

## BAB III LANDASAN TEORI

### 3.1 ANALISIS UKURAN BUTIRAN

Sifat-sifat tanah sangat bergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh karena itu, analisis butiran ini merupakan pengujian yang sering dilakukan.

Analisis ukuran butiran dari sebuah contoh tanah melibatkan penentuan persentase berat butiran dalam rentang ukuran yang berbeda. Distribusi ukuran butiran tanah berbutir kasar dapat ditentukan dengan metode pengayakan (*sieving*). Contoh tanah dilewatkan melalui satu set saringan standar yang memiliki lubang yang makin kecil ukurannya dari atas ke bawah. Berat tanah yang tertahan di tiap saringan ditentukan dan persentase kumulatif dari berat tanah yang melewati tiap saringan dihitung. Contoh nomor-nomor saringan dan diameter lubang standar Amerika dapat dilihat pada Tabel 3.1, sedangkan susunan saringan saat pengujian ditunjukkan dalam Gambar 3.1.

Tabel 3.1 Saringan Standar Amerika

No. Saringan	Diameter Lubang (mm)	No. Saringan	Diameter Lubang (mm)
3	6,35	40	0,42
4	4,75	50	0,30
6	3,35	60	0,25
8	2,36	70	0,21
10	2,00	100	0,15
16	1,18	140	0,106
20	0,85	200	0,075
30	0,60	270	0,053

Sumber: Das (1985)



Gambar 3.1 Uji Saringan  
(Sumber: Junaida, 2013)

Distribusi ukuran butiran tanah berbutir halus atau fraksi butir halus dari tanah berbutir kasar dapat ditentukan dengan cara sedimentasi (Gambar 3.2). Metode ini didasarkan atas hukum Stokes yang mengatur kecepatan sedimentasi butiran berbentuk bola dalam suatu suspensi: makin besar partikel, makin besar pula kecepatan mengendapnya, dan sebaliknya. Menurut Stokes, kecepatan mengendap butiran dapat ditentukan dari Persamaan (3.1) berikut.

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \quad (3.1)$$

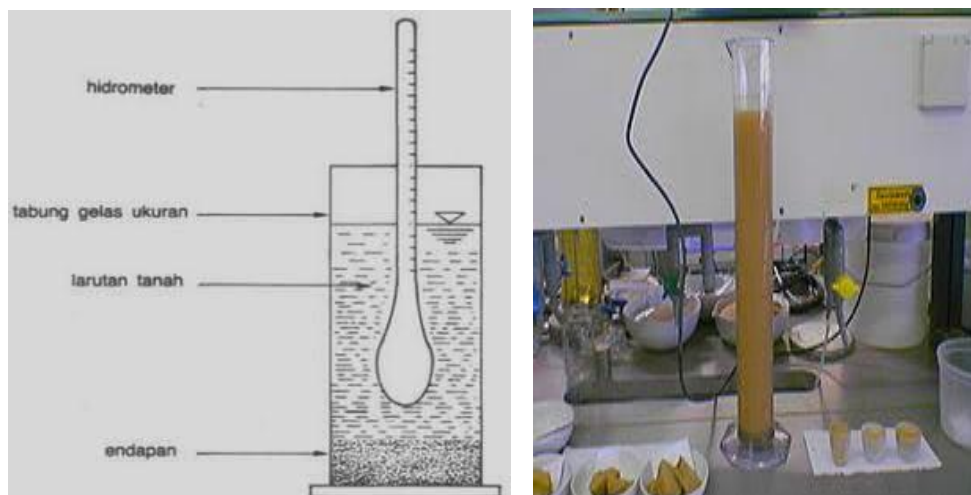
dengan:

- $v$  = kecepatan, sama dengan jarak/waktu ( $L/t$ ),
- $\gamma_w$  = berat volume air ( $g/cm^3$ ),
- $\gamma_s$  = berat volume butiran padat ( $g/cm^3$ ),
- $\mu$  = kekentalan air absolute ( $g \cdot det/cm^2$ ), dan
- $D$  = diameter butiran tanah (mm).

Butiran yang lebih besar akan mengendap lebih cepat, dan sebaliknya, butiran yang lebih halus akan mengendap lebih lama di dalam suspensi. Hukum Stokes tidak berlaku untuk butiran-butiran yang berukuran lebih kecil dari 0,0002

mm, dimana pergerakannya dipengaruhi oleh gerak Brown. Ukuran butiran dianggap sebagai diameter bola yang akan mengendap pada kecepatan yang sama, pada besar butiran yang sama.

Pada uji hidrometer, contoh tanah yang akan diuji terlebih dahulu dibersihkan dari material-material organik dengan menggunakan hidrogen peroksida. Contoh tersebut kemudian dibuat menjadi suspensi di dalam air suling dari larutan pemisah butir-butir ditambahkan agar butiran-butiran satu sama lain saling terpisahkan. Suspensi yang telah jadi ditempatkan di dalam tabung pengendap. Dalam uji hidrometer, contoh tanah yang digunakan beratnya kira-kira 50 gram kering *oven*. Diameter silinder adalah 2,5 in (63,5 mm), tinggi 18 in (457,2 mm) dan volumenya 1000 ml (Gambar 3.2). Dari hukum Stokes, dapat dihitung waktu turun ( $t$ ) butiran berukuran  $D$  (diameter yang ekuivalen dengan penurunan) sejauh kedalaman tertentu dalam suspensi.

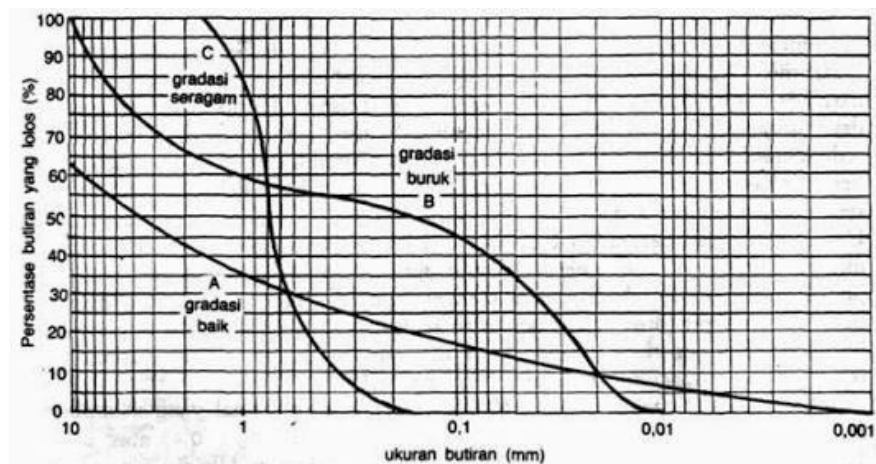


Gambar 3.2 Alat Uji Hidrometer  
(Sumber: Junaida, 2013)

Untuk tanah yang terdiri dari campuran butiran halus dan kasar, gabungan antara analisis saringan dan sedimentasi dapat digunakan. Dari hasil penggambaran kurva yang diperoleh, tanah berbutir kasar digolongkan sebagai gradasi baik bila tidak ada kelebihan butiran pada sembarang ukurannya dan tidak ada yang kurang pada ukuran butiran sedang. Umumnya tanah *bergradasi baik* jika distribusi ukuran

butirannya meluas (pada ukuran butirannya). Tanah berbutir kasar digambarkan sebagai *bergradasi buruk*, bila jumlah berat butiran sebagian besar mengelompok di dalam batas interval diameter butir yang sempit (disebut *gradasi seragam*). Tanah juga termasuk bergradasi buruk, jika butiran besar maupun kecil ada, tapi dengan pembagian butiran yang relatif rendah pada ukuran sedang (Gambar 3.3).

Notasi  $D_{10}$  didefinisikan sebagai 10 dari berat butiran total berdiameter kecil dari ukuran butiran tertentu. Sebagai contoh,  $D_{10} = 0,45$  mm, artinya 10% dari berat total berdiameter kurang dari 0,45 mm. Ukuran-ukuran yang lain seperti  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  didefinisikan seperti cara yang sama. Ukuran  $D_{10}$  didefinisikan sebagai ukuran efektif (*effective size*).



Gambar 3.3 Analisis Distribusi Ukuran Butiran  
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

Kemiringan dan bentuk umum dari kurva distribusi butiran digambarkan oleh koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*),  $C_u$ , dan koefisien gradasi (*coefficient of gradation*),  $C_c$ , yang diberikan menurut Persamaan (3.2) dan (3.3) berikut.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.2)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})} \quad (3.3)$$

### 3.2 KUAT GESER TANAH

Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut persatuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang di maksud. Atau dapat di definisikan juga sebagai gaya perlawanan yang di lakukan butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, bila tanah mengalami pembebanan akan di tahan oleh:

1. kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser, dan
2. gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya.

Parameter kuat geser tanah di perlukan untuk analisis- analisis kapasitas dukung tanah, stabilitas lereng, dan gaya dorong pada dinding penahan tanah.

#### 3.2.1 Kriteria Keruntuhan Menurut Mohr-Coulomb

Menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser, dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum saja. Jadi, hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.4) berikut.

$$\tau = f(\sigma) \quad (3.4)$$

dengan  $\tau$  adalah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*), dan  $\sigma$  adalah tegangan normal pada saat kondisi tersebut. Garis kegagalan (*failure*) yang dinyatakan oleh Persamaan (3.4) di atas sebenarnya berbentuk garis lengkung seperti terlihat pada Gambar 3.4. Persamaan itu ditulis sebagai berikut.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (3.5)$$

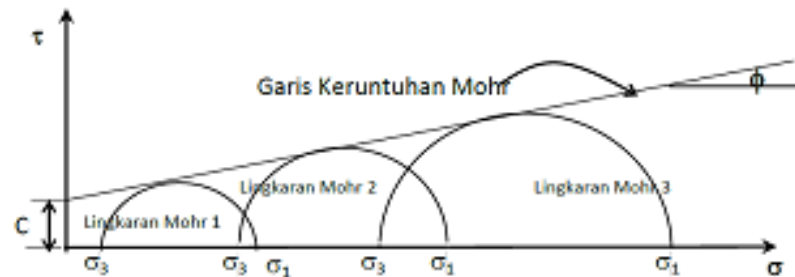
dengan,

$\tau_f$  = kuat geser tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$\varphi$  = sudut gesek dalam tanah atau sudut gesek intern (derajat), dan

$\sigma$  = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m<sup>2</sup>).



Gambar 3.4 Kriteria kegagalan Mohr dan Couloumb  
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

Kuat geser tanah juga bisa dinyatakan dalam bentuk tegangan-tegangan efektif  $\sigma_1'$  dan  $\sigma_3'$  pada saat keruntuhan terjadi.  $\sigma_1'$  adalah tegangan utama mayor efektif dan  $\sigma_3'$  adalah tegangan utama minor efektif. Lingkaran Mohr dalam bentuk lingkaran tegangan, dengan koordinat-koordinat  $\tau$  dan  $\sigma$ , dilihat pada Gambar 3.5. Persamaan tegangan geser ( $\tau_f$ ) dan tegangan normal ( $\sigma_f$ ) yang terjadi pada bidang geser pada saat kegagalan, dinyatakan pada Persamaan (3.6) dan (3.7) berikut.

$$\tau_f = \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \sin 2\theta \quad (3.6)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2} (\sigma_1' + \sigma_3') + \frac{1}{2} (\sigma_1' - \sigma_3') \cos 2\theta \quad (3.7)$$

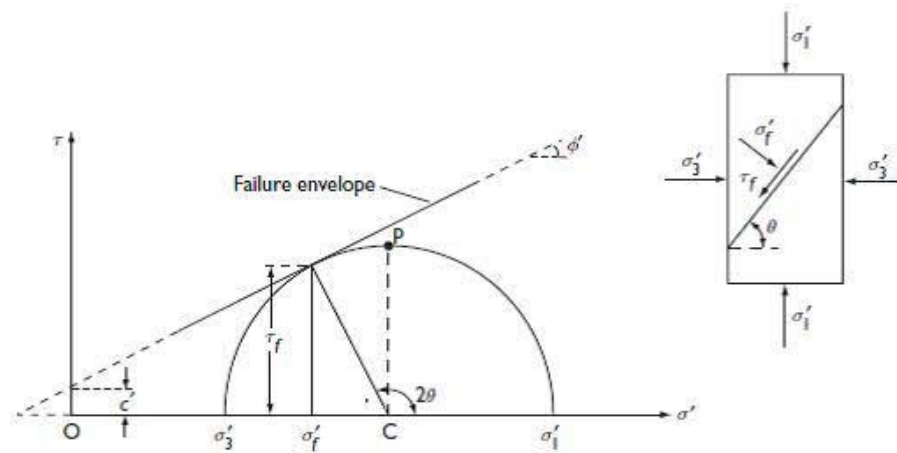
Sudut  $\theta$  adalah sudut teoritis yang terbentuk antara bidang horizontal dengan bidang runtuh, yang besarnya ditentukan dari Persamaan (3.8) berikut.

$$\theta = 45^\circ + \varphi/2 \quad (3.8)$$

Dari Gambar 3.5 hubungan antara tegangan utama efektif saat keruntuhan dan parameter kuat geser juga dapat diperoleh. Besarnya nilai parameter kuat geser, dapat ditentukan dari Persamaan (3.9) dan (3.10) berikut.

$$\sin \varphi' = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3')}{c \operatorname{ctg} \varphi' + \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')} \quad (3.9)$$

$$(\sigma_1' + \sigma_3') = 2 c \cos \varphi' + (\sigma_1' - \sigma_3') \sin \varphi' \quad (3.10)$$



Gambar 3.5 Lingkaran Mohr  
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

### 3.2.2 Uji Kuat Geser Tanah

Parameter kuat geser tanah ditentukan dari uji-uji laboratorium pada benda uji yang diambil dari lapangan yaitu hasil pengeboran tanah yang dianggap mewakili. Tanah yang diambil dari lapangan diusahakan tidak berubah kondisinya, atau masih dalam keadaan tanah asli (*undisturbed*), dimana masalahnya adalah harus menjaga kadar air dan susunan tanah di lapangan supaya tidak berubah. Ada beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, antara lain:

1. uji geser langsung (*direct shear test*),
2. uji triaksial (*triaxial test*), dan
3. uji tekan bebas (*unconfined compression test*).

Pada penelitian kali ini, uji yang nantinya akan di lakukan di Laboratorium hanya uji triaksial. Uji triaksial adalah uji yang paling dapat diandalkan untuk menentukan parameter kuat geser tanah. Diagram skematik dari alat triaksial dapat dilihat pada Gambar 3.6. pada pengujian ini, dapat digunakan tanah benda uji dengan diameter kira-kira 3,81 cm dan tinggi 7,62 cm. Benda uji dimasukkan dalam selubung karet tipis dan diletakkan ke dalam tabung kaca. Benda uji ditekan oleh tekanan sel ( $\sigma_3$ ), yang berasal dari tekanan cairan di dalam tabung. Alat pengujian dihubungkan dengan pengatur drainase ke dalam maupun luar dari benda uji. Untuk menyebabkan terjadinya keruntuhan geser pada benda uji, tegangan aksial

(vertikal) diberikan melalui suatu piston vertikal (tegangan ini biasanya juga disebut tegangan deviator). Pembebanan arah vertikal dapat dilakukan dengan dua cara:

1. dengan memberikan beban mati yang berangsur-angsur ditambah sampai benda uji runtuh, dan
2. dengan memberikan deformasi arah aksial (vertikal) dengan kecepatan deformasi yang tetap dengan bantuan gigi-gigi mesin atau pembebanan hidrolis.

Tegangan-tegangan yang bekerja pada benda uji dinotasikan  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , dan  $\sigma_3$ . Tegangan  $\sigma_1$  disebut tegangan utama mayor (*major principal stress*), tegangan  $\sigma_3$  disebut tegangan utama minor (*minor principal stress*). Tegangan utama tengah (*intermediate principal stress*)  $\sigma_2 = \sigma_3$ , merupakan tegangan kekang atau tegangan sel (*confining stress*). Karena tinjauannya hanya dua dimensi, tegangan  $\sigma_2$  sering tidak diperhitungkan. Tegangan yang terjadi dari selisih  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  atau  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  disebut tegangan deviator (*deviator stress*) atau beda tegangan (*stress difference*),  $\Delta\sigma$ . Uji triaksial dapat dilakukan dengan beberapa cara, namun pada pengujian kali ini, penguji menggunakan uji triaksial *Unconsolidated-Undrained* (UU).

Uji triaksial *Unconsolidated-Undrained* (UU) merupakan uji yang lazim digunakan untuk mencari parameter kuat geser tanah. Pada uji ini terdiri dari 2 fase, yaitu fase kompresi (*unconsolidated*) dan fase deviatorik (*undrained*). Saat fase kompresi, benda uji diberi tekanan sel secara bertahap hingga mencapai tegangan kekangan yang diharapkan karena pada fase ini keran ditutup maka tegangan dari sel triaksial seluruhnya akan ditahan oleh tegangan air pori dari tanah. Saat fase deviatorik, pelat bagian atas dan bawah benda uji akan menekan benda uji dengan tekanan aksial yang menghasilkan tegangan deviatorik pada benda uji. Saat proses pemberian tegangan aksial, maka terjadi penambahan atau pengurangan tegangan air pori. Untuk mencari nilai parameter kuat geser tanah dapat dicari menggunakan Persamaan (3.11) dan (3.12) berikut.

$$\sigma_1 = \sigma_3 m^2 + 2mc \quad (3.11)$$

$$m = \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (3.12)$$



Gambar 3.6 Alat Uji Triaksial  
(Sumber: Lab. Mektan UPN, 2015)

### 3.3 KONSOLIDASI

#### 3.3.1 Teori Penurunan

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 sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total benar-benar hilang.

Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) adalah perpindahan vertikal permukaan tanah sehubungan dengan perubahan volume pada suatu tingkat dalam proses konsolidasi. Sebagai contoh, penurunan konsolidasi akan terjadi bila suatu struktur di bangun di atas suatu lapisan lempung jenuh atau bila muka air tanah turun secara permanen pada lapisan di atas lapisan lempung tersebut. Perkembangan konsolidasi di lapangan dapat dipantau dengan memasang pizometer untuk mencatat perubahan tekanan air pori terhadap waktu. Besarnya penurunan dapat diukur dengan mencatat ketinggian suatu titik acuan yang sesuai pada suatu struktur atau pada permukaan tanah. Di sini diperlukan pengukuran beda tinggi yang teliti, yang dilakukan dari patok acuan di mana penurunan sangat kecil.

Pada umumnya tanah, dalam bidang geoteknik, dibagi menjadi 2 jenis, yaitu tanah berbutir dan tanah kohesif. Pada tanah berbutir (pasir/ *sand*), air pori dapat

mengalir keluar struktur tanah dengan mudah, karena tanah berbutir memiliki permeabilitas yang tinggi. Sedangkan pada tanah kohesif (*clay*), air pori memerlukan waktu yang lama untuk mengalir keluar seluruhnya. Hal ini disebabkan karena tanah kohesif memiliki permeabilitas yang rendah.

Secara umum, penurunan dapat diklasifikasikan menjadi 3 tahap, yaitu :

1. *immediate Settlement* (penurunan seketika), diakibatkan dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air. Umumnya, penurunan ini diturunkan dari teori elastisitas. *Immediate settlement* ini biasanya terjadi selama proses konstruksi berlangsung. Parameter tanah yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah *undrained modulus* dengan uji coba tanah yang diperlukan seperti *SPT*, sondir (*dutch cone penetration test*), dan *pressuremeter test*.
2. *primary Consolidation Settlement* (penurunan konsolidasi primer), yaitu penurunan yang disebabkan perubahan volume tanah selama periode keluarnya air pori dari tanah. Pada penurunan ini, tegangan air pori secara kontinyu berpindah ke dalam tegangan efektif sebagai akibat dari keluarnya air pori. Penurunan konsolidasi ini umumnya terjadi pada lapisan tanah kohesif (*clay/lempung*). Pada penurunan konsolidasi primer, besarnya penurunan dapat di hitung dengan rumus pada Persamaan (3.13) – (3.16) berikut.
  - a. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ( $p_c' = p_o'$ ) dengan tegangan efektif sebesar  $p_1'$ :
 
$$S_c = C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_o'} \quad (3.13)$$
  - b. Untuk lempung *overconsolidated* ( $p_c' > p_o'$ ) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai  $p_1'$ :
 
$$\text{Bila, } p_1' < p_c' \text{ maka } S_c = C_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_o'} \quad (3.14)$$

$$\text{Bila, } p_1' > p_c' \text{ maka } S_c = C_r \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_c'}{p_o'} + C_c \frac{H}{1+e_0} \log \frac{p_1'}{p_c'} \quad (3.15)$$

$$p_1' = p_o' + \Delta p \quad (3.16)$$

3. *secondary Consolidation Settlement (penurunan konsolidasi sekunder)*, adalah penurunan setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Hal ini lebih disebabkan oleh proses pemampatan akibat penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

### 3.3.2 Uji Konsolidasi

Uji konsolidasi satu dimensi (*one dimensional consolidation*) biasanya dilakukan di laboratorium dengan alat *oedometer* atau *konsolidometer*. Contoh tanah yang mewakili elemen tanah yang mudah mampat pada lapisan tanah yang diselidiki, dimasukkan secara hati-hati ke dalam cincin besi. Bagian atas dan bawah dari benda uji dibatasi oleh batu tembus air (*porous stone*).

Beban  $P$  diterapkan di atas benda uji, dan penurunan di ukur dengan arloji pembacaan (*dial gauge*). Umumnya, beban diterapkan dalam periode 24 jam, dengan benda uji selalu terendam air. Penambahan beban secara periodik diterapkan pada contoh tanah. penelitian 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<sup>2</sup>. Untuk tiap penambahan beban, deformasi dan waktu di catat, kemudian diplot pada grafik semi logaritmis.

### 3.3.3 Koefisien Konsolidasi ( $C_v$ ) (*Coefficient Of Consolidation*)

Kecepatan penurunan konsolidasi dapat di hitung dengan menggunakan koefisien konsolidasi  $C_v$ . kecepatan penurunan perlu diperhitungkan bila penurunan konsolidasi yang terjadi pada struktur diperkirakan besar.

#### 1. Metode Kecocokan Log-Waktu (*Log-time Fitting Method*)

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

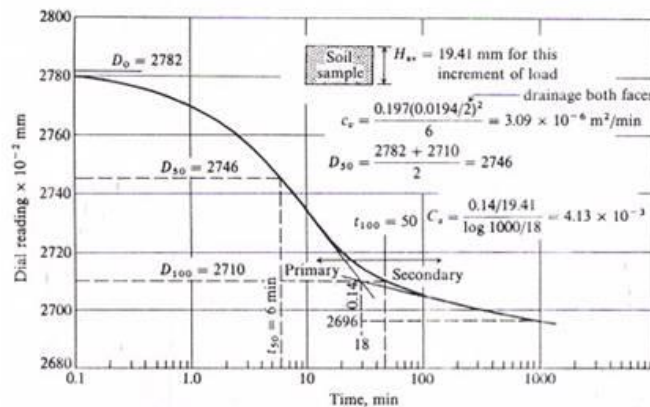
- a. Gambarkan grafik penurunan terhadap log waktu, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.7 untuk satu beban yang diterapkan.

- b. Kedudukan titik awal kurva ditentukan dengan pengertian bahwa kurva awal mendekati parabola. Tentukan dua titik yaitu pada  $t_1$  (titik P) dan pada  $4t_1$  (titik Q). Selisih ordinat (jarak vertikal) keduanya di ukur, misalnya  $x$ . Kedudukan  $R = R_o$  digambar dengan mengukur jarak  $x$  ke arah vertikal di atas titik P.
- c. Titik  $U = 100\%$ , atau  $R_{100}$ , diperoleh dari titik potong dua bagian linier kurvanya, yaitu titik potong bagian garis lurus kurva konsolidasi primer dan sekunder.
- d. Titik  $U = 50\%$  ditentukan dengan:

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

Dari sini diperoleh nilai  $t_{50}$ . Nilai  $T_v$  sehubungan dengan  $U = 50\%$  adalah 0,197, sehingga koefisien konsolidasi  $C_v$  dinyatakan dalam Persamaan (3.17) berikut.

$$C_v = \frac{0,197 H^2 t}{t_{50}} \quad (3.17)$$



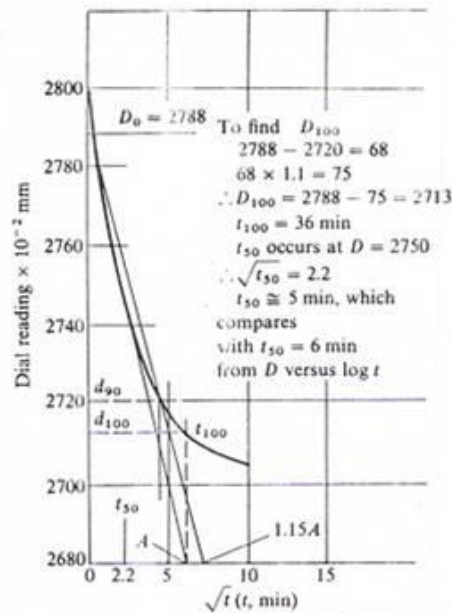
Gambar 3.7 Metode kecocokan log waktu (Casagrande, 1940)  
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

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

Metode akar waktu digunakan untuk menentukan  $C_v$  dengan cara menggambarkan hasil uji konsolidasi pada grafik hubungan akar waktu terhadap penurunan (Gambar 3.8). kurva teoritis yang terbentuk, biasanya linier sampai dengan kira-kira 60% konsolidasi. karakteristik cara akar waktu

ini, adalah dengan menentukan derajat konsolidasi  $U = 90\%$ , dimana  $U = 90\%$  tersebut absis  $OR$  akan sama dengan 1,15 kali absis  $OQ$ . Prosedur untuk memperoleh derajat konsolidasi  $U = 90\%$  selengkapnya adalah berikut.

- Gambarkan grafik hubungan penurunan *vs.* Akar waktu dari data hasil uji konsolidasi pada beban tertentu yang diterapkan.
- Titik  $U = 0\%$  diperoleh dengan memperpanjang garis dari bagian awal kurva yang lurus sehingga memotong ordinat di titik  $P$  dan memotong absis di titik  $Q$ . Anggapan kurva awal berupa garis lurus adalah konsisten dengan anggapan bahwa kurva awal berbentuk parabola.



Gambar 3.8 Metode akar waktu (Taylor, 1948)  
(Sumber: Hardiyatmo, 2003)

- Garis lurus  $PR$  di gambar dengan absis  $OR$  sama dengan 1,15 kali absis  $OQ$ . Perpotongan dari  $PR$  dan kurva merupakan titik  $R_{90}$  pada absis. Dari sini diperoleh  $\sqrt{t_{90}}$ .
- $T_v$  untuk derajat konsolidasi  $U = 90\%$  adalah 0,848. Pada keadaan ini koefisien konsolidasi  $C_v$  dinyatakan oleh Persamaan (3.18) berikut:

$$C_v = \frac{0,848 H^2 t}{t_{90}} \quad (3.18)$$