

Analisis Deformasi dan Tekanan Air Pori Ekses pada Tanah Lempung Lunak akibat Beban Timbunan

NURUL ANNISA SUKIMAN, YUKI ACHMAD YAKIN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung
e-mail: newrulenizha@gmail.com

ABSTRAK

Tanah diperlukan baik sebagai bahan konstruksi maupun sebagai pendukung beban. Dalam membangun suatu bangunan salah satu yang harus diperhatikan adalah tanah pendukungnya. Jika tanah pendukung bermasalah maka akan mempengaruhi proses pembangunan tersebut. Tanah lempung lunak memiliki sifat antara lain gaya gesernya kecil, kemampatan yang besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah dibandingkan tanah lempung lainnya. Pemberian beban timbunan pada tanah lunak dapat menyebabkan meningkatnya tegangan yang bekerja pada tanah tersebut sehingga, menyebabkan timbulnya tekanan air pori ekses dan terjadinya penurunan konsolidasi. Tujuan dari studi ini adalah menganalisis besarnya penurunan dan tekanan air pori ekses yang terjadi berdasarkan kepada data pengujian di lapangan dan di laboratorium serta dengan menggunakan program PLAXIS 2D AE dengan model plane strain dan axisymmetric. Hasil analisis menunjukkan penurunan yang ditunjukkan oleh program PLAXIS lebih besar dari pada data hasil pengujian di lapangan.

Kata Kunci: tanah lempung lunak, plane strain, axisymmetric, PLAXIS 2D AE

ABSTRACT

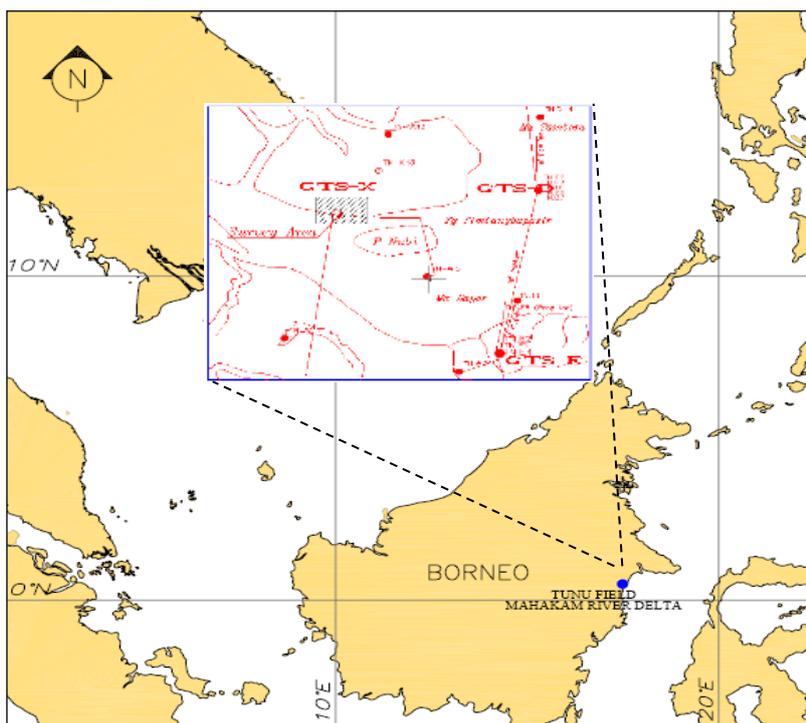
Soil is needed both as a construction material and as a load support. In constructing a building, one of the things to attend is its supporting soil. If it is problematic, the construction process would be adversely affected. Soft clay has some characteristics, among others, small shear force, great compression, small permeability coefficient, and low supporting force, relative to other clays. A placement of a pile load on a soft soil can result in an increasing strain working on the soil and thus result in excess pore water pressures and a decrease in consolidation. The objective of the present study was to analyze the extent of decreases and excess pore water pressures based on the data obtained from field and laboratory tests, by using a PLAXIS 2D AE program in plane strain and axisymmetric models. The result of analysis revealed that the decrease shown by the PLAXIS program was bigger than the data obtained from the result of field test.

Keywords: soft clay, plane strain, axisymmetric, PLAXIS 2D AE

1. PENDAHULUAN

Tanah berbutir halus merupakan tanah berkohesi yang biasanya disebut tanah kohesif (*cohesive soils*). Salah satu hal yang menjadi masalah di bidang geoteknik adalah tanah kohesif biasanya merupakan tanah lunak. Tanah lunak dapat mengembang atau menyusut akibat masuk atau keluarnya air. Pemberian beban pada tanah lunak, akan menyebabkan peningkatan tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Tegangan tambahan yang bekerja pada tanah lunak pada awalnya akan dipikul oleh air pori karena sifat incompressible air. Hal ini akan menyebabkan timbulnya eksese air pori. Eksese air pori ini akan terdisipasi dengan keluarnya air pori tanah melalui pori-pori tanah, sementara tegangan tambahan yang awalnya dipikul air pori secara gradual ditransfer ke partikel tanah padat. Hal ini akan mengakibatkan berkurangnya volume tanah sehingga menyebabkan terjadinya penurunan konsolidasi.

Tujuan dari penelitian adalah membandingkan metode ekuivalensi *plane strain* (multi *drain*) dengan model *axisymmetric* pada PLAXIS 2D AE serta menganalisis besarnya penurunan, waktu konsolidasi, dan tekanan eksese air pori di lokasi Delta Mahakam, **Gambar 1**. Adapun manfaat dari penelitian adalah hasil penelitian ini nantinya dapat dijadikan dasar untuk penelitian selanjutnya dalam menentukan metode *plane strain* yang paling sesuai pada PLAXIS 2D, dapat mengembangkan minat penelitian bagi mahasiswa Teknik Sipil dalam bidang Geoteknik.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian
(Sumber: *Geotechnical Engineering Center, 2008*)

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan tanah yang memiliki kuat geser *undrained* lapang kurang dari 40kPa dan kompresibilitas tinggi. Berdasarkan ukuran butiran, tanah lunak dikelompokkan menjadi tiga jenis tanah, yaitu sedimen lempung lunak, pasir lepas dan gambut. Tanah lunak

tersebut terdapat di sungai-sungai dan di pantai. Lapisan tanah lunak memiliki permukaan air tanah yang tinggi, bahkan ketinggiannya dapat mencapai permukaan tanah. Umumnya lapisan tanah yang disebut lapisan tanah lunak merupakan lanau (*silt*) dan lempung (*clay*).

2.2 Karakteristik Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak merupakan kumpulan partikel mineral yang berukuran kurang dari 0,002 mm atau lolos saringan 200. Sebagian proses pembentukannya adalah melalui proses pelapukan batuan. Sifat tanah lempung lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampuan yang besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah dibandingkan tanah lempung lainnya.

Berdasarkan kepada standart yang ada, yaitu *British Standard*, tanah lempung lunak didefinisikan sebagai tanah butir halus yang memiliki nilai kuat geser tidak teralir (*undrained shear strength*) sampai dengan 40 kN/m². Tanah lempung lunak ini dapat tertekuk oleh jari tangan dengan tekanan ringan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Pada Kuat Geser Tidak Teralir

Kuat Geser (S_u) (kN/m ²)	Konsistensi	Karakteristik
<20	<i>Very Soft</i>	<i>Exudes between fingers when squeezed</i>
20 – 40	<i>Soft</i>	<i>Moulded by lighth finger pressure</i>
40 – 75	<i>Firm</i>	<i>Moulded by strong finger pressure</i>
150 – 150	<i>Stiff</i>	<i>Can be indented by thumb</i>
150 – 300	<i>Very stiff</i>	<i>Can be indented by thumb</i>
>300	<i>Hard</i>	-

(Sumber: *British Standard, 1981*)

2.3 Penurunan Muka Tanah Akibat Beban Timbunan

Timbunan merupakan salah satu jenis lereng buatan manusia yang memiliki kemiringan tertentu dan dapat runtuh jika tidak dirancang dengan baik. Sifat, material, metode konstruksi yang digunakan harus dirancang agar tidak terjadi keruntuhan pada lereng timbunan. Perancangan lereng timbunan di desain berdasarkan parameter kuat geser (*shear strength*). Terkadang suatu timbunan dibuat di atas lapisan tanah asli berupa lempung. Keruntuhan dapat terjadi pada tanah di bawah timbunan tersebut. Oleh karena itu, perlu perhatian khusus untuk lapisan tanah lempung di bawah timbunan.

Tanah timbunan biasanya lebih kaku dan kuat dibandingkan dengan tanah lempung di bawahnya. Hal itu memungkinkan timbunan akan mengalami patah saat lapisan tanah lempung bawah berdeformasi, mengalami penurunan akibat beratnya sendiri, dan terjadi keruntuhan akibat tegangan dan regangan antara timbunan dan lapisan tanah lempung tersebut.

2.4 Konsolidasi

Merupakan proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan. Proses ini terjadi jika tanah jenuh berpermeabilitas rendah dibebani, maka tekanan air pori tanah bertambah, akibatnya air mengalir ke lapisan tanah dengan tekanan air pori yang rendah diikuti dengan penurunan tanah. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) adalah perpindahan vertikal permukaan tanah sehubungan dengan perubahan volume pada suatu tingkat dalam proses konsolidasi.

2.4.1 Fase-Fase pada Konsolidasi

Bila tanah mengalami pembebanan dan berkonsolidasi, maka penurunan tanah tersebut berlangsung dalam tiga fase, yaitu:

a. Fase Awal

Penurunan terjadi segera setelah beban bekerja, diakibatkan oleh keluarnya udara dari rongga pori. Proporsi penurunan awal dapat diberikan dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva waktu terhadap penurunan dari uji konsolidasi.

b. Fase Konsolidasi Primer

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.

c. Fase Konsolidasi Sekunder

Merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer. 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. Konsolidasi sekunder didefinisikan secara kasar sebagai penyesuaian kerangka tanah yang berlangsung untuk beberapa saat lamanya sesudah tekanan pori yang berlebih menghilang. Karena itu, tekanan sekunder tergantung pada waktu dan dapat berlangsung untuk waktu yang lama sampai ratusan tahun.

2.4.2 Kondisi Tanah saat Konsolidasi

Kondisi tanah di alam berbeda-beda akibat proses konsolidasi yang berlangsung. Berikut ada 3 kondisi tanah berdasarkan tegangan yang dialami:

a. *Normally Consolidated* (OCR = 1)

Dimana tegangan efektif *overburden* saat ini merupakan tegangan maksimum yang pernah dialami oleh tanah selama dia ada.

b. *Over Consolidated* (OCR > 1)

Dimana tegangan efektif *overburden* saat ini lebih kecil daripada tegangan yang pernah dialami oleh tegangan tersebut. Tegangan efektif *overburden* maksimum yang pernah dialami sebelumnya dinamakan tegangan prakonsolidasi (*preconsolidation pressure* / P_c).

c. *Under Consolidated* (OCR < 1)

Dimana tegangan efektif *overburden* saat ini belum mencapai maksimum, sehingga peristiwa konsolidasi masih berlangsung pada saat sample tanah diambil.

2.4.3 Indeks Pemampatan (C_c)

Indeks pemampatan adalah bagian kemiringan dari grafik $e - \log p$. Dimana persamaan umum C_c adalah sebagai berikut.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p} = \frac{(e_1 - e_2)}{\log p_2 - \log p_1} = \frac{(e_1 - e_2)}{\log(p_2 / p_1)} \quad \dots (1)$$

Pada kondisi tertentu, seringkali kita dihadapkan pada situasi tidak memiliki nilai C_c karena tidak dilakukannya pengujian konsolidasi. Maka, penggunaan persamaan-persamaan korelasi

empiris menjadi salah satu alternatif menyelesaikan kondisi tersebut. Berikut beberapa persamaan pendekatan C_c dari parameter LL (batas cair).

a. Terzaghi dan Peck (1976) $C_c = 0,009(LL - 10)$... (2)

b. Azzouz et al (1976) $C_c = 0,0046(LL - 9)$... (3)

2.4.4 Faktor-Faktor yang mempengaruhi Kecepatan Konsolidasi

Estimasi kecepatan penurunan konsolidasi biasanya dibutuhkan untuk mengetahui besarnya kecepatan penurunan selama proses konsolidasi berlangsung. Hal ini perlu diperhatikan terutama bila penurunan diperkirakan besar. Bila penurunan sangat kecil, kecepatan penurunan tidak begitu perlu diperhitungkan, karena penurunan sejalan dengan waktunya tidak menghasilkan perbedaan yang berarti kecepatan konsolidasi dipengaruhi oleh permeabilitas tanah, tebal tanah kompresibel, waktu beban kerja serta kondisi drainase di atas dan di bawah lapisan tanah kompresibel.

2.4.5 Prosedur Monitoring Timbunan

Suatu timbunan di atas tanah lunak memerlukan kegiatan monitoring terhadap perilaku tanah lunak sebagai lapisan dasar konstruksi. Akibat pembebanan, tanah mengalami perubahan tegangan khususnya tekanan air pori ekses. Selain itu juga, tanah mengalami deformasi baik secara vertikal maupun secara horizontal. Beberapa instrumen monitoring penimbunan antara lain yaitu : *settlement plate*, *inklinometer*, dan *piezometer*.

2.5 Pengujian pada Tanah Lunak

Dalam kasus ini, pengujian tanah lunak dilakukan dengan dua cara yaitu investigasi lapangan dan pengujian laboratorium. Investigasi lapangan ada tiga cara pengujian antara lain: uji geser baling (*vane shear*), uji sondir, dan uji piezocone. Untuk pengujian di laboratorium, dilakukan uji triaksial dengan 3 kondisi pengujian yaitu, *Consolidated Drained* (CD), *Consolidated Undrained* (CU), *Unconsolidated Undrained* (UU).

2.6 Perbaikan Tanah menggunakan PVD dengan Metode Elemen Hingga

Salah satu metode perbaikan tanah yang digunakan pada kasus ini adalah menggunakan PVD. Dimana metode perbaikan tanah ini bertujuan untuk mengeluarkan air pori dalam tanah.

2.6.1 Metode Kombinasi *Preloading* dan PVD

Metoda perbaikan tanah dengan menggunakan *preloading* dan PVD merupakan metoda yang paling banyak digunakan. Metoda ini bertujuan untuk mempercepat keluarnya tekanan air pori ekses. Penggunaan pembebanan awal (*preloading*) merupakan teknik yang bermanfaat untuk memperbaiki tanah lunak juga dapat meningkatkan kapasitas kekuatan tanah (*bearing capacity*) dan menurunkan kompresibilitas tanah. Teknik ini dilakukan dengan membebani tanah dengan material timbunan tertentu yang menyebabkan penurunan pada tanah lunak tanpa merusak tanah lunak tersebut ketika di bebani.

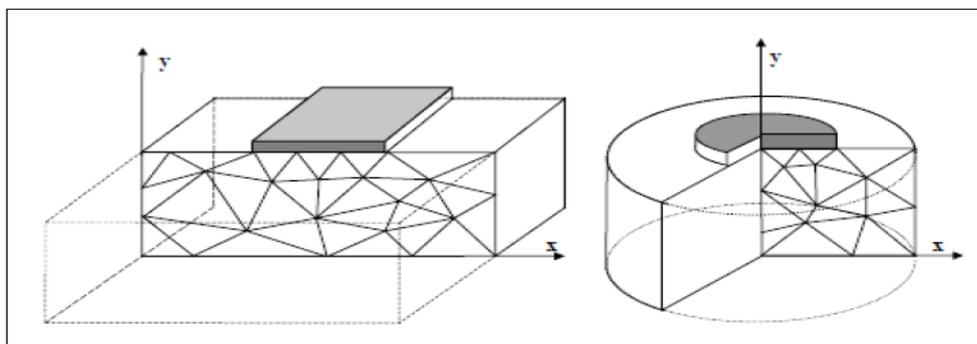
PVD merupakan suatu sistem drainase yang dipasang vertikal di dalam tanah lunak. Bahan baku *preloading* seperti pasir sangat mudah untuk didapatkan dan PVD juga telah banyak tersedia dengan banyak pilihan. PVD merupakan *strip vertikal drain* yang dibuat di pabrik. Umumnya dimensi PVD telah distandarisasi dengan ukuran lebar 100 mm dan ketebalan 3-5 mm. Penggunaan kombinasi *preloading* dan PVD dapat menghasilkan hasil yang efektif dan menjadi metode alternatif dan ekonomis untuk perbaikan tanah lunak.

2.6.2 Metode Elemen Hingga

PLAXIS adalah program komputer berdasarkan metode elemen hingga dua dimensi yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai aplikasi dalam bidang geoteknik. Program ini menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaringan elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisis.

2.6.3 *Axisymmetric dan Plane Strain*

Axisymmetric dan *plane strain* merupakan model geometri global PLAXIS yang dipilih berdasarkan yang paling mewakili kondisi di lapangan. Pola penanaman *vertical drain* terpasang di lapangan setempat-tempat dengan jarak tertentu, sementara dalam program PLAXIS fasilitas pengimplementasikan *vertikal drain* ada yang bersifat menerus (*plane strain*) dan radial (*axisymmetric*) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. *Plane strain* (model menerus) dan *axisymmetric* (model radial)
(Sumber: PLAXIS versi 8 Manual Acuan, 2007)

2.6.4 *Soft Soil Creep*

Perilaku mekanik dari tanah pada berbagai macam tingkat akurasi dapat dimodelkan sesuai dengan karakteristik tanah tersebut. Dari sekian banyak model material yang ada, beberapa model cocok untuk menganalisa perilaku tanah lunak di bawah beban tekan, yang mencakup proses konsolidasi. Pada kasus kali ini di gunakan Model *Soft Soil Creep* pada program komputer PLAXIS. Saat ini, model *soft soil creep* yang dikembangkan oleh Vermeer (1998) mempunyai beberapa karakteristik, di antaranya: kekakuan bergantung pada tegangan (perilaku kompresi logaritmik), perbedaan antara pembebanan primer dan unloading reloading, kompresi sekunder yang bergantung pada waktu, memori dari tegangan prakonsolidasi, perilaku keruntuhan menurut kriteria Mohr – Coulomb.

3. ANALISIS DATA

3.1 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data primer yang mencakup monitoring perilaku timbunan dan uji di lapangan serta uji laboratorium dan data sekunder yang mencakup data penyelidikan tanah sebelum pelaksanaan konstruksi timbunan di Delta Mahakam (Yakin, Y. A, 2013).

3.2 Kondisi Pemodelan

Analisis perilaku konstruksi timbunan di atas tanah lempung lunak pada kasus ini yaitu dengan menggunakan program PLAXIS 2D AE yang berbasis elemen hingga. Pada kasus ini, PVD dimodelkan *plane strain* dengan dikoreksi terlebih dahulu terhadap kondisi di lapangan

yang *axisymmetric*. Hasil analisis elemen hingga kemudian di verifikasi terhadap kondisi di lapangan dimana, monitoring di lapangan berupa *settlement plate*, *piezometer* dan *inclinometer*.

3.3 Parameter Tanah

Masukan *input* untuk program komputer PLAXIS pada *embankment* di Delta Mahakam **Tabel 2** adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Parameter Tanah Pada *Embankment* di Delta Mahakam

<i>Parameter</i>	<i>Fill</i>	<i>Layer 1</i>	<i>Layer 2</i>	<i>Layer 3</i>	<i>Layer 4</i>	<i>Unit</i>
<i>Soil Type</i>	<i>Sand</i>	<i>Very Soft Clay</i>	<i>Soft Clay</i>	<i>Silty Sand</i>	<i>Sandy Clay</i>	[-]
<i>Depth</i>	-	0 – 4,0	4,0 - 12	12 - 16	16 - 50	[m]
<i>Model</i>	<i>Mohr Coulomb</i>	<i>Soft Soil Creep</i>	<i>Soft Soil Creep</i>	<i>Mohr Coulomb</i>	<i>Soft Soil Creep</i>	[-]
<i>Type</i>	<i>Drained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Drained</i>	<i>Undrained</i>	[-]
γ_{unsat}	17	14	15	16,5	15,5	[kN/m ³]
γ_{sat}	19	15	16	17,5	16,5	[kN/m ³]
E_{50}	5.000	-	-	2.000	3.100	[kN/m ²]
ν	0,3	-	-	0,3	0,3	[-]
c	1	20	22	3	24	[kN/m ²]
ϕ	30	7	11	28	14	[°]
$K_h=K_v$	10	8,30E-04	3,05E-04	3,05E-03	1,39E-04	[m/day]
R_{inter}	0,8	0,6	0,6	0,8	0,8	[-]
C_c	-	1,25	0,8	-	0,55	[-]
C_r	-	0,13	0,065	-	0,035	[-]
$e_{initial}$	-	2,5	1,8	-	1,8	[-]
C_a	-	0,00800	0,00600	-	0,0045	[-]
λ^*	-	0,1553	0,12422	-	0,0854	[-]
κ^*	-	0,03230	0,02019	-	0,0109	[-]
μ^*	-	0.00099	0.00093	-	0,0007	[-]

(Sumber: *Geotechnical Engineering Center, 2008*)

Proses *running* pada program PLAXIS selain memerlukan sejumlah parameter yang sudah ada, juga memerlukan data tahapan dari suatu konstruksi *embankment*. Pada di atas, parameter untuk masukan PLAXIS dapat dibedakan dua model material yang masing-masing memiliki satu buah tipe material, yaitu untuk model material *mohr-coloumb*, maka tipe materialnya adalah *drained*. Material yang termasuk tipe ini adalah, *sandfill* dan *silty sand*. Sedangkan model material *soft soil creep*, tipe materialnya adalah *undrained*. Material yang termasuk tipe ini adalah *very soft clay*, *soft clay*, dan *sandy clay*.

3.4 Tahapan Konstruksi *Embankment* pada PLAXIS

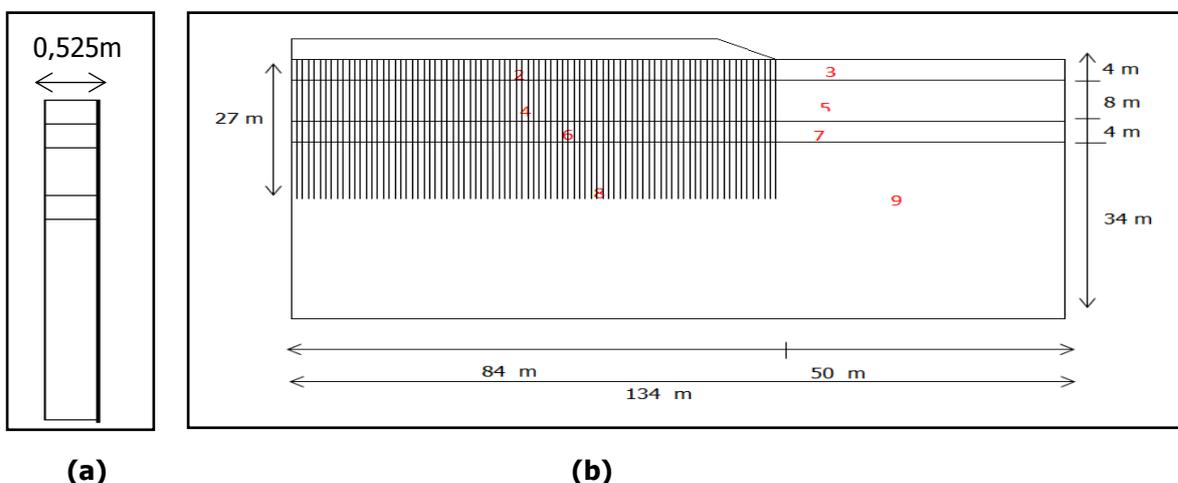
Konstruksi *embankment* untuk proyek reklamasi di Delta Mahakam dibangun secara bertahap dan sesuai dengan desain. Pada setiap tahapan penimbunan dan pemasangan *vertical drain* diperlukan durasi konstruksi selama satu hari untuk memodelkan waktu pada proses kalkulasi. Pada akhir dari setiap penimbunan, diberikan waktu beberapa hari untuk proses konsolidasi, sehingga terjadi disipasi air pori ekses. Tahapan konstruksi *embankment* dimulai pada permukaan tanah dasar dengan elevasi -4,00 m. Lapis ke – 1 dan lapis ke – 2 adalah *soft clay*, lapis ke – 3 adalah *silty sand*, dan untuk lapis ke 4 adalah *sandy clay*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Tahapan Konstruksi *Embankment* pada pemodelan PLAXIS 2D AE

No	Tahapan Pekerjaan	Waktu (hari)
1.	<i>Initial Phase</i>	-
2.	<i>Geotekstile</i>	1
3.	<i>Fill</i>	1
4.	<i>Consolidation</i>	7
5.	<i>Instalation PVD</i>	1
6.	<i>Fill</i>	1
7.	<i>Consolidation</i>	49
8.	<i>Fill</i>	1
9.	<i>Consolidation</i>	21
10.	<i>Fill</i>	1
11.	<i>Consolidation</i>	14
12.	<i>Fill</i>	1
13.	<i>Consolidation</i>	28
14.	<i>Fill</i>	1
15.	<i>Consolidation</i>	7
16.	<i>Fill</i>	1
17.	<i>Consolidation</i>	14
18.	<i>Fill</i>	1
19.	<i>Consolidation</i>	7
20.	<i>Levelling</i>	1
21.	<i>Consolidation</i>	147
22.	<i>Removal</i>	1
23.	<i>Consolidation</i>	42
24.	<i>Minimum Excess Pore Pressures</i>	-

3.5 Model Geometri Konstruksi *Embankment* dan Lapisan Tanah untuk masukan PLAXIS

Model geometri untuk masukan program komputer PLAXIS merupakan satu kesatuan dengan tabulasi paramater dan tahapan konstruksi. Geometri pemodelan *axisymmetric* dapat dilihat pada **Gambar 3a** berikut dimana pemodelan pada arah x adalah sebesar 0,525 m. Selain itu, dapat dilihat juga skema model geometri *plane strain* **Gambar 3b** dan perlapisan tanah **Tabel 4** pada *embankment* di Delta Mahakam.



Gambar 3. (a) Geometri pemodelan *axisymmetric* (b) *Plane strain* dan perlapisan tanah pada *embankment* Delta Mahakam

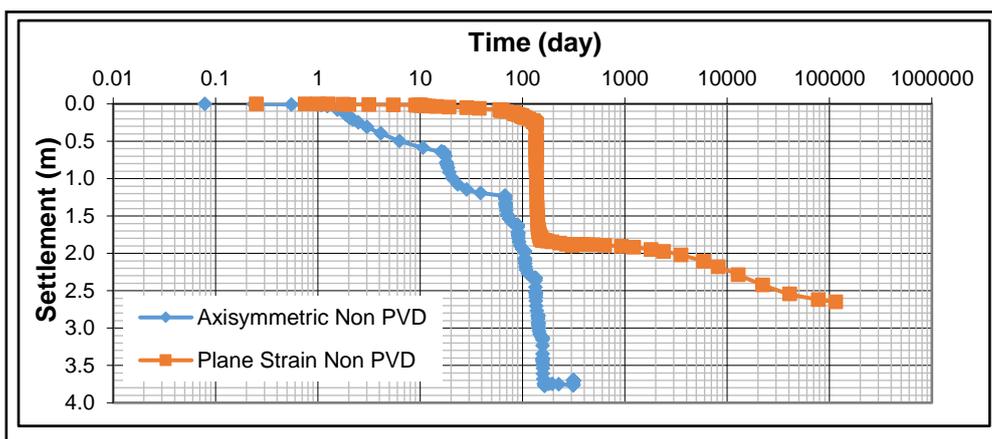
Tabel 4. Legenda dari Model Geometri *Embankment* Delta Mahakam

No.	Jenis Perlapisan Tanah	No.	Jenis Perlapisan Tanah
1.	<i>Sand Fill</i>	6.	<i>Silty Sand</i> , Lapis 3, PVD ($s = 1\text{ m}$)
2.	<i>Very Soft Clay</i> , Lapis 1, PVD ($s = 1\text{ m}$)	7.	<i>Silty Sand</i> , Lapis 3
3.	<i>Very Soft Clay</i> , Lapis 1	8.	<i>Sandy Clay</i> , Lapis 4, PVD ($s = 1\text{ m}$)
4.	<i>Soft Clay</i> , Lapis 2, PVD ($s = 1\text{ m}$)	9.	<i>Sandy Clay</i> , Lapis 4
5.	<i>Soft Clay</i> , Lapis 2		

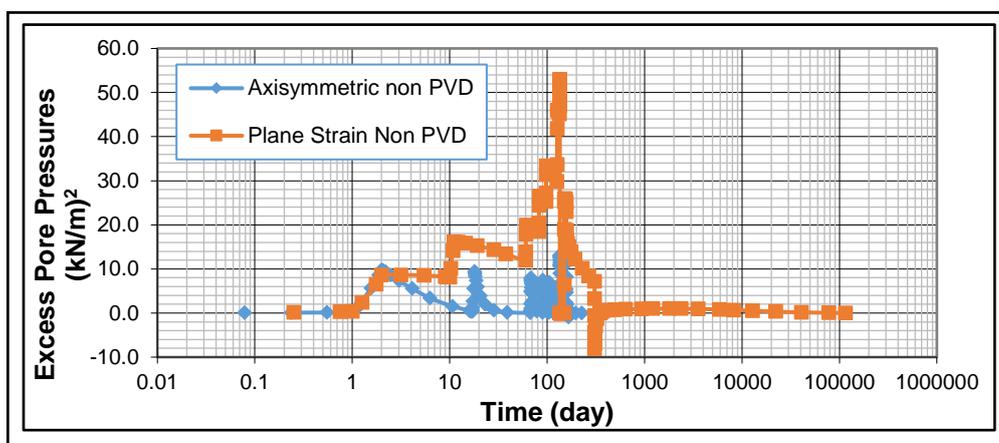
Setelah di *input* parameter tanah langkah selanjutnya adalah melakukan proses *running* PLAXIS 2D. Hasil *running* berupa nilai penurunan dan waktu penurunan berlebih akan disajikan dalam bentuk grafik.

3.6.1 Pemodelan Non PVD

Pemodelan tanah pada kondisi tanpa PVD dapat dilihat pada **Gambar 4**. Hasil analisis untuk tekanan air pori ekses kondisi tanpa PVD dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 4. Grafik penurunan vs. waktu konsolidasi tanah non PVD

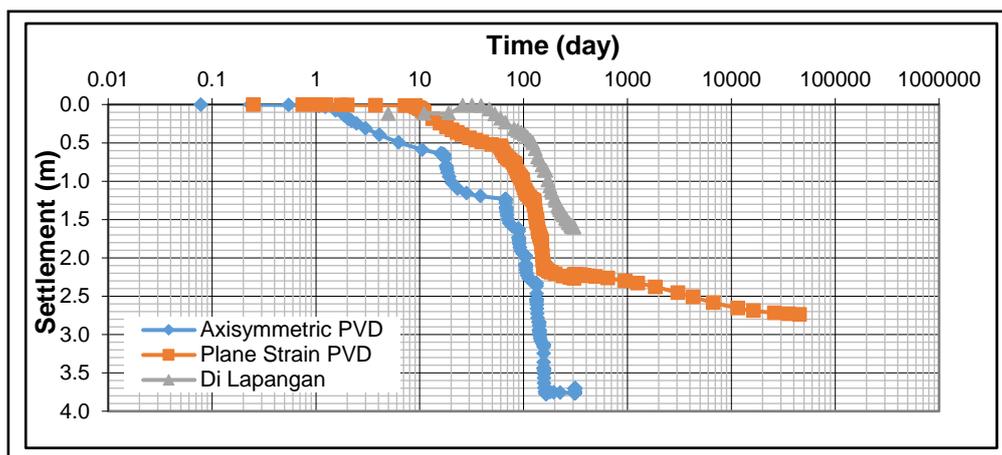


Gambar 5. Grafik tekanan air pori ekses non PVD

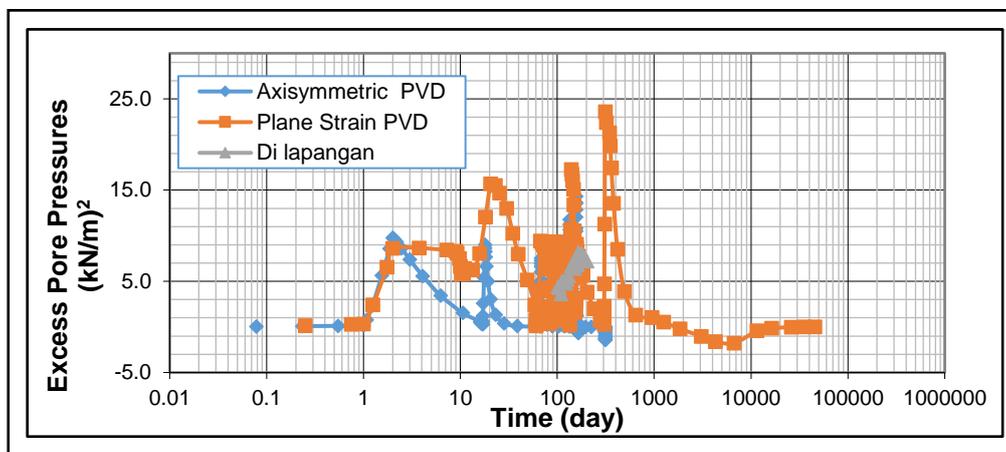
Berdasarkan Gambar 4, terlihat hasil dari kedua pemodelan tersebut, dimana untuk pemodelan *axisymmetric* memiliki penurunan sebesar 3,754 m dan untuk pemodelan *plane strain* memiliki penurunan sebesar 2,759 m dengan waktu konsolidasi untuk kondisi *axisymmetric* 314 hari dan *plane strain* 114.760,68 hari.

3.6.2 Pemodelan dengan PVD

Pemodelan tanah pada kondisi dengan PVD dapat dilihat pada **Gambar 6**. Hasil analisis untuk tekanan air pori ekskes kondisi dengan PVD dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Grafik penurunan vs. waktu konsolidasi tanah dengan PVD



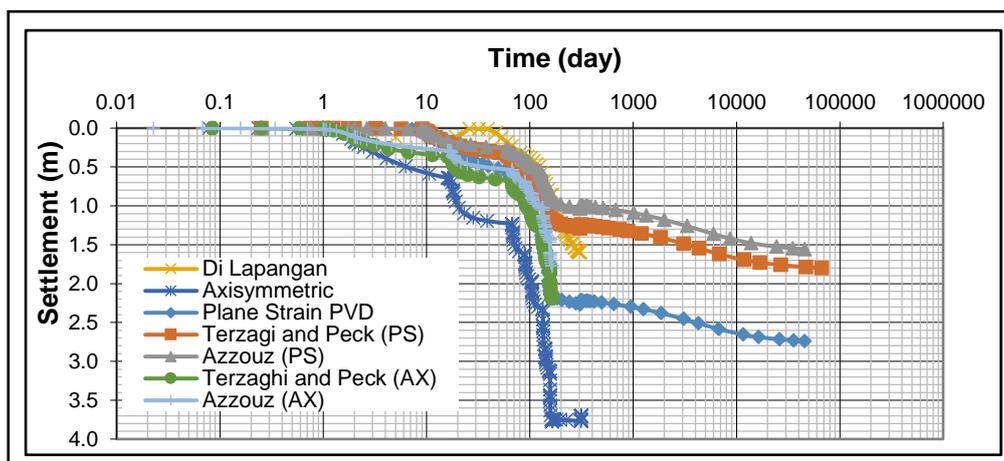
Gambar 7. Grafik tekanan air pori ekskes dengan PVD

Berdasarkan Gambar 6, terlihat hasil dari kedua pemodelan tersebut, dimana untuk pemodelan *axisymmetric* memiliki penurunan sebesar 3,70 m dan untuk pemodelan *plane strain* memiliki penurunan sebesar 2,74 m dengan waktu konsolidasi untuk kondisi *axisymmetric* 314 hari dan *plane strain* 45.437,97 hari.

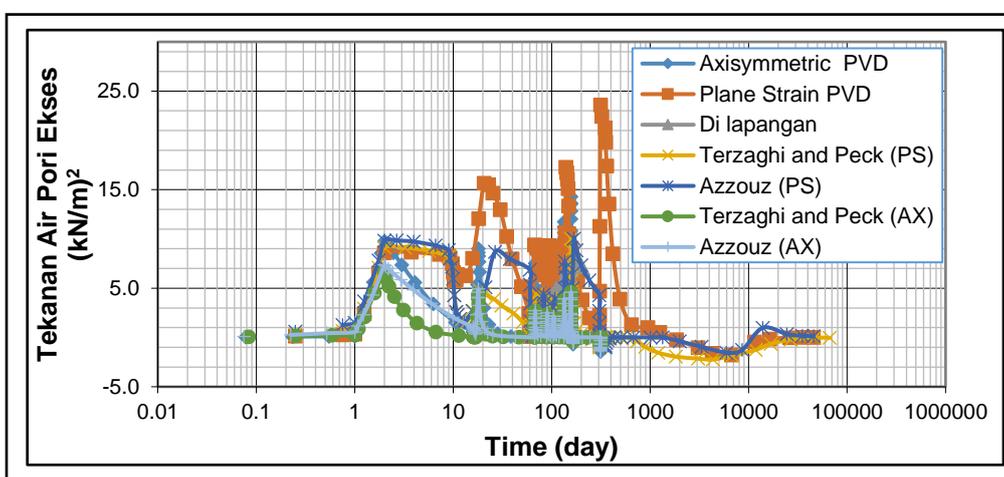
3.6.3 Pemodelan dengan mempertimbangkan Nilai Indeks Kompresi (C_c)

Pada kedua pemodelan ini **Gambar 8** dan **Gambar 9**, nilai indeks kompresi yang digunakan berdasarkan rumus dari Terzaghi dan Peck **Persamaan 2** dan Azzouz **Persamaan 3**.

Analisis Deformasi dan Tekanan Air Pori Ekses pada Tanah Lempung Lunak akibat Beban Timbunan



Gambar 8. Grafik penurunan dan waktu konsolidasi



Gambar 9. Grafik tekanan air pori ekses

Berdasarkan Gambar 8, terlihat garis dari metode Terzaghi dan Peck, juga metode Azzouz terlihat mendekati garis hasil pengukuran di lapangan. dimana hasil penurunan di lapangan adalah 1,60 m sedangkan hasil berdasarkan metode Terzaghi sebesar 1,80 m dan hasil penurunan dari metode Azzouz sebesar 1,56 m.

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengolahan data dan analisis pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Parameter kohesi (c), sudut geser dalam tanah (ϕ), indeks kompresi (λ^*), dan indeks rangkai (μ^*) merupakan parameter - parameter yang sensitif dalam menentukan besarnya penurunan lapisan tanah.
2. Parameter permeabilitas tanah (k) merupakan parameter yang sensitif dalam menentukan laju disipasi air pori ekses pada lapisan tanah lunak akibat beban timbunan.
3. Pada konstruksi *embankment* di Delta Mahakam dimana lapisan tanah lunaknya dipasang PVD, maka akan terjadi percepatan penurunan akibat proses disipasi tekanan air pori ekses oleh *vertikal drain*.

4. Metode Hird memiliki hasil analisis yang cukup mendekati *axisymmetric*. Hal ini berlaku pada berbagai variasi kondisi tanah, kondisi PVD, dan kondisi aliran drainase. Pemodelan Hird cukup sederhana karena hanya memodelkan titik PVD saja.
5. Metode Terzaghi dan Peck, juga metode Azzouz et. al memiliki hasil analisis yang paling mendekati lapangan. Dimana kedua metode ini lebih mempertimbangkan nilai indeks pemampatan (C_c). Semakin kecil nilai indeks pemampatan, maka semakin kecil penurunan yang terjadi. Sebaliknya, semakin besar nilai indeks pemampatan, maka penurunan yang terjadi semakin besar.
6. Dari hasil yang ada menunjukkan bahwa hasil penurunan yang dimodelkan pada program PLAXIS memiliki hasil lebih besar dari pada hasil di lapangan.

DAFTAR RUJUKAN

- Das, Braja M. (1995). Mekanika Tanah Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik, Jilid 2, Jakarta: Erlangga.
- Geotechnical Engineering Center (GEC). (2008). Evaluation and Recommendation of Soil Parameter and Design Review of SPU Camp. Bandung: Geotechnical Engineering Center (GEC).
- Hird, C.C., Pyrah, I.C. & Russell, D. (1992). Finite Element Modelling Of Vertical Drains Beneath Embankments On Soft Ground. *Géotechnique*. 42(3): 499–511, <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1992.42.3.499>.
- Yakin, Y.A. (2003). Karakterisasi Tanah Lunak Dan Analisis Perilaku Embankment di Pantai Utara Semarang. Tesis. Program Pascasarjana Universitas Katolik Parahyangan. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan
- Yakin, Y.A. (2013). Analisis Konsolidasi Lempung Lunak pada Regangan Besar. Disertasi, Program Doktor Universitas Katolik Parhyangan. Bandung: Universitas Katolik Parhyangan.