

# ANALISIS PENURUNAN TIMBUNAN BADAN JALAN PADA TANAH LEMPUNG LUNAK

Nyoman Suaryana

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Jl. A.H. Nasution 264 Bandung

## **RINGKASAN**

*Beberapa tahun yang baru lewat teori yang telah dikenal baik yang dikembangkan oleh Terzaghi, dalam bentuk dasar maupun pengembangannya selalu digunakan untuk menganalisis kecepatan penurunan tanah dan disipasi tegangan air pori. Dalam studi belum lama ini, diketahui bahwa keberhasilan dalam memperkirakan besar dan kecepatan penurunan dengan menggunakan teori Terzaghi untuk beberapa studi kasus bervariasi dari sangat baik sampai jelek. Ketidaktepatan ini dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan beberapa faktor seperti hubungan yang tidak linier antara log tegangan efektif dan angka pori, dan perubahan dalam permeabilitas dan kompresibilitas.*

*Dalam kajian ini telah dikembangkan program komputer untuk menganalisis konsolidasi dua arah dari tanah lunak yang berlapis yang memikul beban timbunan, teori yang digunakan adalah : 1) menggunakan teori Terzaghi-Rendulic, dan 2) menggunakan teori non-linear. Data pengujian yang digunakan adalah laporan percobaan timbunan di Juru, Muar Flats Malaysia dan Tickton, Inggris.*

*Hasil yang diperoleh menunjukkan perkiraan penurunan dan disipasi tegangan air pori dengan teori non-linear lebih mendekati kenyataan lapangan dibandingkan dengan teori Terzaghi-Rendulic.*

**Kata Kunci** : konsolidasi tanah lunak, teori non-linear, teori Terzaghi-Rendulic

## **SUMMARY**

*Over the past many years the well-known theory of consolidation developed by Terzaghi, directly or in extended form, has been usually applied to analyze the time rate of settlement and excess pore water pressure dissipation arising from loading a soft soil. In recent reviews, it has been observed that success in predicting magnitudes and rate of settlement using Terzaghi's theory from different field cases ranging from excellent to poor. The anomalous behavior can be explained in terms of such factors as the non-linear relationship between void-ratio and logarithm of effective stress, and changes in permeability and compressibility as load increases.*

*In this study, a computer program has been developed to consider two dimensional consolidation of stratified cohesive soils under embankment loading, the theory used : i.e. 1) Terzaghi-Rendulic theory and 2) non linear theory. Three case histories were presented, i.e. Trial embankment at Juru, Malaysia, Muar Flats, Malaysia and Tickton, UK.*

*The results indicate that predicted values using non-linear theory for both settlement and pore water pressure dissipation close to the field measured values comparing to those using the Terzaghi-Rendulic theory.*

**Keywords :** *soft clay consolidation, non-linear theory, Terzaghi-Rendulic theory*

## **PENDAHULUAN**

Fenomena konsolidasi pada tanah lempung lunak telah dipelajari oleh banyak ahli selama bertahun-tahun. Pada kebanyakan studi, kecepatan waktu penurunan dan disipasi tegangan air pori selalu dianalisis dengan menggunakan teori Terzaghi, baik dalam bentuk dasar maupun pengembangannya. Teori tersebut mempunyai beberapa asumsi yaitu : tanah

homogen dan jenuh sempurna, berlaku hukum Darcy, kompresi dan aliran dalam satu dimensi (vertikal), ada hubungan yang tunggal antara angka pori (*void ratio*) dan tegangan efektif yang tidak tergantung waktu, koefisien konsolidasi dan koefisien kompresibilitas dianggap tetap konstan selama proses konsolidasi.

Kenyataannya, keberhasilan dalam perkiraan besarnya dan

kecepatan penurunan konsolidasi dengan menggunakan teori tersebut untuk kasus lapangan yang berbeda bervariasi dari baik sekali sampai kurang baik. Kebanyakan dari hasil yang kurang baik tersebut dapat dijelaskan dengan memasukkan beberapa faktor seperti lokasi dan keefektifan lapisan drainase, perbedaan antara asumsi dan kenyataan jejak tegangan (*stress paths*), hubungan yang tidak linier antara tegangan dan angka pori, perubahan permeabilitas akibat berubahnya angka pori dan evaluasi yang tidak tepat pada sejarah tegangannya (MITCHELL, 1986).

Teori konsolidasi untuk memperkirakan besarnya dan kecepatan disipasi tegangan air pori dengan memasukkan beberapa faktor seperti, pembebanan yang tergantung waktu, hubungan yang tidak linier antara angka pori dan log tegangan efektif, pengaruh dari tegangan prakonsolidasi, perubahan permeabilitas dan kompresibilitas, dan perubahan struktur tanah di bawah beban tetap (*creep*) telah dikembangkan oleh TSE (1985) dan disebut teori non-linier.

## STUDI PUSTAKA

### Teori Konsolidasi Terzaghi-Rendulic

Dalam praktek, analisis dari kecepatan penurunan di bawah kondisi satu dimensi hampir selalu dilakukan dengan menggunakan teori konsolidasi Terzaghi. Persamaan dasar Terzaghi adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

keterangan :

$u$  = tegangan air pori

$t$  = waktu

$z$  = kedalaman

$C_v$  = koefisien konsolidasi

Pada kondisi permeabilitas arah horisontal relatif besar dibandingkan dengan arah vertikal, maka kecepatan penurunan akan lebih cepat dari yang diperkirakan. Untuk mengakomodasi hal tersebut maka Teori Terzaghi (1925) dan Rendulic (1937) dikembangkan menjadi konsolidasi dua dimensi, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + C_h \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2)$$

keterangan :

$C_v$  = koefisien konsolidasi vertikal dengan drainase arah vertikal

$C_h$  = koefisien konsolidasi vertikal dengan drainase arah horisontal

### Teori Konsolidasi Non-Linier

Selama proses konsolidasi struktur lempung berubah karena meningkatnya tegangan efektif, dan kemudian terjadi penyesuaian sendiri pada struktur lempung tersebut menjadi lebih stabil di bawah aplikasi tegangan yang baru. Proses penyesuaian struktur di bawah beban tetap sering disebut dengan istilah rangkak (*creep*). Pengaruh dari penyesuaian kecepatan regangan dan ketergantungannya dengan waktu dapat didekati dengan persamaan seperti berikut (TSE, 1985) :

$$\frac{du}{dt} = \left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'}\right)_t \frac{d\sigma'}{dt} + \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\sigma'} \dots \dots (3)$$

Indeks pada kurung tutup berarti variabel tersebut tetap konstan selama proses diferensiasi. Bagian pertama pada sisi kanan persamaan mewakili perubahan volume selama proses konsolidasi. Bagian kedua

mewakili rangkak dan perubahan struktur dihubungkan dengan waktu. Dalam teori Terzaghi bagian pertama  $(\partial e / \partial \sigma')_t$ , diasumsikan konstan, dan bagian kedua  $(\partial e / \partial t)_{\sigma'}$ , sama dengan nol.

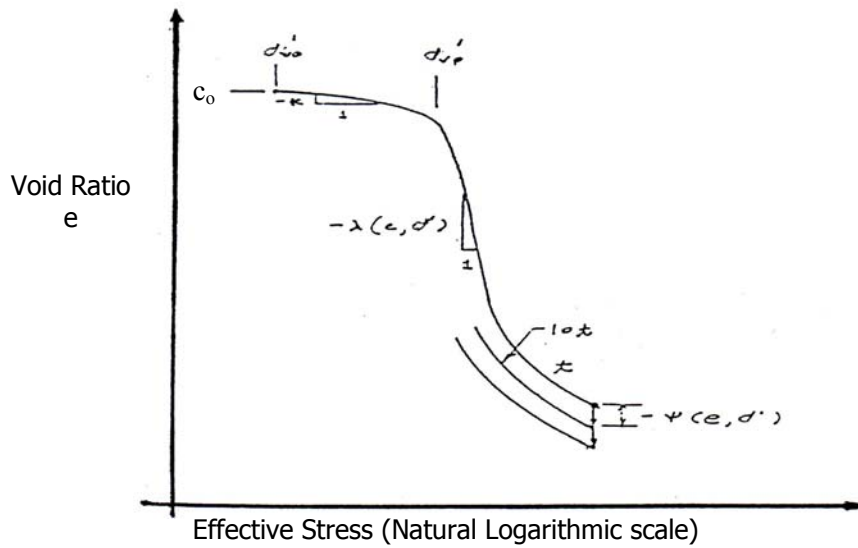
Bagian pertama pada sisi kanan dari persamaan tersebut dapat diturunkan untuk dua kondisi yaitu, *over*konsolidasi dan konsolidasi normal. Untuk lempung konsolidasi normal kemiringan dari kurva  $e - \ln \sigma'_v$  dilambangkan dengan  $\lambda$  (indek kompresi=0,434 Cc). Untuk lempung *over*konsolidasi diasumsikan rekompresi terjadi pada garis lurus dari kurva  $e - \ln \sigma'_v$  dengan kemiringan  $\kappa$  (indeks kompresi = 0,434 Cr). Lihat gambar 1 Berdasarkan hal tersebut bagian pertama dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\left(\frac{\partial e}{\partial \sigma'}\right)_t = \frac{I_c}{\sigma'_v} \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

$I_c = \lambda$  (indek kompresi=0,434 Cc) untuk lempung konsolidasi normal dan

$I_c = \kappa$  (indeks kompresi = 0,434 Cr) untuk lempung *over*konsolidasi.



**Gambar 1.** Hubungan Tegangan Efektif-Angka Pori-Waktu

Bagian kedua dapat diekspresikan dengan menggunakan koefisien sekunder  $\psi$ , dimana merupakan fungsi dari tegangan efektif dan angka pori. Berdasarkan persamaan Taylor  $e = -\psi \ln(t)$ , dapat diturunkan :

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_{\sigma'} = -\frac{\psi}{t} \dots\dots\dots(5)$$

Rangkaian selama proses konsolidasi menyebabkan lempung berperilaku seperti jika terjadi *overkonsolidasi*. Perilaku disipasi tegangan air pori dan tegangan geser lempung yang bersangkutan dapat menjadi sangat berbeda dari perilaku untuk lempung konsolidasi normal. Untuk konsolidasi primer

dianggap besarnya kompresi yang berhubungan dengan waktu selama konsolidasi primer sebagai fungsi dari derajat kompresi,  $\beta$  (MESRI & ROKHSAR, 1974).

Karena itu, persamaan konsolidasi untuk lempung dalam bentuk hubungan antara angka pori-tegangan efektif-waktu dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$\frac{de}{dt} = -\left[\frac{Ic}{\sigma'_v} \frac{d\sigma'_v}{dt} + \frac{\beta\psi}{t}\right] \dots\dots\dots(6)$$

### Distribusi Tegangan Akibat Beban Timbunan

Dalam praktek, pembangunan timbunan diselesaikan dalam

jangka waktu tertentu secara menerus. Pembebanan ini didekati dengan metoda numerik dengan menganggap pembebanan dilaksanakan secara bertahap.

**Penurunan (*settlement*)**

Penurunan adalah perpindahan permukaan arah vertikal yang berhubungan dengan perubahan volume pada tahap proses konsolidasi yang disebabkan oleh penerapan suatu beban. Penurunan total meliputi tiga proses yaitu :

$$S_t = S_i + S_p + S_s \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

- S<sub>t</sub> = penurunan total;
- S<sub>i</sub> = penurunan sesaat;
- S<sub>p</sub> = penurunan primer;
- S<sub>s</sub> = penurunan sekunder.

Dari tiga jenis penurunan tersebut, penurunan primer biasanya yang terbesar, dan umumnya paling penting dari ketiganya.

Dalam praktek untuk memperkirakan penurunan sesaat biasanya digunakan teori elastis, meskipun kenyataanya tidak benar-benar mengikuti perilaku elastis. Pendekatan persamaan dikembangkan oleh DAS (1985), yaitu :

$$S_i = \epsilon_z \cdot H; \dots\dots\dots (8)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \dots\dots (9)$$

Keterangan :

- H = Ketebalan lapisan tanah
- $\epsilon_z$  = regangan vertikal di z
- E = modulus elastisitas tanah
- $\nu$  = angka poisson
- $\sigma_{x,y,z}$  = tegangan pada arah x, y, z

Penurunan primer adalah pemampatan yang terjadi bersamaan dengan peningkatan tegangan efektif karena adanya penurunan tegangan air pori tiap waktu. Penurunan primer dapat dihitung dengan :

$$S_p = \Delta e_p \cdot H / (1 + e_o) \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

- $\Delta e_p$  = perubahan angka pori pada akhir konsolidasi primer,
- $e_o$  = angka pori awal dan
- H = ketebalan lapisan tanah.

Persamaan pendekatan untuk menghitung penurunan sekunder adalah seperti yang diusulkan BUISMAN (1936), yaitu :

$$S_s = H \cdot C_s \cdot \text{Log} (t/t_p) \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan :

- S<sub>s</sub> = penurunan sekunder pada waktu t,

$H$  = ketebalan lapisan tanah,  
 $C_s$  = koefisien kompresi sekunder  
 $t_p$  = waktu 100 % konsolidasi primer.

## METODOLOGI

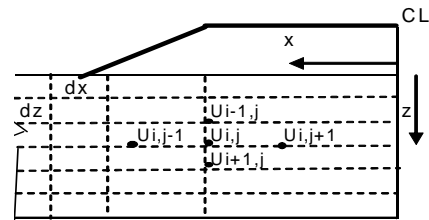
Dalam kajian ini dilaksanakan pembuatan program komputer untuk menghitung disipasi tegangan air pori dan penurunan. Pendekatan yang digunakan berdasarkan dua teori, yaitu Teori Terzaghi-Rendulic dan Non-linier. Dua teori tersebut selanjutnya dibandingkan hasilnya dengan data aktual di lapangan dari 3 lokasi timbunan percobaan.

## HASIL KAJIAN

### Pengembangan Program Komputer

Untuk menentukan disipasi tegangan air pori digunakan metoda ADI (*Alternating Direction Implicit*) yang dikembangkan oleh Peaceman dan Rachford (MURRAY, 1971). Metoda ini didasarkan pada penggantian satu dari turunan derajat dua, menggunakan pendekatan implisit dalam bentuk nilai tegangan air pori yang tidak diketahui pada waktu  $(n+1)$ . Sedangkan turunan

kedua yang lain dalam bentuk nilai tegangan air pori yang sudah diketahui. Dengan demikian tiap vektor baris tegangan air pori, seperti diperlihatkan pada Gambar 1 dengan  $i$  dan  $j$  sebagai indeks yang menunjukkan arah vertikal dan horisontal dapat diselesaikan.



Gambar 2. Analisa Tegangan Pori

Metoda ADI memenuhi tiga kriteria yang dibutuhkan pada metoda beda hingga (REMSON et al, 1971). Kriteria tersebut adalah; konvergen dan selalu stabil; mempunyai ketelitian derajat dua dalam ruang dan waktu; membentuk persamaan dengan sistem tridiagonal.

Dengan metoda ADI tersebut, penyelesaian persamaan kontinuitas dua dimensi untuk lapisan homogen yang diperoleh berdasar prinsip konservasi masa dan hukum Darcy dapat dibuat seperti berikut ini.

$$\frac{de}{dt} = \frac{1+eo}{\gamma_w} \left[ k_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] \dots (12)$$

Dengan substitusi hubungan permeabilitas – angka pori (MESRI & TAVENAS, 1983),

$$e_o - e = C_k \log(k_o / k) \dots\dots\dots(13)$$

atau

$$e_o - e = \phi \ln(k_o / k) \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan :  $\phi = 0,434C_k$

Selanjutnya dapat dituliskan

$$k_v = \left[ k_{vo} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \right] \dots\dots\dots (15)$$

dan

$$k_h = \left[ k_{ho} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \right] \dots\dots\dots (16)$$

Persamaan kontinuitas di atas menjadi.

$$\frac{de}{dt} = \frac{1 + e_o}{\gamma_w} \left[ k_{vo} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A \right]$$

$$A = \left[ k_{ho} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right]$$

..... (17)

Untuk selang waktu antara n dan (n+1) menjadi :

$$\frac{de}{dt} = \frac{1 + e_o}{\gamma_w} \left[ k_{vo} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \frac{u_z}{\Delta z^2} + A \right]$$

$$A = \left[ k_{ho} \exp\left(\frac{e - e_o}{\phi}\right) \frac{u_x}{\Delta x^2} \right]$$

..... (18)

$$u_z = u_{i-1,j,n} - 2u_{i,j,n} + u_{i+1,j,n}$$

$$u_z = u_{i,j-1,n+1} - 2u_{i,j,n+1} + u_{i,j+1,n+1}$$

Jika di ambil :

$$rx = k_h .dt / \Delta x^2$$

$$rz = k_v .dt / \Delta z^2$$

$$re1 = e_{i,j,n+1} \cdot \gamma_w / ((1 + e_o) u_{i-1,j,n} \dots$$

$$re2 = e_{i,j,n} \cdot \gamma_w / ((1 + e_o) u_{i,j-1,n+1} \dots$$

Dengan substitusi persamaan rx, rz, re1 dan re2 ke dalam persamaan kontinuitas di atas dan meletakkan nilai tegangan air pori yang diketahui di sebelah kiri, maka persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$re2_{i,j,n} + rz u_{i-1,j,n} - 2rz u_{i,j,n} + rz u_{i+1,j,n} = -rx u_{i,j-1,n+1} + (re1 + 2rx) u_{i,j,n+1} - rx u_{i,j+1,n+1} \dots\dots\dots (19)$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dalam bentuk matriks, yaitu :

$$[A].[x]=[f] \dots\dots\dots (20)$$

Keterangan :

[A] adalah koefisien matriks, [x] adalah matriks kolom dengan elemen tegangan air pori yang tidak diketahui, dan [f] adalah matriks kolom nilai tegangan air pori yang diketahui. Nilai matriks



[A],[x] dan [f] ditunjukkan sebagai berikut :

$$[A] = \begin{bmatrix} re1+2rx & -rx & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -rx & re1+2rx & -rx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & re1+2rx & 0 & 0 & 0 \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & -rx & re1+2rx & -rx \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -rx & rx^n \end{bmatrix}$$

$$[x] = \begin{bmatrix} U_{i,1,n+1} \\ U_{i,2,n+1} \\ U_{i,3,n+1} \\ \vdots \\ U_{i,jb-1,n+1} \\ U_{i,jb,n+1} \end{bmatrix}$$

$$[f] = \begin{bmatrix} re2_{l,1,n} + rz_{.u i-1,1,n} - 2 rz_{.u l,1,n} + rz_{.u i+1,1,n} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ re2_{l,jb,n} + rz_{.u i-1,jb,n} - 2 rz_{.u l,jb,n} + rz_{.u i+1,jb,n} \end{bmatrix}$$

Dalam penerapan persamaan di atas, diperlukan suatu persamaan tambahan untuk memperhitungkan kondisi pada batas-batas dalam. Lokasi dimana timbul situasi khusus seperti itu adalah pada :

- a. batas dalam arah horizontal yang memisahkan dua lapisan dengan sifat tanah yang berbeda. Untuk tegangan air pori yang alirannya arah horisontal pada lapisan p dan q, koefisien permeabilitas yang digunakan adalah

$$K_h = (K_{hp} + K_{hq}) / 2 \dots\dots\dots(21)$$

- b. Batas pemantulan, pada sumbu vertikal simetris di bawah titik pusat daerah pembebanan.

$$u_{i,j-1,n} = u_{i,j+1,n} \dots\dots\dots(22)$$

Angka pori tanah merupakan fungsi dari tegangan efektif dan waktu, dan pada kondisi luar konstan maka perubahan tegangan efektif tiap waktu sama dengan kecepatan disipasi tegangan air pori. Persamaan disipasi tegangan air pori menjadi sebagai berikut :

$$(e_{i,j,n} - e_{i,j,n+1}) = \frac{Ic}{\sigma_v'} (u_{i,j,n} - u_{i,j,n+1}) \dots\dots\dots(23)$$

Keterangan :

$$Ic = 0,434 Cc \text{ untuk } \sigma_v' \geq \sigma_{vp}'$$

$$Ic = 0,434 Cr \text{ untuk } \sigma_v' < \sigma_{vp}'$$

Program komputer dibuat dengan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 6.0 dan terdiri dari satu program utama dan beberapa sub-program atau unit, yang dapat di *compile* sendiri-sendiri. Dalam uni-unit tersebut terdapat prosedur dan fungsi.

Untuk menguji program komputer yang telah di buat, maka di uji coba dengan menyelesaikan problem konsolidasi

dua dimensi pada tanah seragam. Hasil yang diperoleh menunjukkan program berjalan baik.

### Data Percobaan Timbunan

Untuk membandingkan hasil perkiraan disipasi tegangan air pori dan penurunan dengan kondisi aktual di lapangan, maka diambil 3 seksi percobaan, yaitu di Juru, Muar Flats dan Tickton Yorkshire. Data aktual di ambil dari beberapa paper yang telah dipublikasikan. Data timbunan percobaan tersebut adalah seperti diuraikan berikut ini.

Juru, Malaysia; percobaan timbunan dilaksanakan di atas tanah lempung pantai lunak yang mempunyai tebal 13,5 m dan terletak 10 km dari Butterworth Penang, di bagian utara pantai barat Peninsular Malaysia. Tanah terdiri dari tanah abu-abu kecoklatan yang sangat lunak dan tanah lempung kelanauan yang lunak. Di bawah lapisan mampu mampat tersebut terdapat lapisan pasir yang mempunyai kepadatan kurang sampai sedang.

Berdasarkan data-data yang ada, lempung lunak di lokasi ini dibagi menjadi lima lapisan yang dianggap seragam, dan muka air tanah diperkirakan berada di permukaan. Data masukan untuk

analisis numerik dalam kasus ini diperlihatkan pada Tabel 1.

Kondisi pembebanan dipisahkan menjadi 6 tahap, tiap tahap mewakili pembebanan yang menerus. Selang waktu diambil 10 hari. Tinggi total timbunan 4 meter.

**Tabel 1.**  
Parameter Masukan Untuk Juru,  
Malaysia

LAPISAN	KEDALAMAN (Meter)	DATA TANAH
1	0,0 - 0,4	Unit Weight = 15,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 5 Mpa Initial Cv = 15 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 30 m <sup>2</sup> /year Pc = 100 KPa Cc = 0,46 Cr = 0,01 Cs = 0,001 eo = 1,29
2	0,4 - 4,0	Unit Weight = 13,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 9 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 18 m <sup>2</sup> /year Pc = 33 KPa Cc = 1,40 Cr = 0,01 Cs = 0,01 eo = 3,00
3	4,0 - 7,0	Unit Weight = 13,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 9 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 18 m <sup>2</sup> /year Pc = 47 KPa Cc = 2,40 Cr = 0,01 Cs = 0,02 eo = 3,00
4	7,0 - 10,0	Unit Weight = 13,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 9 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 18 m <sup>2</sup> /year Pc = 70 KPa Cc = 2,00 Cr = 0,01 Cs = 0,02 eo = 3,00
5	10,0 - 13,5	Unit Weight = 23,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 9 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 18 m <sup>2</sup> /year Pc = 90 KPa Cc = 2,40 Cr = 0,01 Cs = 0,02 eo = 3,00

Muar Flats, Malaysia; Tanah dasar terdiri dari lapisan permukaan yang mengalami proses keausan akibat perubahan cuaca dengan ketebalan sekitar 2 m, di bawah lapisan ini ditemukan tanah lempung yang sangat lunak dengan ketebalan 17,5 meter. Pada seksi ini pembangunan timbunan diselesaikan dalam waktu sekitar 5 bulan dengan total tinggi timbunan 6 meter.

Berdasarkan pada data penyelidikan lapangan, lempung lunak dimodelkan menjadi 4 lapisan yang dianggap homogen. Sifat-sifat tanah untuk data masukan diperlihatkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.**  
Parameter Masukan Untuk Muar Flats, Malaysia

LAPISAN	KEDALAMAN (Meter)	DATA TANAH	
1	0,0 - 2,0	Unit Weight = 15,0 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 5 Mpa Initial Cv = 25 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 50 m <sup>2</sup> /year Pc = 110 KPa	Cc = 0,90 Cr = 0,01 Cs = 0,001 eo = 2,00
2	2,0 - 5,0	Unit Weight = 14,0 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 10 Initial Ch = 20 m <sup>2</sup> /year Pc = 45 KPa	Cc = 2,20 Cr = 0,01 Cs = 0,001 eo = 2,60
3	5,0 - 8,0	Unit Weight = 14,0 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 6 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 12 m <sup>2</sup> /year Pc = 50 KPa	Cc = 1,60 Cr = 0,01 Cs = 0,001 eo = 2,60
4	8,0 - 17,5	Unit Weight = 15,7 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 2 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 4 m <sup>2</sup> /year Pc = 100 KPa	Cc = 1,10 Cr = 0,01 Cs = 0,001 eo = 1,70

Tickton, Yorkshire Uk; Kondisi tanah di lokasi terdiri dari lapisan alluvium mampu mampat setebal 7,5 meter dan di atasnya terdapat lapisan kapur. Lapisan alluvium tersebut terdiri dari beberapa lapisan yaitu; lapisan atas, lempung kecoklatan setebal 1,4 meter, lempung lunak biru-abu setebal 1,4 meter, dan sisanya setebal 4,5 meter berupa material mampu mampat yang tersusun dari lempung kelanauan hitam abu, berubah menjadi lempung kepasiran coklat abu. Sifat-sifat

tanah untuk analisa numerik diperlihatkan pada Tabel 3. Muka air tanah pada kedalaman 1,4 meter. Tinggi timbunan 6,4 meter, dan untuk analisa di buat dalam empat tahap pembebanan dengan selang setiap 10 hari.

**Tabel 3.**  
Parameter Masukan Untuk Tickton, UK

LAPISAN	KEDALAMAN (Meter)	DATA TANAH	
1	0,0 - 1,4	Unit Weight = 16,1 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 4 Mpa Initial Cv = 11,3 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 11,3 m <sup>2</sup> /year Pc = 60 KPa	Cc = 1,15 Cr = 0,01 Cs = 0,01 eo = 2,60
2	1,4 - 2,8	Unit Weight = 16,1 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 4 Mpa Initial Cv = 28,9 Initial Ch = 28,9 m <sup>2</sup> /year Pc = 50 KPa	Cc = 1,90 Cr = 0,01 Cs = 0,005 eo = 2,60
3	2,8 - 4,6	Unit Weight = 16,1 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 4 Mpa Initial Cv = 65,3 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 65,3 m <sup>2</sup> /year Pc = 55 KPa	Cc = 2,05 Cr = 0,01 Cs = 0,005 eo = 2,60
4	4,6 - 7,3	Unit Weight = 16,1 KN/m <sup>3</sup> Modulus E = 3 Mpa Initial Cv = 113,6 m <sup>2</sup> /year Initial Ch = 113,6 m <sup>2</sup> /year Pc = 70 KPa	Cc = 0,80 Cr = 0,01 Cs = 0,002 eo = 3,00

## Hasil Analisa

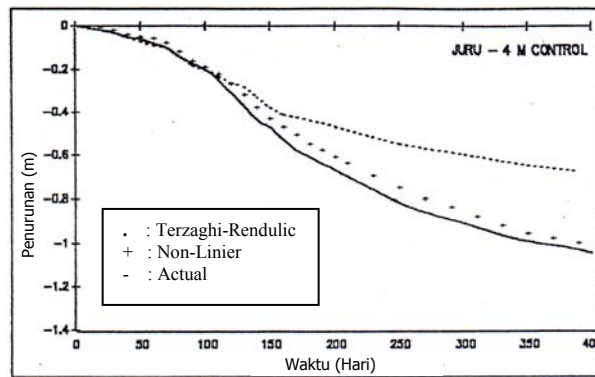
Hasil dari analisa numerik dipresentasikan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8, memperlihatkan perbedaan hasil antara teori Terzaghi-Rendulic dan Non Linear.

Pada percobaan timbunan di Juru dan Muar Flats hasil analisis dengan menggunakan teori Non Linear dalam jangka panjang terlihat lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan dengan teori Terzaghi-Rendulic.

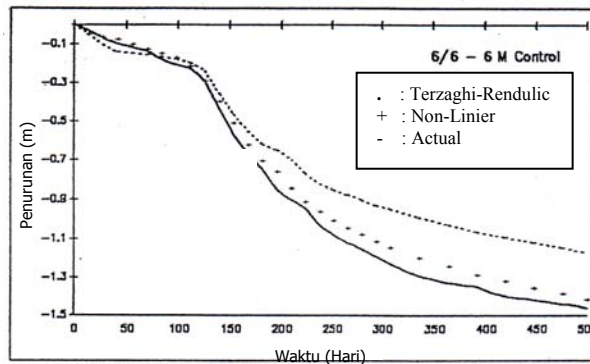
Perbedaan tersebut diperkirakan karena adanya peningkatan koefisien konsolidasi diakibatkan oleh meningkatnya tegangan efektif selama penempatan timbunan, dan menurun sebagai fungsi dari penurunan permeabilitas. Dalam teori Terzaghi-Rendulic koefisien konsolidasi ini dianggap konstan.

Pada percobaan timbunan di Tickton hasil analisis penurunan kedua teori ini mendekati kenyataan di lapangan. Dalam

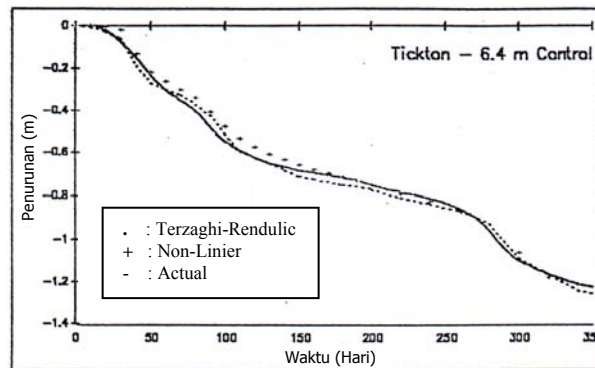
teori Non Linear, seperti dibahas sebelumnya, koefisien konsolidasi meningkat sebagai peningkatan tegangan aktif, tetapi dalam kasus ini karena regangan yang terjadi kecil, dalam waktu yang singkat koefisien konsolidasi kembali mengecil ke angka semula (konstan). Prilaku ini dapat teramati dengan jelas pada prilaku tegangan air pori dimana kecepatan disipasi besar pada awalnya dan mengecil dalam waktu singkat.



Gambar 3. Penurunan Aktual dengan Prediksi, JURU



Gambar 4. Penurunan Aktual dengan Prediksi, MUAR FLATS



Gambar 5. Penurunan Aktual dengan Prediksi, TICKTON

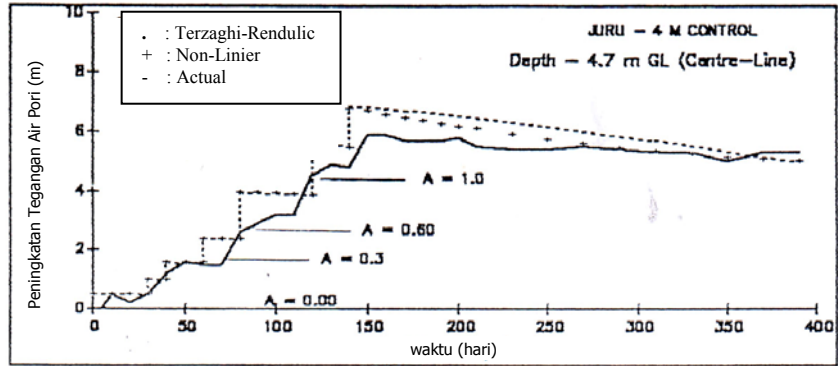
Untuk menganalisa pengaruh perubahan struktur yang diakibatkan oleh rangkakan (*creep*) pada perilaku tegangan pori dapat dilihat pada persamaan antara angka pori-tegangan efektif-waktu seperti di bahas sebelumnya. Dari persamaan tersebut terdapat tiga kecenderungan yang terjadi, yaitu :

- a. Tegangan air pori akan meningkat, jika penurunan volume yang diakibatkan oleh rangkakan melebihi kecepatan pemampatan yang sebenarnya.
- b. Tegangan air pori tetap konstan, jika kecenderungan untuk mampat yang disebabkan oleh rangkakan sama dengan kecepatan pemampatan sebenarnya.

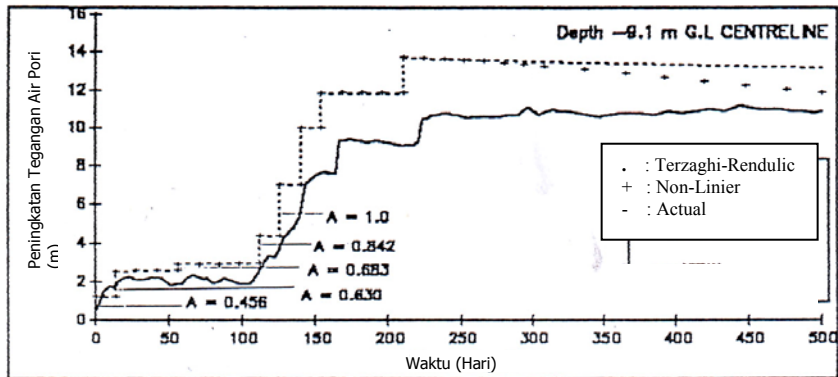
Tegangan air pori akan menurun, jika dua kondisi di atas tidak terjadi.

Kondisi peningkatan air pori (a) terlihat di Muar Flats dimana kandungan organiknya berkisar 10 % – 20 %. Pada lokasi di Juru, tegangan air pori cenderung tetap konstan (b), sementara pada lokasi di Tickton terjadi penurunan air pori.

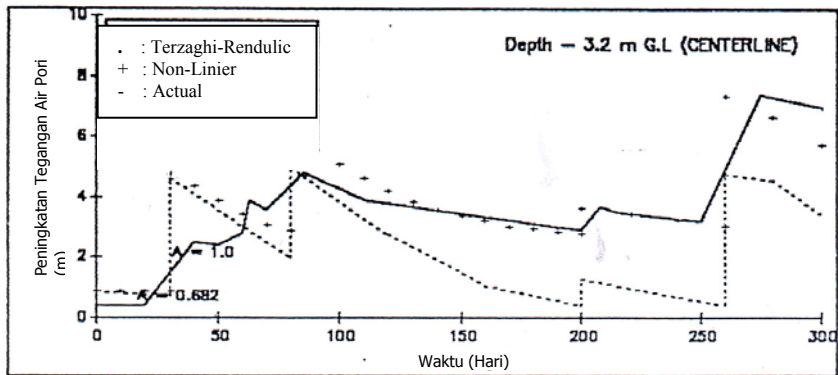
Menurut TSE, 1985 kecenderungan untuk terjadi rangkakan (*creep*) tergantung dari pada besarnya kompresi sekunder dan lempung dengan kandungan organik besar akan mempunyai kompresi sekunder yang besar juga.



Gambar 6. Tegangan Air Pori Aktual dengan Prediksi, JURU



Gambar 7. Tegangan Air Pori Aktual dengan Prediksi, MUAR FLATS



Gambar 8. Tegangan Air Pori Aktual dengan Prediksi, TICKTON

## KESIMPULAN DAN SARAN

1. Dua metoda dengan teori Terzaghi – Rendulic dengan Non Linier untuk memperkirakan konsolidasi dua dimensi pada tanah lempung lunak telah di uji. Perhitungan dengan teori Non Linier menghasilkan perkiraan yang lebih dekat dengan hasil pengamatan lapangan, baik untuk perkiraan penurunan maupun tegangan air pori.
2. Pada teori Non Linier koefisien konsolidasi berubah selama proses konsolidasi sebagai hubungan perubahan tegangan efektif, perubahan indeks permeabilitas dan efek rangkai. Sementara pada teori Terzaghi–Rendulic koefisien konsolidasi dianggap konstan dan tidak ada rangkai.
3. Meskipun efek rangkai tidak dapat dilihat secara jelas pada semua studi kasus, fenomena ini mempengaruhi perilaku tegangan air pori dan memperbesar penurunan konsolidasi. Efeknya terlihat pada tanah lunak yang mempunyai kandungan organik besar.

Berdasarkan pada hasil kajian tersebut, disarankan untuk melakukan pengujian terhadap program tersebut untuk percobaan timbunan yang lain.

## STUDI PUSTAKA

- DAS, B.M., 1985, *Advanced Soil Mechanics, Chapter 7, Consolidation Theory*, Van Nostrand Reinhold Company Ltd, New York
- MESRI, G and ROKHSAR, A (1974) *Theory of Consolidation for Clays*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 100, No. GT8, pp 889-903
- MURRAY, R.T., 1971, *Embankment Constructed of Soft Foundations: settlement Study at Avonmouth*, Departement of the Environment RRL Report Lr 419, Crowthorne, UK
- NYOMAN SUARYANA, (1992), *Consolidation of Soft Soils Takong Account of Structure Change on Pore Pressure and Settlement*, MSc Thesis, Bandung Institute of Technology, Bandung
- TERZAGHI, K (1967), *Soil mechanics in Engineering Practice*, 2<sup>nd</sup> edition, Jhon Wiley & Sons, Inc, New York
- TSE, E.C. (1985), *Influence of Structure Change on Pore Pressure and Deformation Behavior of Soft Clays Under Surface Loading*, PhD. Dissertation, University of California, Berkeley