

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut. Tanah merupakan material yang sangat penting dalam bidang Teknik Sipil. Semua sistem pembebanan produk Teknik Sipil berhubungan langsung dengan tanah serta sifat – sifatnya, baik itu sifat fisik, mekanis, maupun kimiawi.

1. Pengertian Tanah

Pengertian tanah menurut Bowles (1984), tanah merupakan campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis unsur-unsur sebagai berikut :

- a. Berangkal (*Boulder*) adalah potongan batuan batu besar, biasanya lebih besar dari 200 mm - 300 mm dan untuk kisaran ukuran-ukuran 150 mm - 250 mm, batuan ini disebut kerakal (*cobbles/pebbles*).
- b. Pasir (*sand*) adalah partikel batuan yang berukuran 0,074 mm – 5 mm, yang berkisar dari kasar (3 mm – 5 mm) sampai halus (< 1 mm).

- c. Lanau (*silt*) adalah partikel batuan yang berukuran dari 0,002 mm – 0,074 mm.
- d. Lempung (*clay*) adalah partikel yang berukuran lebih dari 0,002 mm, partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi dari tanah yang kohesif.
- e. Koloid (*colloids*) adalah partikel mineral yang diam, berukuran lebih dari 0,01 mm.

Tanah merupakan suatu benda alam yang tersusun dari padatan (bahan mineral dan bahan organik), cairan dan gas, yang menempati permukaan daratan, menempati ruang, dan dicirikan oleh salah satu atau kedua berikut: horison-horison, atau lapisan-lapisan, yang dapat dibedakan dari bahan asalnya sebagai hasil dari suatu proses penambahan, kehilangan, pemindahan dan transformasi energi dan materi, atau berkemampuan mendukung tanaman berakar di dalam suatu lingkungan alami (Soil Survey Staff, 1999).

Tanah adalah kumpulan butiran (agregat) mineral alami yang bisa dipisahkan oleh suatu cara mekanik bila agregat termaksud diaduk dalam air (Terzaghi, 1987).

Tanah adalah kumpulan dari bagian-bagian yang padat yang tidak terikat satu dengan yang lain yang diantara terdiri dari material organik, rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air. (Verhoef, 1994).

Tanah didefinisikan sebagai suatu lapisan kerak bumi yang tidak menjadi satu dengan ketebalan beragam yang berbeda dengan bahan-bahan dibawahnya, juga tidak beku dalam hal warna, bangunan fisik, struktur susunan kimiawi, sifat biologi, proses kimiawi ataupun reaksi-reaksi (Sutedjo, 1988).

2. Sistem Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem yang mengatur jenis-jenis tanah yang berbeda-beda, tetapi mempunyai sifat-sifat yang serupa kedalam kelompok - kelompok dan subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Dengan adanya sistem klasifikasi ini akan menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang rinci. Sistem klasifikasi tanah dibuat pada dasarnya untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisis tanah. Karena variasi sifat dan perilaku tanah yang begitu beragam, sistem klasifikasi secara umum mengelompokkan tanah ke dalam kategori yang umum dimana tanah memiliki kesamaan sifat fisis.

Sistem klasifikasi bukan merupakan sistem identifikasi untuk menentukan sifat-sifat mekanis dan geoteknis tanah. Karenanya, klasifikasi tanah bukanlah satu-satunya cara yang digunakan sebagai dasar untuk perencanaan dan perancangan konstruksi. Maksud klasifikasi tanah secara umum adalah pengelompokkan berbagai jenis tanah ke dalam kelompok yang sesuai dengan sifat teknik dan karakteristiknya. Klasifikasi ini pada umumnya didasarkan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas.

Sistem klasifikasi tanah dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

a. Klasifikasi berdasarkan tekstur dan ukuran

Sistem klasifikasi ini di dasarkan pada keadaan permukaan tanah yang bersangkutan, sehingga dipengaruhi oleh ukuran butiran tanah dalam tanah. Klasifikasi ini sangat sederhana di dasarkan pada distribusi ukuran tanah saja.

Pada klasifikasi ini tanah dibagi menjadi kerikil (*gevel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*) dan lempung (*clay*) (Das,1993).

b. Klasifikasi berdasarkan pemakaian

Pada sistem klasifikasi ini memperhitungkan sifat plastisitas tanah dan menunjukkan sifat-sifat tanah yang penting. Pada saat ini terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang sering dipakai dalam bidang teknik. Kedua sistem klasifikasi itu memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas *Atterberg*.

Ada beberapa macam sistem klasifikasi tanah sebagai hasil pengembangan dari sistem klasifikasi yang sudah ada. Tetapi yang paling umum digunakan adalah:

a. Sistem Klasifikasi AASHTO

Dalam sistem ini tanah dikelompokkan menjadi tujuh kelompok besar yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang termasuk dalam golongan A1, A-2, dan A-3 masuk dalam tanah berbutir dimana 35 % atau kurang dari jumlah tanah yang lolos ayakan No. 200. Sedangkan tanah yang masuk dalam golongan A-4, A-5, A-6, dan A-7 adalah tanah lempung atau lanau. A-8 adalah kelompok tanah organik (Das,1995).

Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria dibawah ini:

1) Ukuran butiran

Kerikil adalah bagian tanah yang lolos ayakan diameter 75 mm dan tertahan pada ayakan No. 200. Pasir adalah tanah yang lolos ayakan No.10 (2mm) dan tertahan ayakan No. 200 (0,075 mm). Lanau dan lempung adalah yang lolos ayakan No. 200.

2) Plastisitas

Nama berlanau mempunyai indeks plastis sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung bila indeks plastisnya 11 atau lebih. Bila dalam contoh tanah yang akan diklasifikasikan terdapat batuan yang ukurannya lebih besar dari 75 mm maka batuan tersebut harus dikeluarkan dahulu tetapi prosentasenya harus tetap dicatat.

Data yang didapat dari percobaan laboratorium telah ditabelkan pada tabel 1. Kelompok tanah paling kiri kualitasnya paling baik, makin ke kanan semakin berkurang.

Tabel 2.1. Klasifikasi tanah berdasarkan AASTHO.

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
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 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			

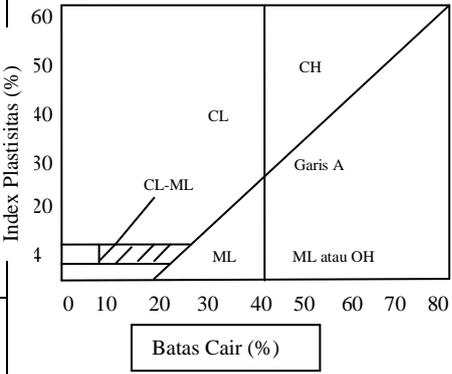
b. Sistem Klasifikasi *Unified* (USCS)

Sistem ini pada awalnya diperkenalkan oleh Casagrande (1942) untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang (Das, 1995). Oleh Casagrande sistem ini pada garis besarnya membedakan tanah atas tiga kelompok besar (Sukirman, 1992), yaitu :

- 1) Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), kurang dari 50 % lolos saringan No. 200, yaitu tanah berkerikil dan berpasir. Simbol kelompok ini dimulai dari huruf awal G untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil dan S untuk Pasir (*Sand*) atau tanah berpasir.
- 2) Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), lebih dari 50 % lolos saringan No. 200, yaitu tanah berlanau dan berlempung. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau anorganik, C untuk lempung anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik.

Klasifikasi sistem *Unified* secara visual di lapangan sebaiknya dilakukan pada setiap pengambilan contoh tanah. Hal ini berguna di samping untuk dapat menentukan pemeriksaan yang mungkin perlu ditambahkan, juga sebagai pelengkap klasifikasi yang dilakukan di laboratorium agar tidak terjadi kesalahan label.

Tabel 2.2. Sistem klasifikasi *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	Kerikil bersih (hanya kerikil)	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. 
				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.

B. Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan, dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Dalam keadaan kering sangat keras, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan. Permeabilitas lempung sangat rendah (*Terzaghi dan Peck, 1987*). Pelapukan kimiawi menghasilkan pembentukan kelompok-kelompok partikel yang berukuran koloid ($< 0,002$ mm) yang dikenal sebagai mineral lempung.

Sifat yang khas dari tanah lempung adalah dalam keadaan kering akan bersifat keras, dan jika basah akan bersifat lunak plastis, dan kohesif, mengembang dan menyusut dengan cepat, sehingga mempunyai perubahan volume yang besar dan itu terjadi karena pengaruh air. Lempung merupakan tanah berbutir halus koloidal yang tersusun dari mineral-mineral yang dapat mengembang. Lempung ekspansif memiliki sifat khusus yaitu kapasitas pertukaran ion yang sangat tinggi yang apabila terjadi perubahan kadar air. Jika kadar air bertambah, tanah lempung ekspansif akan mengembang disertai dengan kenaikan tekanan air pori dan tekanan pengembangannya. Sebaliknya, jika kadar air turun sampai dengan batas susutnya, lempung ekspansif akan mengalami penyusutan yang cukup tinggi.

Tanah Lempung mempunyai beberapa jenis, antara lain :

a. Tanah Lempung Berlanau

Lanau adalah tanah atau butiran penyusun tanah/batuan yang berukuran di antara pasir dan lempung. Sebagian besar lanau tersusun dari butiran-butiran *quartz* yang sangat halus dan sejumlah partikel berbentuk lempengan-lempengan pipih

yang merupakan pecahan dari mineral-mineral mika. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lanau adalah sebagai berikut (Das, 1991). :

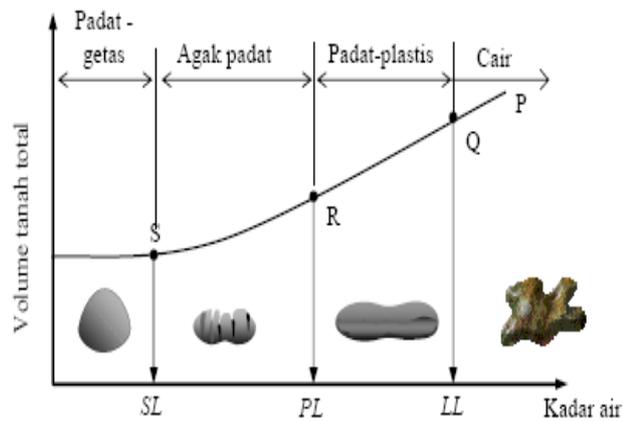
- 1) Ukuran butir halus, antara 0,002 – 0,05 mm.
- 2) Bersifat kohesif.
- 3) Kenaikan air kapiler yang cukup tinggi, antara 0,76 – 7,6 m.
- 4) Permeabilitas rendah.
- 5) Potensi kembang susut rendah sampai sedang.
- 6) Proses penurunan lambat.

Lempung berlanau adalah tanah lempung yang mengandung lanau dengan material utamanya adalah lempung. Tanah lempung berlanau merupakan tanah yang memiliki sifat plastisitas sedang dengan Indeks Plastisitas 7-17 dan kohesif.

b. Tanah Lempung Plastisitas Rendah

Plastisitas merupakan kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak-retak/remuk. Sifat dari plastisitas tanah lempung sangat di pengaruhi oleh besarnya kandungan air yang berada di dalamnya dan juga disebabkan adanya partikel mineral lempung dalam tanah.

Sifat dari plastisitas tanah lempung sangat di pengaruhi oleh besarnya kandungan air yang berada di dalamnya. Atas dasar air yang terkandung didalamnya (konsistensinya) tanah dibedakan atau dipisahkan menjadi 4 keadaan dasar yaitu padat, semi padat, plastis, cair.



Gambar 2.1. Batas konsistensi.

Bila pada tanah yang berada pada kondisi cair (titik P) kemudian kadar airnya berkurang hingga titik Q, maka tanah menjadi lebih kaku dan tidak lagi mengalir seperti cairan. Kadar air pada titik Q ini disebut dengan batas cair (*liquid limit*) yang disimbolkan dengan LL. Bila tanah terus menjadi kering hingga titik R, tanah yang dibentuk mulai mengalami retak-retak yang mana kadar air pada batas ini disebut dengan batas plastis (*plastic limit*), PL. Rentang kadar air dimana tanah berada dalam kondisi plastis, antara titik Q dan R, disebut dengan indeks plastisitas (*plasticity index*), PI, yang dirumuskan :

$$PI = LL - PL$$

dengan,

$$LL = \text{Batas Cair (Liquid Limit)}$$

$$PL = \text{Batas Plastis (Liquid Plastic)}$$

Dari Nilai PI yang dihitung dengan persamaan diatas akan ditentukan berdasarkan (Atterberg, 1911). Adapun batasan mengenai indeks plastisitas tanah ditinjau dari; sifat, dan kohesi. Seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.3. Nilai *indeks* plastisitas dan sifat tanah (Hardiyatmo, 2002).

PI %	PI % Sifat	Tanah Kohesi
0	Non Plastis	Non Kohesif
< 7	Plastisitas Rendah	Kohesi Sebagian
7 - 17	Plastisitas Sedang	Kohesif
> 17	Plastisitas Tinggi	Kohesif

Pada tabel diatas dapat dilihat bahwa lempung plastisitas rendah memiliki nilai *index* plastisitas (PI) < 7 % dan memiliki sifat kohesi sebagian yang disebabkan oleh mineral yang terkandung didalamnya.

Dalam sistem klasifikasi Unified (Das, 1995).

Tanah lempung plastisitas rendah memiliki simbol kelompok CL yaitu Tanah berbutir halus 50% atau lebih, lolos ayakan No. 200 dan memiliki batas cair (LL) ≤ 50 %.

c. Tanah Lempung Berpasir

Pasir merupakan partikel penyusun tanah yang sebagian besar terdiri dari mineral *quartz* dan *feldspar*. Sifat-sifat yang dimiliki tanah pasir adalah sebagai berikut (Das, 1991).:

- 1) Ukuran butiran antara 2 mm – 0,075 mm.
- 2) Bersifat non kohesif.
- 3) Kenaikan air kapiler yang rendah, antara 0,12 – 1,2 m.
- 4) Memiliki nilai koefisien permeabilitas antara 1,0 – 0,001 cm/det.
- 5) Proses penurunan sedang sampai cepat.

Klasifikasi tanah tergantung pada analisis ukuran butiran, distribusi ukuran butiran dan batas konsistensi tanah. Perubahan klasifikasi utama dengan penambahan ataupun pengurangan persentase yang lolos saringan no.4 atau no.200 adalah alasan diperlukannya mengikutsertakan deskripsi verbal beserta simbol-simbolnya, seperti pasir berlempung, lempung berlanau, lempung berpasir dan sebagainya.

Pada tanah lempung berpasir persentase didominasi oleh partikel lempung dan pasir walaupun terkadang juga terdapat sedikit kandungan kerikil ataupun lanau. Identifikasi tanah lempung berpasir dapat ditinjau dari ukuran butiran, distribusi ukuran butiran dan observasi secara visual. Sedangkan untuk batas konsistensi tanah digunakan sebagai data pendukung identifikasi karena batas konsistensi tanah lempung berpasir disuatu daerah dengan daerah lainnya akan berbeda tergantung jenis dan jumlah mineral lempung yang terkandung di dalamnya.

Suatu tanah dapat dikatakan lempung berpasir bila lebih dari 50% mengandung butiran lebih kecil dari 0,002 mm dan sebagian besar lainnya mengandung butiran antara 2 – 0,075 mm. Pada Sistem Klasifikasi *Unified* (ASTM D 2487-66T) tanah lempung berpasir digolongkan pada tanah dengan simbol CL yang artinya tanah lempung berpasir memiliki sifat kohesi sebagian karena nilai plastisitasnya rendah ($PI < 7$).

Untuk tanah urugan dan tanah pondasi, Sistem Klasifikasi *Unified* mengklasifikasikan tanah lempung berpasir sebagai (Sosrodarsono dan Nakazawa, 1988).:

- 1) Stabil atau cocok untuk inti dan selimut kedap air.
- 2) Memiliki koefisien permeabilitas.
- 3) Efektif menggunakan penggilas kaki domba dan penggilas dengan ban bertekanan untuk pemadatan di lapangan.
- 4) Berat volume kering 1,52-1,92 t/m³.
- 5) Daya dukung tanah baik sampai buruk.

Penggunaan untuk saluran dan jalan, Sistim Klasifikasi *Unified* mengklasifikasikan tanah lempung berpasir sebagai (Sosrodarsono dan Nakazawa, 1988). :

- 1) Cukup baik sampai baik sebagai pondasi jika tidak ada pembekuan.
- 2) Tidak cocok sebagai lapisan tanah dasar untuk perkerasan jalan.
- 3) Sedang sampai tinggi kemungkinan terjadi pembekuan.
- 4) Memiliki tingkat kompresibilitas dan pengembangan yang sedang.
- 5) Sifat drainase kedap air.
- 6) Alat pemadatan lapangan yang cocok digunakan penggilas kaki domba dan penggilas dengan ban bertekanan.
- 7) Berat volume kering antara 1,6 – 2 t/m³.
- 8) Memiliki nilai CBR lapangan antara 5-15 %.
- 9) Koefisien reaksi permukaan bawah 2,8 – 5,5 kg/cm³.

C. Pasir

Secara partikel, ukuran partikel pasir besar dan sama atau seragam, bentuknya bervariasi dari bulat sampai persegi. Bentuk-bentuk yang dihasilkan dari abrasi dan pelarutan adalah sehubungan dengan jarak transportasi sedimen. Perilaku

terjadinya massa disebabkan oleh jarak pori di antara butiran masing-masing yang bersentuhan.

Mineral pasir yang lebih dominan adalah kwarsa yang pada dasarnya stabil, lemah dan tidak dapat merubah bentuk. Pada suatu saat, pasir dapat meliputi granit, magnetit dan *hornblende*. Karena perubahan cuaca di mana akan cepat terjadi pelapukan mekanis dan terjadi sedikit pelapukan kimiawi, mungkin akan ditemui mika, *feldspar* atau *gypsum*, tergantung pada batuan asal.

Secara permeabilitas, pasir merupakan material yang mempunyai permeabilitas tinggi, mudah ditembus air. Kapilaritas pasir dapat dikatakan rendah, sehingga dapat diabaikan. Kekuatan hancur pasir diperoleh dari gesekan antar butiran. Dan berkenaan dengan kekuatan hancur, perlu diperhatikan bahwa pada pasir lepas sedikit tersementasi dapat menyebabkan keruntuhan struktur tanah. Dalam hal kemampuan berdeformasi, pasir bereaksi terhadap beban cepat seperti tertutupnya pori-pori dan padatnya butiran akibat pengaturan kembali. Deformasi atau perubahan bentuk pasir pada dasarnya plastis, dengan beberapa pemampatan elastis yang terjadi di dalam butiran-butiran. Jumlah pemampatan dihubungkan dengan gradasi kerapatan relatif dan besarnya tegangan yang bekerja. Kepekaan dan terjadinya kerapatan pasir disebabkan getaran keras dan material-material yang siap dipadatkan. Kehancuran dapat terjadi pada butiran-butiran pada saat tegangan-regangan yang bekerja relatif rendah.

D. Penurunan

Jika lapisan tanah dibebani, maka tanah akan mengalami penurunan (*settlement*). Penurunan yang terjadi dalam tanah disebabkan oleh berubahnya susunan tanah

maupun oleh pengurangan rongga pori/air di dalam tanah tersebut. Jumlah dari penurunan sepanjang kedalaman lapisan merupakan penurunan total tanah. Penurunan akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera dan penurunan konsolidasi.

Pada tanah berpasir yang sangat tembus air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat sehingga pengaliran air pori keluar sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat selesai dengan cepat.

Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapis tanah itu karena air pori didalam tanah berpasir dapat mengalir keluar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi secara bersamaan (Das, 1995).

Hal ini berbeda dengan lapis tanah lempung jenuh air yang *compressible* (mampu mampat). Koefisien rembesan lempung adalah sangat kecil dibandingkan dengan koefisi rembesan ijuk sehingga penambahan tekanan air pori yang disebabkan oleh pembebanan akan berkurang secara lambat dalam waktu yang sangat lama. Untuk tanah lempung perubahan volume yang di Sebakkan oleh keluarnya air dari dalam pori (yaitu konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera.

Penurunan konsolidasi biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lama dibandingkan dengan penurunan segera (Das, 1995).

E. Konsolidasi

Konsolidasi adalah suatu proses pengecilan volume secara perlahan–lahan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori. Proses tersebut berlangsung terus–menerus sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total benar–benar hilang.

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab–sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu :

1. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori–pori tanah.
2. Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air.

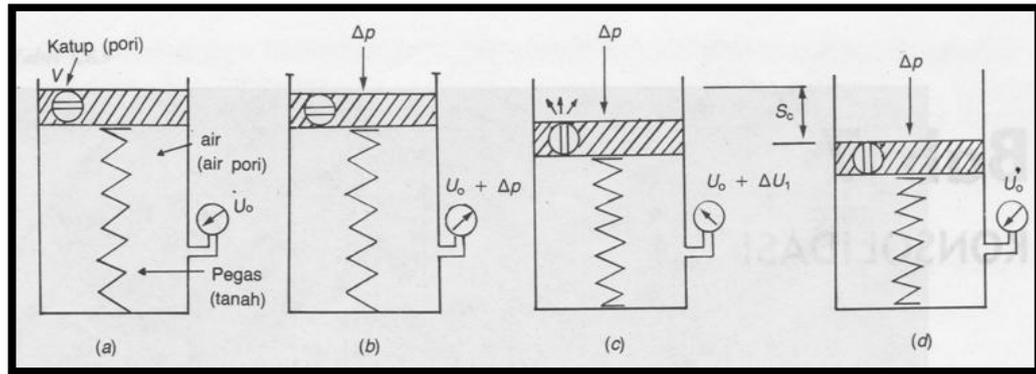
Bilamana suatu lapisan tanah gambut yang mampu mampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) akan terjadi dengan segera. Tanah gambut merupakan tanah yang mempunyai kandungan organik dan kadar air yang tinggi, yang terbentuk dari fragmen-fragmen material organik yang berasal dari tumbuh-tumbuhan yang dalam proses pembusukan menjadi tanah,

yang telah berubah sifatnya secara kimiawi dan telah menjadi fosil, dimana tanah lempung ini memiliki sifat yang tidak menguntungkan bagi konstruksi yaitu daya dukung yang rendah serta kompresibilitas yang tinggi.

Oleh karena itu harus dilakukan usaha perbaikan tanah agar tidak terjadi penurunan konsolidasi kembali saat konstruksi bangunan mulai dibangun bahkan setelah selesai dibangun di atasnya, sehingga resiko kerusakan struktur bangunan karena penurunan tanah yang terlalu besar dapat dihindari. Usaha perbaikan tanah dilakukan untuk meningkatkan kuat geser tanah, mengurangi compressibility tanah dan mengurangi permeabilitas tanah (Stapelfeldt, 2006).

F. Analogi Konsolidasi Satu Dimensi

Mekanisme konsolidasi satu dimensi (*one dimensional consolidation*) dapat digambarkan dengan cara analisis seperti yang disajikan pada Gambar 3. Silinder dengan piston yang berlubang dihubungkan dengan pegas, diisi air sampai memenuhi volume silinder. Pegas dianggap terbebas dari tegangan-tegangan dan tidak ada gesekan antar dinding silinder dengan tepi pistonnya. Pegas melukiskan keadaan tanah yang mudah mampat, sedangkan air melukiskan air pori dan lubang pada piston kemampuan tanah dalam meloloskan air atau permeabilitas tanahnya. Gambar 2.2.a melukiskan kondisi dimana sistem dalam keseimbangan. Kondisi ini identik dengan lapisan tanah yang dalam keseimbangan dengan tekanan *overburden*. Alat pengukur tekanan yang dihubungkan dengan silinder memperlihatkan tekanan hidrostatis sebesar u_o , pada lokasi tertentu didalam tanah.



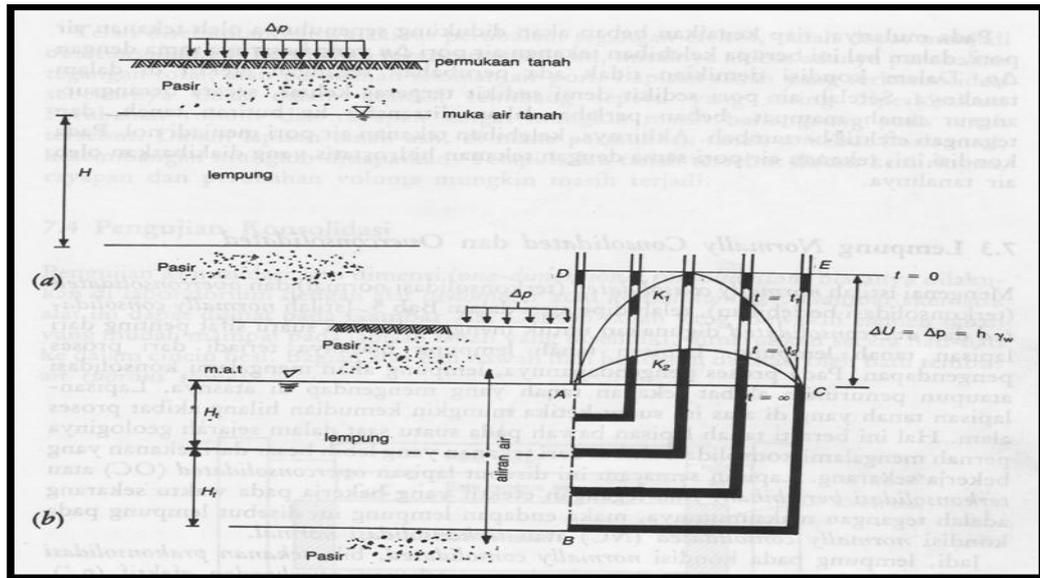
Gambar 2.2. Analogi piston dan pegas.

Bila tegangan sebesar Δp dikerjakan diatas piston dengan posisi katup V tertutup (Gambar 2.b), maka akibat tekanan ini piston tetap tidak akan bergerak. Hal ini disebabkan karena air tu tidak mudah mampat. Pada kondisi ini, tekanan pada piston tidak dipindah ke pegas, tapi sepenuhnya didukung oleh air. Pengukur tekanan air dalam silinder menunjukkan kenaikan tekanan $\Delta u = \Delta p$, atau pembacaan tekanan sebesar $u_0 + \Delta p$. Kenaikan tekanan Δu disebut dengan kelebihan tekanan air pori (*excess pore water pressure*). Kondisi pada kedudukan katup V tertutup melukiskan kondisi tanpa drainasi (*undrained*) didalam tanah.

Jika kemudia katup V dibuka, air akan keluar lewat lubang dengan kecepatan yang dipengaruhi oleh luas lubangnya. Hal ini akan menyebabkan piston bergerak ke bawah, sehingga pegas secara berangsur-angsur mendukung beban akibat Δp (Gambar 2.2.a). Pada setiap kenaikan tekanan yang didukung oleh pegas, kelebihan tekanan air pori (Δu) didalam silinder berkurang. Akhirnya pada suatu saat, tekanan air pori nol dan seluruh tekanan didukung oleh pegasnya dan kemudian piston diam (Gambar 2.2.d). Kedudukan ini melukiskan kondisi dengan drainasi (*drained*).

Pada sembarang waktunya, tekanan yang terjadi pada pegas identik dengan kondisi tegangan efektif didalam tanah. Sedang tegangan air didalam silinder identik dengan tekanan air pori. Kenaikan tekanan Δ_p akibat beban yang diterapkan identik dengan tambahan tegangan normal yang bekerja. Gerakan piston menggambarkan perubahan volume tanah, dimana gerakan ini dipengaruhi oleh kompresibilitas (kemudahmampatan) pegasnya, yaitu ekuivalen dengan kompresibilitas tanahnya.

Walaupun model piston dan pegas ini agak kasar, tetapi cukup menggambarkan apa yang terjadi bila tanah kohesif jenuh dibebani di laboratorium maupun dilapangan. Sebagai contoh nyatanya dapat dilihat pada Gambar 2.3.a, Disini diperlihatkan suatu pondasi yang dibangun diatas tanah lempung yang diapit oleh lapisan tanah pasir dengan muka air tanah dibatas lapisan lempung sebelah atas. Segera sesudah pembebanan, lapisan lempung mengalami kenaikan tegangan sebesar Δ_p . Air pori didalam lapisan lempung ini dapat mengalir dengan baik ke lapisan pasirnya dan pengaliran air hanya ke atas dan ke bawah saja. Dianggap pula bahwa besarnya tambahan tegangan Δ_p sama disembarang kedalaman lapisan lempungnya.



Gambar 2.3. Reaksi tekanan air pori terhadap beban pondasi
 a. Pondasi pada tanah lempung jenuh
 b. Diagram perubahan tekanan air pori dengan waktunya

Jalannya proses konsolidasi diamati lewat pipa-pipa piezometer yang dipasang sepanjang kedalamannya (Gambar 2.3.b), sedemikian rupa sehingga tinggi air dalam pipa piezometer menyatakan besarnya kelebihan tekanan air pori (*excess pore water pressure*) di kedalaman pipanya.

Akibat tambahan tekanan Δp , yaitu segera setelah beban pondasi bekerja, tinggi air dalam pipa piezometer naik setinggi $h = \Delta p / \gamma_w$, atau menurut garis DE , garis DE ini menyatakan distribusi kelebihan tekanan air pori awal. Dalam waktu tertentu, tekanan air pori pada lapisan yang lebih dekat dengan lapisan pasir akan berkurang, sedangkan tekanan air pori lapisan lempung bagian tengah masih tetap. Kedudukan ini dinyatakan dengan kurva K_1 . Dalam tahapan waktu sesudahnya, ketinggian air dalam pipa ditunjukkan dalam kurva K_2 . Setelah waktu yang lama,

tinggi air dalam pipa piezometer mencapai kedudukan yang sama dengan kedudukan muka air tanah (garis AC). Kedudukan garis AC ini menunjukkan kedudukan proses konsolidasi telah selesai, yaitu ketika kelebihan tekanan air pori telah nol.

Pada mulanya, tiap kenaikan beban akan didukung sepenuhnya oleh tekanan air pori, dalam hal ini berupa kelebihan tekanan air pori Δ_u yang besarnya sama dengan Δ_p . Dalam kondisi demikian tidak ada perubahan tegangan efektif didalam tanahnya. Setelah air pori sedikit demi sedikit terperas keluar, secara berangsur-angsur tanah mampat, beban perlahan-lahan ditransfer kebutiran tanah, dan tegangan efektif bertambah. Akhirnya, kelebihan tekanan air pori menjadi nol. Pada kondisi ini, tekanan air pori sama dengan tekanan hidrostatik yang diakibatkan oleh air tanahnya.

G. Lempung Normal *Normally Consolidated* dan *Overconsolidated*

Mengenai istilah *normally consolidated* (terkonsolidasi normal) dan *overconsolidated* (terkonsolidasi berlebihan), istilah *normally consolidated* dan *overconsolidated* digunakan untuk menggambarkan suatu sifat penting dari lapisan tanah lempung. Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses pengendapan. Pada proses pengendapannya, lempung akan mengalami konsolidasi ataupun penurunan akibat tekanan tanah yang mengendap di atasnya. Lapisan-lapisan tanah yang di atas ini suatu ketika mungkin kemudian hilang akibat proses alam. Hal ini berarti tanah lapisan bawah pada suatu saat dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat dari tekanan yang lebih besar dari tekanan yang bekerja sekarang. Lapisan semacam ini disebut lapisan *overconsolidated* (OC)

atau *terkonsolidasi berlebihan*. Bila tegangan efektif yang bekerja pada waktu sekarang adalah tegangan maksimumnya, maka endapan lempung ini disebut lempung pada kondisi *normally consolidated* (NC) atau *terkonsolidasi normal*.

Jadi lempung pada kondisi *normally consolidated*, bila tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*) (p_c') sama dengan tekanan *overburden* efektif (p_o'). Sedang lempung pada kondisi *overconsolidated*, jika *tegangan prakonsolidasi* lebih besar dari tekanan *overburden* efektif yang ada pada waktu sekarang ($p_c' > p_o'$). Nilai banding *overconsolidation* (*Overconsolidation ratio, OCR*) didefinisikan sebagai nilai banding *tekanan prakonsolidasi* terhadap tegangan efektif yang ada, atau bila dinyatakan dalam persamaan :

$$OCR = \frac{p_c'}{p_o'}$$

Tanah *normally consolidated* mempunyai nilai $OCR = 1$, dan tanah dengan $OCR > 1$ adalah *overconsolidated*. Dapat ditemui pula, tanah lempung mempunyai $OCR < 1$. Dalam hal ini tanah adalah sedang dalam (keadaan) konsolidasi (*underconsolidated*). Kondisi *underconsolidated* dapat terjadi pada tanah-tanah yang baru saja diendapkan baik secara geologis maupun oleh manusia. Dalam kondisi ini, lapisan lempung belum mengalami keseimbangan akibat beban di atasnya. Jika tekanan air pori diukur dalam kondisi *underconsolidated*, tekanannya akan melebihi hidrostatiknya.

Telah disebutkan bahwa akibat perubahan tegangan efektif, tanah dapat menjadi *overconsolidated*. Perubahan tegangan efektif ini, misalnya akibat adanya perubahan tegangan total, atau perubahan tekanan air pori. Lapisan tanah yang

terkonsolidasi sebenarnya tidak dalam kondisi seimbang seperti yang sering diperkirakan. Perubahan volume dan rayapan sangat mungkin masih berlangsung pada tanah tersebut. Dalam lapisan tanah asli, dimana permukaan tanah tersebut horizontal, keseimbangan mungkin didapatkan. Tetapi kalau tanah tersebut dalam kemiringan, rayapan dan perubahan volume mungkin masih terjadi.

H. Pengaruh Gangguan Benda Uji pada Grafik e -log p

Kondisi tanah yang mengalami pebebanan seperti yang ditunjukkan dalam grafik e -log p yang diperoleh dari laboratorium, tidak sama dengan kondisi pembebanan tanah asli pada lokasi dilapangan. Beda reaksi terhadap beban antara benda uji di laboratorium dan dilapangan adalah karena adanya gangguan tanah benda uji (*soil disturbance*) selama persiapan pengujian oedometer. Karena dibutuhkan untuk mengetahui hubungan angka pori-tegangan efektif pada kondisi asli dilapangan, maka diperlukan koreksi terhadap hasil pengujian dilaboratorium.

Dilapangan, elemen tanah dipengaruhi oleh tegangan efektif-vertikal σ_z' dan tegangan efektif horizontal $\sigma_z' = K_o \sigma_z'$ (dengan K_o adalah koefisien tekanan lateral tanah diam). Umumnya K_o tidak sama dengan 1, yaitu kurang dari 1 untuk lempung *normally consolidated* atau sedikit *normally overconsolidated* (*slightly overconsolidated*) dan lebih dari 1 untuk lempung *terkonsolidated sangat berlebihan* (*heavily overconsolidated*). Ketika contoh tanah diambil dari dalam tanah dengan pengeboran tekanan keliling luar (*external confining pressure*) hilang. Kecendrungan tanah jenuh setelah terambil dari dalam tanah untuk mengembang karena hilangnya tekanan keliling, ditahan oleh berkembangnya tekanan air pori negatif akibat tegangan kapiler (*capillary tension*). Jika udara

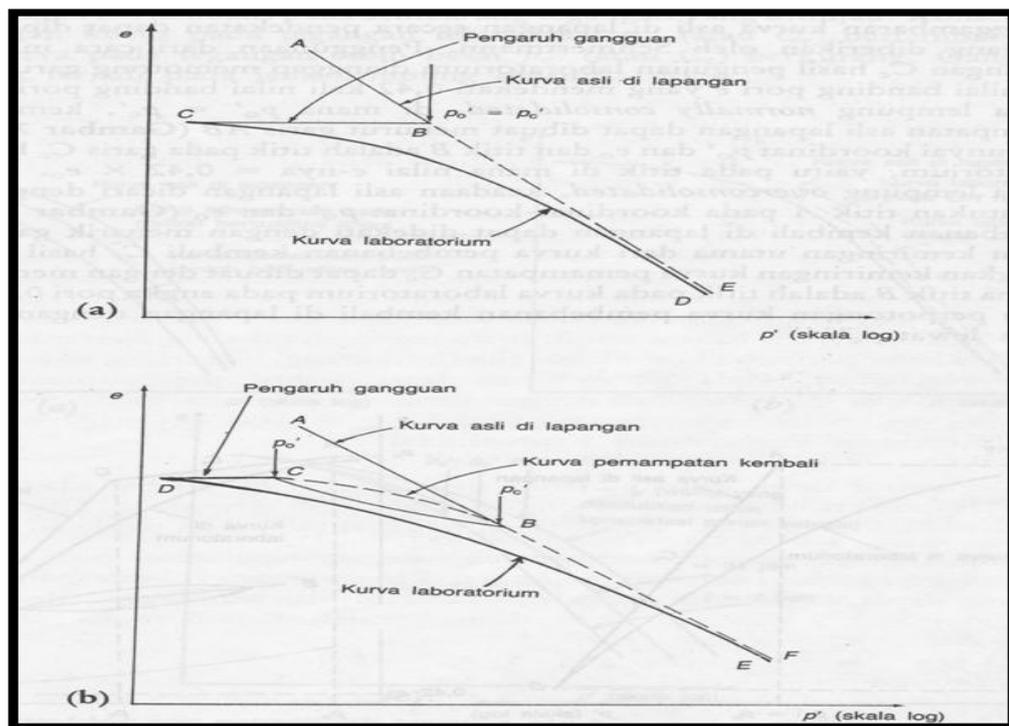
tidak keluar dari larutannya, volume contoh tidak akan berubah dan tegangan keliling efektif (σ_z') sama dengan besarnya tekanan air pori ($-u$). Dalam kondisi ini $\sigma_z' = \sigma_z' n =$.

Jadi, nilai banding σ_z' / σ_z' berubah dengan perubahan yang tergantung pada nilai K_o . Regangan yang ditimbulkan menyebabkan kerusakan benda uji atau benda uji menjadi terganggu. Pengaruh ini telah diselidiki oleh Skewmpton dan Sowa (1963), Ladd dan Lambe (1963), dan Ladd (1964). Pengaruh dari pengambilan contoh tanah dan lain-lain pengaruh kerusakan benda uji diberikan dalam Gambar4.

Sejarah pembebanan dari suatu contoh tanah lempung *normally consolidated* disajikan dalam Gambar 4.a. Kurva pemampatan asli diperlihatkan sebagai garis penuh AB , yang menggambarkan kondisi asli dilapangan, dengan $P_o' = P_c'$. Tambahan beban pada lapisan tanah akan menghasilkan perubahan angka pori (e) menurut garis patah-patah BE , yaitu perpanjangan kurva pemampatan asli dilapangan. Akan tetapi, akibat gangguan tekanan konsolidasi efektif benda uji pada waktu dibawa dilaboratorium berkurang, walupun angka pori tetap. Ketika benda uji dibebani kembali dilaboratorium, pengurangan angka pori yang terjadi akibat gangguan, contohnya adalah seperti kondisi yang ditunjukkan oleh kurva laboratorium CD .

Dalam hal lempung *overconsolidated* (Gambar 4.b), sejarah tegangan dilapangan disajikan oleh kurva pemampatan asli ke titik dimana *tekanan prakonsolidasi* (P_c') tercapai (bagian AB). Sesudah itu, karena sesuatu hal terjadi di waktu lampau, beban berkurang sampai mencapai tekanan *overburden* (P_o'). Kurva garis penuh

BC memperlihatkan hubungan $e-\log P'$ dilapangan selama pengurangan bebannya. Penambahan beban dilapangan akan mengikuti kurva pemampatan kembali yang berupa garis patah-patah CB , yang bila beban bertambah hingga melampaui tekanan prakonsolidasi, kurva akan terus kebawah mengikuti pelurusan dari kurva pemampatan asli dilapangan (bagian BF). Akibat gangguan contohnya, maka tekanan konsolidasi efektif tereduksi pada angka pori konstan, yang bila kemudian diadakan pengujian dilaboratorium kurvanya akan mengikuti garis penuh DE . Penambahan derajat gangguan benda uji, mengakibatkan kurva laboratorium akan cenderung bergeser lebih kekiri

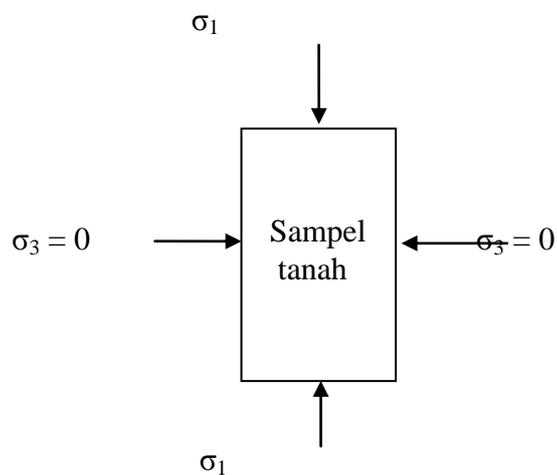


Gambar 2.4. Pengaruh gangguan contoh pada kurva pemampatan.

- (a) Lempung Normally Consolidated
- (b) Lempung Overconsolidated

I. Kuat Tekan Bebas

Uji tekan bebas termasuk hal yang khusus dari uji triaksial *unconsolidated undrained, UU* (tak terkonsolidasi-tak terdrainase). Gambar skematik dari prinsip pembebanan dalam percobaan ini dapat dilihat pada Gambar 5. Kondisi pembebanan sama dengan yang terjadi pada uji triaksial, hanya tekanan selnya nol ($\sigma_3 = 0$).



Gambar 2.5. Skema uji tekan bebas (Christady, 2006)

Bila maksud pengujian adalah untuk menentukan parameter kuat geser tanah, pengujian ini hanya cocok untuk jenis tanah lempung jenuh, dimana pada pembebanan cepat, air tidak sempat mengalir ke luar dari benda uji. Pada lempung jenuh, tekanan air pori dalam benda uji pada awal pengujian negatif (tegangan kapiler).

Tegangan aksial yang diterapkan di atas benda uji berangsur-angsur ditambah sampai benda uji mengalami keruntuhan. Pada saat keruntuhannya, karena $\sigma_3 = 0$, maka:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f = q_u \dots\dots\dots(1)$$

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

$$s_u = c_u = \frac{q_u}{2}$$

Dimana s_u atau c_u adalah kuat geser *undrained* dari tanahnya. Hubungan konsistensi dengan kuat tekan bebas tanah lempung diperlihatkan dalam Tabel 5.

Hasil uji tekan bebas biasanya tidak begitu meyakinkan bila digunakan untuk menentukan nilai parameter kuat geser tanah tak jenuh.

Tabel 2.4. Hubungan kuat tekan bebas (q_u) tanah lempung dengan konsistensinya (Christady, 2006)

Konsistensi	q_u (kN/m ²)
Lempung keras	> 400
Lempung sangat kaku	200 – 400
Lempung kaku	100 – 200
Lempung sedang	50 – 100
Lempung lunak	25 – 50
Lempung sangat lunak	< 25

Dalam praktek, untuk mengusahakan agar kuat geser *undrained* yang diperoleh dari hasil uji tekan bebas mendekati sama dengan hasil uji triaksial pada kondisi keruntuhan, beberapa hal yang harus dipenuhi, antara lain (Holtz dan Kovacs, 1981):

- 1) Benda uji harus 100% jenuh, kalau tidak, akan terjadi desakan udara di dalam ruang pori yang menyebabkan angka pori (e) berkurang sehingga kekuatan benda uji bertambah.
- 2) Benda uji tidak boleh mengandung retakan atau kerusakan yang lain. Dengan kata lain benda uji harus utuh dan merupakan lempung homogen. Dalam praktek, sangat jarang lempung *overconsolidated* dalam keadaan utuh, dan bahkan sering terjadi pula lempung *normally consolidated* mempunyai retakan-retakan.
- 3) Tanah harus terdiri dari butiran sangat halus. Tekanan kekang efektif (*effective confining pressure*) awal adalah tekanan kapiler residu yang merupakan fungsi dari tekanan pori residu ($-u_r$). Hal ini berarti bahwa penentuan kuat geser tanah dari uji tekan bebas hanya cocok untuk tanah lempung.
- 4) Proses pengujian harus berlangsung dengan cepat sampai contoh tanah mencapai keruntuhan. Pengujian ini merupakan uji tegangan total dan kondisinya harus tanpa drainase selama pengujian berlangsung. Jika waktu yang dibutuhkan dalam pengujian terlalu lama, penguapan dan pengeringan benda uji akan menambah tegangan kekang dan dapat menghasilkan kuat geser yang lebih tinggi. Waktu yang cocok biasanya sekitar 5 sampai 15 menit.

Perlu diperhatikan bahwa kuat tekan bebas adalah nilai $(\sigma_1 - \sigma_3)$ saat runtuh (dengan $\sigma_3 = 0$), sedang kuat geser undrained adalah nilai $\tau_f = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$ saat runtuh.

J. Landasan Teori

1. Pengujian Konsolidasi

Pemampatan tanah disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori dan sebab-sebab lain. Mengingat nilai parameter tanah sangat dipengaruhi oleh beban maka besarnya beban yang digunakan perlu disesuaikan dengan beban konstruksi bangunan yang direncanakan. Adapun tujuan dari konsolidasi adalah menentukan sifat kemampuan tanah sifat pengembangan dan karakteristik konsolidasinya yang merupakan fungsi dari permeabilitas tanah.

- Sifat pemampatan tanah dinyatakan dengan indeks kompresi (C_c)
- Sifat pengembangan tanah dinyatakan dengan indeks swelling (C_s)
- Karakteristik konsolidasi dinyatakan oleh koefisien konsolidasi (C_v)

Yang menggambarkan kecepatan terhadap kompresi tanah terhadap waktu.

2. Analisis Perhitungan Pengujian Konsolidasi

a. Tegangan Tanah Sebelum Konsolidasi (P_a')

Nilai tegangan tanah sebelum konsolidasi (P_a') yaitu besarnya tegangan tanah yang terjadi pada saat sebelum konsolidasi atau prakonsolidasi.

b. Tekanan Tanah Sebelum Konsolidasi (P_c')

Nilai tekanan tanah yang terjadi saat sebelum konsolidasi (prakonsolidasi) yaitu tekanan yang terjadi pada saat prakonsolidasi yang mengakibatkan tekanan prakonsolidasi bergerak ke kiri atau berkurang yang diikuti oleh pengurangan angka pori (mengakibatkan regangan tanah bertambah).

c. Koefisien Pemampatan (*Coefficient of Compression*) (a_v) dan koefisien perubahan Volume (m_v) (*Coefficient of Volume Change*)

Koefisien pemampatan (a_v) adalah koefisien yang menyatakan kemiringan kurva $e-p$. Jika tanah dengan volume V_1 memampat sehingga volumenya menjadi V_2 , dan memampatnya tanah dianggap hanya sebagai akibat pengurangan rongga pori, maka perubahan volume hanya dalam arah vertikal dapat dinyatakan oleh :

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{(1 + e_1) - (1 + e_2)}{1 + e_1} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan :

e_1 = angka pori pada tegangan P_1'

e_2 = angka pori pada tegangan P_2'

V_1 = Volume pada tegangan P_1'

V_2 = Volume pada tegangan P_2'

Kemiringan kurva $e - p'$ (a_v) didefinisikan sebagai :

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$$

$$\frac{e_1 - e_2}{P_2' - P_1'} \dots\dots\dots(3)$$

Keofisien perubahan volume (M_v) didefinisikan sebagai perubahan volume persatuan penambahan tegangan efektif. Satuan dari m_v adalah kebalikan dari tegangan (cm^2/kg). Perubahan volume dapat dinyatakan dengan perubahan ketebalan ataupun angka pori. Jika terjadi penambahan tegangan efektif p' ke p'_2 , maka angka pori akan berkurang dari e_1 ke e_2 (Gambar 2.9.b) dengan perubahan ΔH .

$$\begin{aligned} \text{Perubahan volume} &= \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (\text{karena area contoh tetap}) \\ &= \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

Substitusi Persamaan (4a) ke Persamaan (3) diperoleh

$$\text{Perubahan volume} = \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \dots\dots\dots(5)$$

Karena m_v adalah perubahan volume/satuan penambahan tegangan, maka

$$\begin{aligned} M_v &= \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \frac{1}{\Delta_p} \\ &= \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

Nilai m_v untuk tanah tertentu tidak konstan, tetapi tergantung dari besarnya tegangan yang ditinjau.

c. Indeks Pemampatan (C_c) (Compressioon Index)

Indeks pemampatan, C_c adalah kemiringan dari bagian garis lurus grafik $e - \log p'$.

Untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam Gambar 2.10. C_c dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2' - \log p_1'} = \frac{\Delta e}{\log p_2' / p_1'} \dots\dots\dots(7)$$

Untuk tanah *noremally consolidated*, Terzaghi dan Peck (1967) memberikan hubungan angka kompresi C_c sebagaib berikut:

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots (8)$$

Dengan LL adalah batas cair (*liquid limit*). Persamaan ini dapat dipergunakan untuk tanah lempung tak organik yang mempunyai sensitivitas rendah sampai sedang dengan kesalahan 30% (rumus ini seharusnya tak diggunakan untuk sensitivitas lebih besar dari Terzaghi dan Peck juga memberikan hubungan yang sama untuk tanah lempung

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots (9)$$

Beberapa nilai C_c , yang didasarkan pada sifat-sifat tanah pada tempat-tempat tertentu yang diberikan oleh azzouz dkk, (1976) sebagai berikut :

$$C_c = 0,01 W_N \text{ (untuk lempung Chicago) } \dots\dots\dots (10)$$

$$C_c = 0,0046 (LL - 9) \text{ (untuk lempung Brasilia) } \dots\dots\dots (11)$$

$$C_c = 0,208 e_o + 0,0083 \text{ (untuk lempung Chicago) } \dots\dots\dots (12)$$

$$C_c = 0,0115 W_N \text{ (untuk tanah organik, gambut) } \dots\dots\dots (13)$$

Dengan W_N adalah kadar air asli (%) dan e_o adalah angka pori.

d. Koefisien Konsolidasi (C_v) (Coefficient of Consolidation)

Kecepatan penurunan dapat dihitung dengan menggunakan koefisien konsolidasi C_v . Kecepatan penurunan perlu diperhitungkan bila penurunan konsolidasi yang terjadi pada suatu struktur diperkirakan sangat besar. Bila penurunan sangat kecil, kecepatan penurunan tidak begitu penting diperhatikan, karena penurunan yang terjadi sejalan dengan waktunya akan tidak menghasilkan perbedaan yang begitu besar.

Derajat konsolidasi pada sembarang waktunya, dapat ditentukan dengan menggambarkan grafik penurunan vs. waktu untuk satu beban tertentu yang

diterapkan pada alat konsolidometer. Caranya dengan mengukur penurunan total pada akhir fase konsolidasi. Kemudian dari data penurunan dan waktunya, sembarang waktu yang dihubungkan dengan derajat konsolidasi rata-rata tertentu (misalnya $U = 50\%$) ditentukan. Hanya sayangnya, walaupun fase konsolidasi telah berakhir, yaitu ketika tekanan air pori telah nol, benda uji dalam konsolidometer masih terus mengalami penurunan akibat konsolidasi sekunder. Karena itu, tekanan air pori mungkin perlu diukur selama proses pembebanannya atau suatu interpretasi data penurunan dan waktu harus dibuat untuk menentukan kapan konsolidasi telah selesai.

Jika sejumlah kecil udara terhisap masuk dalam air pori akibat penurunan tekanan pori dari lokasi aslinya di lapangan, kemungkinan terdapat juga penurunan yang berlangsung dengan cepat, yang bukan bagian dari proses konsolidasi. Karena itu, tinggi awal atau kondisi sebelum adanya penurunan saat permulaan proses konsolidasi juga harus diinterpretasikan.

e. Metode Kecocokan Log = Waktu (Log-Time Fitting method)

Prosedur untuk menentukan nilai koefisien konsolidasi C_v diberikan oleh Casagrande dan Fadum (1940). Cara ini sering disebut metode kecocokan log-waktu Casagrande (*Casagrande log-time fitting method*). Adapun prosedurnya adalah sebagai berikut:

1. Gambarkan grafik penurunan terhadap log waktu, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 12 untuk satu beban yang diterapkan
2. Kedudukan titik awal kurva ditentukan dengan pengertian bahwa kurva awal mendekati parabol. Tentukan dua titik yaitu pada saat t_1 (titik P) dan saat $4t_1$ (titik Q). Selisih ordinat (jarak vertical) keduanya diukur, misalnya x . Kedudukan $R =$

R_0 digambar dengan mengukur jarak x ke arah vertical di atas titik P . Untuk pengontrolan, ulangi dengan pasangan titik yang lain.

3. Titik $U = 100\%$, atau titik R_{100} , diperoleh dari titik potong dua bagian linier kurvanya, yaitu titik potong bagian garis lurus kurva konsolidasi primer dan sekunder.

4. Titik $U = 50\%$, ditentukan dengan

$$R_{50} = (R_0 + R_{100})/2$$

Dari sini diperoleh waktu t_{50} . Nilai T_v sehubungan dengan $U = 50\%$ adalah 0,197.

Selanjutnya koefisien konsolidasi C_v , diberikan oleh persamaan:

$$C_v = \frac{0,197H_t^2}{t_{50}} \dots\dots\dots(14)$$

Pada pengujian konsolidasi dengan drainasi atas dan bawah, nilai H_t diambil setengah dari tebal rata-rata benda uji pada beban tertentu. Jika temperature rata-rata dari tanah asli di lapangan diketahui, dan ternyata terdapat perbedaan dengan temperature rata-rata pada waktu pengujian, koreksi nilai C_v harus diberikan.

Terdapat beberapa hal di mana cara log-waktu Casagrande tidak dapat diterapkan. Jika konsolidasi sekunder begitu besar pada waktu fase konsolidasi primer selesai, mungkin tidak dapat terlihat dengan jelas dari patahnya grafik log waktu. Tipe kurvanya akan sangat tergantung pada nilai banding penambahan tekanan LIR (Leonard dan Altschaeffl, 1964). Jika R_{100} tidak dapat diidentifikasi dari grafik waktu vs. penurunan, salah satu pengukuran tekanan air pori atau cara lain untuk menginterpretasikan C_v , harus diadakan.

3. Pengujian Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*) merupakan cara yang dilakukan di laboratorium untuk menghitung kekuatan geser tanah. Uji kuat ini mengukur seberapa kuat tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai tanah tersebut terpisah dari butiran-butirannya juga mengukur regangan tanah akibat tekanan tersebut.

4. Analisis Perhitungan Pengujian Kuat Tekan Bebas

Nilai kuat tekan bebas (*Unconfined compressive strength*), q_u didapat dari pembacaan proving ring dial yang maksimum.

$$q_u = \frac{kxR}{A} \dots\dots\dots(15)$$

Dimana :

q_u = kuat tekan bebas

k = kalibrasi proving ring

R = pembacaan maksimum – pembacaan awal

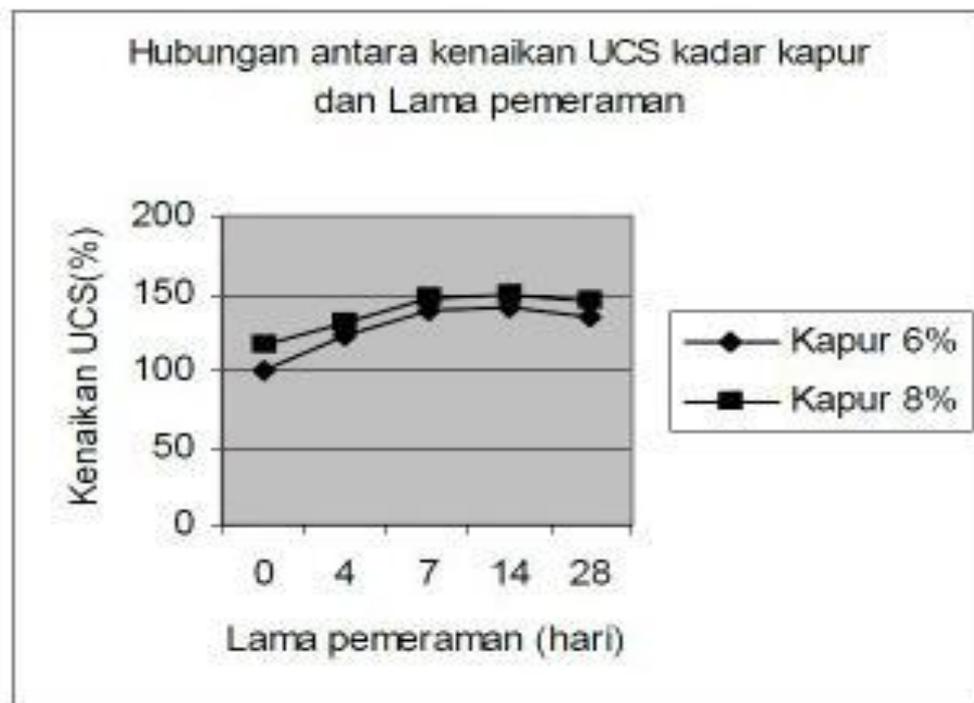
A = luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan R .

K. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pengujian konsolidasi dan kuat tekan antara lain :

a. Penelitian kuat tekan bebas

Pada penelitian yang telah dilakukan (Hatmoko, J.T dan Lulie Y, 2007) yang berjudul UCS Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Abu Ampas Tebu Dan Kapur didapat grafik hubungan UCS kadar kapur dan lama pemeraman.



Gambar 2.6. Hubungan antara kenaikan UCS kadar kapur dan lama pemeraman (Hatmoko, J.T dan Lulie Y, 2007)

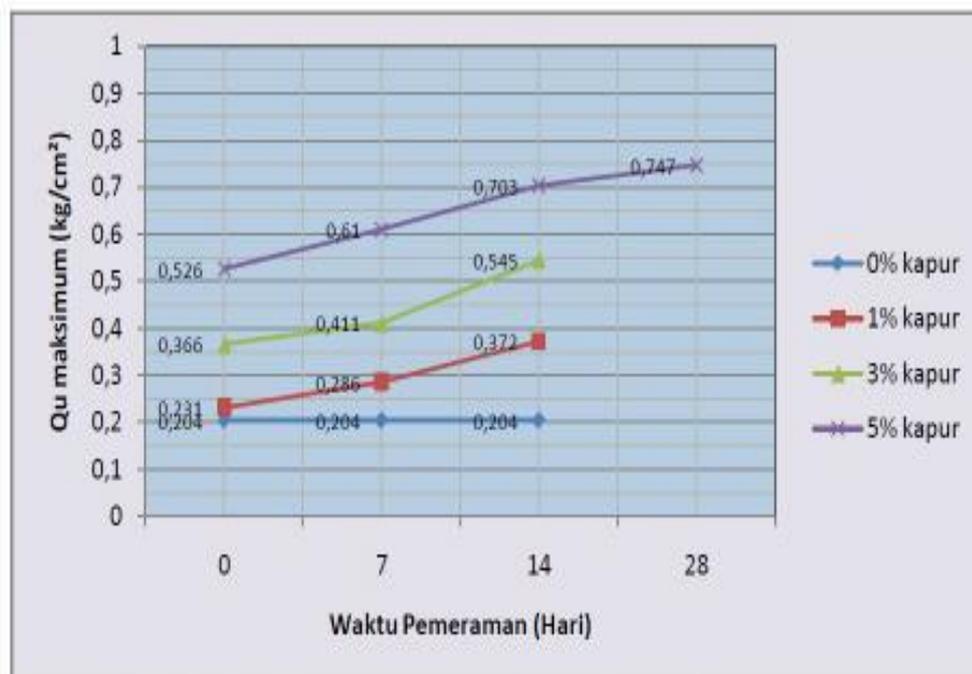
Dapat disimpulkan pengujian kuat tekan bebas tanah lempung dicampur kapur dengan variasi 6% dan 8%, selalu mengalami kenaikan hingga pemeraman 28 hari.

Pada penelitian yang dilakukan (Ghazali F, 2010) yang berjudul Pengaruh Penambahan Kapur Ca(OH)_2 Pada Tanah Lempung (Clay) Terhadap Plastisitas Dan Nilai CBR Tanah Dasar (Subgrade) Perkerasan Jalan diperoleh hasil pengujian kuat tekan bebas tanah lempung yang dengan kapur

Tabel 2.5. Hasil penelitian terhadap kuat tekan bebas berbagai variasi penambahan kapur dan waktu pemeraman.

No	Penambahan Kapur (%)	Waktu Pemeraman (Hari)	UCS (Kg/cm ²)
1	1	0	0,231
		7	0,286
		14	0,372
2	3	0	0,366
		7	0,411
		14	0,545
3	5	0	0,526
		7	0,610
		14	0,703
		28	0,747

Sumber (Ghazali F, 2010)



Gambar 2.7. Perbandingan nilai kuat tekan bebas maksimum tanah lempung yang telah di campur Ca(OH)_2 dengan berbagai variasi kadar kapur dan waktu pemeraman (Ghazali F, 2010)

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa kuat tekan bebas tanah asli yang dicampur dengan kapur selalu naik dengan naiknya kadar kapur di dalam tanah serta lamanya pemeraman. Kenaikan nilai kuat tekan bebas (Q_u) maksimum terjadi pada penambahan kapur 5% dengan masa pemeraman 14 hari, yaitu dari 0.204 kg/cm^2 menjadi 0.703 kg/cm^2 .

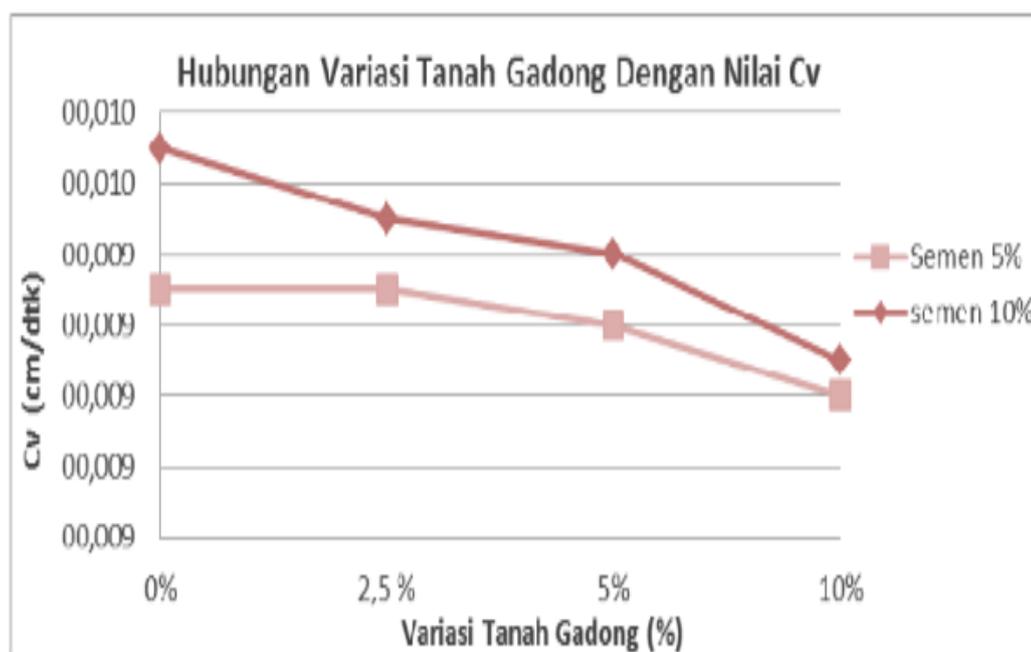
b. Pengujian konsolidasi

Pada penelitian yang dilakukan (Renaningsih , Tedi Agung S, 2012) yang berjudul pengaruh tanah gadong terhadap nilai konsolidasi dan Kuat dukung tanah lempung tanon yang di stabilisasi Dengan semen. Hasil dari pengujian konsolidasi dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel.2.6. Hasil pengujian konsolidasi

Variasi campuran Tanon		<i>Coefficient of Consolidation (Cv)</i>	<i>Compression indek (Cc)</i>	<i>Sentlement of Consolidation (Sc)</i>
Semen	Tanah Gadong			
%	%	cm ² /dtk		cm
0	0	0,0064	0,2	0,044
5	0	0,0093	0,112	0,014
	2,5	0,0093	0,072	0,017
	5	0,0092	0,126	0,025
	10	0,009	0,156	0,031
10	0	0,0097	0,092	0,011
	2,5	0,0095	0,064	0,014
	5	0,0094	0,081	0,015
	10	0,0091	0,181	0,034

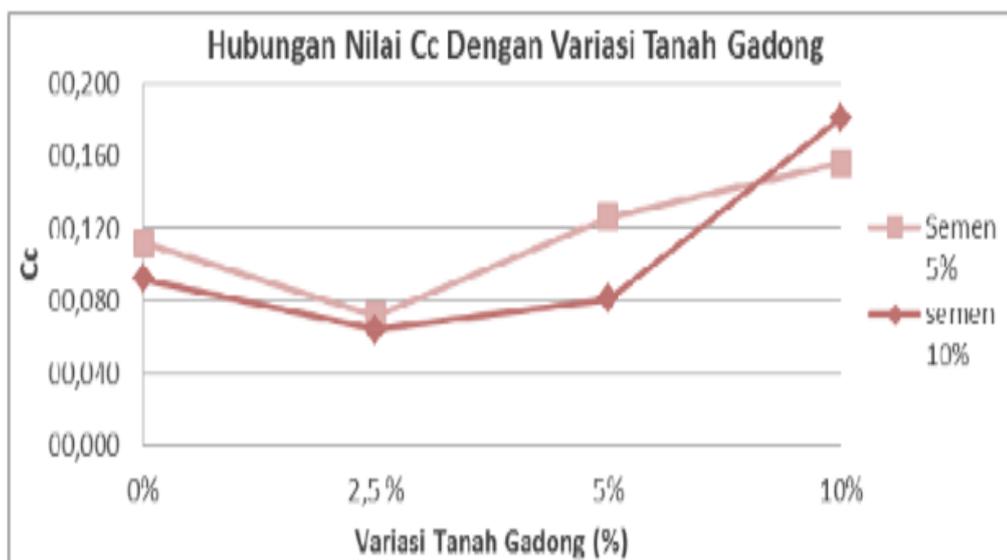
Sumber (Renaningsih , Tedi Agung S, 2012)



Gambar 2.8. Grafik hubungan variasi tanah Gadong terhadap nilai Cv (Renaningsih , Tedi Agung S, 2012)

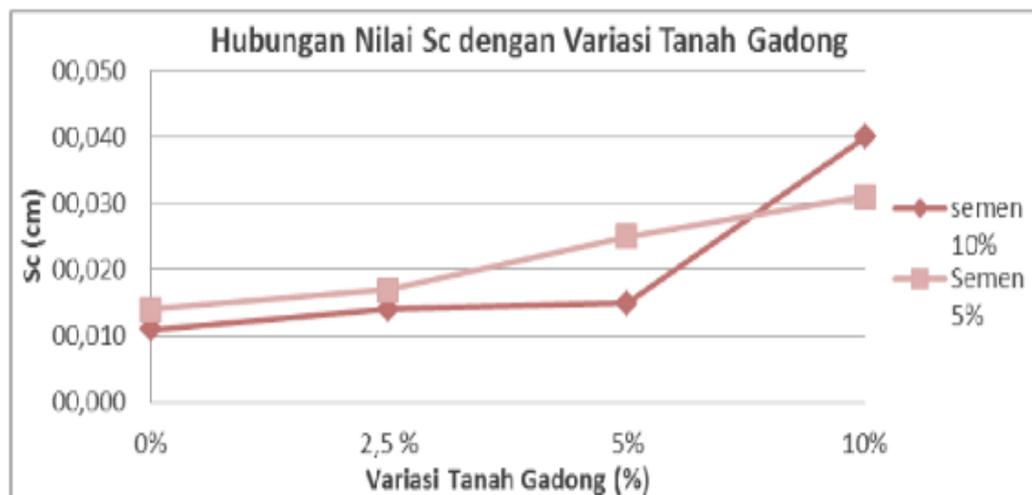
Coefficient of Consolidation (Cv) menunjukkan kecepatan penurunan konsolidasi. Dibandingkan tanah asli terjadi peningkatan nilai Cv pada tanah campuran, tetapi pada penambahan semen 5% dan seiring dengan penambahan persentase tanah

Gadong terjadi penurunan nilai CV, nilai CV terkecil diperoleh pada penambahan semen 5% dan tanah Gadong 10% yaitu sebesar 0,0090 cm²/dtk. Demikian juga pada penambahan semen 10% , nilai Cv paling kecil pada penambahan tanah Gadong 10% yaitusebesar 0,0091 cm²/dtk. Sehingga Cv terkecil diperoleh pada campuran semen 5% dan tanah Gadong 10 % sebesar (0,0090 cm²/dtk). Semakin besar persentase tanah Gadong maka nilai Cv (*Coefficient of Consolidation*) cenderung turun, sehingga waktu yang diperlukan untuk proses konsolidasi semakin lama.



Gambar 2.9. Grafik hubungan variasi tanah Gadong terhadap nilai Cc.
(Renaningsih , Tedi Agung S, 2012)

Compression index (Cc) adalah kemiringan dari bagian lurus grafik e-log p. Pada tanah campuran nilai Cc maksimum terjadi pada penambahan semen 10% dan tanah Gadong 10 % yaitu sebesar 0,1810. Nilai Cc semakin besar, mengakibatkan kemampuan tanah semakin berkurang sehingga penurunan konsolidasi yang terjadi semakin besar.



Gambar 2.10. Grafik hubungan variasi tanah Gadong terhadap nilai Sc.
(Renaningsih , Tedi Agung S, 2012)

Dibandingkan tanah asli, nilai penurunan (S_c) pada tanah campuran semakin kecil. Nilai S_c terkecil terjadi pada penambahan semen 10% tanah Gadong 0 % dengan nilai sebesar 0,0110 cm. Maka penambahan tanah Gadong tidak berpengaruh baik terhadap penurunan.