

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah

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. Tanah pada kondisi alam, terdiri dari campuran butiran-butiran mineral dengan atau tanpa kandungan bahan organik. Butiran-butiran tersebut dapat dengan mudah dipisahkan satu sama lain dengan kocokan air. Material ini berasal dari hasil pelapukan batuan, baik secara fisik maupun kimia. Sifat-sifat fisik tanah, kecuali dipengaruhi oleh sifat batuan induk yang merupakan material asalnya, juga dipengaruhi oleh unsur-unsur luar yang menjadi penyebab terjadinya pelapukan batuan tersebut (Setyanto, 1999).

Adapun menurut para ahli teknik sipil, tanah dapat didefinisikan sebagai :

1. Tanah adalah kumpulan butiran (agregat) mineral alami yang bisa dipisahkan oleh suatu cara mekanik bila agregat termaksud diaduk dalam air (Terzaghi, 1987).
2. Tanah adalah akumulasi partikel mineral yang tidak mempunyai/lemah ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan (Craig, 1987)

3. Tanah adalah material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang terikat secara kimia satu dengan yang lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (partikel padat) disertai zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995).
4. Secara umum tanah terdiri dari tiga bahan, yaitu butir tanahnya sendiri serta air dan udara yang terdapat dalam ruangan antar butir-butir tersebut (Wesley, 1997).

1. Sistem Klasifikasi Tanah

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

Terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan untuk mengelompokkan tanah. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butiran dan batas-batas *Atterberg*, sistem-sistem tersebut adalah Sistem *Unified Soil Classification System (USCS)* dan Sistem *AASHTO (American Association Of State Highway and Transporting Official)*. Tetapi pada penelitian ini penulis memakai system klasifikasi tanah *unified (USCS)*.

➤ **Sistem Klasifikasi *Unified (USCS)***

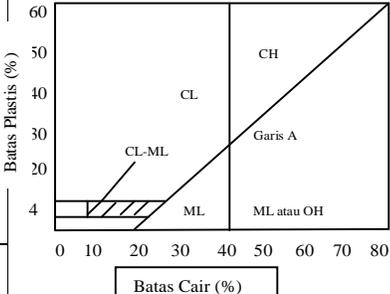
Sistem ini pada awalnya diperkenalkan oleh Casagrande (1942) untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang (Das, 1995). Oleh Casagrande sistem ini pada garis besarnya membedakan tanah atas dua kelompok besar (Sukirman, 1992), yaitu :

- 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 di lakukan di laboratorium agar tidak terjadi kesalahan label.

Tabel 1. 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	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 $PI < 4$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai <i>dobel simbol</i>
			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 $PI < 4$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai <i>dobel simbol</i>
	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		

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 tidak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan. Selain itu, permeabilitas lempung sangat rendah (Terzaghidan Peck, 1987).

Sifat khas yang dimiliki oleh 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. Sedangkan untuk jenis 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 terdiri dari berbagai golongan tekstur yang agak susah dicirikan secara umum. Sifat fisika tanah lempung umumnya terletak di antara sifat tanah pasir dan liat. Pengolahan tanah tidak terlampau berat, sifat merembeskan airnya sedang dan tidak terlalu melekat.

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 dan Afryana, 2009).

Tanah lempung terdiri dari butir – butir yang sangat kecil (< 0.002 mm) dan menunjukkan sifat – sifat plastisitas dan kohesi. Kohesi menunjukkan kenyataan bahwa bagian – bagian itu melekat satu sama lainnya, sedangkan plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuk bahan itu dirubah – rubah tanpa perubahan isi atau tanpa kembali ke bentuk aslinya, dan tanpa terjadi retakan – retakan atau terpecah – pecah (L.D Wesley, 1977).

Mineral lempung merupakan senyawa alumunium silikat yang kompleks yang terdiri dari satu atau dua unit dasar, yaitu *silica tetrahedral* dan alumunium *octahedral*. Silicon dan alumunium mungkin juga diganti sebagian dengan unsur lain yang disebut dengan substitusi isomorfis. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut:

- 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.

Tanah butiran 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).

Partikel lempung dapat berbentuk seperti lembaran yang mempunyai permukaan khusus. Karena itu, tanah lempung mempunyai sifat sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya permukaan. Umumnya, terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Beberapa mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung yakni : *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite* (Hardiyatmo, 2006).

1. Sifat-Sifat Umum Mineral Lempung :

a. Hidrasi

Partikel mineral lempung biasanya bermuatan negatif sehingga partikel lempung hampir selalu mengalami hidrasi, yaitu dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air dalam jumlah yang besar. Lapisan ini sering mempunyai tebal dua molekul dan disebut lapisan difusi, lapisan difusi ganda atau lapisan ganda adalah lapisan yang dapat menarik molekul air atau kation yang disekitarnya. Lapisan ini akan hilang pada temperature yang lebih tinggi dari 60° sampai 100° C dan akan mengurangi plastisitas

alamiah, tetapi sebagian air juga dapat menghilang cukup dengan pengeringan udara saja.

b. Aktivitas (A)

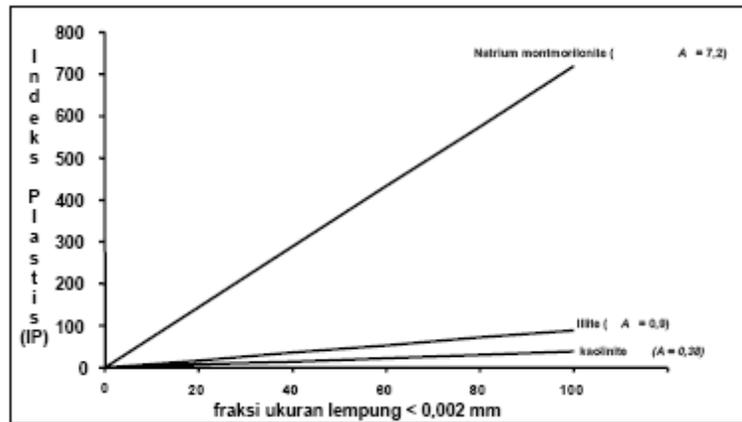
Mendefinisikan aktivitas tanah lempung sebagai perbandingan antara Indeks Plastisitas (PI) dengan presentase butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm atau dapat pula dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$A = \frac{PI}{\% \text{ berat fraksi berukuran lempung}}$$

Aktivitas digunakan sebagai indeks untuk mengidentifikasi kemampuan mengembang dari suatu tanah lempung. Ketebalan air mengelilingi butiran tanah lempung tergantung dari macam mineralnya. Jadi dapat disimpulkan plastisitas tanah lempung tergantung dari :

1. Sifat mineral lempung yang ada pada butiran
2. Jumlah mineral

Bila ukuran butiran semakin kecil, maka luas permukaan butiran akan semakin besar. Pada konsep *Atterberg*, jumlah air yang tertarik oleh permukaan partikel tanah akan bergantung pada jumlah partikel lempung yang ada di dalam tanah.



Gambar 1. Variasi indeks plastisitas dengan persen fraksi lempung (Hary Christady, 2006).

Gambar di atas mengklasifikasikan mineral lempung berdasarkan nilai aktivitasnya, yaitu :

1. *Montmorillonite* : Tanah lempung dengan nilai aktivitas (A) $\geq 7,2$
2. *Illite*: Tanah lempung dengan nilai aktivitas (A) $\geq 0,9$ dan $< 7,2$
3. *Kaolinite*: Tanah lempung dengan nilai aktivitas (A) $\geq 0,38$ dan $< 0,9$
4. *Polygorskite*: Tanah lempung dengan nilai aktivitas (A) $< 0,38$

c. Flokulasi dan Disversi

Apabila mineral lempung terkontaminasi dengan substansi yang tidak mempunyai bentuk tertentu atau tidak berkrystal (*amorphous*) maka daya negatif netto, ion-ion H^+ di dalam air, gaya *Van der Walls*, 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 dan membentuk sendimen yang sangat lepas. Flokulasi larutan dapat dinetralisir dengan menambahkan bahan-bahan yang mengandung asam

(ion H⁺), sedangkan penambahan bahan-bahan alkali akan mempercepat flokulasi. Lempung yang baru saja berflokulasi dengan mudah tersebar kembali dalam larutan semula apabila digoncangkan, tetapi apabila telah lama terpisah penyebarannya menjadi lebih sukar karena adanya gejala, dimana kekuatan didapatkan dari lamanya waktu.

d. 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 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 yang jika dicampur lempung tidak akan terjadi apapun.

e. Sifat Kembang Susut (*Swelling*)

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.

Secara umum sifat kembang susut tanah lempung tergantung pada sifat plastisitasnya, semakin plastis mineral lempung semakin potensial untuk menyusut dan mengembang.

Tanah Lempung mempunyai beberapa jenis, antara lain :

1. 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). :

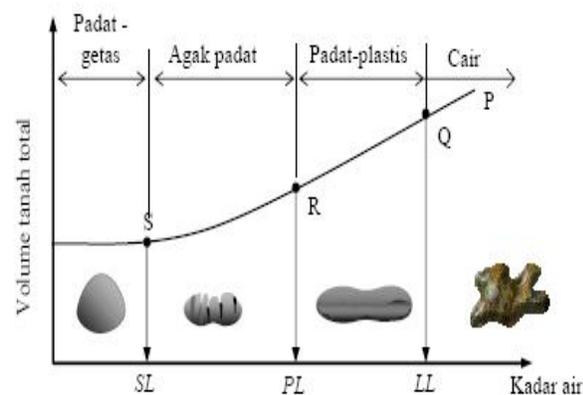
- a. Ukuran butir halus, antara 0,002 – 0,05 mm.
- b. Bersifat kohesif.
- c. Kenaikan air kapiler yang cukup tinggi, antara 0,76 – 7,6 m.
- d. Permeabilitas rendah.
- e. Potensi kembang susut rendah sampai sedang.
- f. Proses penurunan lambat.

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.

2. 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 dipengaruhi oleh besarnya kandungan air yang berada di dalamnya dan juga disebabkan adanya partikel mineral lempung dalam tanah.

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



Gambar 2. 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 = Batas Cair (*Liquid Limit*)

PL = 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. 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) \leq 50 %.

3. 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):

- a. Ukuran butiran antara 2 mm – 0,075 mm.
- b. Bersifat non kohesif.
- c. Kenaikan air kapiler yang rendah, antara 0,12 – 1,2 m.
- d. Memiliki nilai koefisien permeabilitas antara 1,0 – 0,001 cm/det.
- e. 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).:

- a. Stabil atau cocok untuk inti dan selimut kedap air.
- b. Memiliki koefisien permeabilitas.
- c. Efektif menggunakan penggilas kaki domba dan penggilas dengan ban bertekanan untuk pemadatan di lapangan.
- d. Berat volume kering 1,52-1,92 t/m³.

- e. Daya dukung tanah baik sampai buruk.

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

- a. Cukup baik sampai baik sebagai pondasi jika tidak ada pembekuan.
- b. Tidak cocok sebagai lapisan tanah dasar untuk perkerasan jalan.
- c. Sedang sampai tinggi kemungkinan terjadi pembekuan.
- d. Memiliki tingkat kompresibilitas dan pengembangan yang sedang.
- e. Sifat drainase kedap air.
- f. Alat pemadatan lapangan yang cocok digunakan penggilas kaki domba dan penggilas dengan ban bertekanan.
- g. Berat volume kering antara $1,6 - 2 \text{ t/m}^3$.
- h. Memiliki nilai CBR lapangan antara 5-15 %.
- i. Koefisien reaksi permukaan bawah $2,8 - 5,5 \text{ kg/cm}^3$.

C. 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 koefisien 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 disebabkan 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).

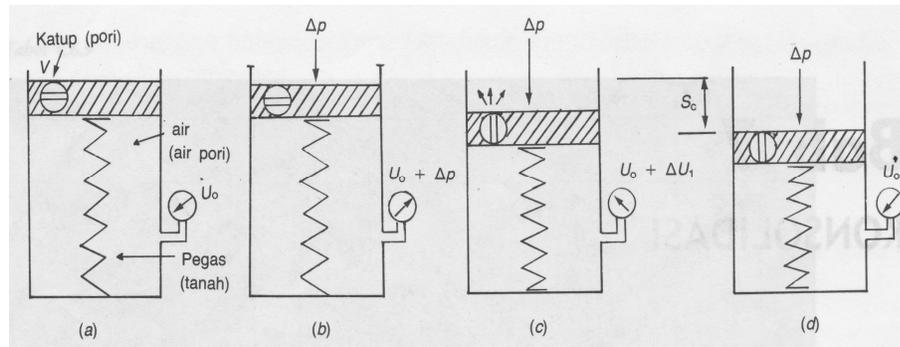
D. Konsolidasi

Bila suatu lapisan tanah jenuh yang berpermeabilitas rendah dibebani, maka tekanan air pori dalam tanah tersebut akan segera bertambah. Perbedaan tekanan air pori pada lapisan tanah, berakibat air mengalir ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang lebih rendah, yang diikuti penurunan tanahnya.

Karena permeabilitas yang rendah, proses ini membutuhkan waktu. Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh yang berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga tanahnya. Proses konsolidasi dapat diamati dengan pemasangan piezometer, untuk mencatat perubahan tekanan air pori dengan waktunya. Besarnya penurunan dapat diukur dengan berpedoman pada titik referensi ketinggian pada tempat tertentu.

E. 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 3.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 3. Analogi piston dan pegas

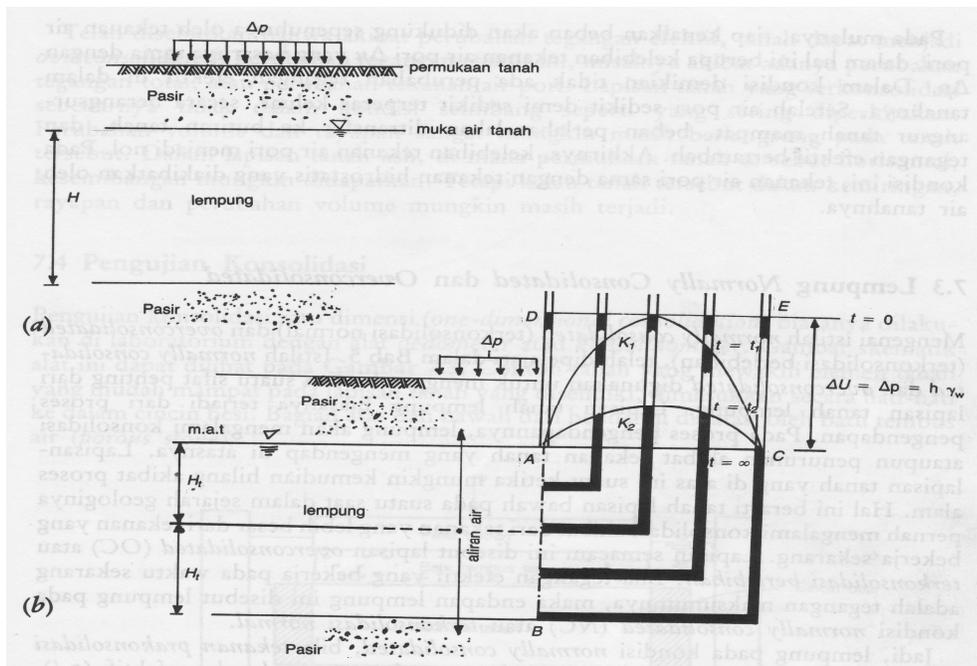
Bila tegangan sebesar Δp dikerjakan diatas piston dengan posisi katup V tertutup (Gambar 3.b), maka akibat tekanan ini piston tetap tidak akan bergerak. Hal ini disebabkan karena air tidak mudah mampat. Pada kondisi ini, tekanan pada piston tidak dipindah ke pegas, tapi sepenuhnya didukung oleh air. 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 kemudian 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 3.1). 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 3.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 4.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 4. 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 4.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 tekana air pori menjadi nol. Pada kondisi ini, tekanan air pori sama dengan tekanan hidrostatik yang diakibatkan oleh air tanahnya.

F. 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 kemudia 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 hidrostatisnya.

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.

G. Pengaruh Gangguan Benda Uji pada Grafik $e\text{-log } p$

Kondisi tanah yang mengalami pebebanan seperti yang ditunjukkan dalam grafik $e\text{-log } p$ 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*

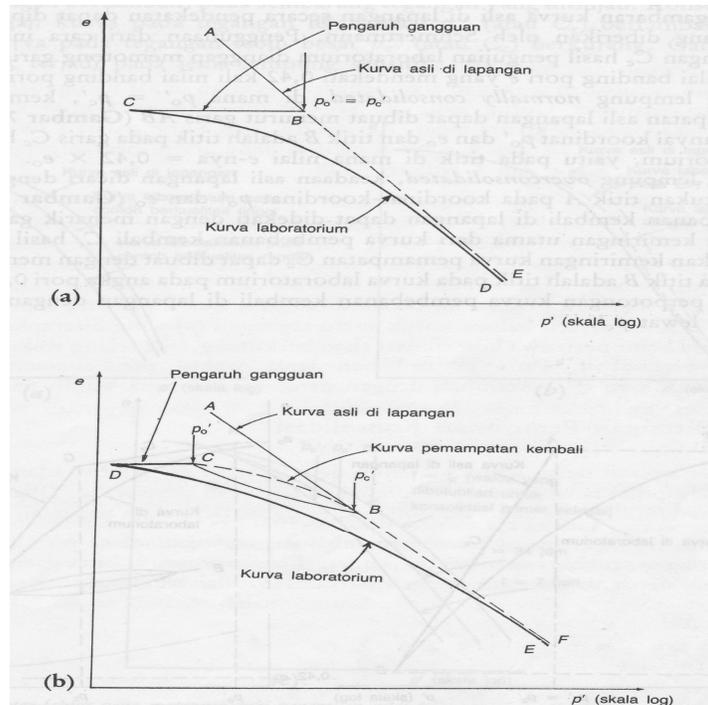
sangat berlebihan (heavily overconsolidated). Ketika contoh tanah diambil dari dalam tanah dengan pengeboran tekanan keliling luar (*external confining pressure*) hilang. Kecendrungan tanah jenuh setelah terambil dari dalam tanah untuk mengembang karena hilangnya tekanan keliling, ditahan oleh berkembangnya 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 $\sigma_z' = \sigma_z' - u$.

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 Gambar 5.

Sejarah pembebanan dari suatu contoh tanah lempung *normally consolidated* disajikan dalam Gambar 5.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, walaupun 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 5.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 ke kiri.



Gambar 5. Pengaruh gangguan contoh pada kurva pemampatan

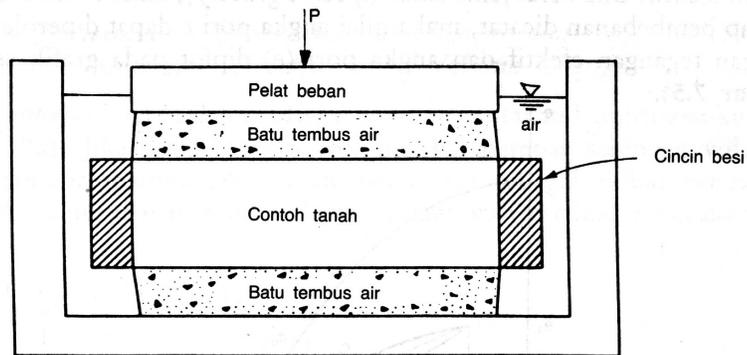
(a) Lempung Normally Consolidated

(b) Lempung Overconsolidated

H. Landasan Teori

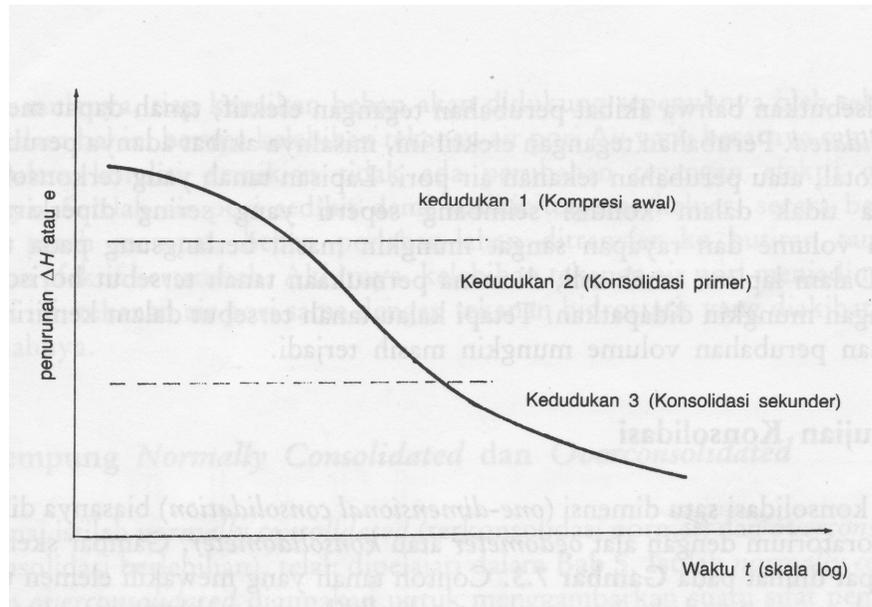
1. Pengujian Konsolidasi

Pengujian konsolidasi satu dimensi (*one-dimensional consolidation*) biasanya dilakukan dilaboratorium dengan alat *oedometer* atau *konsolidometer*. Gambar skematik alat ini dapat dilihat pada Gambar 6. Contoh tanah yang mewakili elemen tanah yang mudah mampat pada lapisan tanah yang diselediki, dimasukkan secara hati-hati kedalam cincin besi. Bagian atas dan bawah dari benda uji dibatasi oleh batu tembus air (*porous stone*).



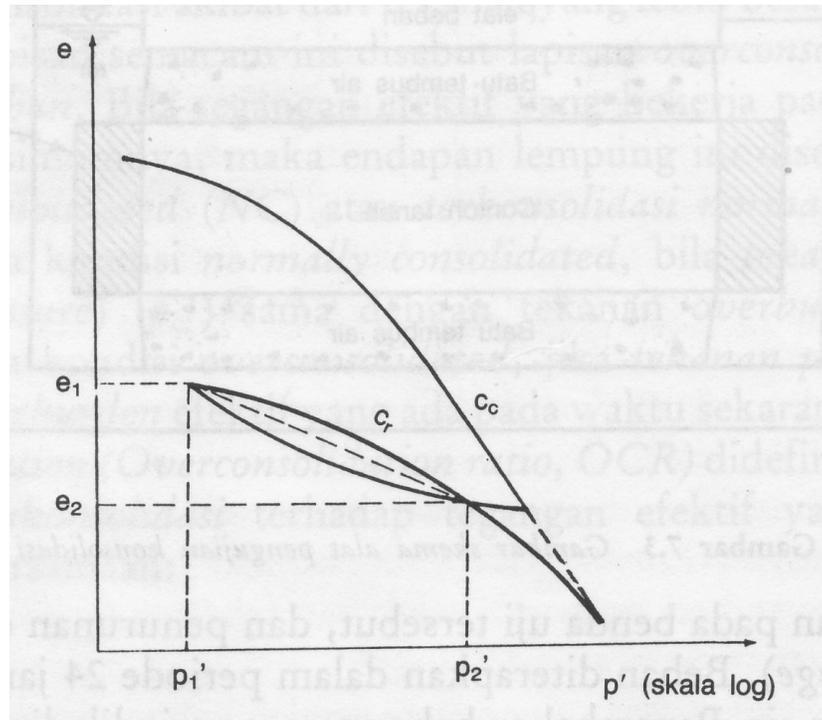
Gambar 6. Gambar skema alat pengujian konsolidasi

Beban P diterapkan pada benda uji tersebut, dan penurunan diukur dengan arloji pembacaan (*dial gauge*). Beban diterapkan dalam periode 24 jam, dengan benda uji tetap terendam dalam air. Penambahan beban secara periodik diterapkan pada contoh tanahnya. Penelitian oleh Leonard (1962) menunjukkan bahwa hasil terbaik diperoleh jika penambahan beban adalah dua kali beban sebelumnya, dengan urutan besar beban 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 8; 16 kg/cm^2 . Untuk tiap penambahan beban, deformasi dan waktunya dicatat, kemudian diplot pada grafik semi logaritmis, Gambar 7 memperlihatkan sifat khusus dari grafik hubungan antara penurunan ΔH dan logaritma waktu ($\log t$). Kurva bagian atas (kedudukan 1). Merupakan bagian dari kompresi awal disebabkan oleh pembebanan awal dari benda uji. Bagian garis lurus (kedudukan 2), menunjukkan proses konsolidasi primer. Bagian garis lurus terendah (kedudukan 3), menunjukkan proses konsolidasi sekunder.



Gambar 7. Sifat khusus grafik hubungan ΔH terhadap $\log t$

Untuk tiap penambahan beban selama pengujiannya, tegangan yang terjadi adalah tegangan efektif. Bila berat jenis tanah (*specific gravity*), dimensi awal dan penurunan pada tiap pembebanan dicatat, maka nilai angka pori e dapat diperoleh. Selanjutnya hubungan tegangan efektif dan angka pori (e) diplot pada grafik semi logaritmis (Gambar 8).



Gambar 8. Sifat khusus grafik hubungan e-log p'

2. LIR (*Load Increment Ratio*)

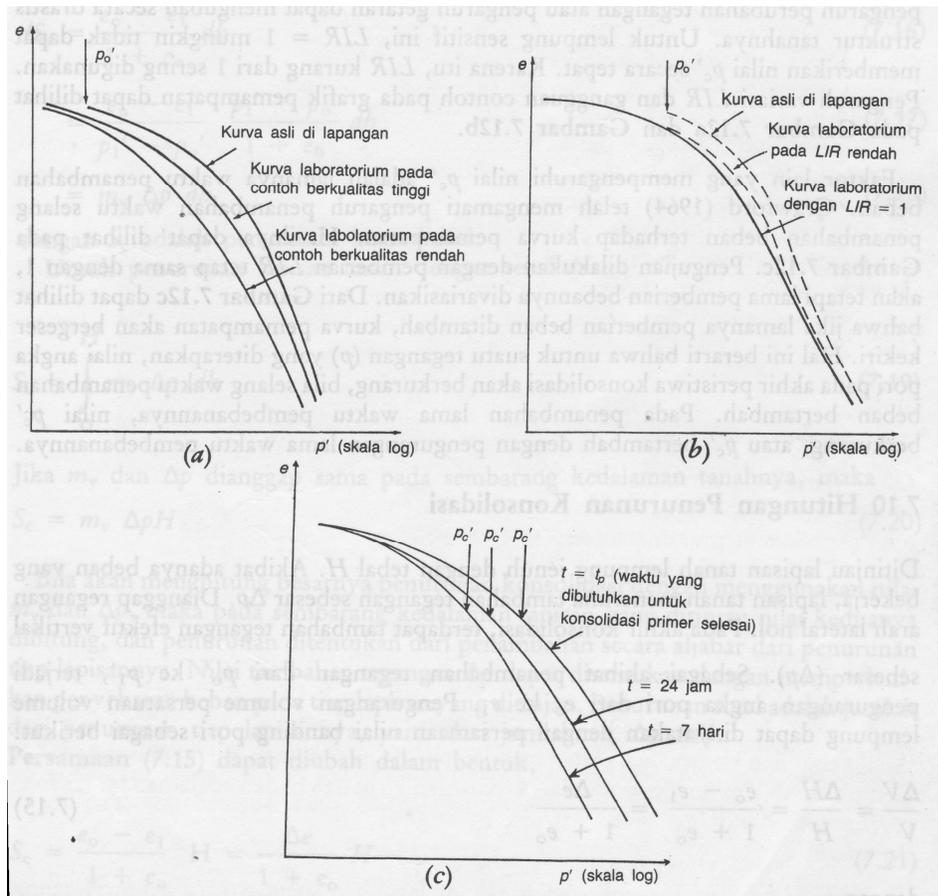
LIR adalah istilah yang digunakan dalam uji konsolidasi, LIR yaitu rasio penambahan beban yang diterapkan pada saat pengujian. LIR didefinisikan sebagai tambahan tegangan dibagi dengan tegangan awal sebelum beban diterapkan, atau

$$\text{LIR} = \frac{\Delta p}{pa'}$$

Δp = Tambahan tegangan pada saat konsolidasi

pa' = Tegangan sebelum konsolidasi

Bila LIR = 1, maka tambahan beban yang diterapkan adalah 2 kali beban sebelumnya.

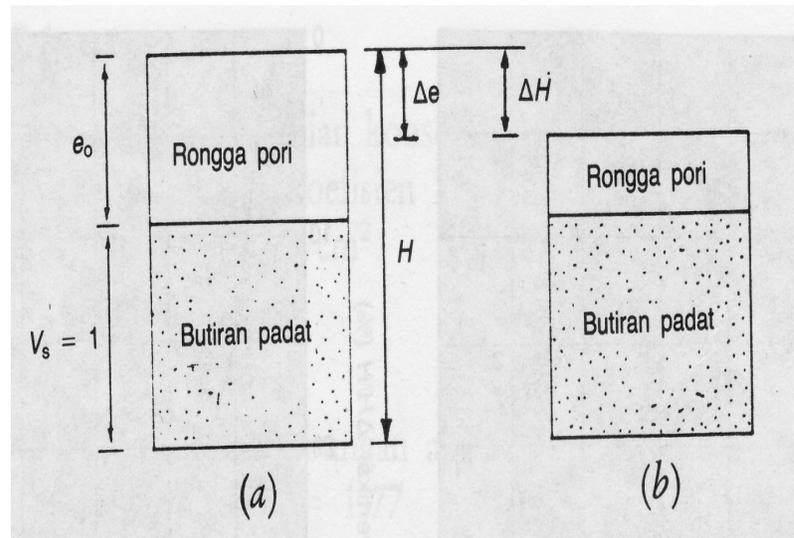


Gambar 9. Hubungan Kurva Load Increment Ratio

3. Interpretasi Hasil Pengujian Konsolidasi

Pada konsolidasi satu dimensi, perubahan tinggi (ΔH) persatuan dari awal (H) adalah sama dengan perubahan volume (ΔV) per satuan volume awal,

$$\text{atau } \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$



Gambar 10. Fase Konsolidasi

(a) Sebelum konsolidasi

(b) Sesudah konsolidasi

Bila volume padat $V_a = 1$ dan volume pori awal adalah e_0 , maka kedudukan akhir dari proses konsolidasi dapat dilihat dalam Gambar 9. volume padat besarnya tetap, angka pori berkurang karena adanya Δe . Dari Gambar 9. dapat diperoleh persamaan.

$$\Delta H = H \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2)$$

4. 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 mampat sehingga volumenya menjadi V_2 , dan mampatnya tanah dianggap hanya sebagai akibat

pengurangan rongga pori, maka perubahan volume hanya dalam arah vertikal dapat dinyatakan oleh :

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

Dengan :

e_1 = angka pori pada tegangan P_1'

e_2 = angka pori pada tegangan P_2'

V_1 = Volume pada tegangan P_1'

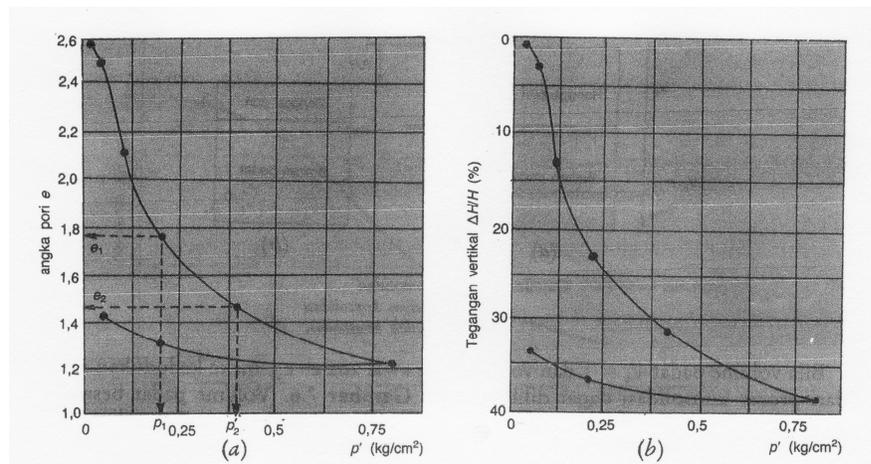
V_2 = Volume pada tegangan P_2'

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

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \tag{3}$$

$$= \frac{e_1 - e_2}{p_2' - p_1'}$$

Dimana kurva $e - p'$ (a_v) berturut – turut adalah angka pori pada tegangan P_1' dan P_2' .



Gambar 11. Hasil pengujian konsolidasi

(a) Plot Angka pori vs. Tegangan efektif $e - p'$

(b) Plot regangan vs tegangan efektif $\Delta H/H - P'$

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' , maka angka pori akan berkurang dari e_1 ke e_2 (Gambar 10.b) dengan perubahan ΔH .

$$\text{Perubahan volume} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (\text{karena area contoh tetap})$$

$$= \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \quad (4a)$$

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

$$\text{Perubahan volume} = \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1}$$

Karena m_v adalah perubahan volume/satuan penambahan tegangan, maka

$$\begin{aligned} M_V &= \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \frac{1}{\Delta_p} \\ &= \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \end{aligned} \quad (4b)$$

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

5. 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 9. C_c dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2' - \log p_1'} = \frac{\Delta e}{\log p_2' / p_1'} \quad (5)$$

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

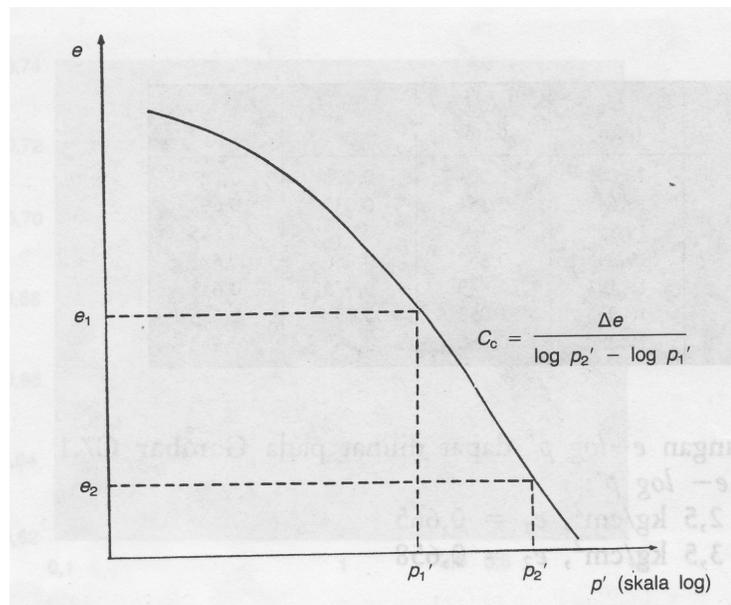
$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (6)$$

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 digunakan untuk sensitivitas lebih besar dari 4).

Terzaghi dan Peck juga memberikan hubungan yang sama untuk tanah lempung,

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (7)$$



Gambar 12. Indeks pamampatan C_c

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

$$C_c = 0,01 W_N \text{ (untuk lempung Chicago)} \quad (8)$$

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

$$C_c = 0,208 e_o + 0,0083 \text{ (untuk lempung Chicago)} \quad (10)$$

$$C_c = 0,0115 W_N \text{ (untuk tanah organik, gambut)} \quad (11)$$

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

6. 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.

7. 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 $R = R_o$ 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

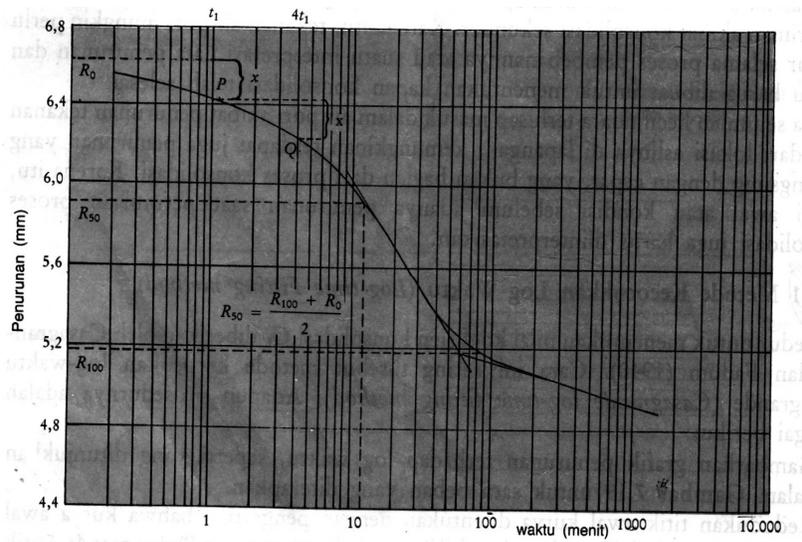
$$R_{50} = (R_o + R_{100})/2$$

Dari sini diperoleh waktu t_{50} . Nilai T_v sehubungan dengan $U = 50\%$ adalah 0,197. Selanjutnya koefisien konsolidasi C_v , diberikan oleh persamaan:

$$C_v = \frac{0,197H_t^2}{t_{50}} \quad (11)$$

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.

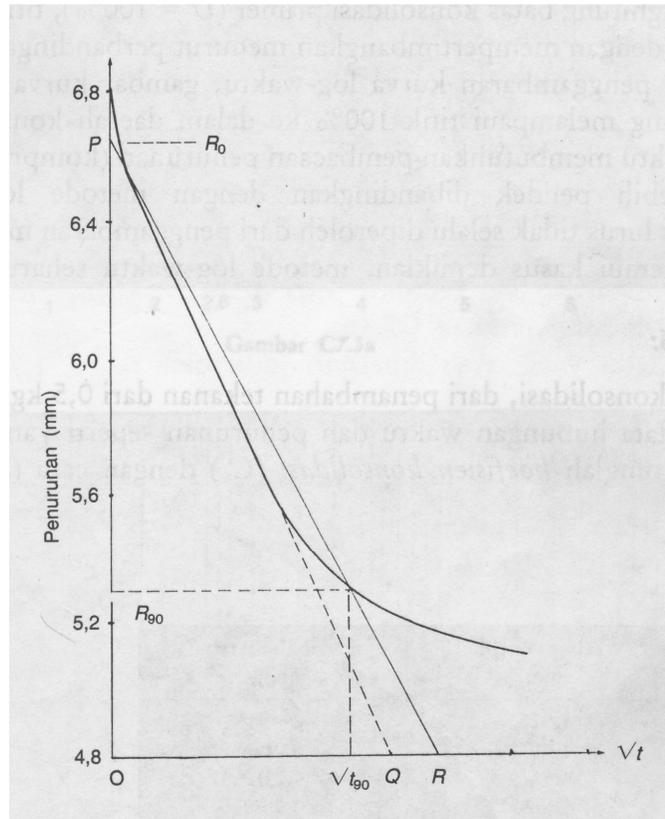
Terdapat beberapa hal di mana cara log-waktu Casagrande tidak dapat diterapkan. Jika konsolidasi sekunder begitu besar pada waktu fase konsolidasi primer selesai, mungkin tidak dapat terlihat dengan jelas dari patahnya grafik log waktu. Tipe kurvanya akan sangat tergantung pada nilai banding penambahan 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.



Gambar 13. Metode kecocokan log-waktu (*Casagrande, 1940*)

8. Metode Akar Waktu (*Square Root of Time Method*) (*Taylor, 1948*)

Penggunaan dari cara ini adalah dengan menggambarkan hasil pengujian konsolidasi pada grafik hubungan akar dari waktu vs. penurunannya (Gambar 7.20). Kurva teoritis yang terbentuk, biasanya linier sampai dengan kira-kira 60% konsolidasi. Karakteristik cara akar waktu ini, yaitu dengan menentukan $U = 90\%$ konsolidasi, di mana $U = 90\%$, absis OR akan sama dengan 1,15 kali absis OQ . Prosedur untuk memperoleh derajat konsolidasi $U = 90\%$, adalah sebagai berikut :



Gambar 14. Metode Akar Waktu (*Taylor, 1948*)

1. Gambarkan grafik hubungan penurunan vs. akar waktu dari data hasil pengujian konsolidasi pada beban tertentu yang diterapkan.
2. Titik $U = Q$ diperoleh dengan memperpanjang garis dari bagian awal kurva yang lurus sehingga memotong ordinatnya di titik P dan memotong absis di titik Q. Anggapan kurva awal berupa garis lurus adalah konsisten dengan anggapan bahwa kurva awal berbentuk parabol.
3. garis lurus PR digambar dengan absis OR sama dengan 1,15 kali absis OQ . Perpotongan dari PR dan kurvanya ditentukan titik R_{90} pada absis.

4. T_v untuk $U = 90\%$ adalah 0,848. Pada keadaan ini, koefisien konsolidasi C_v diberikan menurut persamaan

$$C_v = \frac{0,848H_t^2}{t_{90}}$$

Jika akan menghitung batas konsolidasi primer $U = 100\%$, titik R_{100} pada kurva dapat diperoleh dengan mempertimbangkan menurut perbandingan kedudukannya. Seperti dalam penggambaran kurva log-waktu, gambar kurva akar waktu yang terjadi memanjang melampaui titik 100% ke dalam daerah konsolidasi sekunder. Metode akar waktu membutuhkan pembacaan penurunan (kompresi) dalam periode waktu yang lebih pendek dibandingkan dengan metode log-waktu. Tetapi kedudukan garis lurus tidak selalu diperoleh dari penggambaran metode akar waktu. Dalam hal menemui kasus demikian, metode log-waktu seharusnya digunakan.

9. Konsolidasi Sekunder

Konsolidasi sekunder terjadi setelah konsolidasi primer berhenti. Lintasan kurva konsolidasi sekunder didefinisikan sebagai kemiringan kurva (C_α) pada bagian akhir dari kurva $\Delta H - \log t$ atau dari kurva $e - \log t$. Untuk memperoleh kemiringan kurva konsolidasi sekunder yang baik, diperlukan memperpanjang proses pengamatan pengujian di laboratorium. Dengan cara ini akan mempermudah hitungan kemiringan kurva kompresi sekunder C_α . Dengan melihat gambar 7, persamaan untuk memperoleh C_α diperoleh dengan :

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 / t_1}$$

Penurunan akibat konsolidasi sekunder, dihitung dengan persamaan

$$S_s = H \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \log \frac{t_2}{t_1}$$

dimana

- e_p = angka pori saat konsolidasi primer selesai
- H = tebal benda uji awal atau tebal lapisan tanah yang ditinjau
- ΔH = perubahan tebal benda uji di laboratorium dari t_1 ke t_2
- t_2 = $t_1 + \Delta t$
- t_1 = saat waktu setelah konsolidasi primer selesai.

Dala tanah organik tinggi dan beberapa jenis lempung lunak, jumlah konsolidasi sekunder mungkin akan sebanding dengan konsolidasi primernya. Akan tetapi, kebanyakan jenis tanah, pengaruh konsolidasi sekunder biasanya sangat kecil sehingga sering diabaikan.

Penurunan akibat konsolidasi harus dihitung secara terpisah. Nilai yang diperoleh ditambahkan dengan nilai penurunan konsolidasi primer dan penurunan segeranya.