

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah

Tanah adalah material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1988). Selain itu dalam arti lain tanah merupakan akumulasi partikel mineral atau ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan (Craig,1991).

Tanah juga merupakan kumpulan-kumpulan dari bagian-bagian yang padat dan tidak terikat antara satu dengan yang lain (diantaranya mungkin material organik) rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air (Verhoef,1994). Sedangkan Tanah (*soil*) menurut teknik sipil dapat didefinisikan sebagai sisa atau produk yang dibawa dari pelapukan batuan dalam proses geologi yang dapat digali tanpa peledakan dan dapat ditembus dengan peralatan pengambilan contoh (*sampling*) pada saat pemboran. (Hendarsin, 2000)

Tanah juga didefinisikan sebagai akumulasi partikel mineral yang tidak mempunyai atau lemah ikatan partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan

dari batuan. Diantara partikel-partikel tanah terdapat ruang kosong yang disebut pori-pori yang berisi air dan udara.

Ikatan yang lemah antara partikel-partikel tanah disebabkan oleh pengaruh karbonat atau oksida yang tersenyawa diantara partikel-partikel tersebut, atau dapat juga disebabkan oleh adanya material organik bila hasil dari pelapukan tersebut di atas tetap berada pada tempat semula maka bagian ini disebut tanah sisa (*residu soil*).

Hasil pelapukan terangkut ke tempat lain dan mengendap di beberapa tempat yang berlainan disebut tanah bawaan (*transportation soil*). Media pengangkutan tanah berupa gravitasi, angin, air dan gletsyer.

Pada saat akan berpindah tempat, ukuran dan bentuk partikel-partikel dapat berubah dan terbagi dalam beberapa rentang ukuran.

Tanah menurut Bowles (1989) adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut :

1. Berangkal (*boulders*), merupakan potongan batu yang besar, biasanya lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. Untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (*cobbles*).
2. Kerikil (*gravel*), partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
3. Pasir (*sand*), partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
4. Lanau (*silt*), partikel batuan berukuran dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. Lanau dan lempung dalam jumlah besar ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan ke dalam danau atau di dekat garis pantai pada muara sungai.

5. Lempung (*clay*), partikel mineral berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
6. Koloid (*colloids*), partikel mineral yang “diam” yang berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Istilah tanah dalam bidang mekanika tanah dapat digunakan mencakup semua bahan seperti lempung, pasir, kerikil dan batu-batu besar. Metode yang dipakai dalam teknik sipil untuk membedakan dan menyatakan berbagai tanah, sebenarnya sangat berbeda dibandingkan dengan metode yang dipakai dalam bidang geologi atau ilmu tanah.

Sistem klasifikasi yang digunakan dalam mekanika tanah dimaksudkan untuk memberikan keterangan mengenai sifat-sifat teknis dari bahan-bahan itu dengan cara yang sama, seperti halnya pernyataan-pernyataan secara geologis dimaksudkan untuk memberi keterangan mengenai asal geologis dari tanah.

B. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok-kelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terinci (Das, 1995).

Sistem klasifikasi tanah dimaksudkan untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisik tanah serta mengelompokkannya sesuai dengan perilaku umum dari tanah tersebut. Tanah-tanah yang dikelompokkan

dalam urutan berdasarkan suatu kondisi fisik tertentu. Tujuan klasifikasi tanah adalah untuk menentukan kesesuaian terhadap pemakaian tertentu, serta untuk menginformasikan tentang keadaan tanah dari suatu daerah kepada daerah lainnya dalam bentuk berupa data dasar.

Klasifikasi tanah juga berguna untuk studi yang lebih terinci mengenai keadaan tanah tersebut serta kebutuhan akan pengujian untuk menentukan sifat teknis tanah seperti karakteristik pemadatan, kekuatan tanah, berat isi, dan sebagainya (Bowles, 1989).

Kebanyakan klasifikasi tanah menggunakan indek pengujian yang sangat sederhana untuk memperoleh karakteristik tanahnya. Umumnya klasifikasi didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari analisis saringan (percobaan sedimentasi) dan plastistasnya (Hardiyatmo, 1992).

Jenis dan sifat tanah yang sangat bervariasi ditentukan oleh perbandingan banyak fraksi-fraksi (kerikil, pasir, lanau dan lempung), sifat plastisitas butir halus. Klasifikasi bermaksud membagi tanah menjadi beberapa golongan tanah dengan kondisi dan sifat yang serupa diberi simbol nama yang sama.

Ada dua cara klasifikasi yang umum yang digunakan :

1. Sistem Klasifikasi AASTHO

Sistem Klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*) dikembangkan pada tahun 1929 dan mengalami beberapa kali revisi hingga tahun 1945 dan

dipergunakan hingga sekarang, yang diajukan oleh *Commite on Classification of Material for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board* (ASTM Standar No. D-3282, AASHTO model M145).

Sistem klasifikasi ini bertujuan untuk menentukan kualitas tanah guna pekerjaan jalan yaitu lapis dasar (*sub-base*) dan tanah dasar (*subgrade*).

Sistem ini didasarkan pada kriteria sebagai berikut :

a. Ukuran butir

Kerikil : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 75 mm dan tertahan pada saringan diameter 2 mm (No.10).

Pasir : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 2 mm dan tertahan pada saringan diameter 0,0075 mm (No.200).

Lanau & lempung : bagian tanah yang lolos saringan dengan diameter 0,0075 mm (No.200).

b. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas (PI) sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas sebesar 11 atau lebih.

- c. Apabila ditemukan batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) dalam contoh tanah yang akan diuji maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu, tetapi persentasi dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Sistem klasifikasi AASTHO membagi tanah ke dalam 7 kelompok utama yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah berbutir yang 35 % atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-1, A-2, dan A-3.

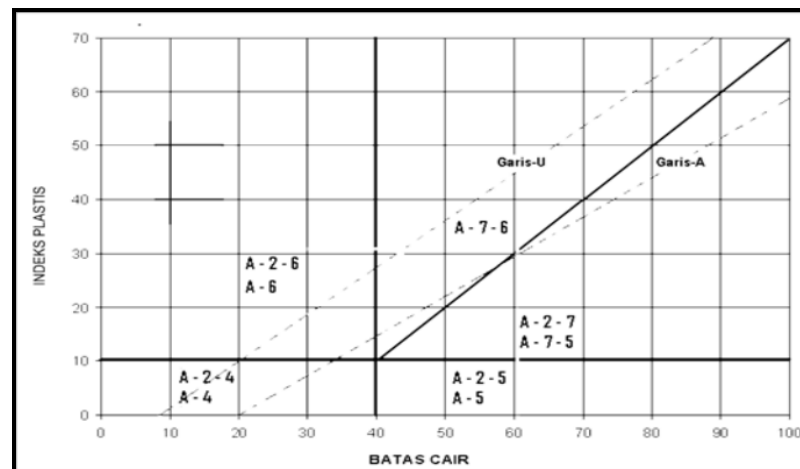
Tanah berbutir yang lebih dari 35 % butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5 A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung.

Untuk mengklasifikasikan tanah, maka data yang didapat dari percobaan laboratorium dicocokkan dengan angka-angka yang diberikan dalam Tabel 1. Kelompok tanah dari sebelah kiri adalah kelompok tanah baik dalam menahan beban roda, juga baik untuk lapisan dasar tanah jalan. Sedangkan semakin ke kanan kualitasnya semakin berkurang.

Tabel 1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

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

Plastisitas (PI) untuk tanah data kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.



Gambar 1. Nilai-nilai batas *Atterberg* untuk subkelompok tanah. (Hary Christady, 1992)

2. Sistem Klasifikasi Tanah *Unified* (USCS)

Sistem klasifikasi tanah *unified* atau *Unified Soil Classification System* (USCS) diajukan pertama kali oleh Casagrande dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation* (USBR) dan *United State Army Corps of Engineer* (USACE). Kemudian *American Society for Testing and Materials* (ASTM) memakai USCS sebagai metode standar untuk mengklasifikasikan tanah. Dalam bentuk sekarang, sistem ini banyak digunakan dalam berbagai pekerjaan geoteknik.

Sistem klasifikasi USCS mengklasifikasikan tanah ke dalam dua kategori utama yaitu :

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir yang kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos saringan No.200. Simbol untuk kelompok ini adalah G untuk tanah berkerikil dan S untuk tanah berpasir. Selain itu juga dinyatakan gradasi tanah

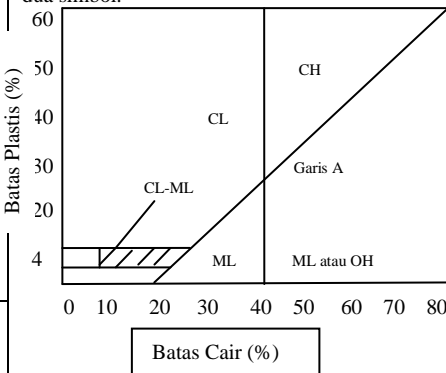
dengan simbol W untuk tanah bergradasi baik dan P untuk tanah bergradasi buruk.

- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*), yaitu tanah yang lebih dari 50% berat total contoh tanahnya lolos dari saringan No.200. Simbol kelompok ini adalah C untuk lempung anorganik dan O untuk lanau organik. Simbol Pt digunakan untuk gambut (*peat*), dan tanah dengan kandungan organik tinggi. Plastisitas dinyatakan dengan L untuk plastisitas rendah dan H untuk plastisitas tinggi

Tabel 2. Sistem klasifikasi tanah *unified* (Bowles, 1991)

Jenis Tanah	Prefiks	Sub Kelompok	Sufiks
Kerikil	G	Gradasi baik	W
		Gradasi buruk	P
Pasir	S	Berlanau	M
		Berlempung	C
Lanau	M		
Lempung	C	$w_L < 50 \%$	L
Organik	O	$w_L > 50 \%$	H
Gambut	Pt		

Tabel 3 . Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

Divisi Utama		Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi		
Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil $50\% \geq$ fraksi kasar tertahan saringan No. 4	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW		
		GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus			
		Kerikil dengan Butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol	
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		
		Pasir $\geq 50\%$ fraksi kasar lolos saringan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik , pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
				SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	
	Pasir dengan butiran halus		SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol	
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200		Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  Garis A : $PI = 0.73 (LL - 20)$
				CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>)	
		OL		Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah		
		Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis		
CH			Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>)			
OH			Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi			
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488			

Sumber : Hary Christady, 1996.

C. Tanah Lempung Lunak

1. Definisi Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung terdiri dari berbagai golongan tekstur yang agak susah dicirikan secara umum. Warna tanah pada tanah lempung tidak dipengaruhi oleh unsur kimia yang terkandung di dalamnya, karena tidak adanya perbedaan yang dominan dimana kesemuanya hanya dipengaruhi oleh unsur Natrium saja yang paling mendominasi.

Semakin tinggi plastisitas, grafik yang dihasilkan pada masing-masing unsur kimia belum tentu sama. Hal ini disebabkan karena unsur-unsur warna tanah dipengaruhi oleh nilai *Liquid Limit* (LL) yang berbeda-beda (Marindo, 2005).

Tanah lempung lunak merupakan partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi di dalam tanah yang kohesif (Bowles, 1991).

Tanah lempung merupakan tanah yang berukuran mikroskopis sampai dengan sub mikroskopis yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan, tanah lempung sangat keras dalam keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi lempung bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak (Das, 1995).

2. Sifat Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak mempunyai karakteristik yang khusus diantaranya daya dukung yang rendah, kemampatan yang tinggi, indeks plastisitas yang tinggi, kadar air yang relatif tinggi, dan mempunyai gaya geser yang kecil. Kondisi tanah seperti itu akan menimbulkan masalah jika dibangun konstruksi di atasnya.

Tanah lempung adalah tanah yang mempunyai partikel mineral tertentu yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air (Grim, 1953).

Mineral lempung merupakan senyawa *aluminium silikat* yang kompleks yang terdiri dari satu atau dua unit dasar, yaitu *silica tetrahedral* dan *aluminium octahedral*. *Silicon* dan *aluminium* mungkin juga diganti sebagian dengan unsur lain yang disebut dengan substitusi isomorfis.

Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 1999) :

- a. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm.
- b. Permeabilitas rendah.
- c. Kenaikan air kapiler tinggi.
- d. Bersifat sangat kohesif.
- e. Kadar kembang susut yang tinggi.
- f. Proses konsolidasi lambat.

Sifat tanah lempung juga dapat dilihat pada tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Sifat Tanah Lempung

Tanah	Sifat	Uji Lapangan
Lempung	Sangat Lunak	Meleleh diantara jari ketika diperas
	Lunak	Dapat diperas dengan mudah
	Keras	Dapat diremas dengan jari yang kuat
	Kaku	Tidak dapat diperas dengan jari, dapat digencet dengan ibu jari
	Sangat Kaku	Dapat dipencet dengan kuku ibu jari

Sumber : Mekanika Tanah 1, R.F CRAIG, 1989

Tanah berbutir halus khususnya tanah lempung akan banyak dipengaruhi oleh air. Sifat pengembangan tanah lempung yang dipadatkan akan lebih besar pada lempung yang dipadatkan pada kering optimum daripada yang dipadatkan pada basah optimum. Lempung yang dipadatkan pada kering optimum relatif kekurangan air, oleh karena itu lempung ini mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk meresap air sebagai hasilnya adalah sifat mudah mengembang (Hardiyatmo, 1999).

Selain itu juga lempung mempunyai sifat *thixotrophyl*, yaitu tanah yang mengalami kehilangan kekuatan setelah diremas, kemudian akan dapat kembali sebagian dari kekuatan yang hilang itu, ini disebabkan karena adanya air terserap (*absorb water*) di sekeliling permukaan dari partikel lempung.

3. Karakteristik Fisik Tanah lempung Lunak

Menurut Bowles (1989), mineral-mineral pada tanah lempung umumnya memiliki sifat-sifat:

1. Hidrasi.

Partikel mineral lempung biasanya bermuatan negatif sehingga partikel lempung hampir selalu mengalami hidrasi, yaitu dikelilingi oleh lapisanlapisan molekul air yang disebut sebagai air teradsorpsi. Lapisan ini pada umumnya mempunyai tebal dua molekul karena itu disebut sebagai lapisan difusi ganda atau lapisan ganda. Lapisan difusi ganda adalah lapisan yang dapat menarik molekul air atau kation disekitarnya. Lapisan ini akan hilang pada temperatur yang lebih tinggi dari 600 sampai 1000C dan akan mengurangi plastisitas alamiah, tetapi sebagian air juga dapat menghilang cukup dengan pengeringan udara saja.

2. Aktivitas.

Hasil pengujian *index properties* dapat digunakan untuk mengidentifikasi tanah ekspansif. Hardiyatmo (2006) merujuk pada Skempton (1953) mendefinisikan aktivitas tanah lempung sebagai perbandingan antara Indeks Plastisitas (IP) dengan prosentase butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm yang dinotasikan dengan huruf C, disederhanakan dalam persamaan:

$$\text{Aktivitas} = \frac{\text{Indeks Plastisitas}}{C}$$

3. Flokulasi dan Dispersi.

Apabila mineral lempung terkontaminasi dengan substansi yang tidak mempunyai bentuk tertentu atau tidak berkristal maka daya negatif netto, ion-ion H^+ dari air gaya Van der Waals dan partikel berukuran kecil akan bersama-sama tertarik dan bersinggungan atau bertabrakan di dalam larutan tanah dan air. Beberapa partikel yang tertarik akan membentuk flok (flock) yang berorientasi secara acak atau struktur yang berukuran lebih besar akan turun dari larutan itu dengan cepatnya membentuk sedimen yang lepas. Flokulasi adalah peristiwa penggumpalan partikel lempung di dalam larutan air akibat mineral lempung umumnya mempunyai $pH > 7$. Flokulasi larutan dapat dinetralkan dengan menambahkan bahan-bahan yang mengandung asam (ion H^+), sedangkan penambahan bahan-bahan alkali akan mempercepat flokulasi. Untuk menghindari flokulasi larutan air dapat ditambahkan zat asam.

4. Pengaruh Zat cair

Fase air yang berada di dalam struktur tanah lempung adalah air yang tidak murni secara kimiawi. Pada pengujian di laboratorium untuk batas Atterberg, ASTM menentukan bahwa air suling ditambahkan sesuai dengan keperluan. Pemakaian air suling yang relatif bebas ion dapat membuat hasil yang cukup berbeda dari apa yang didapatkan dari tanah di lapangan dengan air yang telah terkontaminasi. Air yang berfungsi sebagai penentu sifat plastisitas dari lempung. Satu molekul air memiliki muatan positif dan muatan negatif pada ujung yang berbeda (dipolar). Fenomena hanya terjadi pada air yang molekulnya dipolar dan tidak

terjadi pada cairan yang tidak dipolar seperti karbon tetraklorida (CCl_4) yang jika dicampur lempung tidak akan terjadi apapun.

5. Sifat kembang susut (swelling potensial)

Plastisitas yang tinggi terjadi akibat adanya perubahan sistem tanah dengan air yang mengakibatkan terganggunya keseimbangan gaya-gaya didalam struktur tanah. Gaya tarik yang bekerja pada partikel yang berdekatan yang terdiri dari gaya elektrostatis yang bergantung pada komposisi mineral, serta gaya van der Waals yang bergantung pada jarak antar permukaan partikel. Partikel lempung pada umumnya berbentuk pelat pipih dengan permukaan bermuatan listrik negatif dan ujung-ujungnya bermuatan positif. Muatan negatif ini diseimbangkan oleh kation air tanah yang terikat pada permukaan pelat oleh suatu gaya listrik. Sistem gaya internal kimia-listrik ini harus dalam keadaan seimbang antara gaya luar dan hisapan matrik. Apabila susunan kimia air tanah berubah sebagai akibat adanya perubahan komposisi maupun keluar masuknya air tanah, keseimbangan gaya-gaya dan jarak antar partikel akan membentuk keseimbangan baru. Perubahan jarak antar partikel ini disebut sebagai proses kembang susut. Tanah-tanah yang banyak mengandung lempung mengalami perubahan volume ketika kadar air berubah.

Perubahan itulah yang membahayakan bangunan.

Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor yaitu:

1. Tipe dan jumlah mineral yang ada di dalam tanah.
2. Kadar air.
3. Susunan tanah.
4. Konsentrasi garam dalam air pori.
5. Sementasi.
6. Adanya bahan organik, dll.

D. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah suatu proses untuk memperbaiki sifat-sifat tanah dengan menambahkan sesuatu pada tanah tersebut, agar dapat menaikkan kekuatan tanah dan mempertahankan kekuatan geser. Stabilisasi tanah secara prinsip adalah suatu tindakan atau usaha yang dilakukan guna menaikkan kekuatan tanah dan mempertahankan kekuatan gesernya.

Adapun tujuan stabilisasi tanah adalah untuk mengikat dan menyatukan agregat material yang ada sehingga membentuk struktur jalan atau pondasi jalan yang padat.

Pada umumnya cara yang digunakan untuk menstabilisasi tanah terdiri dari salah satu atau kombinasi dari pekerjaan-pekerjaan berikut (Bowles, 1991):

1. Mekanis, yaitu pemadatan dengan berbagai jenis peralatan mekanis seperti mesin gilas (*roller*), benda berat yang dijatuhkan, ledakan, tekanan statis, tekstur, pembekuan, pemanasan dan sebagainya.

2. Bahan Pencampur (*Additiver*), yaitu penambahan kerikil untuk tanah kohesif, lempung untuk tanah berbutir, dan pencampur kimiawi seperti semen, gamping, abu batu bara, semen aspal, sodium dan kalsium klorida, limbah pabrik kertas dan lain-lainnya.

Metode atau cara memperbaiki sifat-sifat tanah ini juga sangat bergantung pada lama waktu pemeraman, hal ini disebabkan karena didalam proses perbaikan sifat-sifat tanah terjadi proses kimia yang dimana memerlukan waktu untuk zat kimia yang ada didalam *additive* untuk bereaksi. Sifat-sifat tanah yang telah diperbaiki dengan cara stabilisasi dapat meliputi kestabilan volume, kekuatan atau daya dukung, permeabilitas, dan kekekalan atau keawetan.

Menurut *Bowles*, 1991 beberapa tindakan yang dilakukan untuk menstabilkan tanah adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan kerapatan tanah.
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi atau tahanan gesek yang timbul.
3. Menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi atau fisis pada tanah.
4. Menurunkan muka air tanah (drainase tanah).
5. Mengganti tanah yang buruk.

Tanah yang akan digunakan pada suatu konstruksi bangunan harus memiliki sifat-sifat fisik maupun teknis yang baik. Namun kenyataan menunjukkan

bahwa tidak semua tanah dalam kondisi aslinya memiliki sifat-sifat yang diinginkan.

Apabila tanah bersifat sangat lepas atau sangat mudah tertekan, permeabilitas yang terlalu tinggi, dan sifat-sifat lain yang tidak diinginkan sehingga tidak sesuai untuk proyek pembangunan, maka tanah tersebut harus distabilisasi.

E. Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah adalah besarnya tekanan atau kemampuan tanah untuk menerima beban dari luar sehingga menjadi labil. Daya dukung tanah dasar dipengaruhi oleh jenis tanah, tingkat kepadatan, kadar air, kondisi drainase, dan lain-lain. Tingkat kepadatan dinyatakan dengan persentase berat volume kering (γ_k) tanah terhadap berat volume kering maksimum ($\gamma_{k \text{ maks}}$).

Daya dukung tanah bisa kita dapat dengan cara mekanis seperti dengan bantuan alat berat. Ada beberapa cara seperti melakukan penggilasan dengan alat penggilas, menjatuhkan benda berat, ledakan, melakukan tekanan statis, melakukan proses pembekuan, pemanasan dan sebagainya.

Tanah yang memiliki daya dukung yang baik memiliki tingkat kerapatan yang besar.

Tanah pada kondisi ini memiliki penurunan tanah yang sangat kecil dan dalam jangka waktu yang sangat lama. Penurunan muka air tanah juga sangat besar sehingga pada drainase tanah kondisinya tidak terlalu tergenang air.

Tujuan perbaikan daya dukung tanah yang paling utama adalah untuk memadatkan tanah yang memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan spesifikasi pekerjaan tertentu.

Perbaikan daya dukung juga merupakan usaha untuk mempertinggi kerapatan tanah dengan pemakaian energi mekanis untuk menghasilkan pemampatan partikel (Bowless, 1989). Energi pemadatan dilapangan dapat diperoleh dari alat-alat berat, pemadat getaran, mesin gilas dan dari benda-benda berat yang dijatuhkan.

Di laboratorium untuk mendapatkan daya dukung dilakukan dengan gaya tumbukan (dinamik), alat penekan, alat tekan statik yang memakai piston dan mesin tekan.

Rumus daya dukung tanah

$$q_u = C_u * N_c + \gamma * D$$

Di mana :

D : Kedalaman tanah

C_u : Kuat geser undrained (undrained shear strength)

γ : Berat isi tanah

N_c : Faktor daya dukung yang tergantung pada sudut geser

Menurut Bowless (1989), ada beberapa keuntungan pemadatan :

1. Berkurangnya penurunan permukaan tanah (*subsidence*) yaitu gaya vertikal pada massa tanah akibat berkurangnya angka pori.
2. Bertambahnya kekuatan tanah.
3. Berkurangnya penyusutan, berkurangnya volume akibat berkurangnya kadar air dari nilai patokan pada saat pengeringan.

Kerugian utamanya adalah bahwa pemuaian (bertambahnya kadar air dari nilai patokannya) dan kemungkinan pembekuan tanah itu akan membesar.

F. Stabilisasi Elektro-Kimiawi TX 300

TX 300 adalah bahan polimer cair yang berfungsi untuk menstabilisasi, mengeraskan, dan menguatkan daya dukung tanah. Bahan kimia yang terkandung di TX-300 memiliki proses ikatan reaksi kimia seperti yang ditemukan di stabilisator sulfat atau klorida berbasis, yang bersifat korosif.

Sebaliknya, TX-300 bersifat koloid, yang dibentuk melalui pertukaran ion - menghasilkan pembentukan gel yang mengubah mereka dari cair ke padat, membentuk suatu ikatan, tetap kaku ditembus, itu memberikan ketahanan terhadap kelembaban seperti mengisi pada rongga tanah, mengurangi indeks plastisitas dan penurunan tegangan permukaan sebagai sementasi pada akhirnya meningkatkan kapasitas atau daya dukung tanah.

Polimerisasi dari TX-300 menjadi sebuah kumpulan yang solid dan ketika mengeras, menyebarkan air. Komponen mencapai viskositas maksimum dan ditetapkan menjadi kuat, ikatan anorganik yang tidak *biodegradable*. Ketika diterapkan dengan baik, TX-300 menembus permukaan untuk mengikat partikel halus bersama-sama, sehingga ikatan dan kekuatan materi dasar ada dua metode yaitu dehidrasi dan mekanisme pengaturan bahan kimia yang merubah bahan menjadi lekatan, lebih kental dan larut.

TX-300 aman terhadap lingkungan dan tidak memerlukan label peringatan berbahaya. TX-300 dapat disimpan untuk periode waktu yang panjang dalam kontainer baja. TX-300 ini adalah bahan non korosif, tidak mudah terbakar, tidak menyebabkan alergi dan tidak beracun.

TX-300 terdiri dari bahan baku alami dan tidak mengandung bahan atau produk daur ulang. Ini berisi inhibitor korosi, itu memberikan 100% lebih sedikit korosif dari pada air keran, sangat membantu melindungi peralatan logam.

TX 300, bila diaplikasikan secara tepat akan memadatkan tanah dan menjadikan struktur tanah yang keras dan tahan air.

Fungsi lain dari TX-300 adalah :

1. TX-300 tidak berbahaya, tidak korosif, tidak mengandung bahan yang membuat alergi, dan tidak mengandung bahan yang dapat terbakar. Yang harus diperhatikan hanya pada saat menambahkan larutan TX-300 ke dalam tangki air, Safety Goggle dibutuhkan dalam prosedur ini.
Larutan TX-300 lengket dan walaupun tidak akan merusak mata, dibersihkan dengan air yang mengalir akan dibutuhkan.
2. TX-300 berfungsi untuk memadatkan tanah dengan mengikat partikel-partikel tanah antara satu dengan yang lainnya dengan proses “ionisasi” yang menghasilkan peningkatan nilai CBR (California Bearing Ratio) hingga 3X lipat dari nilai awal dan menurunkan Index Plastisitas tanah hingga 50% dari nilai awal sehingga tingkat kelicinan tanah saat terkena air berkurang.

3. Tanah yang sudah diolah dengan TX-300 akan membentuk sebuah lapisan tanah yang sulit dipenetrasi oleh air, kuat karena padat (bukan kering karena proses kristalisasi seperti semen), secara umum dapat tahan terhadap perubahan cuaca dan hanya memerlukan perawatan yang minim atau tidak sama sekali.
4. TX-300 dapat dipakai untuk membuat “base” jalan aspal atau beton (menggantikan keperluan batu) atau sebagai jalan tanah yang lebih tahan lama, minim perawatan, tidak begitu licin saat hujan (kendaraan masih dapat lewat dengan kecepatan yang dibatasi), Tidak terlalu berdebu saat kering.
5. Karakteristik bahan TX-300 :
 1. Cairan konsentrat (campuran unik bahan kimia yang multi guna), Mudah diaplikasikan (dilarutkan dengan air).
 2. Tidak berbahaya, tidak korosif, tidak mengandung bahan penyebab alergi, dan tidak mudah terbakar.
 3. Dapat digunakan hampir di semua tipe atau kombinasi tanah. Kecuali pasir murni (perlu dicampur dengan tanah, lempung, atau bahan lainnya).

Keuntungan menggunakan TX-300 :

1. Daya dukung yang kuat atau kokoh, TX-300 memberikan struktur dasar yang kuat sehingga mampu membuat jalan yang mulus dan tidak berdebu.
2. Waktu konstruksi yang cepat, lebih cepat dibandingkan dengan pembuatan struktur dasar jalan yang normal.

3. Lebih ekonomis, meminimalisasi penggunaan bahan lapisan penutup jalan (aspal atau beton). Atau tidak menggunakan lapisan penutup sama sekali.
4. Tahan lama, baik dengan perawatan yang minimal atau tanpa perawatan sama sekali.
5. Ramah lingkungan dan aman bagi manusia (lulus persyaratan dan standard dari US EPA dan ISO 9002).

G. Metode Aplikasi TX-300

Untuk mengolah 15 cm/30 cm tanah

1. 1 drum TX-300 dapat dipakai untuk mengolah $\pm 570 \text{ m}^3$ tanah. Hitungan ini tergantung dari jenis tanah dan kondisi tanah pada saat pengerjaan. Untuk menghitung keperluan TX-300 dapat menggunakan hitungan di bawah ini:

- Hitung kubikasi tanah yang akan diolah:
- (Luas)..... Meter X (Lebar).....Meter X (Tebal).....Meter =Meter Kubik
 Kalikan total kubikasi yang akan diolah dengan koefisien 0,35 untuk mendapatkan jumlah TX-300 yang dibutuhkan:Meter Kubik X 0,35 = Liter TX-300

Contoh:

300 Meter Panjang X 6 Meter Lebar X 0,15 Meter Tebal = 270 Meter

Kubik 270 Meter Kubik X 0,35 = $\pm 94,5$ Liter TX-300

Komposisi pencampuran dengan air (Air dibutuhkan untuk membantu peresapan cairan TX-300 ke dalam pori-pori tanah)

Dapat dilakukan dengan dua cara :

- Jika jumlah air yang dibutuhkan tanah untuk dapat mencapai OMC (Optimum Moisture Content) sudah diketahui-melalui tes tanah, tambahkan TX-300 sesuai jumlah yang dibutuhkan berdasarkan perhitungan di atas.
 - Dengan metode “Rule of Thumb”:
 - a. Kondisi tanah kering: 100-100 bagian air untuk 1 bagian TX-300.
 - b. Kondisi tanah normal: 80 bagian air untuk 1 bagian TX-300.
 - c. Kondisi tanah basah: 40-60 bagian air untuk 1 bagian TX-300.
2. Isi tangki air dengan air bersih (air yang tidak terkontaminasi limbah, air keruh tidak menjadi masalah asalkan tidak terkontaminasi limbah industri atau bahan kimia).
 3. Tambahkan cairan TX-300 ke dalam tangki air yang sudah disiapkan.
 4. Tandai area yang akan diolah oleh 1 drum TX-300. Jika diperlukan dapat disiapkan air (tanpa campuran TX-300) yang disiramkan kemudian untuk dapat mencapai Optimum Moisture Content (OMC) tanah.
 5. Gemburkan/bongkar permukaan tanah dengan menggunakan Rotavator/Scarifier (Ripper umumnya Motor Grader sudah dilengkapi dengan alat ini) hingga mencapai ketebalan tanah yang diinginkan. Tergantung dari peralatan yang digunakan, proses ini dapat diulangi beberapa kali sampai tanah terbongkar dengan baik.

6. Siramkancampuran TX-300 ke tanah tersebut, ulangi proses hingga OMC tercapai. Cara termudah untuk menentukan moisture content adalah dengan metode “Hand Test”, yaitu dengan mengambil segenggam tanah, kemudian diremas dengan telapak tangan. Kemudian buka telapak tangan.



Jika tanah tersebut masih seperti tepung dan tidak dapat mempertahankan bentuk yang dibuat oleh telapak tangan, serta pecah berantakan ketika dijatuhkan menandakan kondisi tanah terlalu kering. Jika tanah tersebut dapat dibentuk dan pecah menjadi beberapa bongkahan kecil ketika dijatuhkan, menandakan tanah tersebut mempunyai moisture content yang tepat.

Jika tanah tersebut sangat liat ketika di dalam genggamannya, meninggalkan sisa-sisa kelembapan di tangan, menandakan moisture content yang berlebih.

- Jika terlalu basah (over OMC), tambahkan tanah.
 - Jika terlalu kering (under OMC), tambahkan air tanpa TX-300.
7. Setelah OMC tercapai, aduk tanah dengan menggunakan Rotavator atau Grader. Pastikan tanah teraduk dengan baik, singkirkan bongkahan batu atau material yang tidak dibutuhkan dari tanah tersebut.

8. Gunakan Motor Grader untuk memindahkan tanah yang diolah ke kedua sisi area. Ulangi proses hingga ketebalan yang diinginkan tercapai. Siram dengan campuran TX-300/Air jika diperlukan.



Gambar 2. Motor Grader Pada Saat Melakukan Pemindahan Tanah

9. Dengan menggunakan Motor Grader, tebarkan kembali tanah yang sudah diolah tersebut dan dibentuk sesuai kebutuhan (Levelling, dikontur).



Gambar.3 Proses Pemadatan Tanah Dengan Menggunakan Compactor

10. Padatkan dengan Compactor 2-3 kali tanpa menggunakan Vibro. Pematatan awal ini adalah untuk membentuk permukaan jalan.

11. Padatkan kembali dengan menggunakan Vibro hingga tanah terlihat kering dan keras. Pematatan dengan Vibrasi akan mengeluarkan kandungan air di dalam tanah untuk mempercepat proses pengeringan. Di tahap ini dapat disemprotkan air ke permukaan tanah untuk memperlambat proses “Curing” sehingga mengurangi “retak rambut” yang timbul di permukaan saat tanah mengering.



Gambar 4. Proses Pematatan dan curing

12. Biarkan tanah mengering dalam 1 hari. Jika setelah pematatan tanah sudah kering, dapat langsung digunakan. Lalu lintas yang lewat di permukaan tanah tersebut akan membantu proses pematatan dan “Curing” dari tanah tersebut.

Catatan:

- Setelah proses aplikasi TX-300, biasanya akan timbul “retak rambut” di permukaan yang disebabkan oleh air yang terperangkap

di bawah permukaan akan keluar ke permukaan sehingga mendorong permukaan yang sudah rapat oleh pemadatan dan menimbulkan “retak rambut” tersebut.

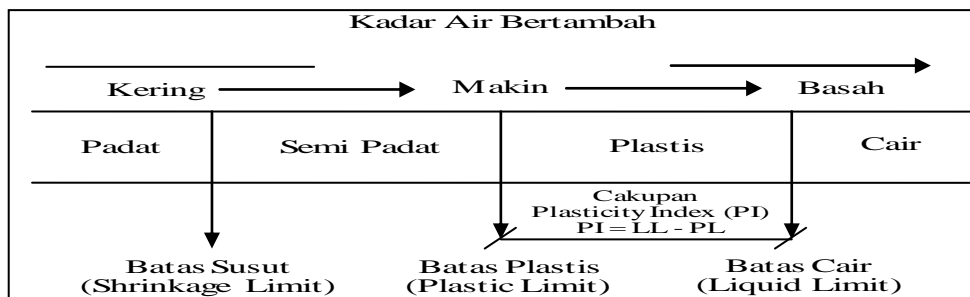
- Jika timbul “retak rambut”, akan hilang dengan sendirinya seiring dengan waktu jika sering dilewati dan tidak diperlukan pengerjaan tambahan. Jika diperlukan dapat di Vibro untuk menghilangkan “retak rambut” tersebut dan mempercepat proses konsolidasi tanah.

H. Batas-Batas *Atterberg*

Batas kadar air yang mengakibatkan perubahan kondisi dan bentuk tanah dikenal pula sebagai batas-batas konsistensi atau batas-batas *Atterberg* (yang mana diambil dari nama peneliti pertamanya yaitu *Atterberg* pada tahun (1911). Pada kebanyakan tanah di alam, berada dalam kondisi plastis.

Kadar air yang terkandung dalam tanah berbeda-beda pada setiap kondisi tersebut yang mana bergantung pada interaksi antara partikel mineral lempung. Bila kandungan air berkurang maka ketebalan lapisan kation akan berkurang pula yang mengakibatkan bertambahnya gaya-gaya tarik antara partikel-partikel.

Sedangkan jika kadar airnya sangat tinggi, campuran tanah dan air akan menjadi sangat lembek seperti cairan. Oleh karena itu, atas dasar air yang dikandung tanah, tanah dapat dibedakan ke dalam empat (4) keadaan dasar, yaitu : padat (*solid*), semi padat (*semi solid*), plastis (*plastic*), dan cair (*liquid*), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 5. Batas-batas Atterberg

Adapun yang termasuk ke dalam batas-batas Atterberg antara lain :

1. Batas cair (*Liquid Limit*).

Batas cair (LL) adalah kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.

2. Batas plastis (*Plastic Limit*).

Batas plastis (PL) adalah kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi plastis, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3 mm mulai retak-retak ketika digulung.

3. Batas susut (*Shrinkage Limit*).

Batas susut (SL) adalah kadar air yang didefinisikan pada derajat kejenuhan 100%, dimana untuk nilai-nilai dibawahnya tidak akan terdapat perubahan volume tanah apabila dikeringkan terus. Harus diketahui bahwa batas susut makin kecil maka tanah akan lebih mudah mengalami perubahan volume.

4. Indeks plastisitas (*Plasticity Index*).

Indeks plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis. Indeks plastisitas merupakan interval kadar air tanah yang masih bersifat plastis.

5. Berat spesifik (*Specific Gravity*).

Berat jenis tanah (G_s) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dengan berat volume air (γ_w) pada temperature t°C.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

I. Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas adalah besarnya gaya aksial per satuan luas pada saat sampel tanah mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial telah mencapai 20% (pilih yang lebih dahulu tercapai saat pengujian).

Uji kuat tekan bebas adalah salah satu cara untuk mengetahui geser tanah. Uji kuat tekan bebas bertujuan untuk menentukan kekuatan tekan bebas suatu jenis tanah yang bersifat kohesif, baik dalam keadaan asli (*undisturbed*), buatan (*remoulded*) maupun tanah yang dipadatkan (*compacted*).

Konsistensi tanah lempung dapat ditentukan berdasarkan kekuatan kompresinya (q_u), sebagaimana dalam tabel 5 terlihat bahwa konsistensi dibagi menjadi 6 kategori dari sangat lunak sampai keras, yaitu antara nilai kompresibilitas (q_u) antara 0 sampai dengan lebih besar dari 4.

Tabel 5 Deskripsi lempung berdasarkan kompresibilitas

Konsistensi	Nilai q_u (kg/cm ²)
Sangat Lunak	< 0,25
Lunak	0,25 – 0,50
Sedang	0,50 – 1,0
Kaku	1,0 – 2,0
Sangat Kaku	2,0 – 4,0
Keras	> 4,0

(Sumber : Terzaghi & Peck, 1967)

J. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian laboratorium yang menjadi bahan pertimbangan dan acuan penelitian ini dikarenakan adanya kesamaan metode dan sampel tanah yang digunakan, akan tetapi untuk bahan *additive* dan variasi campuran serta waktu pemeraman yang berbeda, antara lain

1. Stabilisasi Dengan Menggunakan ISS 2500

Penelitian yang dilakukan oleh Luki Sandi pada tahun 2010 adalah mengenai Stabilisasi Tanah Lunak dengan menggunakan ISS. Hasil dari penelitian tersebut mengatakan bahwa penggunaan bahan campuran ISS 2500 sebagai bahan stabilisasi pada tanah lempung lunak Rawa Sragi mampu meningkatkan kekuatan daya dukungnya. Penggunaan ISS 2500 juga cukup efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak yang berasal dari Rawa Sragi terutama sebagai *subgrade*, akan tetapi peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan.

2. Stabilisasi Dengan Semen

Penelitian yang dilakukan oleh Candra Hakim Van Rafi'i pada tahun 2009 adalah mengenai Pengaruh Durabilitas Terhadap Daya Dukung Lapisan *Soil Cement Base* Pada Tanah Lempung. Hasil yang didapat adalah bahwa pengaruh dari durabilitas terhadap lapisan *soil cement base* yaitu mengganggu kestabilan lapisan fondasi tersebut, pengaruh dari durabilitas tersebut dapat dilihat dari perilaku rendaman (siklus). Dari hasil pengujian di laboratorium, didapat bahwa terjadi penurunan nilai CBR disetiap penambahan waktu siklus.

3. Stabilisasi Dengan Aspal Buton

Penelitian yang dilakukan oleh Christian Simpa pada tahun 2010 adalah mengenai Stabilisasi Tanah Lempung menggunakan Aspal Buton. Penambahan Aspal Buton terhadap nilai CBR pada stabilisasi tanah mempunyai kecenderungan yang semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya presentase penggunaan Aspal Buton tersebut. Tetapi penambahan Aspal Buton cenderung menurunkan nilai berat jenis bila dibandingkan dengan nilai berat jenis tanah asli tersebut, hal ini disebabkan karena bercampurnya dua bahan dengan berat jenis yang berbeda.

4. Stabilisasi Tanah Timbunan Menggunakan ISS 2500

Penelitian yang dilakukan oleh Ade Ridwan pada tahun 2010 adalah mengenai Stabilisasi Tanah Timbunan menggunakan ISS 2500. Penambahan ISS terhadap nilai CBR pada stabilisasi tanah mempunyai kecenderungan yang semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya presentase penggunaan ISS tersebut. Tetapi penambahan ISS cenderung menurunkan nilai berat jenis bila dibandingkan dengan nilai berat jenis tanah asli tersebut. Penggunaan ISS 2500 cukup efektif jika digunakan pada jenis tanah timbunan karena meningkatkan daya dukung tanah.

6. Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Abu Cangkang Sawit

Penelitian yang dilakukan oleh Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, S.T., M.Eng.Sc. pada tahun 2009 adalah Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Abu Cangkang Sawit Stabilisasi tanah terhadap kuat geser maupun kuat

tekan adalah suatu usaha yang selalu dilakukan untuk meningkatkan ketahanan tanah terhadap tegangan tekan maupun tegangan geser. Sehingga, sampai saat ini stabilisasi tanah merupakan kajian yang menarik untuk diteliti baik metodenya maupun bahan-bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah tersebut. Bahan-bahan yang digunakan selama ini antara lain : GEOSTA yang masih diimpor dan harganya relatif mahal, abu terbang, yang dahulu merupakan limbah saat ini dimanfaatkan untuk pozzolan pada adukan beton maupun untuk stabilisasi tanah, sehingga nilai ekonomisnya menjadi tinggi.