

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

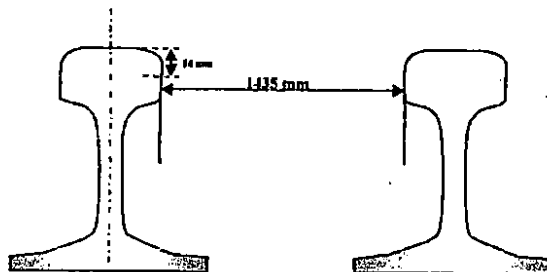
A. Penelitian Terdahulu

Pasaribu dan Iskandar (2013) meneliti tentang penurunan pada tanah lunak akibat timbunan dan waktu konsolidasi yang dibutuhkan pada *Rumway* Bandara Internasional Medan Baru, Sumatera Utara. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini tergolong tanah lempung lanau pada bagian atas dan tanah pasir pada bagian bawah. Analisa penurunan tanah dilakukan dengan metode analisa konsolidasi satu arah dengan menggunakan satu titik *stationing* yang dianggap mengalami penimbunan paling kritis. Perhitungan besar penurunan konsolidasi dengan menggunakan metode Hansbo. Derajat konsolidasi yang ditargetkan adalah saat mencapai derajat konsolidasi 90%. Sedangkan untuk mempercepat waktu konsolidasi akan dipasang *Prefabricated Drainage Vertical (PVD)*. Analisa jarak spasi antar PVD juga akan dihitung untuk mendapatkan jarak yang paling efektif yang disesuaikan dengan waktu konstruksi yang dibutuhkan.

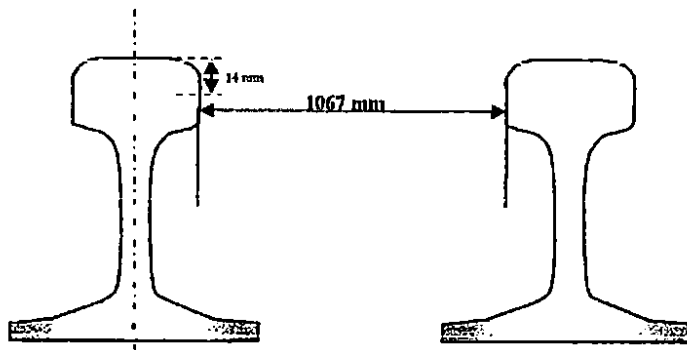
B. Klasifikasi Jalan Rel

Lebar jalan rel merupakan jarak terkecil diantara kedua sisi kepala rel bagian dalam. Berdasarkan Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 dan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 yang mengatur klasifikasi jalan rel sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

1. Sepur lebar dengan ukuran lebar jalan rel 1435 mm (Gambar 2.1).
2. Sepur sempit dengan ukuran lebar jalan rel 1067 mm (Gambar 2.2).



Gambar 2.1 Lebar Jalan Rel 1435 mm (Peraturan Menteri No.60, 2012)



Gambar 2.2 Lebar Jalan Rel 1067 mm (Peraturan Menteri No.60, 2012)

C. Klasifikasi Beban Gandar

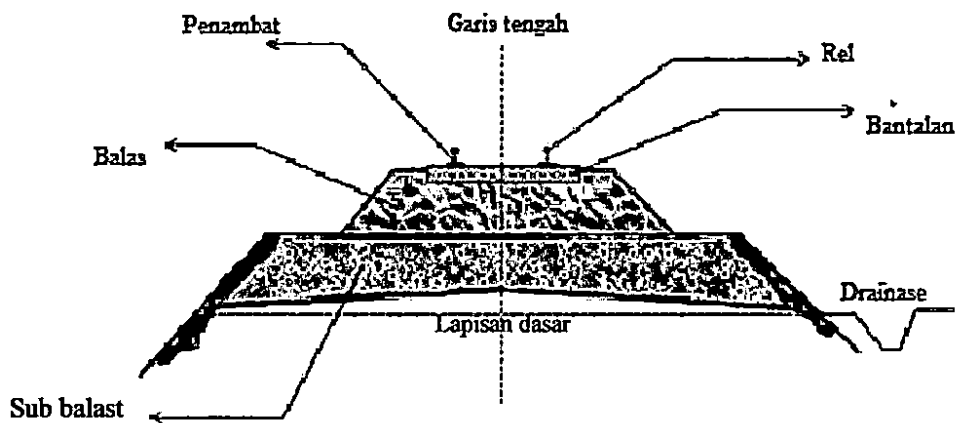
Beban gandar merupakan beban yang diterima oleh beban jalan rel. Klasifikasi jalan rel menurut beban gandar maksimum dibedakan berdasarkan lebar jalan, yaitu :

1. Beban gandar untuk jalan 1067 mm pada semua kelas jalan maksimum sebesar 18 ton.
2. Beban gandar untuk lebar jalan 1435 mm pada semua kelas jalan maksimum sebesar 22,5 ton.

D. Konstruksi Jalan Rel

Komponen struktur jalan rel dibagi menjadi dua bagian yaitu:

1. Struktur bagian atas (*superstructure*) yang terdiri dari komponen rel (*rail*) termasuk pelat penyambung didalamnya (jika ada), penambat (*fastening*) dan bantalan (*sleeper, tie, crosstie*). Pada komponen ini akan langsung menerima beban dari lokomotif, kereta, atau gerbong yang langsung menyebarkan beban ke substruktur.
2. Struktur bagian bawah (*substructure*) yang terdiri dari komponen balas (*ballast*), subbalas (*subballast*), tanah dasar dan tanah asli (*natural ground*). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Konstruksi Rel (Theeiyyha, 2010)

E. Pembebanan Struktur Jalan Rel

Menurut Rosyidi (2015) pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel. Gaya vertikal adalah beban yang paling dominan dalam struktur jalan rel yang dipengaruhi oleh faktor aerodinamik (hambatan udara dan beban dinamik, kondisi geometrik dan kecepatan pergerakan rangkaian kereta api. Persamaan 2.1 digunakan untuk menentukan gaya vertikal pada jalan rel sebagai fungsi dari baban statik.

$$P_d = I_d \times P_s \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana,

P_d = beban roda dinamik rencana (kN atau kg)

P_s = beban roda statik dari kendaraan/kereta api (kN atau kg)

I_d = faktor atau indeks beban dinamik

Nilai indeks beban dinamik dapat diperoleh menggunakan persamaan Talbot (1980) yang digunakan sebagai standart perencanaan struktur jalan kereta api di Indonesia. Faktor indeks beban dinamik menurut Talbot pada persamaan 2.2.

$$I_d = 1 + 0,01 \left(\frac{v_r}{1,069} - 5 \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana,

I_d = faktor atau indeks beban dinamis

V_r = kecepatan rencana (km/jam)

Menganalisis lapisan tanah dasar akibat pembebanan dinamik dari kereta api dapat menggunakan metode Area dan Talbot. Beban yang bekerja pada tanah dasar sebesar σ_2 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$\sigma_2 = \frac{58,87 \times \sigma_1}{d^{1,25}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Nilai tekanan pada permukaan badan jalan (σ_1) dapat dihitung dengan persamaan 2.4.

$$\sigma_1 = \frac{3 \times Q_1}{b \times l} \dots\dots\dots(2.4)$$

Beban sebesar Q_1 merupakan distribusi beban dari rel ke bantalan, dapat dihitung dengan persamaan 2.5.

$$Q_1 = 0,786 \frac{P d x_1^5}{x_1} \dots\dots\dots(2.5)$$

Nilai x_1 diperoleh dari persamaan 2.6.

$$x_1 = \frac{1\pi}{4\lambda} \dots\dots\dots(2.6)$$

Nilai λ diperoleh dari persamaan 2.7.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana,

σ_1 = tekanan pada permukaan badan jalan (kg/cm^2)

σ_2 = tekanan tepat di bawah bantalan (kg/cm^2)

d = tebal *ballast* total (cm)

Q_1 = beban dari rel ke bantalan (kg)

b = lebar bantalan (cm)

l = panjang bantalan (cm)

S = jarak bantalan (cm)

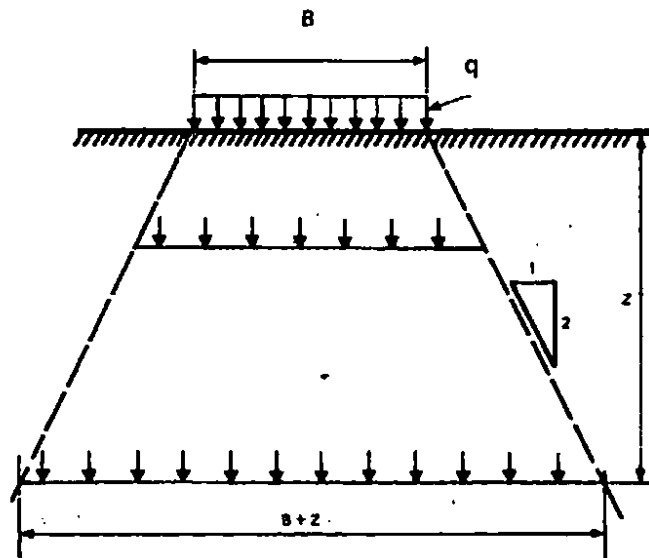
k = modulus jalan rel (Mpa)

E = modulus elastisitas baja penyusun rel (kg/cm^2)

I = momen inersia rel (cm^4)

F. Analisis Tegangan Tanah

Secara teori, tegangan yang berasal dari penambahan beban dipermukaan tanah akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Perhitungan penambahan tegangan vertikal yang terjadi dalam tanah berhubungan dengan perhitungan penurunan yang terjadi (Muntohar, 2009). Untuk dapat menyalurkan tekanan yang berasal dari beban kereta api, ke tanah dasar dengan tekanan yang dapat diterima oleh tanah dasar, maka diperlukan tekanan yang disalurkan dari rel dan bantalan ke lapisan balas, seterusnya dari lapisan balas ke tanah dasar. Persamaan dasar penambahan tegangan vertikal pada suatu titik dalam masa tanah akibat beban garis dapat digunakan untuk menentukan tegangan vertikal pada suatu titik akibat beban lajur memanjang dengan lebar (B) dan per satuan luas (q) pada Gambar 2.10.



Gambar 2.4 Metode Penyebaran Beban 2V : 1H (Doyle, 1980)

Total penambahan tegangan vertikal ($\Delta\sigma$) dengan metode penyebarab beban 2V:1H dapat dihitung dengan persamaan 2.8.

$$\frac{\Delta\sigma}{q} = \frac{qLB}{(L+z)(B+z)} \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan,

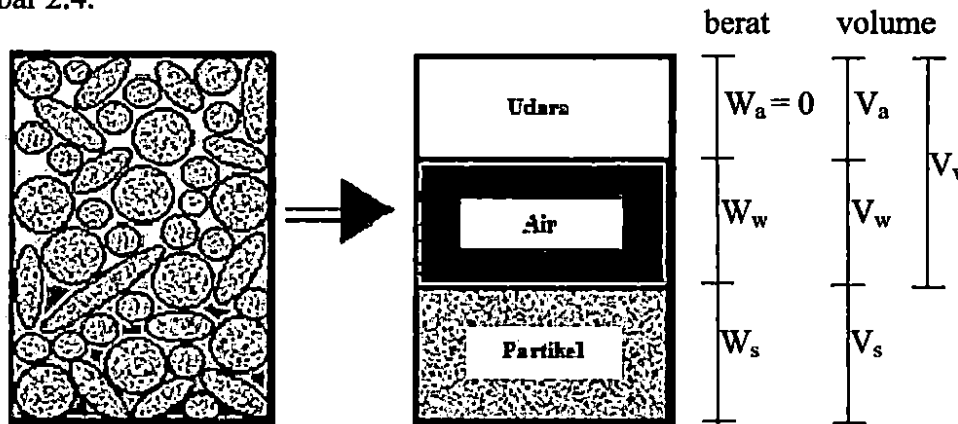
$\Delta\sigma$ = tegangan vertikal (kg/cm^2)

q = beban per satuan luas (kg/cm^2)

- z = kedalaman (cm)
- B = lebar pondasi (cm)
- L = panjang pondasi (cm)

G. Tanah

Dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, di antara organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah (Hary, 1992). Bahan penyusun tanah disertai dengan zat cair dan gas (udara) yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat atau lebih dikenal sebagai sistem tiga fase tanah. Diagram fase tanah tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.5 Diagram Fase Tanah (Das, 1994)

Butiran-butiran mineral yang membentuk bagian padat dari tanah merupakan hasil pelapukan batuan. Ukuran setiap butiran padat tersebut sangat bervariasi dan sifat-sifat fisik dari tanah tergantung dari faktor-faktor ukuran, bentuk, dan komposisi kimia dari butiran. Dari Gambar 2.5 dapat dibentuk persamaan berikut :

$$W = W_s + W_w \dots \dots \dots (2.9)$$

dan,

$$V = V_s + V_w + V_a \dots \dots \dots (2.10)$$

$$V_v = V_w + V_a \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan :

W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

V_s = volume butiran padat

V_w = volume air

V_a = volume udara

V_v = volume rongga

Hubungan – hubungan volume yang biasa digunakan dalam mekanika tanah adalah sebagai berikut :

1. Kadar Air

Kadar air (w) didefinisikan sebagai perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran (W_s) dalam tanah tersebut, dinyatakan dalam persen, dengan persamaan sebagai berikut :

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan :

w = kadar air

W_w = berat air

W_s = berat butiran tanah

2. Angka pori

Angka pori (e), didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Biasanya dinyatakan didalam desimal.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (2.13)$$

3. Berat Volume Tanah

Dalam geoteknik, berat volume sangat diperlukan dalam perhitungan kondisi tanah, biasanya digunakan dalam analisis fondasi untuk menghitung tekanan tanah. Berat volume tanah (γ) adalah berat total tanah per satuan volume total. Dalam penyelidikan tanah laboratorium biasanya akan didapat nilai

berat volume total dan berat volume kering, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan :

γ_d = Berat Volume Kering

γ = Berat Volume (kN/m³)

w = Kadar Air (%)

Tabel 2.1 Tipikal nilai angka pori, kadar air, berat volume kering untuk beberapa jenis tanah (Muntohar, 2009)

Jenis Tanah	Angka pori, e	Kadar air pada pondasi jenuh, w (%)	Berat volume kering, γ_d (kN/m ³)
Pasir lepas seragam	0,8	30	14,5
Pasir padat seragam	0,45	16	18
Pasir berlanau lepas	0,65	25	16
Pasir berlanau padat	0,4	15	12
Lempung keras	0,6	21	17
Lempung lunak	0,9-1,4	30-50	11,5-14,5
Lempung lunak organik	2,5-3,2	90-170	6-8

4. Derajat kejenuhan

Derajat kejenuhan (S) adalah perbandingan volume air (V_w) dengan volume total rongga pori tanah (V_v), biasanya dinyatakan dalam persen.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \dots\dots\dots (2.15)$$

5. Berat Jenis Tanah

Berat jenis merupakan nilai yang tidak bersatuan. Nilai berat jenis suatu tanah akan sangat bervariasi tergantung pada material penyusunnya, namun secara umum tanah mempunyai berat jenis 2,6 dan 2,8. Berdasarkan pengalaman

pada permasalahan geoteknik, berat jenis tanah yang biasa diambil sebesar 2,7. Beberapa nilai berat jenis untuk tipikal tanah diberikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.2 Nilai berat jenis untuk tipikal tanah (Muntohar, 2009)

Jenis Tanah	Rentang Nilai Berat Jenis, Gs
Kerikil	2,65-2,68
Pasir	2,65-2,68
Lanau	2,66-2,7
Lempung	2,68-2,8
Gambut	1,25-1,80

6. Batas Cair

Batas cair didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.

7. Batas Plastis

Batas plastis didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air di mana tanah dengan diameter siliaber 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung. Batas plastis merupakan batas terendah dari kondisi plastis tanah. batas plastis dapat ditentukan dengan pengujian yang sederhana dengan cara menggulung sejumlah tanah dengan menggunkan tanah secara berulang menjadi bentuk ellipsodial. Batas cair adalah nilai kadar air dimana tanah dalam keadaan antara plastis dan semi padat, perconbaan ini bertujuan menentukan kadar air suatu tanah dalam keadaan plastis. Hasil percobaan ini digabung dengan hasil pengujian batas cair untuk Indeks Plastis (PI). PI merupakan perbedaan antar batas cair dan batas plastis tanah.

$$PI = LL - PI \dots \dots \dots (2.16)$$

dengan :

PI = *Plastic Index*

LL = *Liquid Limit* (Batas cair)

PL = *Plastic Limit* (Batas plastis)

8. Analisa Saringan

Pada dasarnya partikel-partikel pembentuk struktur tanah mempunyai ukuran dan bentuk yang beraneka ragam, baik pada tanah kohesif maupun tanah non kohesif. Sifat suatu tanah banyak ditentukan oleh ukuran butir dan distribusinya. Untuk tanah yang berbutir kasar seperti kerikil dan pasir, sifatnya tergantung pada ukuran butirnya.

Ukuran efektif $= D_{10}$(2.17)

Koefisien keseragaman $= \frac{D_{60}}{D_{10}}$ (2.18)

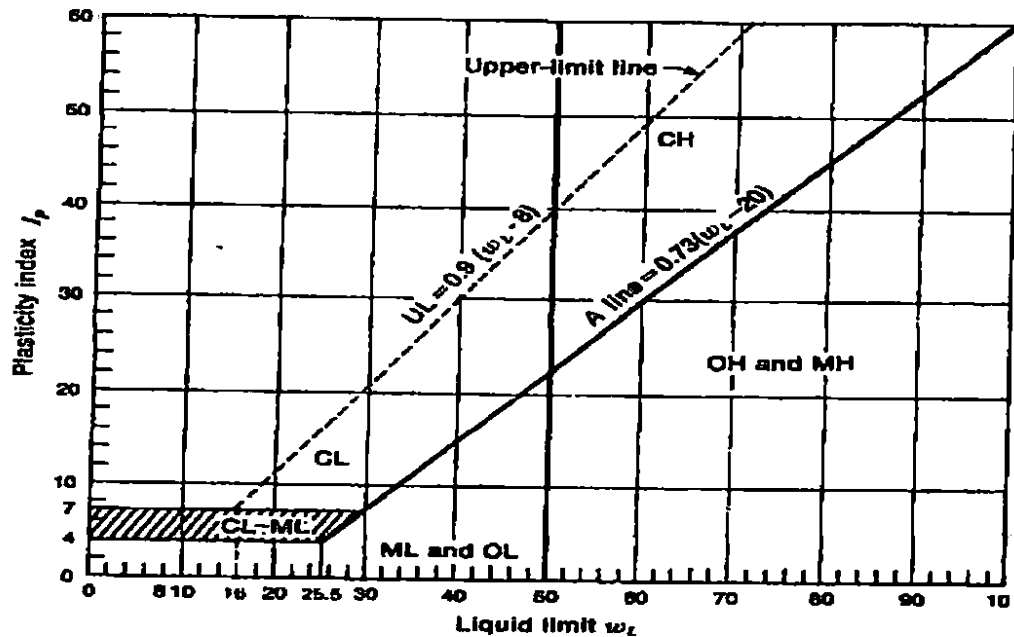
sehingga di dalam mekanika tanah, analisa ukuran butir banyak dilakukan atau dipakai sebagai acuan untuk klasifikasi tanah.

H. Klasifikasi Tanah Metode USCS

Klasifikasi tanah sistem ini diajukan pertama kali oleh *Casagrande* dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation* (USBR), dan *United Army Corps of Engineer* (USACE). Kemudian *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Dalam USCS tanah diklasifikasikan dalam dua kategori, yaitu :

- a. Tanah berbutir kasar apabila $\leq 50\%$ tanah tertahan pada saringan No.200.
- b. Tanah berbutir halus apabila $\geq 50\%$ tanah lolos saringan No.200.

Sifat lempung atau lanau yang paling penting adalah plastisitas, sehingga dalam deskripsi atau klasifikasi tanah berbutir halus diperlukan petunjuk mengenai sifat plastisnya. Grafik plastisitas untuk klasifikasi tanah menurut USCS dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.6 Grafik Plastisitas

Sedangkan klasifikasi menurut USCS dapat dilihat secara jelas pada tabel 2.1 untuk tanah berbutir kasar dan tabel 2.2 untuk tanah berbutir halus.

Tabel 2.3 Klasifikasi Tanah untuk Tanah Berbutir Kasar

Jenis	Deskripsi	Simbol	Kriteria Laboratorium		
			Butiran Halus (%)	Kualitas	Plastisitas
Kerikil (50 % atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan No.200)	Kerikil bergradasi baik, kerikil berpasir, dengan sedikit atau tanpa butiran halus.	GW	0-5	$Cu > 12$ dan $1 < Cc < 3$	
	Kerikil berlanau, kerikil berpasir, dengan sedikit atau tanpa butiran halus.	GP	0-5	Tidak memenuhi syarat-syarat GW	
	Kerikil berlanau, kerikil berpasir lanau.	GM	> 12		Di bawah garis A atau $PI < 4$
	Kerikil berlempung, kerikil berlempung berpasir.	GC	> 12		Di atas garis A atau $PI < 5$

Tabel 2.3 (lanjutan)

Pasir (50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan saringan No.200 berukuran pasir	Pasir bergradasi baik, kerikil berpasir, dengan sedikit atau tanpa butiran halus.	SW	0-5	$Cu > 6$ dan $1 < Cc < 3$	
	Pasir bergradasi buruk, pasi berkerikil, dengan sedikit atau tanpa butiran halus.	SP	0-5	Tidak memenuhi syarat-syarat SW	
	Pasir berlanau.	SM	> 12		Di bawah garis A atau $PI < 4$
	Pasir berlempung.	SC	> 12		Di atas garis A atau $PI < 7$

Tebel 2.4 Klasifikasi Tanah untuk Tanah Berbutir Halus

Jenis	Deskripsi	Simbol	Kriteria
Lanau dan lempung (batas cair < 50 %)	Lanau anorganik, pasir halus berlanau atau berlempung plastisitas tinggi.	ML	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.5.
	Lempung anorganik, lempung berlanau, lempung berpasir plastisitas rendah.	CL	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.5.
	Lanau organik dan lempung berlanau organik plastisitas rendah.	OL	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.5.
Lanau dan lempung (batas cair > 50 %)	Lanau anorganik plastisitas tinggi.	MH	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.5.
	Lempung anorganik plastisitas tinggi.	CH	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.5.
	Lempung organik plastisitas tinggi.	OH	Gunakan grafik plastisitas pada Gambar 2.2.
Tanah organik	Gambut dan tanah berkadar organik tinggi lainnya.	Pt	

Pada USCS mengklasifikasikan tanah lebih kecil dari 0,06 mm sebanyak lebih dari 50% termasuk kelompok tanah berbutir halus, sedangkan pada tanah yang memiliki ukuran berbutir lebih kecil dari 0,06 mm dengan jumlah kurang dari 50% termasuk kelompok tanah berbutir kasar.

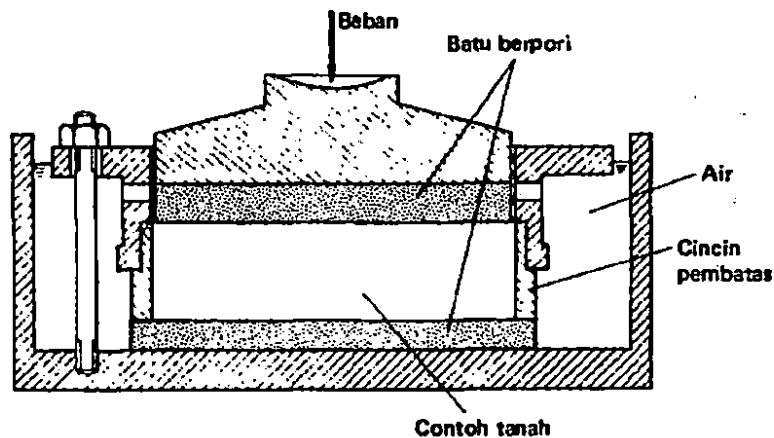
I. Pengujian Konsolidasi

Pengujian konsolidasi satu dimensi (*one-dimensional consolidation*) biasanya dilakukan di laboratorium dengan alat *Oedometer* atau *Konsolidometer*. Gambar skematik alat ini dapat dilihat pada gambar 2.5. 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 pori tembus air.

Parameter konsolidasi dapat ditentukan dari uji konsolidasi. Tes konvensional atau tes *oedometer*, dikenal sebagai 1 dimensi uji konsolidasi didasarkan pada asumsi sebagai berikut :

1. Lapisan tanah lempung jenuh air (*saturated*).
2. Tanah yang lateral terbatas.
3. Aliran air satu dimensi.
4. Permeabilitas tanah adalah konstan.
5. Proses ini dapat diukur dengan *oedometer* .

Adapun sketsa alat *oedometer* dapat dilihat dari gambar 2.6. berikut.

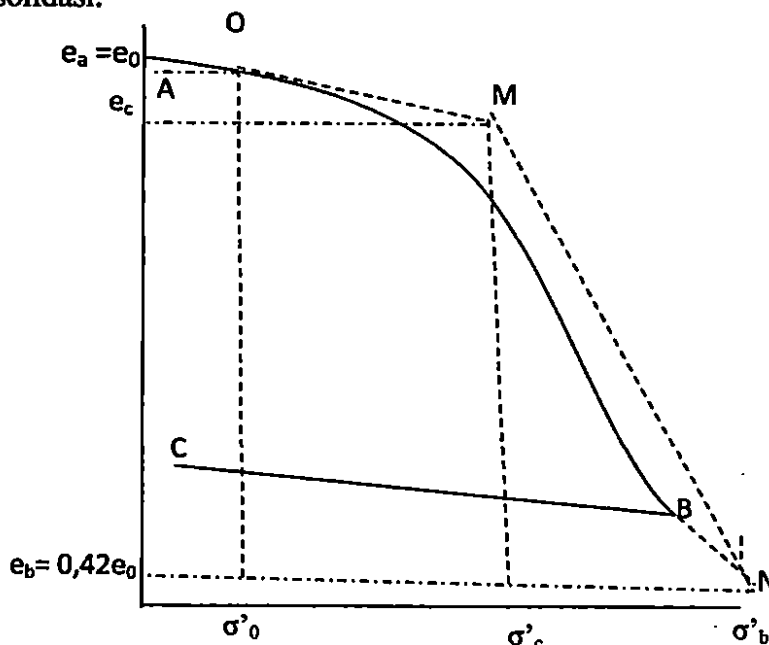


Gambar 2.7. Gambar Melintang Alat *Oedometer*

Beban diterapkan pada benda uji tersebut, dan penurunan diukur dengan arloji pembacaan. Beban diterapkan dalam periode 24 jam, dengan benda uji tetap terendam air. Penambahan beban secara periodik diterapkan pada contoh tanahnya. Penambahan beban adalah dua kali beban sebelumnya, dengan urutan

besaran beban 0,5; 1; 2; 4; 8 kg/cm². Untuk tiap penambahan beban, deformasi dan waktunya dicatat.

Untuk tiap penambahan beban selama pengujiannya, tegangan yang terjadi adalah tegangan efektif. Bila berat jenis tanah, dimensi awal dan penurunan pada tiap pembebanan dicatat, maka nilai angka pori e dapat diperoleh. Selanjutnya hubungan antara tegangan efektif dan angka pori e diplot pada grafik semi logaritmis pada gambar 2.8. Kurva A-B-C adalah kurva konsolidasi laboratorium dan garis O-M-N dianggap kurva konsolidasi yang sebenarnya di lapangan. Tekanan σ'_o adalah tegangan efektif vertikal di lapangan dan σ'_c adalah tegangan prakonsolidasi.



Gambar 2.8 Garis Konsolidasi (Wesley, 2010)

J. Koefisien dan Indeks Konsolidasi

Koefisien dan indeks konsolidasi adalah nilai yang diperoleh dari grafik hubungan tekanan dan angka pori pada pengujian konsolidasi. Koefisien konsolidasi ada 2 macam, yaitu koefisien pemampatan (a_v) dan koefisien perubahan volume (m_v). Sedangkan indeks konsolidasi yaitu indeks pemampatan (C_c) dan indeks pengembangan (C_r). Menentukan koefisien dan indeks konsolidasi dapat dilihat dibawah ini.

1. Koefisien Pemampatan (a_v) dan Koefisien Perubahan Volume (m_v)

Koefisien pemampatan (a_v) adalah koefesian yang menyatakan kemiringan kurva $e - \sigma'$ pada Gambar 2.8. Kemiringan kurva $e - \sigma'$ (a_v) didefinisikan sebagai :

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan :

e_1 = angka pori pada tegangan σ_1

e_2 = angka pori pada tegangan σ_2

σ_1 = tekanan ke-1 (kg/cm^2)

σ_2 = tekanan ke-2 (kg/cm^2)

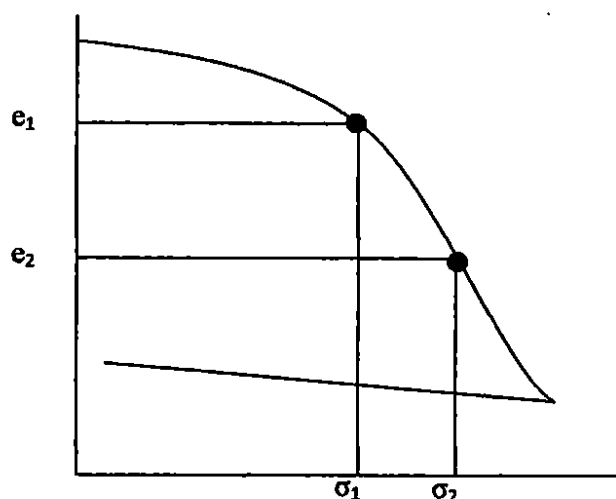
Koefisien perubahan volume (m_v) didefinisikan sebagai perubahan volume persatuan penambahan beban tegangan efektif. Satuan dari m_v adalah kebalikan dari tekanan (cm/kg^2). Nilai m_v untuk tanah tertentu tidak konstan, tetapi tergantung dari besar tegangan yang ditinjau. Karena m_v adalah perubahan volume/satuan penambahan tegangan, maka :

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_1} \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan :

a_v = koefisien pemampatan (cm^2/kg)

e_1 = angka pori pada tegangan σ_1



Gambar 2.9 Hasil Pengujian Konsolidasi (Hardiyatmo, 1994)

2. Indeks Pemampatan (C_c) dan Indeks Pengembangan (C_r)

Indeks pemampatan C_c adalah kemiringan dari bagian lurus grafik e - $\log p'$. Untuk dua titik yang terletak pada bagian lurus dari grafik dalam Gambar 2.9 nilai C_c dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} \dots\dots\dots (2.21)$$

dengan :

C_c = Indeks pemampatan

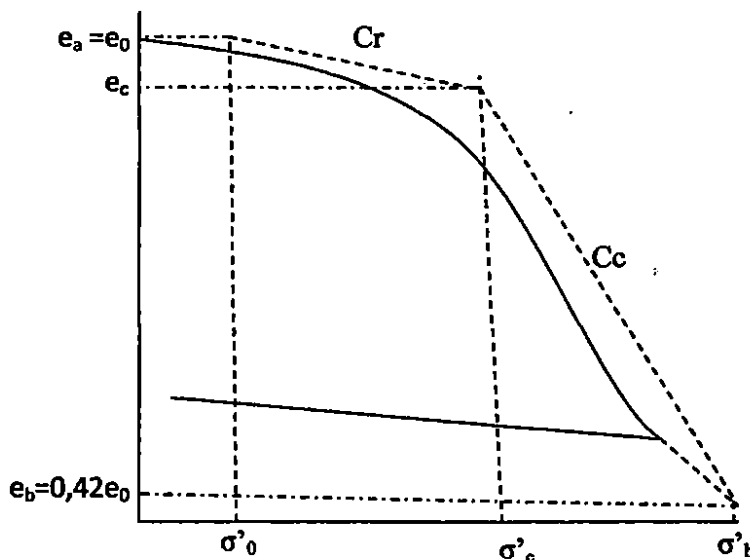
e_1 = Angka pori awal

e_2 = Angka pori akibat penambahan beban

σ_1 = Tegangan akibat penambahan beban (kg/cm^2)

σ_2 = Tegangan efektif maksimum pada masa lampau (kg/cm^2)

Indeks pengembangan (C_r) adalah kemiringan curva pelepasan beban dan pembebanan kembali pada grafik e - $\log p$, dari Gambar 2.9. Pada lempung OC, nilai C_r dapat dicari dengan cara yang sama dengan C_c . Dan biasanya nilai $C_r < C_c$.



Gambar 2.10 Indeks C_c dan C_r (Hardiyatmo, 1994)

Untuk konsolidasi 1 dimensi dengan drainase vertikal, tingkat konsolidasi U_v adalah fungsi dari faktor waktu (T_v) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.22 mana:

$$T_v = \frac{c_v \times t}{H_{dr}^2} \dots \dots \dots (2.22)$$

dimana :

c_v = koefisien konsolidasi (cm^2/detik)

t = waktu (tahun)

H_{dr} = panjang lintasan drainase (cm)

Koefisien konsolidasi merupakan salah satu parameter konsolidasi dari tes konsolidasi untuk memperkirakan waktu saat konsolidasi. Hal ini dapat diperoleh dari tes *oedometer* pada tegangan efektif sama dengan yang beban di bawah timbunan. Koefisien konsolidasi vertikal menurun tajam selama kenaikan konsolidasi.

K. Metode Akar Waktu Menurut Taylor

Metode akar waktu menurut Taylor digunakan untuk menentukan nilai c_v dengan menggambar grafik hubungan akar waktu terhadap pembacaan arloji pengukur. Kurva biasanya linier sampai dengan 60% konsolidasi. Kurva ini untuk menentukan derajat konsolidasi $U = 90\%$, dimana disini absis OR akan sama dengan 1,15 kali absis OQ pada Gambar 2.11 . Untuk memperoleh derajat konsolidasi $U = 90\%$ adalah sebagai berikut ;

1. Gambarkan grafik hubungan penurunan vs akar waktu dari data hasil uji konsolidasi.
2. Titik $U = 0\%$ diperoleh dengan memperpanjang garis dari bagian awal kurva yang lurus sehingga memotong ordinat di titik P dan absis dititik Q.
3. Garis lurus digambar dengan absis $OR = 1,15 \times$ absis OQ. Perpotongan PR dengan kurva merupakan titik R90 pada absis. diperoleh $\sqrt{t_{90}}$.
4. T_v untuk konsolidasi $U = 90\%$ adalah 0,848 dan koefisien konsolidasi c_v dinyatakan dengan Persamaan 2.15:

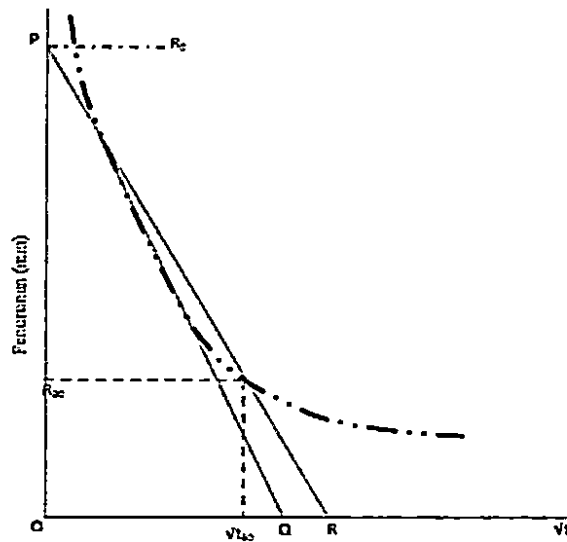
$$c_v = \frac{0,848 \times H_{dr}^2}{t_{90}} \dots \dots \dots (2.23)$$

dimana :

c_v = koefisien konsolidasi (cm^2/detik)

H_t = tinggi rata – rata sampel (cm)

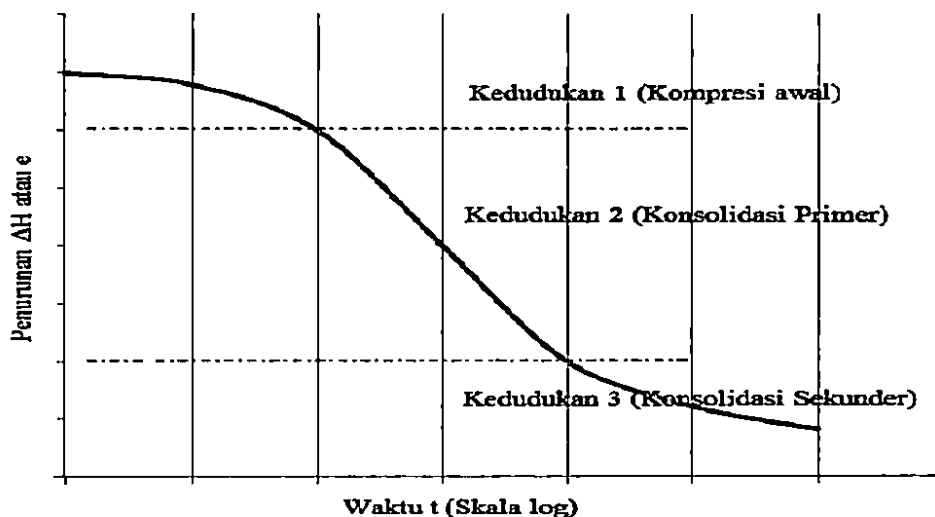
t_{90} = waktu untuk derajat konsolidasi 90% (detik)



Gambar 2.11 Metode akar Waktu

L. Analisis Penurunan Tanah

Pada saat konsolidasi berlangsung, bangunan diatas lapisan tersebut akan mengalami penurunan. Setiap beban yang diberikan dapat digambarkan hubungan antara perubahan benda uji (penurunan) terhadap waktu seperti Gambar 2.10.



Gamabr 2.12 Hubungan antara penurunan dan waktu (Mitchell, 1976)

1. Penurunan Segera (S_e)

Penurunan segera (S_e) atau penurunan elastis yang disebabkan oleh perubahan bentuk elatis dari tanah. Perhitungan ini didasarkan pada Persamaan teori elastisitas, yang didasarkan pada anggapan bahwa tanah terdiri atas bahan elastis yang seragam dengan kedalaman tak hingga.

$$S_e = \Delta\sigma B \left(\frac{1-\mu^2}{E_s} \right) I_p \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan :

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left(m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \dots\dots(2.25)$$

dengan :

- s_e = penurunan segera (cm)
- $\Delta\sigma$ = tekanan yang bekerja (kg/cm^2)
- B = lebar fondasi (cm)
- μ = angka poisson tanah (*poisson's ratio*)
- E_s = modulus elastisitas tanah (kg/cm^2)
- I_p = faktor pengaruh (tak -- berdimensi)

2. Penurunan Primer (S_c)

a. Menggunakan nilai C_c dan C_r

Berdasarkan jenis tanah lempung dibagi menjadi dua jenis, yaitu tanah lempung terkonsolidasi normal (*normally consolidated = NC*) dan tanah lempung terkonsolidasi berlebih (*overconsolidated = OC*). Menentukan konsolidasi primer dibagi menjadi dua, yaitu :

a) Tanah lempung *NC*

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right] \dots\dots\dots (2.26)$$

b) Tanah lempung *OC*

a) Untuk $\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$:

$$S_c = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right] \dots\dots\dots (2.27)$$

b) Untuk $\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$:

$$S_c = \frac{C_r H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right] \dots (2.28)$$

dengan :

- S_c = Penurunan primer (cm)
- C_c = Indek pemampatan
- C_r = Indek pengembangan
- H = Tebal tanah (cm)
- e_0 = Angka pori awal
- σ'_0 = Tekanan *overburden* (kg/cm^2)
- $\Delta\sigma'_0$ = Penambahan tekanan (kg/cm^2)
- σ'_c = Tekanan prakonsolidasi

b. Menggunakan nilai m_v dan a_v

Berdasarkan koefisien pemampatan tanah dengan volume V_1 sehingga volumenya menjadi V_2 , dan tanah memampatnya tanah dianggap hanya sebagai akibat pengurangan rongga pori.

$$S_c = m_v \Delta\sigma H \dots \dots \dots (2.29)$$

dengan :

- m_v = perubahan volume (cm^2/kg)
- $\Delta\sigma$ = penambahan tegangan (kg/cm^2)
- H = tebal lapisan (cm)