

# ANALISIS KONSOLIDASI MENGGUNAKAN *PRELOADING* DAN *PREFEBRICATED VERTICAL DRAIN* (PVD) PADA PROYEK PEMBANGUNAN JALAN TOL PEKANBARU - PADANG

<sup>1</sup>Egi Surya Pratama <sup>2</sup>Tika Ermita Wulandari  
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Medan Area  
egisuryap809@gmail.com

---

---

## Abstrak

Permasalahan geoteknik merupakan masalah yang penting, salah satu permasalahan geoteknik adalah penurunan dan daya dukung tanah yang merupakan pondasi dari pembangunan jalan tol Pekanbaru – Padang. Setiap jalan tol direncanakan sedemikian rupa sehingga memiliki beban tertentu dan elevasi tertentu yang terkadang tidak dapat dilayani oleh kondisi tanah eksisting karena karakteristik tanah yang lunak seperti dipembangunan jalan tol Pekanbaru – Padang tepatnya di STA 46+950. Perbaikan tanah dengan cara *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk meningkatkan kekuatan geser tanah lunak. Analisis ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan besar penurunan konsolidasi menggunakan metode elemen hingga dengan pemodelan pada plaxis 2D menggunakan *type mesh* dengan data *settlement* plate STA 46+950 dilapangan, menganalisis dengan membandingkan besar penurunan konsolidasi dengan metode elemen hingga plaxis 2D dengan *type coarse* = 0,864.7 m

**Kata kunci:** Konsolidasi, *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur sering kali dibangun diatas tanah yang lunak yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur bila tidak dilakukan perbaikan. Seperti pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah pada proyek tersebut adalah berlempung lunak. Pemberian beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab – sebab lain dimana faktor – faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan.

Lokasi yang ditinjau pada tugas akhir ini adalah Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang pada STA 46+950 berdasarkan hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah pada proyek tersebut dan menggunakan alat boring log adalah tanah berlempung lunak dan mengandung banyak air. Adapun kondisi tanah yang demikian merupakan kondisi tanah tidak baik jika digunakan sebagai tanah dasar untuk membangun sebuah konstruksi diatasnya, karena penurunan yang akan terjadi cukup besar dan waktu yang dibutuhkan untuk mendisipasi air pori juga sangat lama.

Analisis perhitungan kecepatan penurunan dan waktu pada konsolidasi satu dimensi dilakukan dengan teori klasik Terzaghi

(1925). Perluasan perhitungan dan teori konsolidasi Terzaghi yang sederhana digunakan pada pembebanan time dependent yang mempengaruhi hubungan tegangan dan regangan linear, sistem lapisan dan large strain dimana penyelesaiannya antara lain menggunakan analisa numerik disamping solusi analitik. Kecepatan penurunan konsolidasi satu dimensi dapat diprediksi secara teoritis. Analisa harus memenuhi aturan kesetimbangan, hukum aliran *Darcy* dan kompatibilitas kerangka tanah. Proses konsolidasi pada lempung jenuh dipengaruhi oleh perubahan permeabilitas dan kompresibilitas. Factor ini diabaikan dalam teori Terzaghi sehingga persamaannya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial linier. Dari uraian diatas maka untuk mengatasi masalah tanah lunak pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pekanbaru – Padang digunakan dengan ”Kombinasi Metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan Preloading”

## 2. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 2.1. Timbunan Pada Tanah Lempung Lunak

Tanah liat atau lempung akan menjadi sangat keras dalam keadaan kering, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan (Terzaghi, 1987). Tanah liat atau lempung mempunyai sifat permeabilitas sangat rendah dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Lempung atau tanah liat adalah suatu silika hidro alumunium yang kompleks. Mineral lempung mempunyai daya Tarik menarik individual yang mampu menyerap 100 kali volume partikelnya, ada atau tidaknya air (selama pengeringan ) dapat menghasilkan perubahan volume dan kekuatan yang besar.

Menurut Hardiyatmo (1999), tanah lempung mempunyai sifat sebagai berikut :

- a. Ukuran butir halus, yaitu kurang dari 0,002 mm

- b. Permeabilitas rendah
- c. Kenaikan air kapiler tinggi
- d. Bersifat sangat kohesif
- e. Proses konsolidasi lambat

Timbunan pada lapisan tanah lempung berfungsi sebagai *preloading* yang mempercepat proses konsolidasi. Dengan terdisipasinya air pori pada lapisan tanah tersebut maka akan meningkatkan kuat geser tanah dan kohesi tanah, sehingga lapisan tanah tersebut dapat memikul beban yang besar dan mempengaruhi tinggi timbunan yang akan dipergunakan. Penentuan tinggi timbunan sesuai dengan nilai penurunan agar tanah timbunan tidak dibuang sia – sia dan dapat dijadikan pondasi dari suatu konstruksi. Tinggi timbunan beban preloading ini dihitung berdasarkan dari dukung tanah lempung mula -mula, kemudian dibandingkan dengan tinggi timbunan atau beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yaitu  $H_{cr}$  kritis ( $H_{cr}$ ). Daya dukung tanah lempung dalam perencanaan beban Preloading dihitung sebagai berikut :

$Q_u = 2.C_u$  (nilai  $C_u$  diambil dari kohesi tanah dasar dari tipe jenis material tanah yang dipakai untuk timbunan)

$$Q_{all} = Q_u/SF$$

$$H_{cr} = Q_u/SF$$

$$\text{Maka, } H_{cr} = 2.C_u/\text{timbunan}$$

Dimana :

$$Q_u = \text{Daya dukung tanah (t/m}^2 \text{)}$$

$$C_u = \text{Kohesi tanah dasar (t / m}^2 \text{)}$$

$$H_{cr} = \text{Tinggi timbunan kritis (m)}$$

$$\gamma \text{ timbunan} = \text{Berat Volume tanah timbunan (t/m}^3 \text{)}$$

## 2.2. Karakteristik Tanah Lunak

Berdasarkan hasil uji lapangan, tanah lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah menggunakan tangan ( Braja M. Das,1995) menyatakan nilai hasil pengujian dilapangan dan laboratorium, akan menunjukkan bahwa tanah tersebut lunak apabila: koefisien rembesan (k) sangat rendah  $\leq 0.0000001$  cm/dtk, batas cair (LL)  $\geq 50\%$ , angka pori (e) antara 2,5 – 3,2, kadar air dalam keadaan jenuh antara 90% - 120% dan beratspesifik (Gs) berkisar antara 2,6 – 2,9. Nilai berat jenis untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 1

Jenis Tanah	Berat Jenis (Gs)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Anorganik	2,65 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,65
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Tabel 1. Berat jenis (Gs) berbagai jenis tanah (Darwis 2018)

## 2.3. Tipe Tanah Lunak

Sistem USDA membagi tanah menjadi tiga kelompok utama: tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah dengan kandungan organik yang tinggi. Dalam dasar – dasar Mekanika Tanah tentang sistem 20 Klasifikasi Tanah Lunak, tanah berbutir halus dibagi lagi menjadi tiga kelompok berdasarkan kandungan organiknya, terlihat dalam Tabel 2

Ukuran Butiran (mm)	Kelompok Tanah
2,0 – 0,05	Pasir
0,05 – 0,002	Lanau
< 0,002	Lempung

Tabel 2. Tipe Tanah Lunak

## 2.4. Permasalahan Tanah Lunak

Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam tiga kelompok besar, yaitu:

- Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori – pori tanah.
- Penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air.
- Penurunan sekunder (*secondary settlement*), merupakan pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang bersifat plastis dari butir – butir tanah.

Settlement total yang terjadi pada tanah lunak yang dibebani *Stotal* mempunyai 3 komponen :

$$Stotal = Si + Sc + Ss$$

Dimana :

$Si = Immediate\ settlement\ (cm)$

$Sc = Consolidation\ settlement\ (cm)$

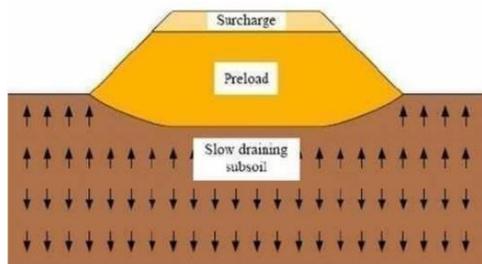
$Ss = Secondary\ settlement\ (cm)$

## 2.5. Metode Perbaikan Tanah Lunak

### a. Metode *prefabricated vertical drain* (PVD)

PVD merupakan material *geosynthetic* yang konsep kerjanya sama dengan kolam pasir yang mempunyai karakteristik sebagai pengumpul air pori yang kemudian dialirkan secara vertikal baik ke atas maupun ke bawah lapisan tanah sepanjang PVD tersebut. Laju konsolidasi yang rendah pada lempung jenuh dengan permeabilitas rendah dapat dinaikan

dengan menggunakan PVD, kemudian konsolidasi yang diperhitungkan akibat pengaliran horizontal menyebabkan disipasi kelebihan air pori yang lebih cepat, sedangkan vertikal sangat kecil pengaruhnya. Dalam teori, besar penurunan konsolidasi akhir adalah sama, hanya laju penurunannya yang berbeda. *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* digunakan untuk mempercepat waktu penurunan primer/konsolidasi (Hausmann, 1990) PVD berbahan ini sudah diaplikasikan pada beberapa proyek infrastruktur di Indonesia (Rudy Purwondho, 2018). Pemasangan PVD berbahan alami ini terbukti dapat mencapai nilai konsolidasi di atas 90% dalam waktu 4-6 bulan dengan kedalaman penetrasi 15-30 m, tergantung pada ketebalan dari lapisan kompresibel



Gambar 1. Aliran air pori pada PVD (Gulhati K, 2005)

PVD harus memiliki kekuatan tarik yang cukup untuk bertahan selama instalasi. (S. Hansbo, 1960) mengemukakan bahwa kekuatan tarik inti lunak, filter seluruh drain, dan drain tersambung harus lebih besar dari 1 kN pada regangan tarik 10% dalam kondisi kering dan basah. Equivalent Permeability (Chai et al, 2001) mengusulkan metode yang digunakan untuk memperkirakan peningkatan konsolidasi drainase yang dilakukan secara vertikal. Dalam metode mereka, permeabilitas vertikal yang setara dapat diperkirakan dengan mempertimbangkan keberadaan saluran vertikal, dimana :

$k_{ve}$  = ekuivalen vertikal permeabilitas

$h_{dr}$  = jarak maksimum drainase dari saluran vertical

### b. Pembebanan Awal (*Preloading*)

Metode *preloading* atau pembebanan awal adalah metode penimbunan beban yang besarnya lebih besar atau sama dengan beban konstruksi yang akan dilaksanakan. Kombinasi antara metode *preloading* dengan instalasi PVD merupakan salah satu metode untuk mempercepat proses konsolidasi. Kombinasi pada metode ini dilakukan dengan cara memberikan beban awal yaitu berupa timbunan (*preloading*) pada tanah lempung yang telah dipasang PVD. Studi ini dilakukan untuk mengetahui percepatan waktu konsolidasi yang dihasilkan dari proses kombinasi *preloading* dan PVD untuk mencapai konsolidasi primer. Metode pembebanan awal (*Preloading*) ialah metode penimbunan beban yang sama dengan beban konstruksi yang akan dilaksanakan (Lestari, 2018).

Besarnya beban yang akan diberikan dapat ditentukan terlebih dahulu, kemudian dibandingkan dengan tinggi timbunan atau beban yang mampu diterima oleh tanah dasar yaitu  $H_{kritis}$  ( $H_{cr}$ ). Apabila ternyata tinggi timbunan sebagai beban *preloading* yang akan diberikan lebih besar daripada  $H_{cr}$ , maka timbunan tersebut harus diletakkan secara bertahap (*stepped preloading*)

#### • Pemberian Timbunan dengan Sistem Bertahap

Dengan beban terhadap, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ketinggian timbunan rencana cukup lama dan tergantung pada peningkatan daya dukung tanah dasarnya. Penambahan beban setiap lapisan beban *preloading* mengacu pada ketinggian yang masuk mampu dipikul  $H_{kritis}$  oleh tanah dasarnya agar tidak terjadi kelongsoran. Untuk menentukan  $H_{kritis}$  digunakan program bantu XSTABL. Pemberian

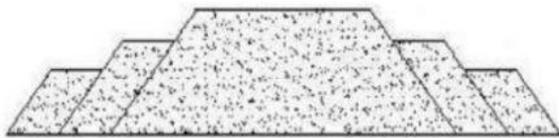
timbunan secara bertahap dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. Pemberian *preloading* secara Bertahap (wirya ardana 2008)

- **Pemberian timbunan dengan sistem *Counter Weight***

Pada tanah dasar dengan daya dukung yang sangat rendah dan luas lahan yang cukup luas, bisa dipakai sistem *preloading* dengan *counter weight*, seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. Pemberian *Preloading* secara *Counter Weight* (wirya ardana 2008)

**c. Penurunan (Settlement)**

Akibat adanya beban timbunan (*preloading*) yang ditempatkan di atas tanah dasar yang sangat lunak maka akan terjadi penurunan (*settlement*) tanah dasar. *Settlement* tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori dan sebab-sebab lainnya. Keluarnya air atau udara dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut.

Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam tiga 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 elastis tanah kering, basah dan jenuh.
3. Penurunan sekunder (*secondary settlement*), merupakan pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.

Settlement total yang terjadi pada tanah yang dibebani ( $S_t$ ) mempunyai 3 komponen ;

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

Dimana :

$S_i$  = *Immediate settlement* (cm)

$S_c$  = *Consolidation settlement* (cm)

$S_s$  = *Secondary settlement* (cm)

**2.6. Dasar Konsolidasi**

Konsolidasi adalah proses terdisipasinya air tanah akibat bekerjanya beban, yang terjadi sebagai fungsi waktu karena kecilnya permeabilitas tanah. Proses ini berlangsung terus sampai kelebihan tekanan air pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total yang telah benar-benar hilang. Peristiwa konsolidasi umumnya dipicu oleh adanya beban/muatan diatas tanah. Muatan tersebut dapat berupa tanah atau konstruksi bangunan yang berdiri diatas tanah. Bila lapisan tanah mengalami beban dia atasnya, maka pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volumenya akan berkurang atau dengan kata lain akan mengalami konsolidasi (Wesley, 1977).

- **Uji Konsolidasi Satu Dimensi**

Salah satu teori yang umum digunakan untuk memprediksi penurunan dan waktu yang dibutuhkan adalah teori konsolidasi satu dimensi yang diperkenalkan oleh Terzaghi, dimana deformasi dan arah aliran hanya

terjadi ketika pada satu arah yaitu ketika pada arah vertical.

Prosedur untuk melakukan uji konsolidasi satu dimensi (1 - D) pertama - tama diperkenalkan (*oedometer*). Skema konsolidometer ditunjukkan dalam contoh tanah diletakkan di dalam cincin logam dengan buah batu berpori diletakkan di atas dan bagian bawah contoh tanah tersebut. Ukuran contoh tanah digunakan biasanya adalah : diameter 2,5 inci (63,5 mm) dan tebal 1 inci (2,54 mm). pembebanan pada contoh tanah dilakukan dengan cara meletakkan beban pada ujung sebuah balok datar, dan pemampatan contoh tanah diukur dengan menggunakan skala ukur dengan skala micrometer. Contoh tanah selalu direndam air selama percobaan. Tiap - tiap beban biasanya diberikan selama 24 jam. Setelah itu, beban dinaikkan sampai dengan dua kali lipat bebasebelumnya, dan pengukuran pemampatan diteruskan. Pada saat percobaan selesai, berat kering dari contoh tanah ditentukan. Secara matematis, dasar persamaan diferensial dari teori konsolidasi oleh Terzaghi adalah sebagai berikut :

$$\partial u \partial^2 u = C_v \partial t \partial^2 u$$

- **Derajat Konsolidasi Arah Vertikal**

Persamaan matematis untuk konsolidasi 1 - D dari Terzaghi dalam menentukan nilai derajat konsolidasi arah vertikal ( $U_v$ ) dapat dinyatakan dengan formula berikut :

Jika ( $U_v$ )  $\leq 60\%$  maka :

$$\sqrt{4T_v U} = \pi v 4T_v (1 + (\pi) 2 . 8) 0,178$$

- Jika ( $U_v$ )  $> 60\%$  maka :

$$8 m=\infty 1 - 2 (2m+1)^{2/4} U_v = 1 - \pi^2 \sum ( 2 ) \text{Exp} [\pi ] T_v m=0 (2m + 1)$$

Dimana :

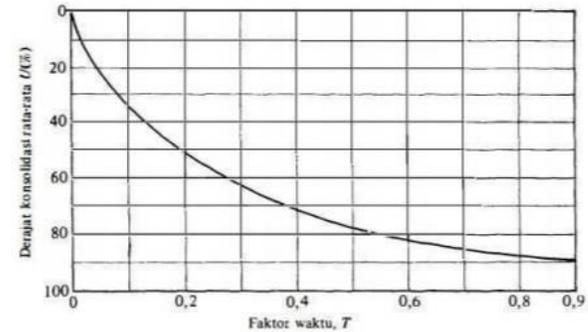
m = bilangan bulat

$T_v$  = faltar waktu

$C_v$  = koefisien konsolidasi arah vertikal ( $cm^2/detik$ )

t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (s)

$$\exp = 2,7182818$$



Gambar 4. Grafik variasi derajat konsolidasi rata - rata terhadap faktor waktu,  $T_v$  (M das,1995)

- **Koefisien Konsolidasi Vertikal**

Koefisien konsolidasi vertikal,  $C_v$  biasanya akan berkurang dengan bertambahnya batas cair (LL) dari tanah. Rentang (range) dari variasi harga  $C_v$  untuk suatu batas cair tanah tertentu adalah agak lebar. Koefisien konsolidasi vertikal ( $C_v$ ) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah vertikal dalam tanah. Karena pada umumnya konsolidasi berlangsung satu arah saja, yaitu arah vertikal, maka koefisien konsolidasi sangat berpengaruh terhadap kecepatan konsolidasi yang akan terjadi. Harga  $C_v$  dapat dicari mempergunakan persamaan berikut ini:

$$C_v = T_v H^2 / t$$

Dimana :

$C_v$  = koefisien konsolidasi vertikal ( $cm^2/detik$ )

$T_v$  = faktor waktu derajat konsolidasi vertikal

H = panjang aliran air pori selama proses konsolidasi (cm)

t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi  $U\%$

- **Grafik Angka Pori – Tekan**

Setelah mendapatkan grafik antara waktu dan pemampatan untuk besar pembebanan yang bermacam – macam dari percobaan di laboratorium, selanjutnya penting bagi kita untuk mempelajari perubahan angka pori terhadap tekanan. Berikut ini adalah langkah demi langkah urutan pelaksanaannya

1. Hitung tinggi butiran padat,  $H_s$  pada contoh tanah

$$H_s = W_s / A \cdot G_s \cdot \gamma_w$$

Dimana :

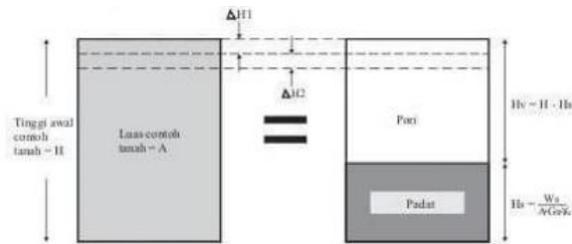
$W_s$  = Berat kering contoh tanah

$A$  = Luas penampang contoh tanah

$G_s$  = Berat spesifik contoh tanah

$\gamma_w$  = Berat volume air

2. Hitungan tinggi awal dari ruang pori,  $H_v$ :



Gambar 5. Perubahan tinggi contoh tanah pada uji konsolidasi satu dimensi (M, Das, 1995)

$$H_v = H - H_s$$

Dimana  $H$  = tinggi awal tanah contoh

3. Hitung angka pori awal,  $e_0$ , dari contoh tanah

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v \cdot A}{H_s \cdot A} = \frac{H_v}{H_s}$$

4. Untuk penambahan beban pertama  $P_1$  (beban total/luas penampang contoh tanah), yang menyebabkan penurunan  $\Delta H_1$ , hitung penurunan

$\Delta e_1$ :

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

$\Delta H_1$  didapatkan dari pembacaan awal dan akhir skala ukur untuk beban sebesar  $P_1$

5. . Hitung angka pori yang baru,  $e_1$ , setelah konsolidasi yang disebabkan oleh penambahan tekanan  $P_1$ :

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

Untuk beban berikut yaitu  $P_2$  (beban kumulatif per satuan luas contoh tanah), yang menyebabkan penambahan pemampatan  $\Delta H_2$ , angka pori  $e_2$  pada saat akhir konsolidasi dapat dihitung sebagai berikut:

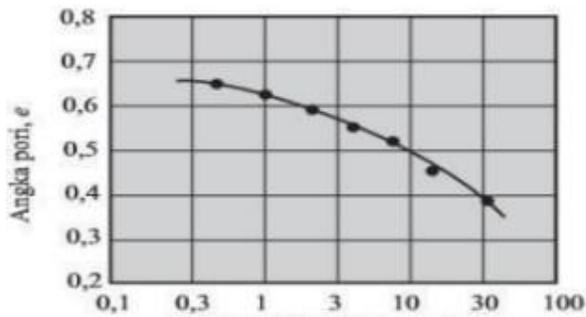
$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

- **Lempung yang Terkonsolidasi Secara Normal (*Normally Consolidated*) dan Terlalu Terkonsolidasi (*Over Consolidated*)**

Keadaan ini mengarah kepada dua definisi dasar yang didasarkan pada sejarah tegangan :

1. Terkonsolidasi secara normal (*normally consolidated*), dimana tekanan efektif overburden pada saat ini adalah merupakan tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah itu

2. Terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), di mana tekanan efektif overburden pada saat ini adalah lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami tanah ini sebelumnya. Tekanan efektif overburden maksimum yang pernah dialami sebelumnya dinamakan tekanan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure*).



Gambar 6. Variasi angka pori terhadap tekanan (M Das, 1995)

• **Analisis Perhitungan Penurunan yang Disebabkan oleh Konsolidasi Primer Satu Dimensi**

Dengan pengetahuan yang didapat dari analisis hasil uji konsolidasi, maka dapat dihitung kemungkinan penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi primer dilapangan, dengan menganggap konsolidasi tersebut adalah satu dimensi (Das, Braja M. 1985). Tinjauan suatu lapisan lempung jenuh dengan tebal H dan luasan penampang melintang A serta tekanan efektif overburden rata – rata sebesar  $P_0$ . Disebab oleh penambahan tekanan sebesar  $\Delta p$ , dianggaplah penurunankonsolidasi primer yang terjadi adalah sebesar S. menjelaskan kasus penurunan tersebut.

Volume pori dapat ditentukan dengan menggunakan rumus :

$$\Delta V_v = V_0 - V_1 = H \cdot A - (H - S) \cdot A = S \cdot A$$

Dimana  $V_0$  dan  $V_1$  berturut – turut adalah volume awal dan volume akhir tetapi perubahan volume sama dengan perubahan volume pori,  $\Delta V_v$ . Jadi

$$\Delta V = S \cdot A = V_{v0} - V_{v1}$$

Dimana  $V_{v0}$  dan  $V_{v1}$  berturut – turut adalah volume akhir dari pori.

Dari definisi angka pori

$$\Delta V_v = \Delta e \cdot V_s$$

Dimana

$\Delta e$  = perubahan angka pori

Tapi

$$V_s = V_0 = A H \frac{1+e_0}{1+e}$$

Dimana

$e_0$  = angka pori awal pada saat volume tanah sama dengan  $V_0$ . Jadi dari persamaan – persamaan diatas maka di dapat :

$$A H \Delta V = S \cdot A = \Delta e \cdot V_s = 1 + e_0 \Delta e$$

Atau

$$S = H \Delta e \frac{1+e_0}{1+e}$$

Untuk lempung yang terkonsolidasi secara normal dimana e versus log p merupakan garis lurus maka :

$$\Delta e = C_c [ \log (P_0 + \Delta p) - \log P_0 ]$$

Dimana

$C_c$  = kemiringan kurva  $\Delta e$  versus  $\log P_0$  dan didefinisikan sebagai “indeks pemampatan” (*compression index*).

Masukan persamaan maka diperbolehkan persamaan

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{P_0 + \Delta p}{P_0} \right)$$

Untuk suatu lapisan lempung yang tebal, adalah lebih teliti bila lapisan tanah tersebut dibagi menjadi beberapa sub – lapisan dan perhitungan penurunan dilakukan secara terpisah untuk tiap – tiap sub – lapisan. Jadi, penurunan total dari seluruh lapisan tersebut adalah

Dimana :

S = Penurunan total

H = Tebal lapisan tanah lunak yang memampat (m)

$H_i$  = Sub lapisan  $i$

$P_{0i}$  = Tekanan efektif *overburden* untuk sub – lapisan  $i$  ( $t/m^2$ )

$\Delta P_i$  = Penambahan tekanan vertical untuk sub – lapisan  $i$  ( $t/m^2$ )

$C_c$  = Indeks pemampatan (*Compression Index*)

$C_s$  = Indeks pemuaiian (*Swelling Index*)

$e_0$  = Angka pori awal (*Initial Void Ratio*)

Untuk lempung yang terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*), apabila  $(P_0 + \Delta p) \leq P_c$  lapangan, variasi  $e$  versus  $\log p$  terletak di sepanjang  $c_b$  dengan kemiringan yang hamper sama dengan kemiringan kurva pantul (*rebound curve*) yang didapat dari uji konsolidasi di laboratorium. Kemiringan kurva pantul,  $C_s$  disebut “indeks pemuaiian” jadi : Besarnya penurunan dapat ditung dengan persamaan

- Bila  $(P_0 + \Delta p) \leq P_c$  maka :

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{P_0 + \Delta p}{P_0} \right)$$

- Bila  $(P_0 + \Delta p) \geq P_c$  maka :

$$S = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{P_0 + \Delta p}{P_0} \right) + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left( \frac{P_0}{P_c} \right)$$

Apabila kurva  $e$  versus  $\log p$  tersedia, mungkin saja untuk memilih  $\Delta e$  dengan mudah dari grafik tersebut dengan rentang (*range*) tekanan yang sesuai. Kemudian nilai – nilai yang diambil dari kurva tersebut dimasukan kedalam persamaan () untuk menghitung besar penurunan  $S$ .

- **Indeks Pemampatan (*Compression Index*)**

Indeks pemampatan digunakan sebagai untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi dilapangan sebagai akibat dari konsolidasi dapat ditentukan dari kurva yang menunjukkan hubungan antara pori dan tekanan seperti ditunjukkan oleh (Gambar 18 ) yang didapat dari uji konsolidasi di laboratorium. Ketika tekanan air pori sama dengan nol, penurunan masih terjadi sebagai akibat dari penyesuaian plastis butiran tanah. Tanah konsolidasi ini dinamakan konsolidasi sekunder. Selama konsolidasi sekunder berlangsung, kurva hubungan antara deformasi dan  $\log$  waktu ( $t$ ) merupakan garis lurus. Penurunan yang diakibatkan oleh konsolidasi sekunder sangat penting untuk semua jenis tanah organik dan tanah anorganik yang *compressible*. Untuk lempung anorganik yang terlalu terkonsolidasi, indeks pemampatan sekunder adalah sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Terzaghi dan Peck (1967), menyarankan pemakaian persamaan empiris berikut ini untuk menghitung indeks pemampatan:

- Untuk lempung yang struktur tanahnya tak terganggu/belum rusak (*undisturbed*)  $C_c = 0,009 (LL - 10)$
- Untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)  $C_c = 0,007 (LL - 10)$

Dimana  $LL$  (*Liquid Limid*) = batas cair dalam persen

Apabila tidak tersedia data konsolidasi hasil percobaan di laboratorium, persamaan  $C_c = 0,009 (LL - 10)$  sering digunakan untuk menghitung konsolidasi primer yang terjadi di lapangan.

Kadar Organik	Kelompok Tanah
$C_c = 0,009 (LL - 10)$	Untuk Lempung Tak Terganggu
$C_c = 0,007 (LL - 10)$	Untuk Lempung Terbentuk Kembali
$C_c = 0,007 (LL - 7)$	Untuk Lempung Terbentuk Kembali
$C_c = 0,0046 (LL - 9)$	Lempung Brazillian
$C_c = 0,01 \omega_n$	Lempung Chicago
$C_c = 0,0115 \omega_n$	Gambut, lanau organik, dan Lempung
$C_c = 1,15 (e_o - 0,27)$	Lempung pada umumnya Tanah kohesif non organik, lanau, lempung berlanau, lempung
$C_c = 0,30 (e_o - 0,27)$	Tanag berplastisitas rendah Lempung Chicago
$C_c = 0,75 (e_o - 0,5)$	Lempung pada umumnya
$C_c = 0,208 e_o + 0,0083$	
$C_c = 0,156 e_o + 0,0107$	

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Perhitungan Analisis dengan Plaxis

##### 2D

Pada perhitungan plaxis dihitung dengan efek *smear zone*, jenis pemodelan yang digunakan yaitu *plane strain* dengan 15 titik nodal. Lebar yang ditinjau 50 m dengan tipe mesh medium. Secara umum pemodelan geometri pada plaxis ada 3 yaitu :

##### 1. Axysimetris

Pemodelan *Axysimetris* digunakan untuk struktur yang simetris, misalnya pada pondasi tiang tunggal.

##### 2. Plane Strain

Pemodelan *Plane Strain* biasanya digunakan untuk pemodelan struktur memanjang, misalnya dinding penahan. Untuk penelitian ini digunakan pemodelan geometri dengan *Plane Strain*

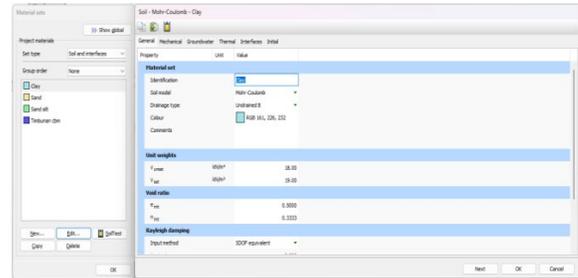
##### 3. Plane Stress

Pemodelan *Plane Stress* biasanya digunakan untuk pemodelan pelat tepi

Perhitungan Plaxis 2D dilakukan dengan tahapan berikut :

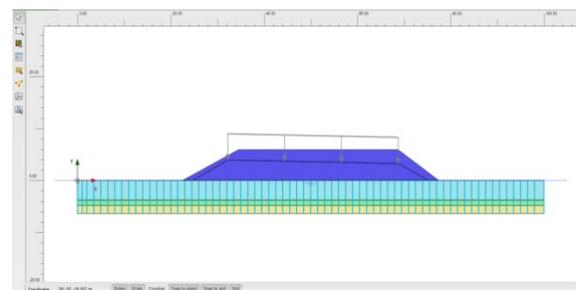
#### 1. Soil

Pada Tahapan ini melakukan pemodelan tanah sesuai dengan lapisan tanah dari hasil sondir dilapangan, selanjutnya input data/nilai sesuai dengan tabel diatas Adapun proses input data lapisan tanah terlihat pada gambar berikut



Gambar 7. Setting Material

Kondisi dilapangan yang disimulasikan kedalam program Plaxis bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan dilapangan kedalam tahapan pengerjaan pada program dengan harapan pelaksanaan dilapangan dapat didekati sedekat mungkin sehingga respon yang dihasilkan dari program dapat diasumsikan sebagai cerminan dari kondisi yang sebenarnya terjadi dilapangan. Pemodelan lapisan tanah dan PVD dapat terlihat pada gambar 7.



Gambar 8. Pemodelan Lapisan Tanah dan PVD pada Plaxis 2D

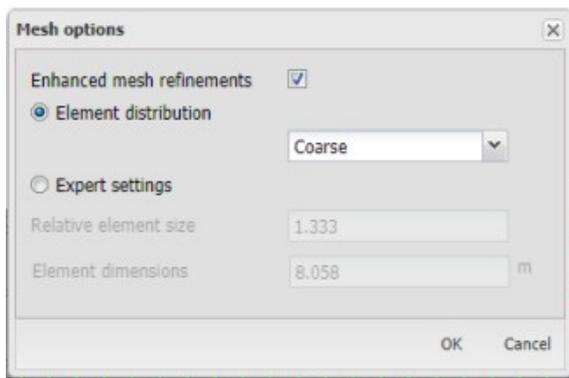
#### 2. Generate Mesh 2D

Setelah semua geometri tanah digambarkan dan propertisnya dimasukkan kelapisan tanah tersebut. Langkah berikutnya adalah melakukan

*boundary condition dan generate mesh,*

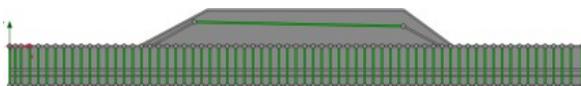
pada analisa ini arah Xmin adalah *normally closed*, Xmax adalah *normally open*. Pada *generate mesh* seluruh elemen sttruktur akan dibagi menjadi elemen elemen kecil. Semakin kecil elemennya maka perhitungan akan semakin teliti. Tujuan menggunakan seluruh mesh yang tersedia pada program plaxis yaitu agar didapat perbandingan jumlah mesh dan besar penurunan yang dihasilkan

Pemilihan mesh dapat dilihat pada gambar dibawah



Gambar 9. Pemodelan Mesh yang digunakan

Proses kalkulasi pada program plaxis dilakukan dengan cara membagi keseluruhan konstruksi menjadi mesh. Semakin kecil mesh yang dibuat maka semakin teliti pula perhitungannya, namun semakin kecil mesh yang dibuat kalkulasinya akan memakan waktu yang semakin lama pula. Berikut hasil generate mesh pada *type very fine* dapat dilihat pada gambar diatas jumlah mesh yang diperoleh adalah 987 elemen dan 7683 node.

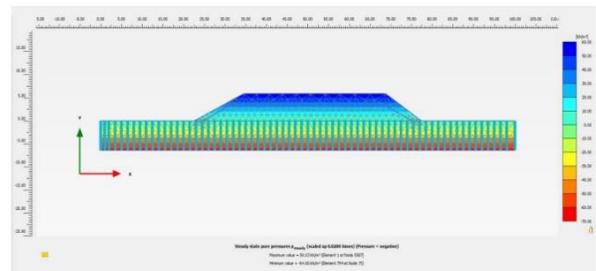


Gambar 10. Generate Mesh diperoleh 987 elemen dan 7683 node

### 3. Flow Condition

Pada *Flow Condition* akan diperhitungkan besaran muka air tanah

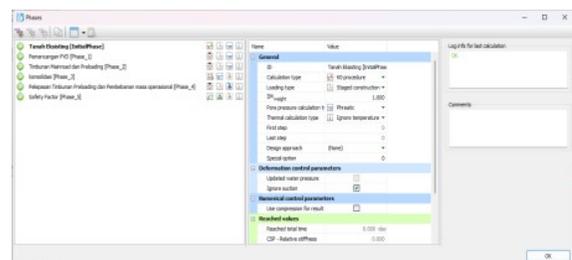
yang ada pada lokasi penelitian. Pada penelitian ini elevasi muka air tanah pada 65 elevasi 0,0mL WS, ini menunjukkan bahwa pada *initial condition* seluruh lapisan tanah eksiting berada dipermukaan air laut hal ini memberikan pengaruh besar pada tekanan yang dialami oleh lapisan tanah dibawahnya. Tekanan yang terjadi akibat air tanah dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 11. Tekanan yang Terjadi Akibat Air Tanah (max. 59.03 KN/m<sup>2</sup> dan min. -64.00 KN/m<sup>2</sup>)

### 4. Stage Construction

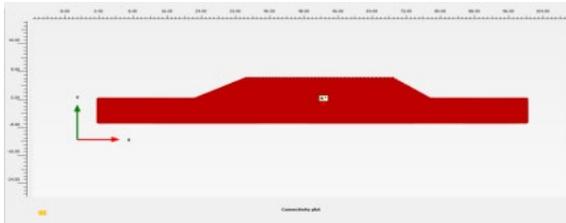
Tahap *Stage Construction* merupakan tahapan perhitungan. Phase perhitungan adalah sebanyak 8 *phase*, dapat dilihat dalam gambar berikut



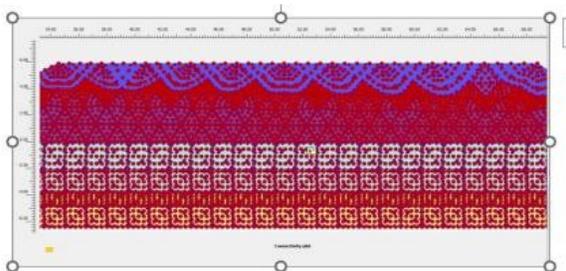
Gambar 12. Phase Perhitungan

Setelah dilakukan Phase perhitungan, maka setelah itu ditentukan titik yang ditinjau (Titik A) ini harus sama dengan lokasi dimana settlement plate dipasang yaitu pada lapisan tanah dasar, hal ini agar di dapat hasil yang akurat. Titik A berada di kordinat  $x = 25$   $y = 0$  pada pemodelan plaxis. Perbedaan lokasi penentuan titik timjauan akan mengakibatkan

kesalahan dalam menganalisa, hal ini dikarenakan setiap lokasi akan mengalami penurunan dan konsolidasi yang berbeda.



Gambar 13. Titik Analisa Peninjauan (Titik A)



Gambar 14. Titik Analisa Peninjauan (Titik A)

### Hasil Waktu Penurunan

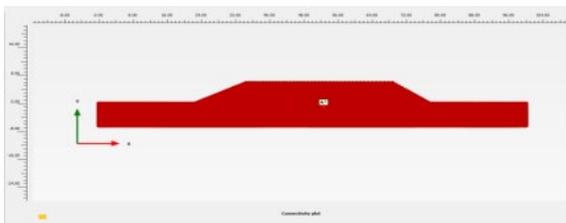
Waktu Penurunan 23.84 Day

Turun 0,864m

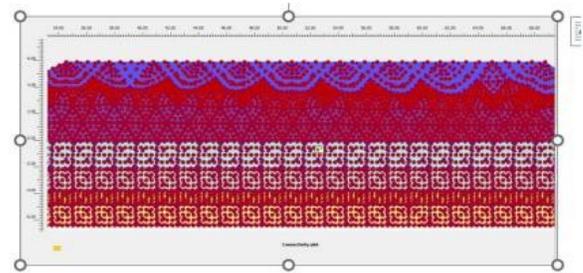
Setelah seluruh tahapan perhitungan dilakukan pada plaxis, maka akan didapat hasil *output* perhitungan yang menunjukkan bahwa penurunan *vertical* yang terjadi pada are tersebut dengan beragam tipe mesh yang ditunjukkan.

### 3.2. Hasil Akhir Perhitungan Plaxis tidak Pakai PVD

Adapun hasil akhirnya adalah sebagai berikut:



Gambar 15. Titik Analisa Peninjauan tanpa PVD (Titik A)



Gambar 16. Titik Analisa Peninjauan tanpa PVD (Titik A)

### Hasil waktu penurunan

Waktu Penurunan 77.06 Day

Turun 0,220m

Data Perbandingan Plaxis 2D menggunakan PVD dan Tanpa PVD beserta Data *settlement* Plate STA 46+950

	Settlement plate STA 46+950	Plaxis 2D menggunakan PVD mesh coarse	Plaxis 2D Tanpa PVD mesh coarse
Penurunan (m)	0,551	0,864	0,220
Perbedaan Selisih Penurunan dengan Lapangan STA 46+950 (m)		0,313	-0,331
Lama waktu penurunan(Hari)	97.69	23.84	77.06

### 3.3. Penurunan dengan Efek *Smear Zone*

Verifikasi pemodelan PVD dilakukan dengan cara mengekuvalenkan PVD yang setempat – setempat menjadi menerus (*Plane Straine*). Dari perhitungan ini juga akan dihitung besaran efek *Smear Zone* terhadap koefisien permeabilitas , dikarenakan dari perhitungan besar efek *Smear Zone* terhadap koefisien permeabilitas horizontal tanah ( $K_x$ ) berubah namun arah horizontal ( $K_y$ ) tetap. Maka perubahan dapat dilihat dalam tabel berikut :

Uraian	Unit	Material Properties STA 46-950			
		Timbunan	Clay	Sand Silt	Sand
Material Model	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Kedalaman	Mtr.	3,89-0	1,4-3,8	3,8-4,8	4,8-6,4
Drainage Type	-	Undrained	Undrained	Drained	Drained
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	16	18	17	16
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	17	19	18	17
E	kN/m <sup>2</sup>	10030	4095	50140	323300
$\nu$ (nu)		0.30	0.30	0.30	0.30
$c_{def}$	kN/m <sup>2</sup>	0	15.5	15.5	29.2
$\phi$ (phi)		40	0	20	12.89
$\Psi$ (psi)		0	0	0	0
$\lambda^*$ (lambda)		-	-	-	-
$\kappa^*$ (kappa)		-	-	-	-
$k_{ax}$	m/day	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
$k_{ay}$	m/day	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Nama Lapisan	Preloading	1	2	3	

EFEK SMEARZONE					
$k_{ax}$	m/day	8.640	0.0001	0.0001	1
$k_{ay}$	m/day	8.640	0.0005	0.0005	1

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dan pembahasan yang telah dianalisis pada penelitian ini, didapatkan beberapa kesimpulan seperti, besar penurunan konsolidasi menggunakan metode analisis dengan pemodelan plaxis 2D menggunakan PVD diperoleh penurunan sebesar 0,864 m, Tanpa PVD 0,220 m dan pada data settlement plate STA 46 + 950 sebesar 0,551 m perbedaan ini dikarenakan data laboratorium tidak mewakili seluruh lapisan tanah dilapangan, dimana terdapat data yang tidak dimiliki atau didapat dari lapangan.

Lama waktu konsolidasi menggunakan metode analisis dengan Pemodelan Plaxis 2D menggunakan PVD diperoleh waktu 23,84 hari, Tanpa PVD diperoleh waktu 77.06 hari, dan pada data Settlement Plate STA 46+950 diperoleh waktu 97,69 hari . perbedaan ini dikarenakan data laboratorium tidak mewakili seluruh lapisan tanah dilapangan, dimana terdapat data yang tidak dimiliki atau didapat dari lapangan

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

Ahsan, A. D., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum

Consolidation Dengan Variasi Jarak Pemasangan Pvd. *Konstruksia*, 13(1), 54–68.

Adhi, Bagas Wahyu. 2022. “Analisa Stabilitas Timbunan Di Daerah Rawa Menggunakan Penanganan Limestone Dengan Software Plaxis.” *MoDuluS: Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil* 4(1): 40.

Adinegoro, Chandra, Moch. Sholeh, and Dandung Novianto. 2021. “Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Terminal Internasional Kijing Pontianak Kalimantan Barat.” *Jurnal JOS- MRK* 2(2): 158–62.

Braja, M. Das. 2008. *Advance Soil Mechanics*.

Das, B. M. 1995. “Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik.” *Penerbit Erlangga*: 1–300.

Das, Braja M. 1993. “Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis.” *Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis*: 239.

Element, T. (2022). *Analisis Konsolidasi dengan Metode Preloading dikombinasikan dengan PVD berdasarkan Perhitungan Analitis dan Plaxis 2d Baby Purba , Roesyanto , Gina Cyntia Raphita , Rudianto Surbakti Universitas Sumatera Utara , Indonesia Baby Purba , Roesyanto , Gina Cy. 3(12)*.

Putri, R., Tyagita, E., & Hayati, J. (2022). *Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dan Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain ( PVD ) dengan Variasi Panjang PVD ( Studi Kasus : Pembangunan Jalan Tol. 2(February), 19–25*.

Ohoimas, M. Y., and Indra Noer Hamdhan.  
2014. "Analisis Konsolidasi Dengan  
Menggunakan Metode Preloading Dan  
Vertical Drain Pada Areal Reklamasi  
Proyek Pengembangan Pelabuhan  
Belawan Tahap II." *Reka Racana Jurnal  
Online Institut Teknologi Nasional* (x): 1–  
11