalam lapisan tanah untuk meningkatkan karakteristik teknis dalam massa tanah sesuai dengan tujuan stabilisasi yang hendak dicapai. Contoh stabilisasi mekanis adalah stabilisasi dengan *metal strip*, *geomembrane*, *geotextile*, *geogrid*, *vertical drain*, dan lain sebagainya.

Stabilisasi tanah pada pekerjaan jalan biasanya dilakukan pada lapisan tanah dasar. Stabilisasi pada tanah dasar (*subgrade*) bertujuan untuk memperbaiki kapasitas dukung lapisan tanah sehingga dapat mengurangi tebal komponen perkerasan. Perkerasan lentur beserta lapisan-lapisan di bawahnya dirancang untuk mendistribusikan beban dari komponen-komponen perkerasan menuju ke tanah dasar. Beban yang diterima pada tanah dasar telah direduksi oleh lapisan di atasnya, sehingga penambahan kekuatan pada tanah dasar (*subgrade*) akan menambah umur perkerasan.

Pedoman Perencanaan Stabilisasi Tanah dengan Bahan Serbuk Pengikat untuk Konstruksi Jalan yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum mensyaratkan kriteria kekuatan tanah yang telah distabilisasi untuk pekerjaan jalan memiliki sifat kekuatan dan nilai durabilitas yang ditunjukkan pada Tabel 2.5 sedangkan kekuatan campuran biasanya disebut kekuatan struktural yang dapat dinyatakan dalam nilai UCS, CBR dan *flexural modulus*. Dengan nilai tipikal desain untuk bahan jalan yang telah distabilisasi ditunjukkan derajat pengikatan nilai stabilisasi dan dapat mengacu pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 5 Persyaratan Kekuatan dan *Durability* Tanah yang telah Distabilisasi

Pengujian	Acuan	Batas-batas sifat
Kuat tekan bebas (<i>Unconfined Compressive Strength, UCS</i>)	SNI 03-6887-2002	2,1 -2,8 MPa *) (21-28) kg/cm ²
<i>California Bearing Ratio (CBR)</i> a) Lapis Pondasi (<i>Base</i>) b) Lapis Pondasi Bawah (<i>Subbase</i>)	SNI 03-1744-1989	Minimum 90% Minimum 35%
Pengujian Basah dan Kering (nilai durabilitas) % kehilangan Berat Klasifikasi tanah: A-1, A-2-4, A-2-5 dan A-3 Klasifikasi tanah: A-2-6, A-2-7, A-4 dan A-5 Klasifikasi tanah: A-6 dan A-7	SNI 13-6427-2000	Maksimum 14% Maksimum 10% Maksimum 7%

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2007)

Tabel 2. 6 Nilai Tipikal Desain Kuat Tekan Bebas dan *Flexural* untuk Bahan Jalan yang telah Distabilisasi

Derajat Pengikatan nilai stabilisasi	Desain Kekuatan-28 hari		<i>Design flexural modulus</i>	
	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
Rendah (<i>modified</i>) *)	UCS ≤ 1	UCS ≤ 10	≤ 1000	≤ 10.000
Sedang (<i>lightly bound</i>)	1 < UCS < 4	10 < UCS < 40	1.500 - 3.000	15.000 - 30.000
Tinggi (<i>heavily bound</i>)	UCS ≥ 4	UCS ≥ 40	≥ 3000	≥ 30.00

*) Pengujian kekuatan dapat menggunakan CBR

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2007)

2.6.1 Stabilisasi kimia tanah

Metode perbaikan tanah dengan bahan kimia (Stabilisasi kimia) merupakan metode perbaikan tanah dengan mencampurkan tanah yang akan diperbaiki dengan larutan kimia dan/atau bubuk kimia (*powder*). Jenis bahan kimia yang dapat digunakan untuk stabilisasi tanah antara lain: semen *portland*, kapur, aspal, sodium klorida, kalsium klorida, limbah pabrik kertas, limbah pabrik pupuk ZA, abu-terbang (*fly ash*) dan lain sebagainya. Stabilisasi kimiawi tanah bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah seperti kekuatan, tekstur, plastisitas dan kemudahan dikerjakan (*workability*).

Bahan stabilisasi kimiawi tanah dipilih berdasarkan jenis tanah yang distabilisasi, jenis struktur yang distabilisasi, ketentuan-ketentuan tanah yang harus dicapai, tipe perbaikan tanah yang diinginkan, dana yang tersedia dan kondisi lingkungan. Langkah awal yang digunakan dalam pemilihan jenis bahan stabilisasi adalah mengetahui secara komprehensif sifat-sifat fisik maupun sifat kimia tanah yang dimiliki oleh lapisan tanah yang akan diperbaiki. Sifat atau karakteristik tanah ini dapat menjadi faktor pertimbangan untuk menentukan jenis bahan stabilisasi yang tepat sehingga target perbaikan yang diinginkan dapat tercapai. Menurut Pedoman Perencanaan Stabilisasi Tanah dengan Bahan Serbuk Pengikat untuk Konstruksi Jalan yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum pemilihan bahan stabilisasi tanah metode kimiawi dapat ditentukan berdasarkan nilai indeks propertis yang mengacu pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Jenis Bahan Pengikat untuk Stabilisasi Tanah

Jenis Bahan Stabilisasi	Besar dari 25% lolos saringan 0,075 mm			Lebih kecil atau sama dari 25% lolos saringan 0,075 mm		
	PI ≤ 10	10 < PI < 20	PI ≥ 10	PI ≤ 6 atau PI x% lolos µm ≤ 60	6 < PI < 10	PI ≥ 10
Semen dan ikatan yang dibentuk oleh sementasi						
Kapur						
Polimer						

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2007)

Keterangan:

Dianjurkan	:	
Dipertimbangkan	:	
Tidak Diajukan	:	

2.6.2 Stabilisasi tanah dengan semen

Stabilisasi tanah dengan semen adalah metode perbaikan tanah dengan serbuk pengikat berupa semen yang akan membentuk material baru berupa *soil cement*. Sasaran dari metode stabilisasi ini adalah untuk memperbesar sudut geser dalam

tanah (ϕ), melalui pembentukan kerangka (*skeleton*) di dalam tanah, meningkatkan berat volume tanah (γ), nilai kohesi tanah (c), dan memperkecil angka porositas dalam massa tanah sehingga memperkecil tekanan pori tanah (u). Peningkatan parameter-parameter tersebut dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan daya dukung tanah (q_u) dan kuat geser tanah (τ).

Reaksi semen dengan material tanah dan air pada proses stabilisasi, akan menghasilkan senyawa yang mengeras sehingga dapat memperbaiki kekuatan tanah dan sifat-sifat teknis tanah. Mekanisme reaksi kimia yang terjadi pada stabilisasi tanah semen adalah sebagai berikut:

a) Absorpsi air dan reaksi pertukaran ion;

Bila Semen *Portland* ditambahkan pada tanah dan air, ion kalsium (Ca^{2+}) akan dilepaskan melalui proses hidrolisis dan pertukaran ion akan berlanjut pada permukaan partikel-partikel lempung. Butiran lempung dalam kandungan tanah berbentuk halus dan bermuatan negatif. Ion positif seperti ion hidrogen (H^+), ion kalsium (K^+), serta air yang berpolarisasi, semuanya melekat pada permukaan butiran lempung. Dengan reaksi ini partikel-partikel lempung menggumpal sehingga mengakibatkan konsistensi tanah menjadi lebih baik.

b) Reaksi pembentukan kalsium silikat dan kalsium aluminat;

Reaksi pertukaran ion pada stabilisasi tanah semen akan menghasilkan kalsium silikat (CaO.SiO_2) dan/atau kalsium aluminat ($\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$). Proses reaksi kimia tersebut dapat dijelaskan dengan persamaan berikut :



Dari reaksi kimia di atas, maka reaksi utama yang berkaitan dengan kekuatan ialah hidrasi dari A-lit (3CaO. SiO_2) dan B-lit (2CaO.SiO_2), sehingga membentuk senyawa kalsium silikat dan kalsium aluminat yang dapat meningkatkan kekuatan tanah.

c) Reaksi *pozzolan*.

Reaksi antara silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) halus yang terkandung dalam tanah lempung dengan kandungan mineral reaktif, sehingga akan membentuk kalsium silikat hidrat seperti: tobermorit, kalsium aluminat hidrat $4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$ dan gehlenit hidrat $\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.6\text{H}_2\text{O}$ yang tidak larut

dalam air. Pembentukan senyawa-senyawa ini akan terus berlangsung untuk waktu yang lama dan menyebabkan tanah menjadi lebih keras, lebih padat dan lebih stabil.

Reaksi yang terjadi pada campuran tanah semen meningkatkan kuat tekan tanah, kapasitas daya dukung serta memperbaiki ketahanan tanah terhadap pengaruh air, namun kadar semen yang terlalu tinggi dapat menimbulkan keretakan pada tanah yang distabilkan dengan semen.

Stabilisasi tanah dengan semen umumnya dapat dilakukan pada semua jenis tanah, namun perbedaan jenis tanah dapat mempengaruhi besar kekuatan, daya dukung tanah yang dihasilkan serta kadar semen yang dibutuhkan. Kadar semen yang direkomendasikan untuk stabilisasi adalah sekitar 5% untuk kerikil, 12% untuk tanah lanau dan 20% untuk tanah lempung. Stabilisasi tanah lempung membutuhkan kadar semen yang paling tinggi dari stabilisasi dengan jenis tanah lainnya dan memberikan hasil kekuatan campuran sangat kecil bila dibandingkan dengan tanah berpasir dan kerikil berpasir. Pada tanah berpasir, banyak butiran-butiran individu yang tersementasi. Namun pada tanah lempung, porsi partikel yang dapat tersementasi kecil.

Menurut Ingles & Metcalf dalam Hardiyatmo (2017) bahwa untuk jenis tanah umum (*common soil*) yang digunakan pada bangunan umum, kebutuhan kadar semen pencampur berkisar antara 10 sampai 20%. Sedangkan menurut Pedoman Perencanaan Stabilisasi Tanah dengan Bahan Serbuk Pengikat untuk Konstruksi Jalan yang dikeluarkan oleh Departemen Pekerjaan Umum Kebutuhan semen dapat ditentukan dengan mengikuti langkah-langkah berikut:

1. Langkah 1: menentukan perkiraan awal kadar semen berdasarkan klasifikasi tanah AASHTO (Tabel 2.8).
2. Langkah 2: melakukan uji hubungan kepadatan-kadar air (*moisture-density test*) untuk menentukan kadar air optimum dan kepadatan maksimum campuran tanah semen dengan menggunakan perkiraan awal kadar semen yang diperoleh dari langkah 1.
3. Langkah 3: menentukan perkiraan awal kadar semen yang digunakan sesuai jenis tanah yang akan distabilisasi. Kadar semen yang digunakan untuk tanah kepasiran berdasarkan Tabel 2.9 sedangkan tanah kelanauan atau lempung

merujuk pada Tabel 2.10. Kedua tabel tersebut memperhitungkan kepadatan kering maksimum dan sifat-sifat tanah lainnya sehingga dapat diperoleh perkiraan kadar semen yang lebih akurat dengan variasi 2% di atas dan 2% di bawah nilai yang didapatkan.

Tabel 2. 8 Penentuan Perkiraan Persentase Semen yang Dibutuhkan

Klasifikasi tanah menurut AASTHO	Rentang umum kadar semen yang diperlukan	Perkiraan kadar semen (% berat) untuk uji pemadatan
	% berat	% berat
A-1.a	3 – 8	5
A-1.b	5 – 8	6
A-2	5 – 9	7
A-3	7 – 11	9
A-4	7 – 12	10
A-5	8 – 13	10
A-6	9 – 15	12
A-7	10 – 16	13

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum ,2007)

Tabel 2. 9 Kebutuhan Semen Rata-rata untuk Tanah Kepasiran

Tanah tertahan saringan No.4	Bahan lebih kecil dari 0,05 mm, %	Kadar semen, % berat					
		Berat isi maksimum, ton/m ³					
		1,68-1,75	1,76-1,83	1,84-1,91	1,92-1,99	2,00-2,07	> 2,08
0-14	0-19	10	9	8	7	6	5
	20-39	9	8	7	6	5	5
	40-50	11	10	9	8	6	5
15-29	0-19	10	9	7	6	5	5
	20-39	9	8	7	6	6	5
	40-50	12	10	9	8	7	6
30-45	0-19	10	8	7	6	5	5
	20-39	11	9	8	7	6	5
	40-50	12	11	10	9	8	6

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2007)

Tabel 2. 10 Kebutuhan Semen untuk Tanah Kelanauan dan Kelempungan

Grup Indeks (GI)	Bahan antara 0,05 mm dan 0,005 mm, %	Kadar semen, %berat						
		Berat isi maksimum, ton/m ³						
		1,40 – 1,50	1,51 – 1,59	1,60 – 1,67	1,68 – 1,75	1,76 – 1,83	1,84 – 1,91	≥1920
0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8	7
	40-59	13	13	11	9	9	8	8
	≥60	-	-	-	-	-	-	-
4-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	20-39	13	12	11	10	9	8	8
	40-59	14	13	12	10	10	9	8
	≥60	15	14	12	11	10	9	9
8-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	20-39	15	14	11	10	9	9	9
	40-59	16	14	12	11	10	10	9
	≥60	17	15	13	11	10	10	10
12-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	20-39	16	15	13	12	11	10	10
	40-59	17	16	14	12	12	11	10
	≥60	18	16	14	13	12	11	11
16-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	20-39	18	17	15	14	13	11	11
	40-59	19	18	15	14	14	12	12
	≥60	20	19	16	15	14	13	12

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2007)

Stabilisasi dengan semen untuk tanah lempung gemuk perlu dilakukan penanganan awal atau modifikasi tanah terlebih dahulu. Modifikasi tanah ini dimaksudkan untuk mengurangi plastisitas tanah dan menambah *workability* (kemudahan kerja) saat stabilisasi. Modifikasi tanah dilakukan dengan mencampurkan tanah dengan semen atau kapur atau bahan lainnya, lalu diperam selama 1 sampai 3 hari hingga sifat tanah berubah.

Stabilitas tanah dengan semen untuk aplikasi perkerasan jalan umumnya digunakan untuk material lapis pondasi (*base*) atau lapis pondasi bawah (*subbase*). stabilisasi ini sangat berguna untuk mereduksi tebal lapis perkerasan. Stabilisasi lapis pondasi (*base*) atau lapis pondasi bawah (*subbase*), harus memenuhi syarat gradasi, kekuatan serta keawetan. Syarat nilai CBR yang telah distabilisasi untuk lapis pondasi (*base*) berdasarkan Departemen Pekerjaan Umum adalah 90% dan untuk lapis pondasi bawah (*subbase*) adalah 35%.

2.6.3 Stabilisasi tanah – abu terbang (*fly ash*)

Fly ash dapat digunakan untuk memodifikasi tanah maupun mempercepat pembentukan kekuatan tanah yang kurang stabil. Keuntungan penggunaan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah adalah untuk memanfaatkan material hasil buangan pabrik. *Fly ash* telah digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah sejak tahun 1950. *Fly ash* yang digunakan sebagai bahan tambah untuk stabilisasi tanah-semen biasa disebut *fly ash* yang tidak mengikat sendiri atau *fly ash* kelas F.

Pencampuran *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah akan membuat plastisitas dan potensi pengembangan tanah berkurang. Menurut Feruson (1993), *fly ash* mereduksi potensi pengembangan dengan tiga acara:

1. *Fly ash* mengandung ion-ion kalsium yang mereduksi muatan permukaan lempung.
2. *Fly ash* bekerja sebagai bahan yang memberikan stabilisasi secara mekanikal dengan menggantikan sebagian volume dari partikel-partikel.
3. *Fly ash* mengikat partikel secara bersama-sama.

Kekuatan tanah yang distabilisasi dengan *fly ash* dapat ditentukan dari uji CBR atau kuat tekan bebas. Pembentukan kekuatan campuran tanah dengan *fly ash* bergantung pada waktu perawatan, temperature, energi pemadatan, dan waktu penundaan pemadatan (waktu setelah pencampuran).

2.7 Semen

Semen yang akan digunakan untuk stabilisasi tanah adalah semen Portland tipe I sesuai SNI 15-2049-2004. Semen *portland* adalah semen hidrolis yang berfungsi sebagai perekat yang mengikat fragmen-fragmen mineral menjadi suatu kesatuan yang kompak saat bereaksi dengan air. Semen *portland* terbuat dari batu kapur yang mengandung kapur (CaO) dan lempung yang mengandung silika (SiO₂), oksida alumina (Al₂O₃) dan oksida besi (Fe₂O₃) dan 3-5% gips untuk mengendalikan waktu pengikat semen agar tidak berlangsung terlalu cepat. Reaksi kimia yang terjadi pada semen akan menghasilkan senyawa kalsium silikat. Kalsium silikat (C₃S dan C₂S) merupakan senyawa yang memenuhi 70-80% dari semen. Senyawa C₃S menyebabkan semen terhidrasi saat terkena air serta berpengaruh besar pada

kecepatan pengerasan semen terutama sebelum mencapai 14 hari. Sedangkan C_2S bereaksi lebih lambat terhadap air dan memberikan pengaruh pengerasan semen setelah 7 hari. Senyawa C_2S memberikan kekuatan final dan membuat semen tahan terhadap pengaruh kimia, unsur C_2S juga dapat mereduksi penyusutan saat pengeringan.

Semen yang digunakan untuk stabilisasi tanah harus dilakukan pengujian waktu ikat awal terlebih dahulu sesuai SNI 03-6827-2002. Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan lama waktu pengadukan atau proses stabilisasi yang dibutuhkan.

2.8 Fly Ash (Abu Terbang)

Fly ash adalah abu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara yang terdiri dari partikel-partikel halus. Berdasarkan SNI 03-6414 (2002) mendefinisikan *fly ash* atau abu terbang sebagai limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar, dan bersifat *pozzolanic* (Wahyuni *et al.*, 2021). Pada pembangkit listrik bertenaga batubara modern, *fly ash* umumnya ditangkap oleh pengendapan elektrostatis atau peralatan filtrasi partikel lainnya sebelum gas buang mencapai cerobong asap. Komponen abu terbang sangat bervariasi tergantung pada sumber dan komposisi batubara yang dibakar, tetapi semua abu terbang mengandung sejumlah besar silikon dioksida (SiO_2) baik itu *amorf* maupun kristal, aluminium oksida (Al_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), senyawa mineral utama dalam strata batuan pembawa batu bara (Indriyati *et al.*, 2019).

Karakteristik abu terbang sangat penting diketahui untuk memahami reaksi bahan ini terhadap tanah atau material yang berada di lapangan. 80-99% butiran abu terbang umumnya lolos saringan No. 200 (0,075 mm). Dalam sistem klasifikasi USCS, abu terbang termasuk material berbutir halus lanau.

Klasifikasi abu terbang umumnya dikaitkan dengan maksud penggunaannya. Klasifikasi abu terbang pada ASTM C 618 didasarkan pada sumber batu bara kadar oksida dari elemen pembentuk utamanya. Abu terbang dibedakan menjadi 2 tipe klasifikasi, abu terbang tipe kelas F, yaitu abu terbang yang berasal dari

pembakaran batu bara dengan kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan persentase minimum 70 %, dan abu terbang tipe kelas C yang berasal dari pembakaran batu bara dengan kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan persentase minimum 50 %. Abu terbang kelas C umumnya digunakan untuk bahan pengikat sendiri (tanpa dicampur semen atau kapur). Komposisi bahan kimia abu terbang secara tipikal, yang diberikan oleh Rollings dan Rollings (1975) ditunjukkan Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Komposisi Bahan Kimia Semen *Portland* dan Abu Terbang

Material	Komposisi Kimia		
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Semen <i>portland</i>	60-70	17-25	3-6
Abu terbang kelas F	1-7	45-64	20-30
Abu terbang kelas C	12-29	44-64	20-30

2.9 Difa Soil Stabilizer

Difa SS merupakan salah satu bahan stabilisasi berbasis *Ion Exchange* yang dapat meningkatkan daya dukung tanah. Bahan ini tidak bekerja sendiri, namun lebih mengefektifkan semen-tanah dengan melarutkan asam humus pada permukaan butiran tanah (Mahakarya, 2012).

Partikel tanah apabila dilihat dengan mikroskop maka pada permukaannya akan terlihat lapisan air yang tipis. Lapisan ini memiliki kekuatan yang luar biasa, untuk memindahkan lapisan air ini, dibutuhkan energi yang besar. Air ini dapat bergerak dengan arah horizontal tetapi tidak dapat bergerak secara vertikal sehingga dapat menghambat semen menjadi keras. Dengan menggunakan Difa hambatan itu bisa dihilangkan. Hal ini bisa dilakukan karena kandungan dari Difa dipilih dari material anorganik yang memiliki energi ikatan ion lebih besar dibandingkan dengan materi logam yang berada pada permukaan butiran tanah.

Difa SS dapat dicampur dengan bahan stabilisasi lain seperti: *fly ash*, semen, abu sekam padi dan *cementitious* material lainnya, sehingga dapat meningkatkan daya dukung tanah dan menjadikan *soil-cement* tidak rapuh karena bersifat semakin terendam air akan semakin baik.

2.10 Pengujian Laboratorium

2.10.1 Pengujian sifat fisik material dan campuran

2.10.1.1 Kadar air

Kadar air adalah perbandingan berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat keseluruhan sampel tanah yang dinyatakan dalam persen. Kadar air tanah merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan korelasi antara perilaku tanah dengan sifat fisik tanah. Pemeriksaan kadar air dilakukan menggunakan metode kering oven (*oven drying method*), dimana benda uji dipanaskan selama 16 sampai dengan 24 jam pada suhu 110 ± 5 °C. Pada keadaan khusus, benda uji yang tanah lempung yang terdiri dari mineral monorolinote/holosite, *gypsum*, ataupun bahan-bahan organik (seperti tanah gambut), maka suhu pengeringan dalam oven maksimum adalah 60°C, dengan waktu pengeringan yang lebih lama. Penentuan kadar air termasuk pengujian yang rutin dilaksanakan pada pengujian tanah.

2.10.1.2 Berat jenis (*specific gravity*)

Berat jenis atau berat spesifik (*specific gravity*) (Gs) adalah angka perbandingan (rasio) antara berat isi butiran tanah dan berat isi air suling (*distilled water*). Berat jenis tanah (Gs) adalah perbandingan antara berat butir tanah dan berat air pada volume yang sama dan suhu tertentu. Berat jenis tanah digunakan untuk menghitung *index properties* tanah seperti angka pori, berat isi tanah, derajat kejenuhan, dan karakteristik pemampatan serta sifat-sifat penting tanah lainnya. Nilai berat jenis berbagai jenis tanah berbeda satu sama lain sesuai jenis mineral tanah yang terkandung di dalamnya. Nilai-nilai berat jenis tanah untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2. 12 Berat Jenis Tanah (*Specific Gravity*)

Jenis tanah	Berat jenis (Gs)
Kerikil	2,65-2,68
Pasir	2,65-2,68
Lanau anorganik	2,62-2,68
Lempung organik	2,58-2,65
Lempung anorganik	2,68-2,75

Jenis tanah	Berat jenis (Gs)
Humus	1,37
Gambut	1,25-1,80

(Sumber: Hary Christady Hardiyatmo,2014)

2.10.1.3 Analisa saringan

Analisa saringan merupakan metode yang dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah yang mempunyai ukuran lebih besar dari 0,075 mm. Ukuran ayakan yang umum digunakan untuk mengetahui distribusi butiran tanah berdasarkan *American Society for Testing and Materials* (ASTM,1981), *British Standard* (BS 410:BS 1377,1975), dan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) dapat dilihat pada Tabel 2.13 di bawah ini.

Tabel 2. 13 Diameter Lubang Ayakan Beberapa Standar

<i>American Society for Testing and Materials</i> (ASTM)		AASHTO	<i>British Standard</i>	
Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)	Ukuran lubang (mm)	Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)
No. 4	4,76	4,75		
No. 6	3,35			
No. 8	2,36	2,36	No. 8	2,057
No. 10	2,00			
No. 16	1,18	1,18	No. 16	1,003
No. 20	0,841			
No. 30	0,595	0,600	No. 30	0,500
			No. 36	0,422
No. 40	0,425			
No. 50	0,300	0,300	No. 52	0,295
No. 60	0,250		No. 60	0,251
No. 80	0,180		No. 85	0,178
No. 100	0,150	0,150	No. 100	0,152
No. 140	0,106			

<i>American Society for Testing and Materials (ASTM)</i>		AASHTO	<i>British Standard</i>	
Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)	Ukuran lubang (mm)	Nomor ayakan	Ukuran lubang (mm)
No. 170	0,088	0,090		
No. 200	0,075	0,075	No. 200	0,076

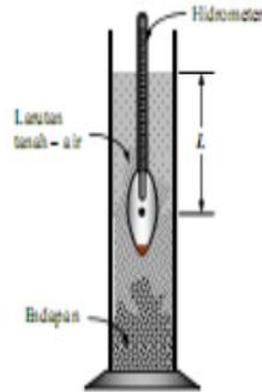
(Sumber: Pengujian Tanah di Laboratorium G. Budi, 2011)

Analisa saringan dapat dilakukan dengan dua macam cara yaitu dengan cara kering (*dry method*) dan cara basah (*wet method*). Analisa saringan cara kering dilakukan dengan menggetarkan saringan apabila tanah yang akan ditentukan distribusi butirannya cukup bersih dan hanya sedikit mengandung butiran halus yang mempunyai diameter kurang dari 0,075 mm atau akurat untuk material yang non kohesif dan bersih dari tempelan lempung serta lanau, sedangkan cara basah dilakukan dengan mencuci tanah dengan air sampai menjadi lumpur encer dan dibasuh seluruhnya melewati saringan apabila tanah mengandung cukup banyak partikel halus dengan diameter kurang dari 0,075 mm atau terdapat indikasi campuran tanah lempung serta lanau pada tanah non-kohesif sehingga terdapat kemungkinan tanah lempung dan lanau tersebut menempel pada butiran tanah yang tidak akan lepas meskipun telah dikeringkan.

2.9.1.4 Analisa hidrometer

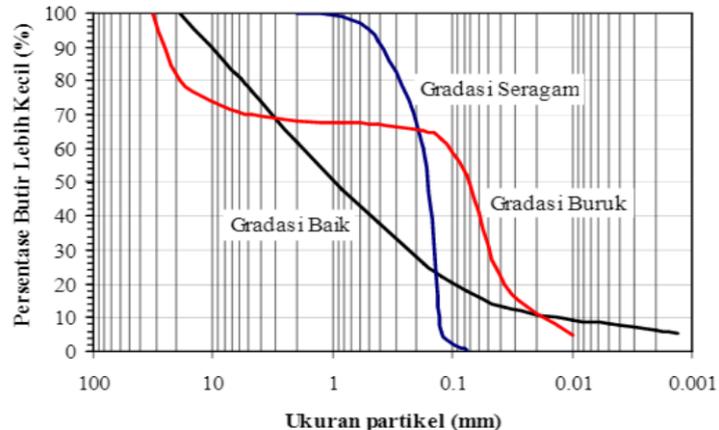
Analisa hidrometer merupakan metode yang dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah yang mempunyai ukuran kurang dari 0.075 mm. Metode ini didasarkan pada perumusan *stokes*, yang mengkorelasikan diameter butiran tanah dengan kecepatan penurunan butiran tanah di dalam cairan. Dalam analisa hidrometer contoh tanah yang akan diuji dilarutkan dengan air yang berada di dalam tabung dan selanjutnya butir-butir tanah akan turun mengendap ke dasar tabung seperti pada Gambar 2.3. Kecepatan mengendap dari butir-butir tanah akan berbeda-beda dikarenakan ukuran dari butir tanah yang bervariasi. Ukuran butir yang lebih besar dan lebih berat akan mengalami sedimentasi (mengendap) terlebih

dahulu dengan kecepatan mengendap lebih besar dari butiran yang lebih kecil dan lebih ringan. Agar gumpalan tanah cepat terurai maka digunakan bahan disperse berupa sodium heksametafosfat dalam 1 liter air suling.



Gambar 2.3 Pengujian Hidrometer

Diameter butiran digambarkan dalam skala logaritma dan persentase dari butiran yang lolos saringan digambarkan dalam skala hitung biasa, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Grafik Analisa Hidrometer

2.9.1.5 Batas-batas Atterberg

Batas-batas Atterberg sangat berguna untuk identifikasi dan klasifikasi tanah. Batas-batas Atterberg diciptakan oleh Albert Atterberg seorang kimiawan Swedia dan kemudian diperbaharui oleh Arthur Cassagrande. Atterberg mengembangkan metode untuk menjelaskan sifat konsistensi tanah butir halus pada kadar air yang bervariasi dan membuat batasan-batasan dari keadaan yang dapat terjadi pada

partikel tanah yang terdiri atas batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas susut (*shrinkage limit*).

Batas cair (LL) didefinisikan sebagai kadar air yang terkandung di dalam tanah pada perbatasan antara fase cair dan fase plastis. Pengujian batas cair dilakukan menggunakan alat Cassagrande yang dimaksudkan untuk menentukan besarnya jumlah kadar air di dalam contoh tanah pada saat fase tanah akan berubah dari cair menjadi plastis atau sebaliknya. *Liquid limit* didapat dengan membaca grafik *flow curve* pada ketukan ke-25.

Batas plastis (PL) adalah jumlah kadar air ketika partikel tanah tersebut mulai hancur saat digulung menjadi bentuk seperti benang dengan ukuran yang telah ditentukan dikarenakan apabila kadar air di dalam tanah berkurang, maka tanah menjadi lebih keras dan memiliki kemampuan untuk menahan perubahan bentuk. Perubahan tanah dari cair menjadi padat tersebut akan melalui fase yang dinamakan semi padat. Batas plastis didapat pada saat contoh tanah yang digulung sampai diameter 3 mm mengalami keretakan.

Batas susut (SL) adalah batasan kadar air dimana tidak akan terjadi perubahan volume pada massa tanah, apabila kadar airnya dikurangi karena suatu contoh tanah akan menyusut sebanding dengan volume air di dalam pori tanah yang menguap. Namun terdapat suatu batas dimana berkurangnya air di dalam pori tanah tidak mengurangi volume tanah.

Indeks plastisitas (PI) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah. Jika tanah mempunyai nilai PI tinggi, maka dapat diambil kesimpulan tanah mengandung banyak butiran lempung. Jika nilai PI tanah rendah, seperti lanau, dengan adanya sedikit pengurangan kadar air akan mengakibatkan tanah menjadi kering. Indeks plastisitas didapat dengan mencari selisih dari batas cair dan batas plastis.

$$PI = LL - PL \quad (2.2)$$

2.10.1.6 Berat jenis semen

Berat jenis semen adalah perbandingan antara massa jenis semen dengan massa jenis air suling. Pengujian berat jenis semen *portland* dilaksanakan berdasar pada

SNI 15-2531-1991 yang bertujuan untuk mendapatkan nilai berat isi semen *portland*, sebagai pengendalian mutu semen. Berat jenis semen yang disyaratkan berkisar antara 3,00 sampai 3,20. Jika berat jenis semen kurang dari 3,00 maka semen *portland* tersebut dianggap sudah tidak termasuk semen tipe I sampai dengan tipe V.

2.10.1.7 Waktu ikat semen

Waktu pengikatan semen atau waktu ikat semen adalah waktu yang semen perlukan untuk mengeras, terhitung saat semen mulai bereaksi dengan air sehingga menjadi suatu material yang cukup kaku untuk menahan beban. Waktu ikat semen dapat dibedakan menjadi dua yaitu:

- a. Waktu ikat awal (*initial setting time*), yaitu waktu dari pencampuran semen dengan air menjadi pasta semen hingga mulai hilang sebagian sifat keplastisannya, pengikatan ini berkisar 1 – 2 jam tetapi tidak boleh kurang dari 1 jam.
- b. Waktu ikat akhir (*final setting time*), yaitu waktu antara terbentuknya pasta semen hingga pasta semen mengeras, pengikatan ini tidak boleh lebih dari 8 jam.

2.10.2 Pengujian sifat mekanis

2.10.2.1 Pemadatan

Pemadatan merupakan proses yang dilakukan untuk merapatkan butiran tanah (*solid*) yang satu dengan yang lain, sehingga partikel tanah saling berdekatan dan pori tanah menjadi kecil. Pemadatan tanah di laboratorium bertujuan untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum pada energi yang standar, dengan jalan memberikan kadar air yang optimum (Budi, 2011).

Pengujian pemadatan standar telah dikembangkan sejak tahun 1930-an oleh R.R. Proctor. Untuk alasan ini, maka prosedur dinamik laboratorium yang standar biasanya disebut uji *proctor*. Dua macam pengujian pemadatan, yaitu pengujian pemadatan *proctor* standar dan pengujian pemadatan *proctor* modifikasi, merupakan pengujian yang masih digunakan hingga saat ini. Proctor mendefinisikan empat variabel pemadatan tanah, yaitu usaha pemadatan (energi

pemadatan), jenis tanah (gradasi, kohesif atau tidak kohesif, ukuran partikel, dan sebagainya), kadar air dan berat volume kering.

Prinsip pengujian pemadatan *proctor* yaitu suatu penumbuk dari ketinggian tertentu akan ditumbukkan beberapa kali pada sejumlah lapisan tanah di dalam suatu cetakan (*mold*) untuk menghasilkan suatu sampel dengan volume tertentu. Pemadatan *proctor* standar dan pengujian pemadatan *proctor* modifikasi telah dispesifikasikan dalam pengujian standar oleh ASTM dan AASHTO terkait ukuran penumbuk, jumlah jatuhan, jumlah lapisan, dan volume cetakan. Spesifikasi ini dapat dilihat dalam Tabel 2.14.

Tabel 2. 14 Pengujian Pemadatan *Proctor*

Pengujian		Proctor Standar	Proctor Modifikasi
Nomor ASTM		D 698-70	D1557-70
Nomor AASHTO		T-99	T-180
Volume Cetakan	(m ³)	945 × 10 ⁻⁶	945 × 10 ⁻⁶
	(ft ³)	0,033	0,033
Penumbuk	Massa (kg)	2,5	4,5
	Berat (lb)	5,5	10
Tinggi Jatuh	(m)	0,3	0,46
	(ft)	1	1,5
Usaha Pemadatan (Tenaga)		25 tumbukan/lapis	25 tumbukan/lapis
		3 lapisan	5 lapis
		590 kJ/m ³ atau 12375 ft lb/ft ³	2700 kJ/m ³ atau 56250 ft lb/ft ³

(Sumber : Bowles, Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah, 1984)

Pengujian pemadatan *proctor* dilakukan pengulangan paling sedikit 5 kali dengan kadar air tiap percobaan divariasikan (Hardiyatmo, 2002). Dalam pengujian pemadatan *proctor* apabila diketahui berat tanah basah di dalam cetakan yang volumenya diketahui, maka berat isi basah dapat langsung dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma_{\text{basah}} = \frac{\text{Berat tanah basah di dalam cetakan}}{\text{Volume cetakan}} \quad (2.3)$$

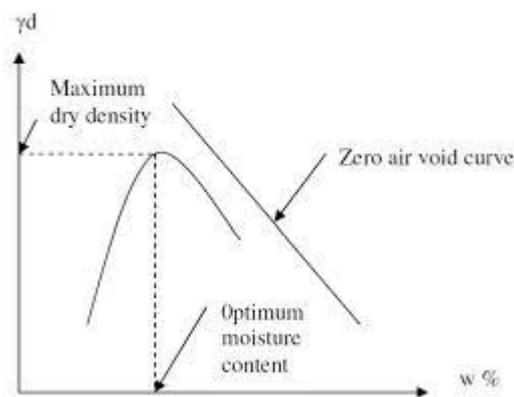
Berat isi kering dapat langsung dihitung dengan persamaan:

$$\gamma_{\text{kering}} = \frac{\gamma_{\text{basah}}}{1 + \text{kadar air}} \quad (2.4)$$

Nilai puncak dari berat isi kering disebut kerapatan kering maksimum (kerapatan *proctor*). Kadar air pada kerapatan kering maksimum disebut kadar air optimum atau *optimum moisture content* (OMC). Garis *zero air voids* (ZAV) menunjukkan kerapatan kering pada saat kejenuhan (*saturation*) 100%, dan langsung dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\text{ZAV} = \frac{G_s \times \text{kadar air}}{1 + G_s \times \text{kadar air}} \quad (2.5)$$

Pengujian pemadatan *proctor* digambarkan dalam grafik hubungan kadar air (*moisture content*) dan berat volume keringnya (*dry density*) seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 5 Grafik Pengujian Pemadatan *Proctor*

Kurva yang dihasilkan dari pengujian memperlihatkan nilai kadar air terbaik (W_{opt}) untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum. Tipe tanah dan gradasi akan mempengaruhi kurva pemadatan. Umumnya tanah yang dominan berbutir halus atau *fine grain* akan membutuhkan kadar air lebih untuk mencapai pemadatan optimum, sebaliknya tanah dominan berbutir kasar atau *coarse grain* membutuhkan sedikit kadar air untuk mencapai kadar air pemadatan optimum. Hal ini juga terkait pada sifat plastisitasnya dimana tanah berbutir halus atau *fine grain* seperti lempung kelanauan memiliki sifat plastis dibanding tanah berbutir kasar seperti pasir kelanauan yang memiliki indeks plastisitas rendah.

2.10.2.2 CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengujian CBR pertama kali diperkenalkan oleh Laboratorium *California Division of Highway* USA pada tahun 1929, yang kemudian diterima dan dikembangkan oleh institusi lain, seperti *U.S. Corps of Engineers* pada tahun 1940-an, ASTM D 1883-87 tahun 1961, AASHTO T 193-74 tahun 1972, dan *British Standard BS* tahun 1377. Sedangkan di Indonesia, percobaan ini telah distandarisasi melalui SNI dan Standar Bina Marga.

CBR (*California Bearing Ratio*) adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu jenis material dan beban standar pada kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Nilai CBR digunakan untuk mengevaluasi kekuatan material lapis tanah dasar (*subgrade*), pondasi bawah (*subbase*) dan lapis pondasi (*base*) sehingga nilai CBR yang digunakan dapat dijadikan parameter desain perkerasan.

Nilai CBR diperoleh dengan membagi nilai beban terkoreksi pada penetrasi 0,01 inci (2,54 mm) dan 0.02 inci (5,08 mm) dengan berat standar secara berurutan sebesar 13 kN (3000 Ibs) dan 20 kN (6000 Ibs) lalu dikalikan 100. Nilai CBR dinyatakan dalam persen (%) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Beban Terkoreksi}}{\text{Beban Standar}} \times 100 \quad (2.6)$$

Berdasarkan SNI 1744:2012 tentang Metode uji CBR Laboratorium, nilai CBR yang umumnya digunakan adalah nilai CBR pada penetrasi 0,01 inci (2,54 mm). Apabila nilai CBR yang diperoleh pada penetrasi 5 mm lebih besar dari nilai CBR pada penetrasi 2,5 mm, maka pengujian harus diulangi. Namun bila hasil pengujian ulangan tetap diperoleh nilai CBR pada penetrasi 5 mm lebih besar dari nilai CBR pada penetrasi 2,5 mm, maka yang diambil sebagai nilai CBR laboratorium adalah nilai CBR pada penetrasi 5 mm.

Gambar 2. 1 Rentang (<i>range</i>) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6 dan A-7	15
Gambar 2. 2 Mineral-mineral lempung	16
Gambar 2. 3 Pengujian Hidrometer	32
Gambar 2. 4 Grafik Analisa Hidrometer.....	32
Gambar 2. 5 Grafik Pengujian Pemadatan Proctor	36
Tabel 2. 1 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat dan Lapis Drainase	9
Tabel 2. 12 Berat Jenis Tanah (Specific Gravity).....	29
Tabel 2. 13 Diameter Lubang Ayakan Beberapa Standar	30
Tabel 2. 14 Pengujian Pemadatan Proctor.....	35
<u>Tabel 2. 1 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat dan Lapis Drainase</u>	<u>9</u>
<u>Tabel 2. 12 Berat Jenis Tanah (Specific Gravity).....</u>	<u>29</u>
<u>Tabel 2. 13 Diameter Lubang Ayakan Beberapa Standar</u>	<u>30</u>
<u>Tabel 2. 14 Pengujian Pemadatan Proctor.....</u>	<u>35</u>
<u>Tabel 2. 1 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat dan Lapis Drainase</u>	<u>9</u>
<u>Tabel 2. 12 Berat Jenis Tanah (Specific Gravity).....</u>	<u>29</u>
<u>Tabel 2. 13 Diameter Lubang Ayakan Beberapa Standar</u>	<u>30</u>
<u>Tabel 2. 14 Pengujian Pemadatan Proctor.....</u>	<u>35</u>
<u>Tabel 2. 1 Sifat-sifat Lapis Pondasi Agregat dan Lapis Drainase</u>	<u>9</u>
<u>Tabel 2. 12 Berat Jenis Tanah (Specific Gravity).....</u>	<u>29</u>
<u>Tabel 2. 13 Diameter Lubang Ayakan Beberapa Standar</u>	<u>30</u>
<u>Tabel 2. 14 Pengujian Pemadatan Proctor.....</u>	<u>35</u>