II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah

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 parikel-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).

B. 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 mengelompokan 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 Clasification System* (*USCS*) dan Sistem AASHTO (*American Association Of State Highway and Transporting Official*). Tetapi pada penelitian ini penulis memakai system klasifikasi tanah *unified* (USCS).

1. Sistem Klasifikasi *Unified* (USCS)

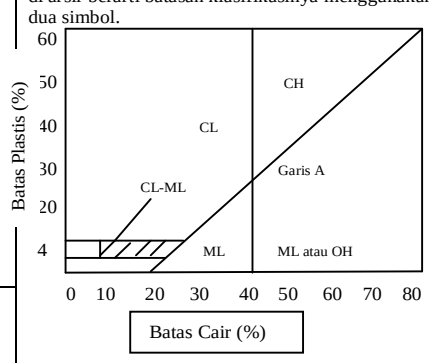
Sistem ini pada awalnya diperkenalkan oleh Casagrande (1942) untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang (Das, 1995).

Oleh Casagrade sistem ini pada garis besarnya membedakan tanah atas tiga kelompok besar (Sukirman, 1992), yaitu :

a. 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.
b. Tanah berbutir halus (*fire-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≥ 50% butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil 50%≥ 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	Klasifikasi berdasarkan prosentase butiran halus ; Kurang dari 5% lolos saringan no.200: GM, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan no.200 : GM, GC, SM, SC. 5% - 12% lolos saringan No.200 : Batasan klasifikasi yang mempunyai simbol dobel	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D10 \times D60}$ Antara 1 dan 3	
			GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		Kerikil dengan Butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau		Batas-batas *Atterberg* di bawah garis A atau PI < 4	Bila batas *Atterberg* berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		Batas-batas *Atterberg* di bawah garis A atau PI > 7	
	Pasir≥ 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		$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D10 \times D60}$ Antara 1 dan 3	
			SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		Batas-batas *Atterberg* di bawah garis A atau PI < 4	Bila batas *Atterberg* berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		Batas-batas *Atterberg* di bawah garis A atau PI > 7	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200		Lanau dan lempung batas cair ≤ 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 *Atterberg* yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  Garis A : PI = 0.73 (LL-20)	
			CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (*lean clays*)			
			OL	Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
		Lanau dan lempung batas cair ≥ 50%	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis			
			CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (*fat clays*)			
			OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi			
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi			PT	*Peat* (gambut), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi		Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

Tabel 2. Sistem klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System* (Bowles, 1991)

Jenis Tanah	*Prefiks*	Sub Kelompok	*Sufiks*
		Gradasi Baik	W
Kerikil	G	Gradasi Buruk	P
Pasir	S	Berlanau	M
		Berlempung	C
Lanau	M		
Lempung	C	wL < 50%	L
Organik	O	wL > 50%	H
Gambut	Pt		

C. Tanah Organik

Prilaku tanah organik sangat tergatung pada kadar organik (*organic content*), kadar abu (*ash content*), kadar serat (*fibrous content*). Makin tinggi kandungan organiknya makin rendah daya dukungnya (bearing capacity) dan kekuatan gesernya (*shear strength*), serta makin besar pemampatannya (*compressibility*).

Tanah yang kandungan organiknya tinggi disebut tanah gambut (*peat soil*). Menurut ASTM, OSRC (*Organic Sediment Research Centre*) dari University of Shouth Carolina dan LSG (*Lousiana Geological Survey*), suatu tanah organik dapat diklasifikasikan sebagai tanah peat apabila kandungan

organiknya 75 % atau lebih. Tetapi USSR system mengklasifikasikan suatu tanah organik sebagai tanah gambut apabila kandungan organiknya 50 % atau lebih.

Gambut umumnya mengacu pada bahan alami dengan daya kemampatan tinggi namun mempunyai kekuatan rendah. Tanah gambut terbentuk di daerah berair dangkal, dalam danau, atau empang dengan sistem drainase yang buruk (Sumber : Pedoman Konstruksi Jalan Di Atas Tanah Gambut Dan Organik, 1996).

Menurut proses terjadinya, tanah gambut dapat dibedakan menjadi :

1. Gambut Rumput

   Kondisi dimana tanah mengalami pengendapan reruntuhan tumbuhan atau jasad renik yang dilestarikan di bawah permukaan air, sehingga material tersebut mulai membusuk dan menyatu dengan tanah. Pada umumnya dalam proses ini tanah gambut memiliki banyak kandungan mineral, berhumus namun memiliki kandungan air yang lebih sedikit bila dibandingkan dengan gambut rancah apabila ditinjau dari derajat prosese penguraiannya.

2. Gambut Transisi

   Kondisi pada saat gambut rumput tumbuh melebihi paras air tanah. Di sini berlaku keadaan *mesotopik*.

3. Gambut Rancah

Kondisi dimana tanah kehilangan kontak dengan air tanah sehingga terjadi tahapan *ombotropik*, yaitu tahapan dimana pertumbuhan lumut *spaghnum* pada air hujan akan mendominasi.

Gambut rancah juga dapat terbentuk pada permukaan tanah yang diakibatkan oleh ketersediaan *oligotropik* atau bahan makanan bagi organisme pengurai, sehingga terjadi proses penghumusan yang berlebihan.

Menurut ASTM D2607-69, istilah tanah gambut hanya berhubungan dengan bahan organik berasal dari proses geologi selain batubara. Terbentuk dari tumbuh-tumbuhan yang telah mati, berada didalam air dan hampir tidak ada udara di dalam, terjadi dirawa-rawa dan mempunyai kadar abu tidak lebih 25% berat kering. Dengan demikian rawa merupakan tempat pembentukan tanah gambut, dipengaruhi oleh iklim, hujan, peristiwa pasang surut, jenis vegetasi rawa, topografi serta beberapa aspek geologi serta hidrologi daerah setempat.

Ditinjau dari segi teknis, para peneliti mengaplikasikan tanah gambut berbeda-beda, disebabkan masih sedikit yang melakukan penelitian. Ma. Farlane (1969). ASTM D2607-69 dan ASTM D4427-84 (1989), mengklasifikasikan tanah gambut berdasarkan kandungan bahan organik, kadar serta berat volume rata-rata.

Noor Endah (1991), menyelidiki jenis tanah gambut di daerah Palangkaraya dan Banjarmasin adalah jenis tanah gambut berserat (fibrous peat). Demikian pula hasil penelitian Puslitbang PU (1991), di Pekan Heram, dan di Pulau Padang Sumatera, jenis tanah tersebut adalah mengandung serat dan kayu-kayuan (fibrous peat dan woody peat).

Tanah gambut mempunyai kandungan serat lebih besar dari 20% dikelompokkan kedalam fibrous peat. Tanah gambut dengan kandungan serat kurang dari 20% dikelompokkan kedalam amorphous granular peat, jenis ini terdiri dari butiran tanah berukuran colloid (2µ) dan sebagian besar air pori terserap disekeliling permukaan butiran tanah gambut tersebut. Karena kondisi tersebut maka amorphus granular peat ini mempunyai sifat hampir sama dengan lempung.

MacFarlane mengatakan bahwa fibrous peat mempunyai dua jenis pori yaitu makropori (pori-pori antera serat) dan mikropori (pori dalam serat). Hal ini menyebabkan perilaku tanah fibrous peat sangat berbeda dengan amorphous granular peat maupun tanah lempung. Ini juga disebabkan fibrous peat mempunyai phase solid yang tidak selalu solid, phase tersebut terdiri dari serat-serat berisi air atau gas.

a. Hubungan Antara Morfologi dan Sifat-Sifat Gambut

Hoobs memperlihatkan bahwa sifat-sifat gambut merupakan hasil dari proses morfologis, yang memberikan beberapa hubungan sebagai berikut :

1. Akibat pengaruh seratnya, stabilitas sepertinya bukan masalah pada gambut rancah berserat yang permeabel, sementara bila dilihat pada gambut rumput yang kurang permeabel, plastik, dan sangat berhumus, maka kestabilan dan laju pembebanan merupakan pertimbangan yang paling penting.

2. Gambut rumput yang terbentuk oleh penetrasial umumnya didukung oleh lumpur organik yang dapat menyebabkan masalah teknik yang besar.

3. Napal dan lumpur pendukungnya merintangi penyidikan, menyulitkan pemantauan, yang mengakibatkan bahaya pada pekerjaan teknik.

4. Stratifikasi pada gambut rumput sepertinya relatif mendatar. Digabungkan dengan penghumusan yang tinggi dan permeabilitas yang kurang, drainase tegak mungkin memiliki penggunaan yang bermanfaat dalam mempercepat lendutan-pampat primer. Sedangkan gambut rancah sering memiliki drainase tegak alami dalam bentuk *betting cotton-grass* berlajur sehingga drainase tegak mungkin saja terbukti tidak efisen.

5. Permukaan batas antara gambut lumut sangat lapuk dan terlestarikan baik, yang disebabkan oleh pergeseran iklim

menyebabkan stratigrafi berlapis yang sangat berbeda jika dibandingkan dengan karakteristik tegak yang diakibatkan oleh pertumbuhan mendatar. Keadaan hidrolik *anistropi* akan terjadi. Satu permukaan berulang umumnya akan muncul dan akan cenderung bertindak sebagai akuiklud mendatar pada drainase tegak dan tekanan pori akan terbebas pada waktu pekerjaan teknik berlangsung (*Horison Weber-Grenz*).

6. Rancah selubung umumnya tidak memiliki suatu dasar yang berupa lempung lunak yang secara normal terkonsolidasi.

7. Gerakan penurun potensial dan yang ada pada bencah miring akibat rangkak, longsor, atau aliran rancah membutuhkan penanggulangan teknik yang khusus.

b. Identifikasi Geoteknik dan Penggolongan Tanah Organik

Terdapat dua sistem penggolongan utama yang dilakukan, yakni sistem penanggulangan AASHTO (metode AASHTO M 145 atau penandaan ASTM D-3282) dan sistem penggolongan tanah bersatu (penandaan ASTM D-2487). Dalam metode AASHTO, tidak tercantum untuk gambut dan tanah yang organik, sehingga ASTM D-2487 harus digunakan sebagai langkah pertama pada pengidentifikasian gambut.

Tabel 3. Penggolongan tanah berdasarkan kandungan organik

KANDUNGAN ORGANIK	KELOMPOK TANAH
≥ 75 %	GAMBUT
25 % - 75 %	TANAH ORGANIK
≤ 25 %	TANAH DENGAN KANDUNGAN ORGANIK RENDAH

(SUMBER : PEDOMAN KONSTRUKSI JALAN DI ATAS TANAH GAMBUT DAN ORGANIK, 1996)

ASTM D2607-69 (1989), mengklasifikasi tanah gambut berdasarkan kandungan bahan organik dan kadar serat, yaitu:

1. *Sphagnum moss peat (peat moss),* bila kandungan serat lebih besar atau. sama dengan 2/3 berat kering
2. *Hypnum mos -peat*, bila kandungan serat lebih besar atau sama dengan 1/3 berat kering
3. *Reed-sedge peat*, bila kandungan serat lebih besar atau sama. dengan 1/3 dari reed-sedge dan serat-serat lain kering
4. *Peat* humus, bila kandungan serat lebih kecil 1/3 ~berat kering
5. *Peat* lainnya, selain dari klasifikasi tanah gambut di atas

ASTM D4427-84 (1989), mengklasikasi tanah gambut berdasarkan kadar serat, yaitu:

1. *Fibric-peat*, bila kadar serat lebih besar dari 67%
2. *Hemic-peat*, bila kadar serat 33-67%
3. *Sapric-peat*, bila kadar abu. lebih kecil 33%

ASTM D4427-84 (1989), mengklasifikasi tanah gambut berdasarkan kandungan kadar abu yang ada, yaitu:

1. *Low ash-peat*, bila kadar abu 5%
2. *Medium ash-peat*, bila kadar abu 5-15%
3. *High abb-peat*, bila kadar abu lebih besar dari 15%

D. Sifat-Sifat Fisik Tanah Organik

Tidak berbeda dengan tanah lempung, parameter tanah yang penting untuk menentukan sifat fisik tanah organik di antaranya: berat volume, specific gravity, kadar air, dan angka pori. Sedang parameter tanah gambut yang tidak diperlukan untuk tanah lempung adalah: kadar abu, kadar organik, dan kadar serat. Pada tanah lempung, dimana plastisitasnya sangat diperlukan untuk mengidentifikasi sifat tanah, pada tanah gambut sama sekali tidak diperlukan, mengingat tanah gambut tidak mempunyai sifat plastis.

1. Kadar Air

   Kemampuan tanah gambut untuk menyerap dan menyimpan air sangat besar. Kadar air tanah gambut ini bisa sampai 600 % dan besar penyerapan tergantung dari derajat dekomposisi gambut yang bersangkutan. Apabila gambut tercampur dengan tanah anorganik, kadar air gambut bisa langsung menurun secara drastis.

2. Angka Pori

Besar angka pori gambut umumnya berkisar antara 5 sampai dengan 15. Pada tanah gambut berserat angka porinya bisa jauh lebih besar, sementara tanah gambut granular angka pori cukup kecil dan berkisar 2 (Hellis dan Brawner, 1961).

3. Berat Volume

Karena angka pori yang cukup besar, berat volume tanah gambut menjadi sangat kecil. Tanah gambut yang terendam air dengan kandungan organik tinggi, berat volumenya kurang lebih sama dengan berat volume air. Secara umum berat volume gambut berkisar antara 9 kN/m^3 sampai 12,5 kN/m^3

4. Specific Gravity

Pada umumnya harga specific gravity rata-rata tanah gambut antara 1,50 sampai 1,60. Tergantung dari kandungan bahan organik, semakin besar kandungan bahan organik semakin besar pula harga specific grafitynya.

5. Susut

Apabila dikeringkan tanah gambut akan menyusut dan mengeras. Penyusutan volume tanah gambut akibat pengeringan adalah sangat besar, bahkan bisa mencapai lebih dari 50% Sedangkan penyusutan beratnya lebih besar lagi, dan bisa tinggal 10% dari berat semula.

Apabila tanah gambut sudah pernah menyusut, maka ia akan sulit menyerap air lagi seperti semula. Air yang bisa terserap setelah gambut mengalami penyusutan berkisar antara 33% sampai 55% (Feustel & Byers, 1930).

6. Koefisien Rembesan

Koefisien rembesan tanah gambut dipengaruhi oleh :

- Kandungan bahan mineral
- Derajat konsolidasi
- Derajat dekomposisi

Harga koefisien rembesan tanah gambut antara 10^{-6} sampai 10^{-3} cm/detik (Colley, 1950 dan Miyakawa, 1960). Untuk tanah gambut berserat koefisien rembesan arah horisontal lebih besar dari arah vertikal.

7. Kadar Gas

Bahan organik yang terendam dalam air akan mengalami proses dekomposisi yang lamban dan dalam waktu bersamaan akan menghasilkan gas methane serta sedikit gas nitrogen dan karbon dioksida. Jika muka air turun akan terjadi proses oksidasi pada gambut dan menghasilkan gas karbon dioksida.

8. Keasaman

Karena kandungan karbon dioksida dan humic acid yang dihasilkan dari proses pembusukan, tanah gambut mempunyai sifat acidic reaction. Umumnya air gambut mempunyai derajat keasaman pH = 4-7 (Lea, 1956). Naik turunnya derajat keasaman gambut sangat tergantung dari musim dan cuaca. Tingkat keasaman ini mencapai nilai tertinggi setelah terjadi hujan lebat yang diikuti oleh musim panas yang kering. Karena keasaman ini air gambut mempunyai sifat korosif terhadap baja dan beton.

9. Kadar Abu dan Organik

Untuk menentukan kadar abu pada gambut dengan cara memasukkan gambut kering yang telah dioven dengan suhu 105 ^{0} C ke dalam oven dengan suhu 440 ^{0} C (metoda C) atau dengan suhu 750 ^{0} C (metoda D) sampai gambut menjadi abu (ASTM D2974-87). Persentase kadar abu dihitung terhadap berat kering tanah sampel.

10. Batas Konsisensi

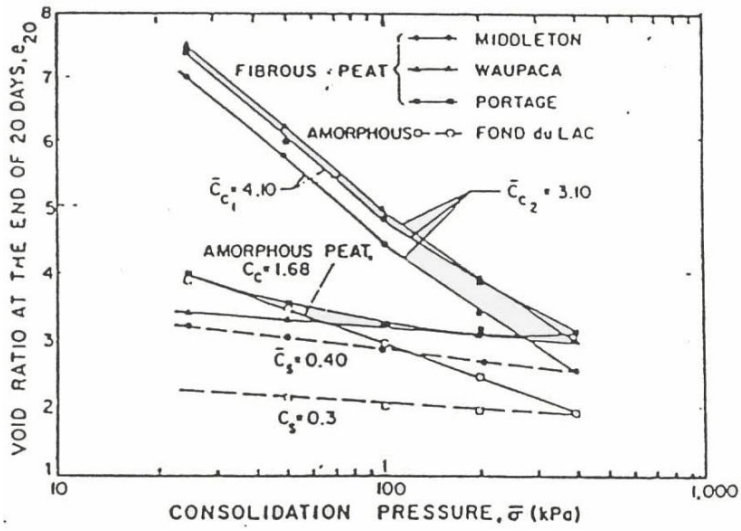
Tidak terdapat metoda. khusus untuk menentukan batas konsistensi tanah gambut, karena. tanah gambut tidak mempunyai sifat plastis. Terlebih lagi dengan adanya serat sangat sulit untuk menentukan batas plastis gambut. Selain itu plastisitas juga bukan merupakan parameter gambut yang penting, seperti pada tanah lempung.

E. Kemampumampatan Tanah Organik

Tanah organik mempunyai porositas yang tinggi, oleh karena itu pemampatan awal terjadi berlangsung sangat cepat. Selama proses pemampatan, daya rembes tanah gambut berkurang dengan cepat sehingga menyebabkan berkurangnya kecepatan pemampatan. Proses dekomposisi pada serat – serat didalam tanah gambut menyebabkan perilaku pemampatan semakin rumit. Hal ini disebabkan oleh struktur serat-serat menjadi hancur serta bentuk gas akibat proses tersebut. (Hanrahan 1954, Hallingshead & Raymong 1972, Dhowian & Edil 1980) dalam Farni I. (1996).

Apabila tanah lunak mendapat pertambahan tegangan vertikal, maka pertambahan ini akan menyebabkan adanya penurunan. Pada umumnya penurunan tanah lunak dibedakan atas penurunan segera (pengaruh elastisitas tanah) dan penurunan konsolidasi (akibat terdisipasinya air pori). Penurunan konsolidasi sendiri masih dibedakan atas konsolidasi primer dan sekunder. Penurunan segera terjadi segera (langsusng) setelah tanah lunak menerima pertambahan tegangan. Dengan adanya pertambahan tegangan ini, air pori yang ikut menderita tambahan tegangan akan mengalir keluar dari pori. Akibat keluarnya air dari pori ini tanah secara perlahan akan mampat dan turun. Tergantung dari koefisien permeabilitas tanah yang bersangkutan. Semakin kecil permeabilitas tanah, semakin sulit pula air pori mengalir, sehingga penurunan yang terjadi pun menjadi sangat perlahan (Ladd, 1987). Sedikit berbeda dibanding tanah lempung, kurva pemampatan pada gambut hasil test

laboratorium terdiri dari empat komponen pemampatan (Dhowian dan Edil,1980).



Gambar 1. Kurva e vs. log s' pada tanah gambut amorphous dan gambut berserat (Dhowian & Edil, 1980)

E. Sifat Kembang Susut (*Swelling*)

Tanah-tanah yang banyak mengandung organik 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 kadar organik, kadar abu, dan kadar serat 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 organik tergantung pada kadar organik, kadar abu, dan kadar seratnya.

G. 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 ar 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 di dalam tanah berpasir dapat mengalir keluar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi secara bersamaan (Das, 1995).

Pada tanah gambut perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (dikarenakan konsolidasi) akan terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi biasanya jauh lebih besar dan lebih lambat serta lebih lama dibandingkan dengan dengan penurunan segera (Das, 1995).

H. Konsolidasi (*Consolidation Settlement*)

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 elastic 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

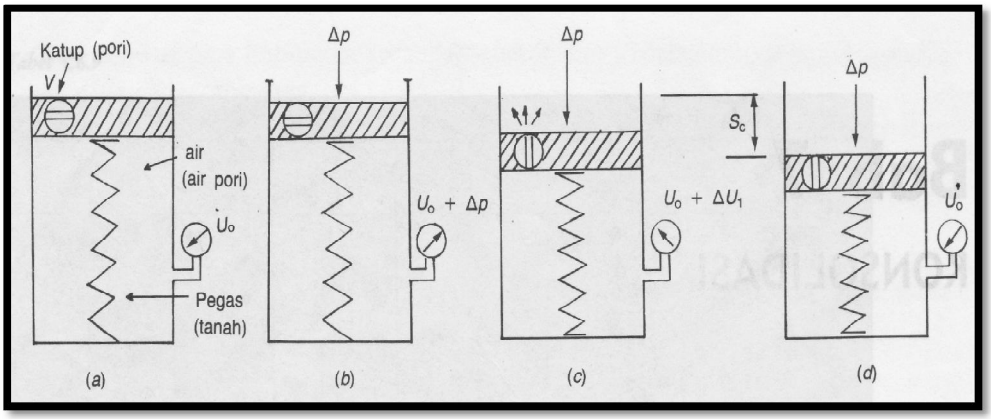
pembusukan menjadi tanah, yang telah berubah sifatnya secara kimiawi dan telah menjadi fosil, dimana tanah gambut ini memiliki sifat yang tidak menguntungkan bagi konstruksi yaitu daya dukung yang rendah serta kompresibilitas yang tinggi.

Oleh karena itu harus dilakukan usaha perbaikan tanah agar tidak terjadi penurunan konsolidasi kembali saat konstruksi bangunan mulai dibangun bahkan setelah selesai dibangun diatasnya, 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).

I. Analogi Konsolidasi Satu Dimensi

Mekanisme konsolidasi satu dimensi (*one dimensional consolidation)* dapat digambarkan dengan cara analisis seperti yang disajikan pada Gambar 2. Silinder dengan piston yang berlubang dihubungkan dengan pegas, diisi air sampai memenuhi volume silider. Pegas dianggap terbebas daari 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.a melukiskan kondisi dimana sistem dalam keseimbangan. Kondisi ini identik dengan lapisan tanh yang dalam keseimbangan dengan tekanan *overburden*. Alat pengukur tekanan

yang dihubungakan dengan silider memperlihatkan tekanan hidrostatis sebesar u_o, pada lokasi tertentu didalam tanah.



Gambar 2. Analogi piston dan pegas

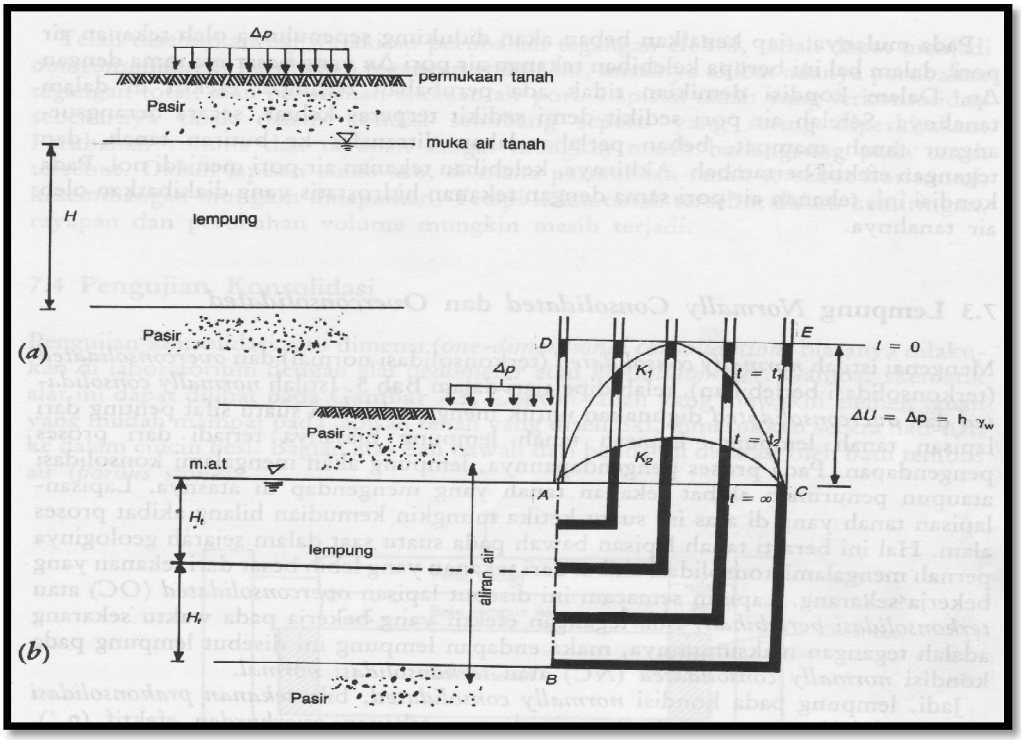
Bila tegangan sebesar Δ_p dikerjakan diatas piston dengan posisi katup V tertutup (Gambar 2.b**),** maka akibat tekanan ini piston tetap tidak akan bergerak. Hal ini disebabkan karena air tu\idak mudah mampat. Pada kondisi ini, tekanan pada piston tidak dipindah ke pegas, tapi sepenuhnya didukung oleh air. Pengukur tekanan air dalam silinder menunjukkan kenaikan tekanan $\Delta_u = \Delta_p$, atau pembacaan tekanan sebesar $u_o + \Delta_p$. Kenaikan tekanan Δ_u 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 Δ_p (Gambar 2.1). Pada setiap kenaikan tekanan yang didukung oleh pegas, kelebihan tekanan air pori (Δ_u) didalam silinder berkurang.

Akhirnya pada suatu saat, tekanan air pori nol dan seluruh tekanan didukung oleh pegasnya dan kemudian piston diam (Gambar 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 ekivalen 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 3.a, Disini diperlihatkan suatu pondasi yang dibagun diatas tanah lampung 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 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 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 Δ_p, yaitu segera setelah beban pondasi bekerja, tinggi air dalam pipa piezometer naik setinggi $h = \Delta_p/y_w$, 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 hidrostatis yang diakibatkan oleh air tanahnya.

J. Pengaruh Ganguan 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 ganguan 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.

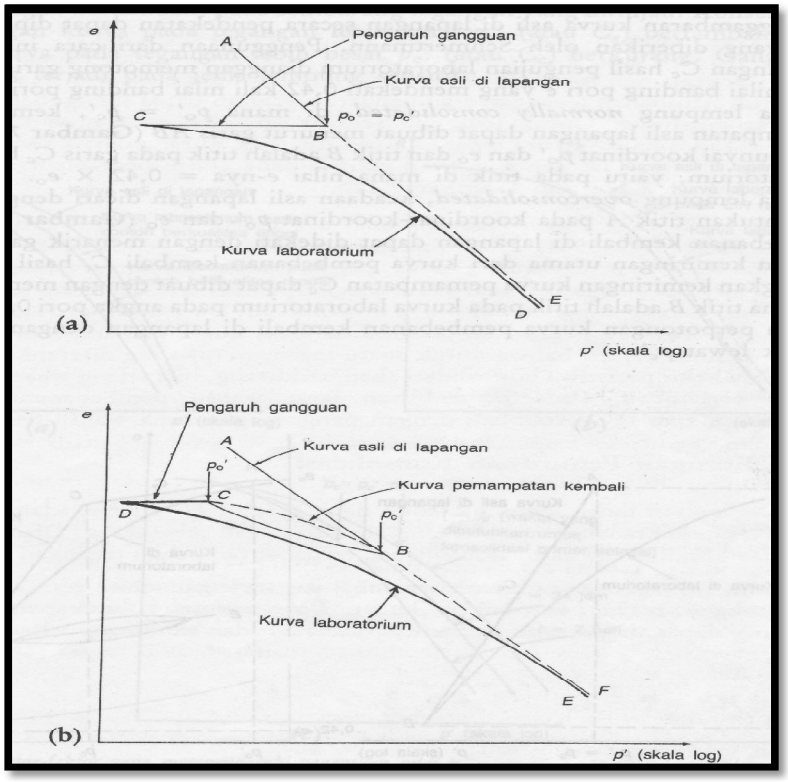
Dilapangan, elemen tanah dipengaruhi oleh tegangan efektif-vertikal σ_z' dan tegangan efektif horizontal $\sigma_z' = K_o\ \sigma_z'$ (dengan K_o adalah koefisien tekanan lateral tanah diam). Umumnya K_o tidak sama dengan 1, yaitu kurang dari 1 untuk lempung *normally consolidated* atau sedikit *normally 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 Gambar 4**.**

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, akibaht 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 akibaht ganguan, 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 prakonsilidasi* (P_c') tercapai (bagian *AB*). Sesudah itiu, 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 hinga melampaui tekanan prakonsildasi, 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 ganguan benda uji, mengakibatkan kurva laboratorium akan cenderung bergeser lebih kekiri.



Gambar 4. Pengaruh ganguan contoh pada kurva pemampatan

(a) Lempung Normally Consolidated

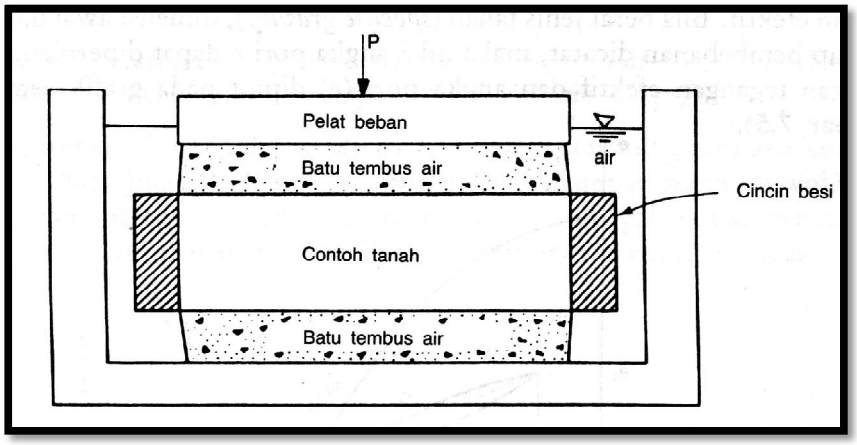
(b) Lempung Overconsolidated

K. Landasan Teori

1. Konsolidasi

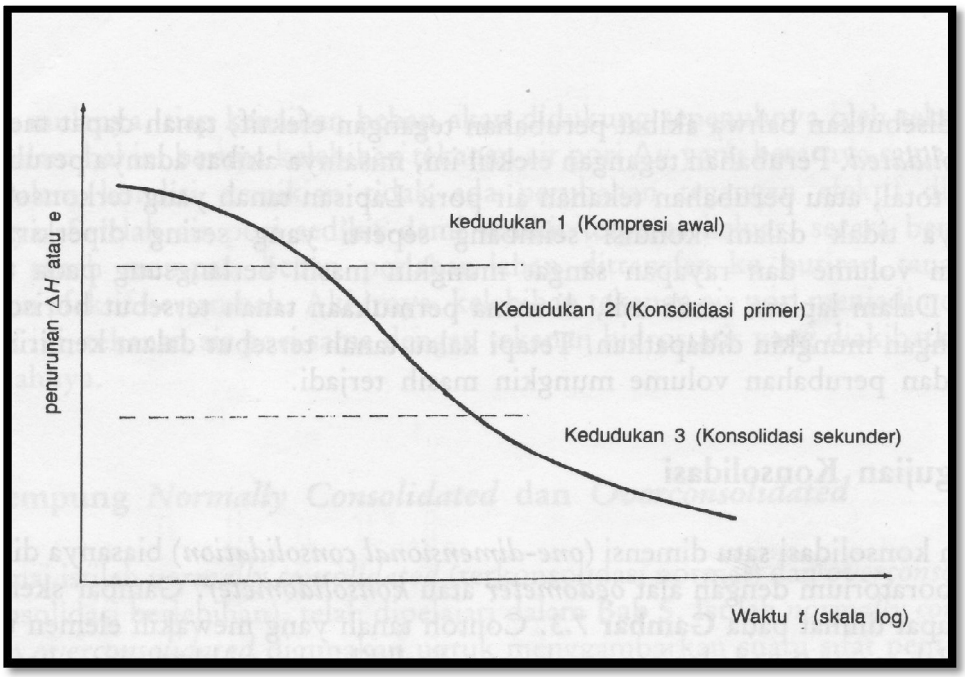
Pemampatan tanah disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori dan sebab-sebab lain. Pengujian konsolidasi satu dimensi (*one-dimensional consolidation*) biasanya dilakukan dilaboratorium dengan alat *oedometer* atau *konsolidometer*. Gambar skematik alat ini dapat dilihat pada Gambar 5**.** Contoh tanah yang mewakili elemen tanah yang mudah mampat pada lapisan tanah yang diselediki, dimasukan secara hati-hati kedalam cincin

besi. Bagian atas dan bawah dari benda uji dibatasi oleh batu tembus air (*porous stone*).



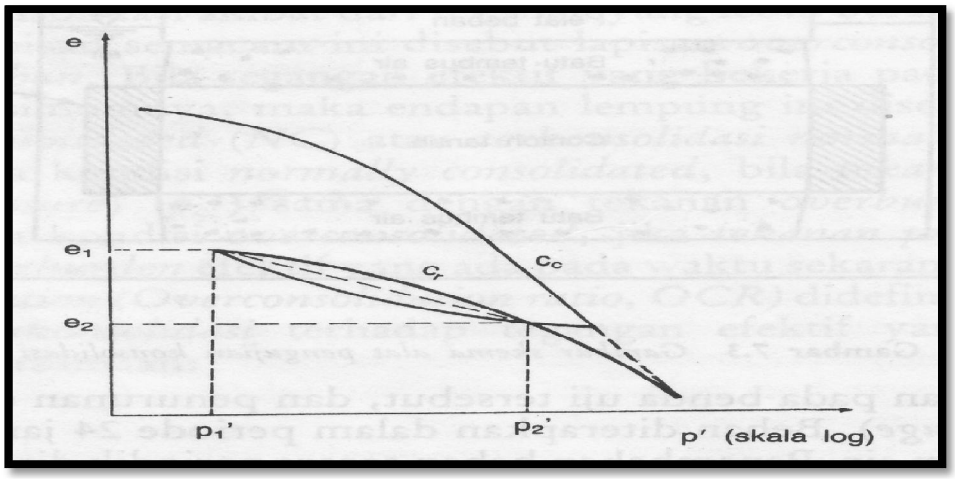
Gambar 5. Gambar skema alat pengujian konsolidasi

Beban P diterapkan pada benda uji tersebut, dan penururnan diukur dengan arloji pembacaan (*dial gauge*). Beban diterpkan 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; kg/cm^2. Untuk tiap penambahan beban, deformasi dan waktunya dicatat, kemudian diplot pada grafik semi logaritmis, Gambar 6 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 6. 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 7).

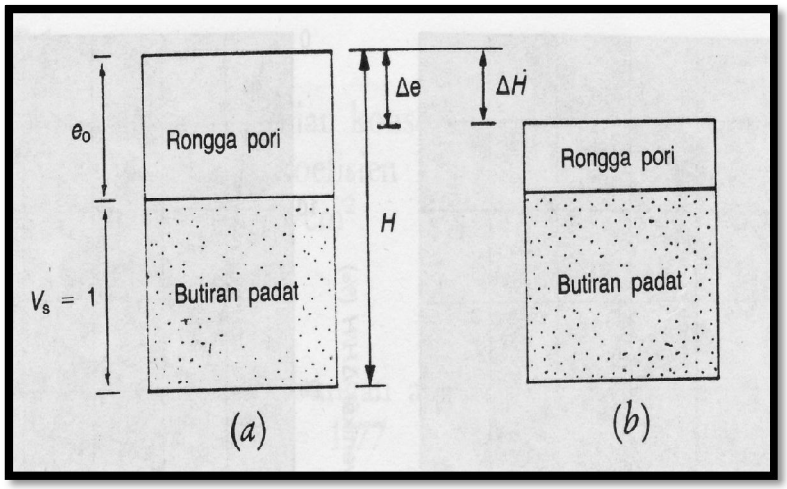


Gambar 7. Sifat khusus grafik hubungan e-log p'

2. Interpretasi Hasil Pengujian Konsolidasi

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

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



Gambar 8. Fase Konsolidasi

(a) Sebelum konsolidasi (b) Sesudah konsolidasi

Bila volume padat V_a = 1 dan volume pori awal adalah e_o, maka kedudukan akhir dari proses konsolidasi dapat dilihat dalam Gambar 8**.** volume pdat besarnya tetap, angka pori berkurang karena adanya Δ_e. Dari Gambar 8**.** dapat diperoleh persamaan.

$$\Delta H = H \frac{\Delta e}{1 + e_o} \qquad (2)$$

3. Koefisien Pemampatan (*Coeficient of Compression)* (a_v) dan keofisien perubahan Volume (m_v) (*Coeficient of Volume Change*)

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

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

Dengan :

e_1 = angka pori pada tegangan P_1'

e_2 = angka pori pada tegangan P_2'

V_1 = Volume pada tegangan P_1'

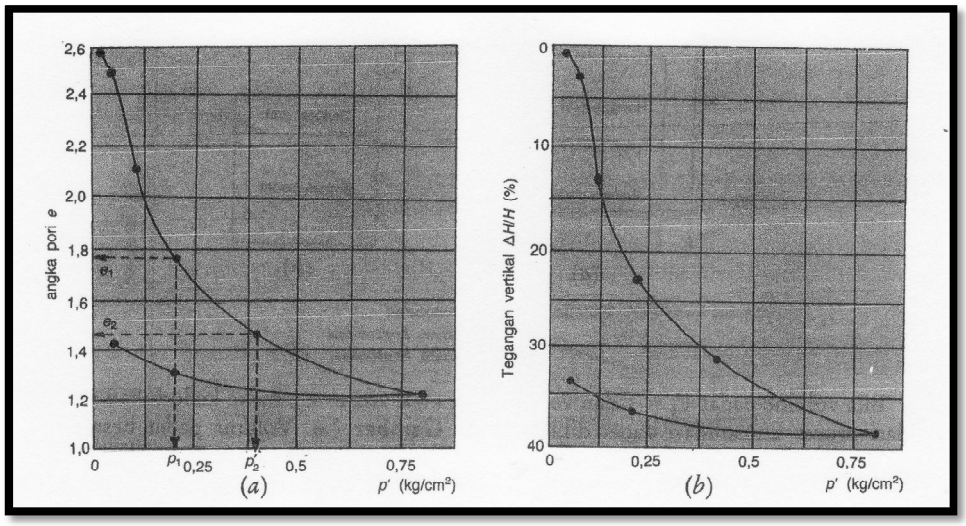
V_2 = Volume pada tegangan P_2'

Kemiringan kurva e – *p*' (a_v) didifinisikan sebagai :

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \qquad (3)$$

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

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



Gambar 9. Hasil pengujian konsolidasi

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

(b) Plot regangan vs tegangan efektif ΔH/H – P'

Keofisien perubahan volume (M_v) didifenisikan 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 9.b) dengan perubahan ΔH.

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

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

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

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

Karena m_v adalah perubahan volume/satuan penambahan tegangan, maka

$$M_V = \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \frac{1}{\Delta_P}$$

$$= \frac{a_v - \Delta_p}{1 + e_1} \qquad (4b)$$

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

4. 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 10**.** C_c dapat dinyatakan dalam persamaan :

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

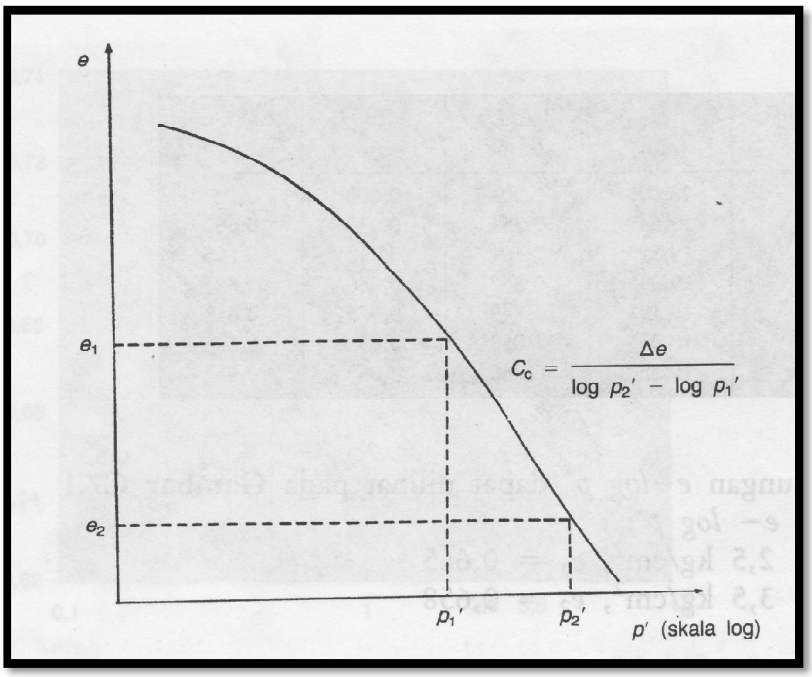
Untuk tanah *noremally consolidated*, Terzaghi dan Peck (1967) memberikan hubungan angka kompresi C_c sebagaib berikut:

C_c = 0,009 (LL -10) (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 diggunakan untuk sensitivitas lebih besar dari 4).

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

C_c = 0,009 (LL -10) (7)



Gambar 10. Indeks pamampatan C_c

Beberapa niulai 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 (untuk lempung Chicago) (8)

C_c = 0,0046 (LL – 9) (untuk lempung Brasilia) (9)

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

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

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

5. 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.

6. 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 kea rah 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

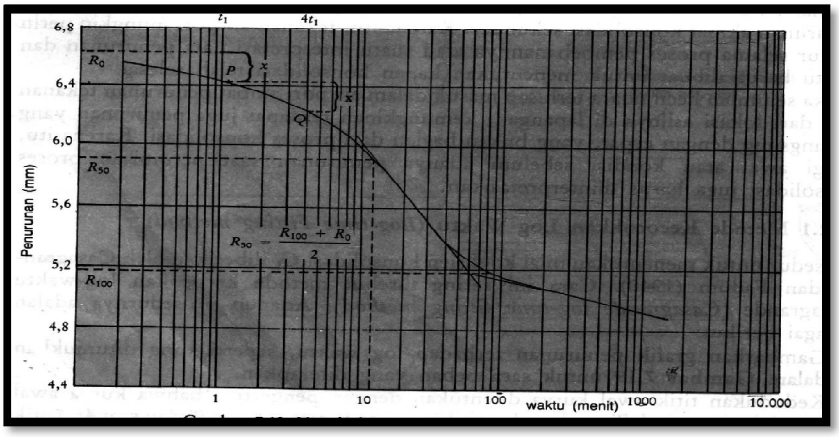
   $R_{50} = (R_0 + R_{100})/2$

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

$$C_v = \frac{0{,}197 H_t^2}{t_{50}} \qquad (12)$$

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.

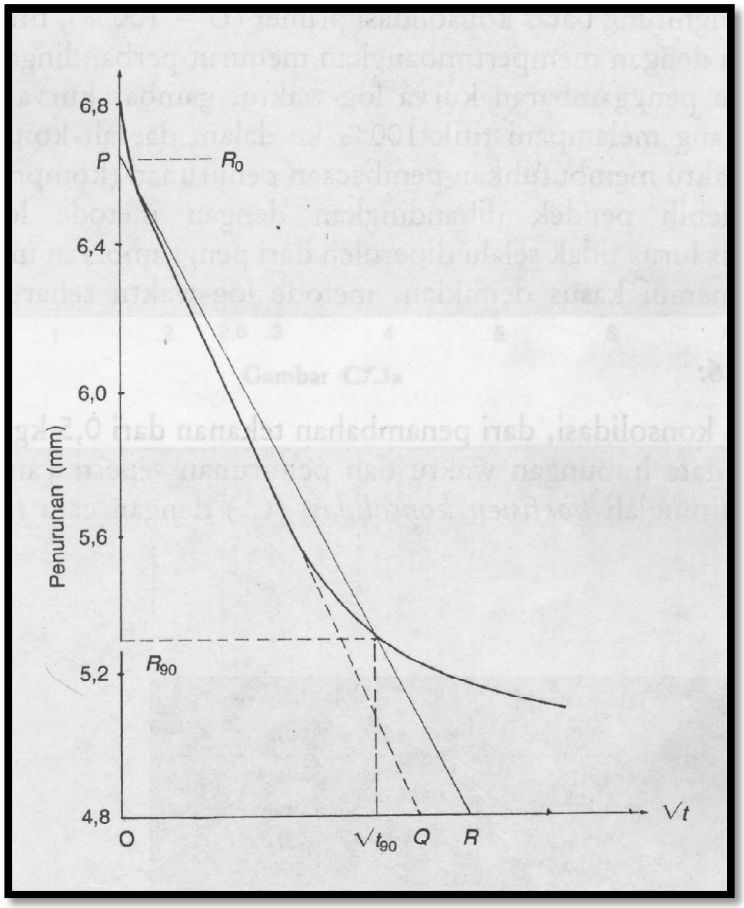
Terdapat beberapa hal di mana cara log-waktu Casagrande tidak dapat diterapkan. Jika konsolidasi sekunder begitu besar pada waktu fase konsolidasi primer selesai, mungkin tidak dapat terlihat dengan jelas dari patahnya grafik log waktu. Tipe kurvanya akan sangat tergantung pada nilai banding penambahan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



Gambar 11. Metode kecocokan log-waktu *(Casagrande, 1940)*

7. 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 6.20). 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 k ali absis OQ. Prosedur untuk memperoleh derajat konsolidasi *U = 90%*, adalah sebagai berikut :



Gambar 12. Metode Akar Waktu (*Taylor, 1948*)

a. Gambarkan grafik hubungan penurunan vs. akar waktu dari data hasil pengujian konsolidasi pada beban tertentu yang diterapkan.
b. 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.
c. garis lurus *PR* digambar dengan absis *OR* sma dengan 1,15 kali absis *OQ*. Perpotongan dari *PR* dan kurvanya ditentukan titik R_{90} pada absis.
d. T_v untuk $U = 90\%$ adalah 0,848. Pada keadaan ini, koefisien konsolidasi C_v diberikan menurut persamaan :

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

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 dibandingan 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.

8. Konsolidasi Sekunder

Konsolidasi sekunder terjadi setelah konsolidasi prmer berhenti. Lintasan kurva konsolidasi sekunder didefinisikan sebagai kemiringan kurva (C_α) pada bagian akhir dari kurva ΔH-*log t* atau dari kurva *e-log t.* untuk memperoleh kemiringan kurva konsolidasi sekunder yang baik, diperlukan memperanjang proses pengamatan pengujian di laboratorium. Dengan cara ini akan mempermudah hitungan kemiringan kurva kompresi sekunder C_α. Dengan melihat gambar 6, 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.