

**ANALISA PENURUNAN KONSOLIDASI METODE  
PRELOADING DENGAN DAN TANPA PREFABRICATED  
VERTICAL DRAIN (PVD) PADA PROYEK JALAN TOL  
BALIKPAPAN – SAMARINDA SEGMENT LIMA STA 20+375**

**ANALYSIS OF THE CONSOLIDATION SETTLEMENT  
PRELOADING METHOD WITH AND WITHOUT  
PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD) ON THE  
BALIKPAPAN – SAMARINDA TOLL ROAD PROJECT  
SEGMENT FIVE STA 20+375**

**Syahrul Khoirudin Satindra**

Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda  
*Syahrulkhoirudin3025@gmail.com*

**Muhammad Ridwan**

Staff Pengajar, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda  
*mridwan2000@gmail.com*

**Priyo Suroso**

Staff Pengajar, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda  
*priyo.suroso@ymail.com*

### INTISARI

Jalan tol Balikpapan-Samarinda merupakan jalan bebas hambatan yang dibangun untuk meningkatkan konektivitas dan mengurangi waktu tempuh antara kedua kota tersebut. Namun, pada segmen lima yang terletak di km. 36 Kecamatan Samboja diketahui bahwa kondisi tanah pada area tersebut didominasi tanah lempung lunak. Tanah lempung lunak cenderung memiliki potensi waktu penurunan yang cukup lama karena permeabilitasnya yang sangat rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan perbaikan tanah lunak dengan mengkombinasikan metode *preloading* dengan *prefabricated vertical drain* (PVD), sehingga proses penurunan dapat dipercepat secara signifikan. Tujuan studi ini adalah untuk menghitung besar dan lamanya waktu penurunan tanah asli dan metode *preloading* dengan dan tanpa PVD, serta mengetahui pola pemasangan PVD yang paling efisien terhadap waktu penurunan dengan jarak yang bervariasi. Studi kali ini menggunakan cara manual dan dengan program PLAXIS.

Dari hasil perhitungan secara manual diperoleh besar penurunan tanah asli ialah 1,037 m dan dengan metode *preloading* tanpa PVD ialah 1,370 m dengan lama waktu penurunan ialah 22,069 tahun. Sedangkan waktu penurunan dengan PVD dengan pola dan jarak yang berbeda ialah dari rentang waktu 2-4 bulan lamanya. Selain itu, dari hasil perhitungan PLAXIS dengan waktu yang sama dengan perhitungan manual diperoleh besar penurunan yang tidak begitu jauh dengan hasil perhitungan secara manual. Dari hasil perhitungan juga diketahui bahwa pola segitiga merupakan pola yang paling efisien dari segi waktu penurunan.

**Kata kunci:** tanah lempung lunak, penurunan, metode *preloading*, *prefabricated vertical drain* (PVD), PLAXIS

## ABSTRACT

The Balikpapan-Samarinda toll road is a freeway that was built to improve connectivity and reduce travel time between the two cities. However, in the fifth segment located at km. 36 Samboja Subdistrict is known that the soil conditions in the area are predominantly soft clay soils. Soft clay soils tend to have a potential decline in quite a long time because of extremely low permeability. To resolve this, do soft soil improvement by preloading method combines with prefabricated vertical drain (PVD), so that the process can be accelerated significantly decreased. The purpose of this study is to calculate the magnitude and length of time the original land degradation and preloading methods with and without PVD, as well as knowing the most efficient PVD installation patterns against time decrease with varied distance. This study using manual method and PLAXIS program.

From the results of manual calculations obtained a large decrease of the original land is 1,037 m and with the preloading method without PVD is 1,370 m with a decrease in time is 22,069 years. While the time decreased with PVD with different patterns and distances is from the span of two-four months. In addition, the results of the PLAXIS calculation with the same time as the manual calculation is obtained the large decrease is not so far with the results of manual calculation. From the calculation results it is also known that the triangle pattern is the most efficient pattern in terms of time decreased.

**Keywords:** soft clay soils, soil decreased, preloading methods, prefabricated vertical drain (PVD), PLAXIS

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Jalan tol Balikpapan-Samarinda merupakan jalan bebas hambatan yang dibangun untuk meningkatkan konektivitas serta mengurangi biaya logistik dan waktu tempuh antara kedua kota tersebut. Untuk tahap pengerjaannya, jalan tol Balikpapan-Samarinda dibagi dalam lima seksi. Pada seksi satu, pengerjaannya dibagi lagi menjadi lima segmen.

Pada salah satu segmen, yaitu segmen lima yang terletak di km. 36 Kecamatan Samboja ditemui permasalahan yaitu tanah dasar yang sebagian besar berupa rawa. Sehingga hampir di seluruh area proyek dilakukan penimbunan. Dari beberapa hasil penyelidikan tanah, diketahui tanah di area proyek didominasi tanah lempung lunak karena memiliki nilai uji SPT dibawah 4 ( $N\text{-value} < 4$ ). Berdasarkan data di lapangan, titik *stationing* yang paling kritis ialah pada STA 20+375 dengan kedalaman tanah lempung lunak mencapai  $\pm 13$  m.

Hal ini sangat dikhawatirkan, mengingat struktur di atasnya merupakan jalan tol yang nantinya akan dilalui oleh kendaraan-kendaraan berat dari arah Balikpapan

maupun Samarinda, yang lama kelamaan dapat menyebabkan struktur jalan tol menjadi rusak atau amblas akibat penurunan tanah yang belum sepenuhnya stabil. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan suatu solusi berupa perbaikan tanah lunak. Perbaikan tanah lunak dapat dilakukan dengan menggunakan PVD (*prefabricated vertical drain*) dan metode *preloading* (Pasaribu, 2012).

PVD dan metode *preloading* pada dasarnya dilakukan dengan cara memberikan beban awal berupa timbunan tanah yang dilengkapi sistem drainase buatan yang dipasang secara vertikal ke dalam lapisan tanah lunak. Tujuan utama penggunaan PVD dan metode *preloading* ialah untuk mempercepat proses konsolidasi sehingga pada saat jalan tol beroperasi tidak terdapat lagi penurunan yang signifikan. Oleh karena itu, studi penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besar dan lamanya waktu penurunan tanah metode *preloading* dengan dan tanpa menggunakan PVD, baik dengan cara manual maupun dengan bantuan program PLAXIS 8.2 2D.

**LANDASAN TEORI**

**Tanah Lunak**

Tanah lunak merupakan tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah dalam proyek konstruksi. Hal tersebut dikarenakan tanah lunak memiliki daya dukung dan kuat geser yang rendah.

Secara umum, tanah lunak memiliki sifat sebagai berikut:

1. tanah terdiri dari butiran – butiran yang halus,
2. memiliki kandungan air yang tinggi,
3. plastisitas tinggi,
4. tanah dengan permeabilitas yang rendah,
5. memiliki daya dukung relatif rendah,
6. memiliki sifat kompresibilitas yang tinggi,
7. memiliki sifat kembang susut yang tinggi,
8. memiliki potensi penurunan konsolidasi yang besar dalam waktu yang cukup lama.

**Teori Penurunan Tanah**

Terzaghi (1943) dalam Maspanji (2016), mengasumsikan bahwa beban yang bekerja atau deformasi tanah terjadi pada satu arah vertikal saja. Pada kondisi sebenarnya, deformasi dapat terjadi ke segala arah, sehingga deformasi yang terjadi akan terdistribusi ke segala arah dan menyebabkan nilai penurunan akan lebih kecil.

Secara umum, penurunan pada tanah dapat dibagi menjadi tiga komponen, yaitu :

1. Penurunan seketika merupakan penurunan yang terjadi seketika saat beban diberikan.
2. Penurunan konsolidasi adalah penurunan pada tanah kohesif yang diakibatkan terdispasinya tegangan air berlebih di dalam tanah, dan akhirnya menghasilkan perubahan dari segi volume.
3. Penurunan sekunder merupakan penurunan yang terjadi setelah penurunan konsolidasi. Penurunan biasanya terjadi sangat lama setelah beban mulai bekerja.

**Penurunan Konsolidasi**

Penambahan beban di atas lapisan tanah jenuh air menyebabkan tekanan air pori meningkat dan mengakibatkan air mengalir keluar dari pori-pori tanah sehingga

volumenya akan berkurang. Penurunan tanah tersebut disebut penurunan konsolidasi.

Menurut Das (1995), besar penurunan konsolidasi pada lapisan tanah lempung dapat dihitung dengan persamaan:

a. Untuk NC-Soil

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \dots\dots\dots(1)$$

b. Untuk OC-Soil

apabila  $P_o + \Delta p < P_c$  :

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \dots\dots\dots(2)$$

apabila  $P_o + \Delta p > P_c$  :

$$S_c = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_c}{P_o} + \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \dots\dots(3)$$

Dengan,

- $S_c$  = besar penurunan (m)
- $H$  = tebal lapisan tanah terkonsolidasi (m)
- $C_c$  = indeks pemampatan
- $C_s$  = indeks pengembangan
- $e_0$  = angka pori
- $P_o$  = tegangan *overburden* efektif
- $\Delta p$  = penambahan beban vertikal
- $P_c$  = tegangan pra-konsolidasi

**Waktu Penurunan Konsolidasi**

Terzaghi (1925) dalam Das (1995) memperkenalkan teori pertama kali untuk menghitung kecepatan konsolidasi satu dimensi untuk tanah lempung yang jenuh air. Berikut adalah asumsi - asumsi yang digunakan dalam melakukan perhitungan :

1. campuran lempung dan air homogen,
2. tanah benar – benar jenuh,
3. kemampumampatan air diabaikan,
4. kemampumampatan butiran tanah diabaikan,
5. aliran air hanya satu arah saja, yaitu searah pembebanan,
6. hukum Darcy berlaku.

Menurut Terzaghi (1943) dalam Das (1995), lamanya waktu penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$t = \frac{T_v \times H d r^2}{C_v} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan,

- $t$  = waktu konsolidasi (detik)
- $T_v$  = faktor waktu
- Hdr = panjang aliran air (drainage) (m)
- Hdr = H bila aliran satu arah
- Hdr =  $\frac{1}{2} H$  bila aliran dua arah
- $C_v$  = koefisien konsolidasi arah vertikal ( $m^2/detik$ )

**Pra-pembebanan (Preloading)**

Metode *preloading* dimaksudkan untuk mereduksi penurunan konsolidasi, yaitu dengan membebani tanah terlebih dahulu sebelum pelaksanaan pekerjaan konstruksi sebagai pengganti beban lalu lintas. Daya dukung tanah lempung dalam perencanaan beban preloading dihitung sebagai berikut :

$$H_{cr} = \frac{2 \cdot x_{cu}}{\gamma_{timbunan}} \dots\dots\dots (5)$$

Dengan,

- $C_u$  = kohesi tanah dasar ( $t/m^2$ )
- $\gamma_{timbunan}$  = berat volume tanah timbunan ( $t/m^3$ )
- $H_{cr}$  = tinggi timbunan kritis (m)

**Prefabricated Vertical Drain (PVD)**

Untuk mempercepat proses konsolidasi, dilakukan perbaikan tanah dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD). *Prefabricated vertical drain* (PVD) merupakan sistem drainase buatan yang dipasang secara vertikal ke dalam lapisan tanah lunak.

Adapun untuk menghitung waktu penurunan konsolidasi dengan PVD dapat dihitung dengan langkah – langkah berikut :

- a. menghitung nilai koefisien konsolidasi horizontal ( $C_h$ )
- b. menghitung nilai derajat konsolidasi vertikal ( $U_v$ )
- c. menghitung faktor waktu horizontal ( $T_h$ )
- d. menghitung nilai derajat konsolidasi horizontal ( $U_h$ )
- e. menghitung nilai derajat konsolidasi total ( $U$ )
- f. menghitung total konsolidasi ( $S_c$ ) pada waktu ke- $n$

**PLAXIS 2D**

PLAXIS 2D adalah sebuah program komputer dua dimensi yang dibuat berdasarkan metode elemen hingga yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisa deformasi, penurunan, maupun

stabilitas dalam rekayasa geoteknik. Hal ini dilengkapi dengan fitur untuk menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi menggunakan prosedur komputasi yang kuat dan secara teoritis. Pada program PLAXIS 2D terdapat beberapa jenis pemodelan tanah, yaitu :

1. Model *Mohr-Coulomb* (MC)
2. Model *Jointed-Rock* (JR)
3. Model *Hardening Soil* (HS)
4. Model *Soft Soil Creep* (SSC)
5. Model *Soft Soil* (SS)

Selain itu, dalam memodelkan elemen tanah pada program PLAXIS 2D dapat dilakukan dalam dua kondisi, yaitu :

1. Kondisi *drained*
2. Kondisi *undrained*

**METODOLOGI**

**Lokasi Penelitian**

Lokasi proyek pembangunan jalan tol Balikpapan-Samarinda segmen lima terletak di km. 36 Kelurahan Sei. Merdeka, Kecamatan Samboja, Kabupaten Kutai Kartanegara.



**Gambar 1.** Peta lokasi kegiatan proyek

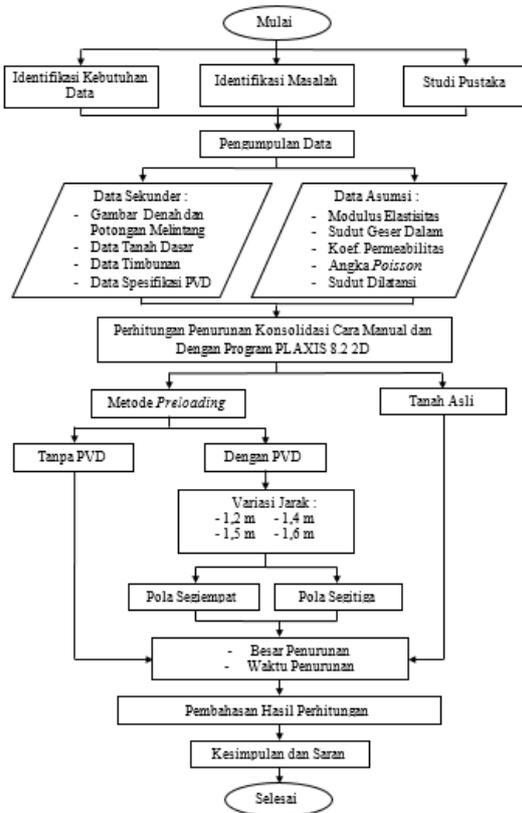
**Pengumpulan Data**

Data–data yang diperoleh merupakan data sekunder dari PT. Waskita Karya selaku kontraktor proyek pembangunan jalan tol Balikpapan – Samarinda segmen lima beserta data asumsi yang digunakan secara umum. Adapun data – data yang diperlukan untuk penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. gambar denah lokasi titik bor dan potongan melintang,
2. data tanah dasar,
3. data tanah timbunan,
4. data spesifikasi PVD.

**Bagan alir penelitian**

Dalam analisis penelitian ini tentunya melalui beberapa tahapan. Adapun tahapan – tahapannya dapat dilihat pada bagan alir berikut :



**Gambar 2.** Bagan alir penelitian (*flowchart*)

**PEMBAHASAN**

**Umum**

Dalam menganalisa, terdapat tiga perhitungan, yaitu perhitungan penurunan tanah asli, perhitungan penurunan tanah dengan metode *preloading*, dan perhitungan penurunan konsolidasi dengan *prefabricated vertical drain* (PVD). Selain penurunan konsolidasi, nantinya juga akan di cek kestabilan lereng timbunannya. Analisa dilakukan dengan cara manual maupun dengan program PLAXIS 8.2 2D.

**Perhitungan Penurunan Konsolidasi Tanah Asli**

Penurunan konsolidasi tanah asli merupakan penurunan tahap awal yang disebabkan oleh beban timbunan. Perhitungan penurunan konsolidasi tanah asli terdiri dari perhitungan tegangan *overburden* efektif, perhitungan tegangan akibat beban timbunan, perhitungan besar penurunan, dan perhitungan lamanya waktu penurunan.

a. Perhitungan Tegangan *Overburden* Efektif ( $P_o$ )

Berikut akan diberikan contoh perhitungan tegangan *overburden* efektif pada lapisan 1 ( $z = 3,5$  m) :

$$P_o = \gamma' \cdot (1/2 \cdot H)$$

$$P_o = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot (1/2 \cdot H)$$

$$P_o = (1,799 - 1) \cdot (1/2 \cdot 3,5) = 1,398 \text{ t/m}^2$$

Hasil rekap perhitungan tegangan *overburden* efektif ditunjukkan tabel berikut ini :

Tabel 1. Hasil rekap perhitungan tegangan *overburden* efektif

Lapisan	$\gamma_{sat}$ ( $t/m^3$ )	$\gamma'$ ( $t/m^3$ )	H (m)	$P_o$ ( $t/m^2$ )
1	1.799	0.799	3,5	1.398
2	1.810	0.810	5	3.423
3	1.902	0.902	3	4.776

b. Perhitungan Tegangan Akibat Beban Timbunan ( $\Delta p$ )

Berikut akan diberikan contoh perhitungan tegangan akibat beban timbunan pada lapisan 1 ( $z = 3,5$  m) :

$$q_0 = \gamma_{timbunan} \cdot H$$

$$= (1,7 \cdot 1,85) + (1,599 \cdot 1,5)$$

$$= 5,544 \text{ t/m}^2$$

$$\Delta p = 2 \cdot q_0 \cdot I$$

$$= 2 \cdot 5,544 \cdot 0,5 = 5,544 \text{ t/m}^2$$

Hasil rekap perhitungan tegangan akibat beban timbunan ditunjukkan tabel berikut ini:

Tabel 2. Hasil rekap perhitungan tegangan akibat beban timbunan

Lapisan	I	q <sub>0</sub>	ΔP
		(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )
1	0.5	5.544	5.544
2	0.48	5.544	5.322
3	0.47	5.544	5.211

c. Perhitungan Besar Penurunan (Sc)

Berikut akan diberikan contoh perhitungan besar penurunan pada lapisan 1 (z = 3,5 m) :

$$Sc = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o}$$

$$Sc = \frac{0,512 \cdot 3,5}{1 + 1,588} \cdot \log \frac{1,398 + 5,544}{1,398}$$

Sc = 0,482 m

Hasil rekap perhitungan besar penurunan ditunjukkan tabel berikut ini :

Tabel 3. Hasil rekap perhitungan besar penurunan

Lapisan	H	P <sub>o</sub>	ΔP	C <sub>c</sub>	e <sub>0</sub>	Sc
	(m)	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )			(m)
1	3,5	1.398	5.544	0.512	1.588	0.482
2	5	3.423	5.322	0.493	1.507	0.400
3	3	4.776	5.211	0.331	1.059	0.154
				Σ		1.037

d. Perhitungan Waktu Penurunan (t)

Berikut ialah perhitungan waktu 90% penurunan konsolidasi :

$$t = \frac{Tv \cdot Hdr^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0,848 \cdot 1150^2}{0,00163}$$

= 686435942,056 detik  
 = 686435942,056 / 3600 / 24 / 30 / 12  
 = 22,069 tahun

**Perhitungan Penurunan Konsolidasi Dengan Metode Preloading**

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan metode *preloading* hampir sama dengan penurunan konsolidasi tanah asli, yang membedakan ialah adanya penambahan beban awal berupa tanah timbunan setinggi

2,15 m sebagai pengganti beban lalu lintas. Perhitungan penurunan konsolidasi dengan metode *preloading* terdiri dari perhitungan tegangan *overburden* efektif, perhitungan tegangan akibat beban timbunan, perhitungan besar penurunan, dan perhitungan lamanya waktu penurunan.

a. Perhitungan Tegangan *Overburden* Efektif (P<sub>o</sub>)

Hasil perhitungan tegangan *overburden* efektif yang ditambah dengan beban *preloading* sama dengan perhitungan pada tanah asli, dikarenakan perhitungannya tidak berpengaruh sama sekali dengan penambahan beban *preloading*.

Hasil rekap perhitungan tegangan *overburden* efektif ditunjukkan tabel berikut ini :

Tabel 4. Hasil rekap perhitungan tegangan *overburden* efektif

Lapisan	γ <sub>sat</sub>	γ'	H	P <sub>o</sub>
	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )	(m)	(t/m <sup>2</sup> )
1	1.799	0.799	3,5	1.398
2	1.810	0.810	5	3.423
3	1.902	0.902	3	4.776

b. Perhitungan Tegangan Akibat Beban Timbunan (Δp)

Berikut akan diberikan contoh perhitungan tegangan akibat beban timbunan pada lapisan 1 (z = 3,5 m) :

$$q_0 = \gamma_{\text{timbunan}} \cdot H$$

$$= (1,7 \cdot 4,0) + (1,599 \cdot 1,5)$$

$$= 9,199 \text{ t/m}^2$$

$$\Delta p = 2 \cdot q_0 \cdot I$$

$$= 2 \cdot 9,199 \cdot 0,5 = 9,199 \text{ t/m}^2$$

Hasil rekap perhitungan tegangan akibat beban timbunan ditunjukkan tabel berikut ini:

Tabel 5. Hasil rekap perhitungan tegangan akibat beban timbunan

Lapisan	I	q <sub>0</sub>	ΔP
		(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )
1	0.5	9.199	9.199
2	0.48	9.199	8.831
3	0.47	9.199	8.647

c. Perhitungan Besar Penurunan (Sc)

Berikut akan diberikan contoh perhitungan besar penurunan pada lapisan 1 (z = 3,5 m) :

$$Sc = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o}$$

$$Sc = \frac{0,512 \cdot 3,5}{1 + 1,588} \cdot \log \frac{1,398 + 9,199}{1,398}$$

$$Sc = 0,609 \text{ m}$$

Hasil rekap perhitungan besar penurunan ditunjukkan tabel berikutini :

Tabel 6. Hasil rekap perhitungan besar penurunan

Lapisan	H	P <sub>o</sub>	ΔP	C <sub>c</sub>	e <sub>o</sub>	Sc
	(m)	(t/m <sup>2</sup> )	(t/m <sup>2</sup> )			(m)
1	3,5	1.398	9.199	0.512	1.588	0.609
2	5	3.423	8.831	0.493	1.507	0.545
3	3	4.776	8.647	0.331	1.059	0.216
					Σ	1.370

d. Perhitungan Waktu Penurunan (t)

Hasil perhitungan waktu penurunan yang ditambah dengan beban *preloadings* sama dengan perhitungan pada tanah asli. Perhitungannya tidak berpengaruh sama sekali dengan penambahan beban *preloading*, karena yang mempengaruhi lamanya waktu penurunan ialah nilai koefisien konsolidasi (Cv) tanah dasar. Dari hasil perhitungan tersebut, penurunan tanah pada STA 20+375 memerlukan waktu selama 22,069 tahun untuk mencapai derajat konsolidasi (U) 90%.

**Perhitungan Penurunan Konsolidasi Dengan PVD**

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan (PVD) dapat menggunakan metode yang diperkenalkan oleh Hansbo (1981). Pola pemasangan yang dihitung ialah pola segitiga dan pola segiempat dengan variasi jarak antar PVD yang berbeda-beda.

a. Pola segitiga

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan PVD pola segitiga akan dihitung dengan jarak pemasangan 1,2 m; 1,4 m; 1,5 m; dan 1,6 m. Berikut akan diberikan contoh perhitungan pola segitiga jarak 1,2 m :

- (1) Menghitung koefisien konsolidasi horizontal (Ch)

$$Ch = (1 - 2) \cdot Cv$$

Diambil nilai Ch = 2 . Cv

$$Cv \text{ gabungan} = 0,000000163 \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$= 5,152 \text{ m}^2/\text{tahun},$$

Maka nilai Ch = 2 . 5,152 = 10,305 m<sup>2</sup>/tahun

- (2) Menghitung derajat konsolidasi arah vertikal (Uv)

Misalkan pada waktu t = 10 hari = 0,027 tahun, maka :

$$Tv = \frac{Cv \cdot t}{Hd^2} = \frac{5,152 \cdot 0,027}{11,5^2}$$

$$= 0,001052$$

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot Tv}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{Tv}{\pi}\right)^{2,8}\right)^{0,179}}$$

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,001052}{3,14}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{0,001052}{3,14}\right)^{2,8}\right)^{0,179}}$$

$$= 0,037 \%$$

- (3) Menghitung faktor waktu horizontal (Th)

de = diameter hidrolis = 1,05 . s (pola segitiga)

$$de = 1,05 \cdot 1,2 = 1,26 \text{ m}$$

lebar PVD (a) = 10 cm

tebal PVD (b) = 0,3 cm, maka diameter ekivalen PVD adalah :

$$dw = \frac{2 \cdot (a+b)}{\pi} = \frac{2 \cdot (10+0,3)}{3,14}$$

$$= 6,56 \text{ cm} = 0,0656 \text{ m}$$

Misalkan pada waktu t = 10 hari = 0,027 tahun, maka :

$$Th = \frac{Ch \cdot t}{de^2} = \frac{10,305 \cdot 0,027}{1,26^2}$$

$$= 0,178$$

- (4) Menghitung derajat konsolidasi horizontal (Uh)

$$F = 2,21 + 1,39 = 3,60$$

$$Uh = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot Th}{F}\right)$$

$$Uh = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot 0,178}{3,60}\right)$$

$$Uh = 0,326 \%$$

- (5) Menghitung derajat konsolidasi total (U)

$$U = 1 - [(1 - U_v) \cdot (1 - U_h)]$$

$$U = 1 - [(1 - 0,037) \cdot (1 - 0,326)]$$

$$U = 1 - (0,963) \cdot (0,674)$$

$$U = 0,351 \%$$

- (6) Menghitung besar penurunan konsolidasi (Sc) pada waktu ke-n

$$S_c = U \cdot S_{ult}$$

$$S_c = 0,351 \cdot 1,370$$

$$S_c = 0,481 \text{ m}$$

**b. Pola segiempat**

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan PVD pola segiempat akan dihitung dengan jarak pemasangan 1,2 m; 1,4 m; 1,5 m; dan 1,6 m. Berikut akan diberikan contoh perhitungan pola segiempat jarak 1,2 m :

- (1) Menghitung koefisien konsolidasi horizontal (Ch)

$$C_h = (1 - 2) \cdot C_v$$

Diambil nilai  $C_h = 2 \cdot C_v$

$$C_v \text{ gabungan} = 0,000000163 \text{ m}^2/\text{detik}$$

$$= 5,152 \text{ m}^2/\text{tahun},$$

Maka nilai  $C_h = 2 \cdot 5,152 = 10,305 \text{ m}^2/\text{tahun}$

- (2) Menghitung derajat konsolidasi arah vertikal (Uv)

Misalkan pada waktu  $t = 10 \text{ hari} = 0,027 \text{ tahun}$ , maka :

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{Hd^2} = \frac{5,152 \cdot 0,027}{11,5^2}$$

$$= 0,001052$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{T_v}{\pi}\right)^{2,8}\right)^{0,179}}$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,001052}{3,14}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{0,001052}{3,14}\right)^{2,8}\right)^{0,179}}$$

$$= 0,037 \%$$

- (3) Menghitung faktor waktu horizontal (Th)

$$d_e = \text{diameter hidrolis} = 1,13 \cdot s$$

(pola segiempat)

$$d_e = 1,13 \cdot 1,2 = 1,356 \text{ m}$$

lebar PVD (a) = 10 cm

tebal PVD (b) = 0,3 cm, maka diameter ekivalen PVD adalah :

$$d_w = \frac{2 \cdot (a+b)}{\pi} = \frac{2 \cdot (10+0,3)}{3,14}$$

$$= 6,56 \text{ cm} = 0,0656 \text{ m}$$

Misalkan pada waktu  $t = 10 \text{ hari} = 0,027 \text{ tahun}$ , maka :

$$T_h = \frac{C_h \cdot t}{d_e^2} = \frac{10,305 \cdot 0,027}{1,356^2}$$

$$= 0,154$$

- (4) Menghitung derajat konsolidasi horizontal (Uh)

$$F = 2,29 + 1,39 = 3,68$$

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot T_h}{F}\right)$$

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot 0,154}{3,68}\right)$$

$$U_h = 0,289 \%$$

- (5) Menghitung derajat konsolidasi total (U)

$$U = 1 - [(1 - U_v) \cdot (1 - U_h)]$$

$$U = 1 - [(1 - 0,037) \cdot (1 - 0,289)]$$

$$U = 1 - (0,963) \cdot (0,711)$$

$$U = 0,315 \%$$

- (6) Menghitung besar penurunan konsolidasi (Sc) pada waktu ke-n

$$S_c = U \cdot S_{ult}$$

$$S_c = 0,315 \cdot 1,370$$

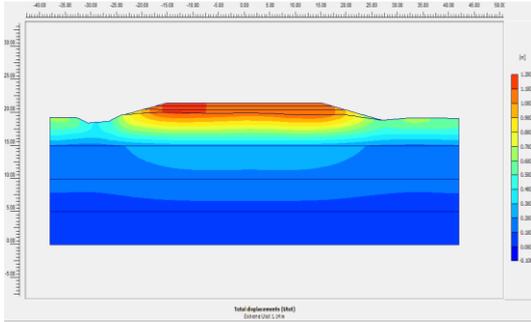
$$S_c = 0,432 \text{ m}$$

**Analisa Dengan Program PLAXIS 8.2 2D**

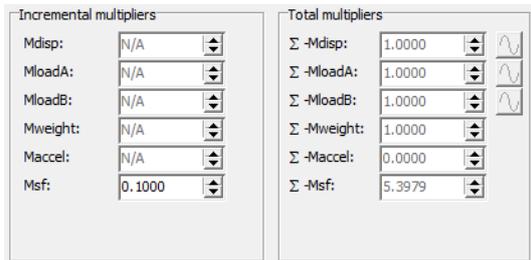
Analisa penurunan konsolidasi dengan program PLAXIS 8.2 2D juga dilakukan dengan tiga perbandingan kondisi, yaitu tanah asli (tanpa perbaikan tanah), dengan metode *preloading*, dan kombinasi *preloading* dengan *prefabricated vertical drain* (PVD). Untuk PVD, pola pemasangan yang di analisa hanya dengan pola segiempat dengan jarak pemasangan yang bervariasi.

Di bawah ini adalah hasil keluaran dari program PLAXIS 8.2 2D. Untuk kondisi dengan PVD hanya ditunjukkan pada jarak 1,2 m.

- a. Kondisi geometri tanah asli

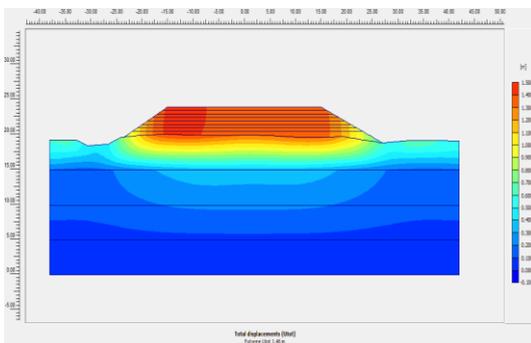


**Gambar 3.** Total displacements tanah asli

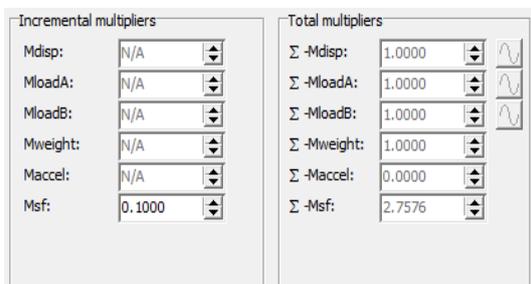


**Gambar 4.** Safety factor tanah asli

b. Kondisi geometri dengan beban preloading

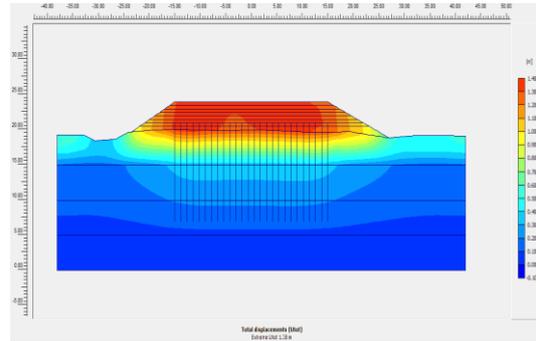


**Gambar 5.** Total displacements dengan beban preloading

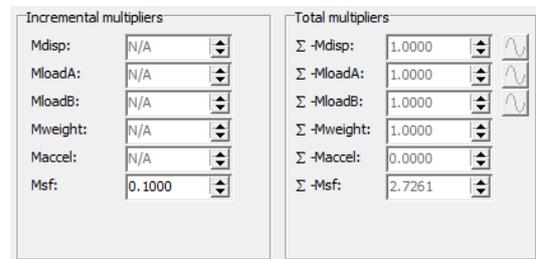


**Gambar 6.** Safety factor dengan beban preloading

c. Kondisi geometri dengan PVD jarak 1,2 m



**Gambar 7.** Total displacements dengan PVD jarak 1,2 m



**Gambar 8.** Safety factordengan PVD jarak 1,2 m

**Hasil Rekap Perhitungan**

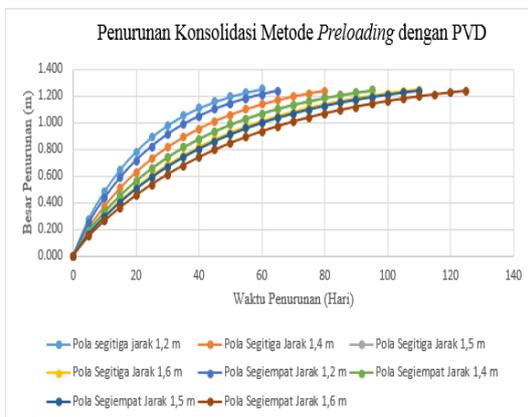
Adapun rekapitulasi hasil perhitungan dan grafiknya ialah sebagai berikut :

Tabel 7. Hasil rekap perhitungan penurunan konsolidasi tanpa PVD

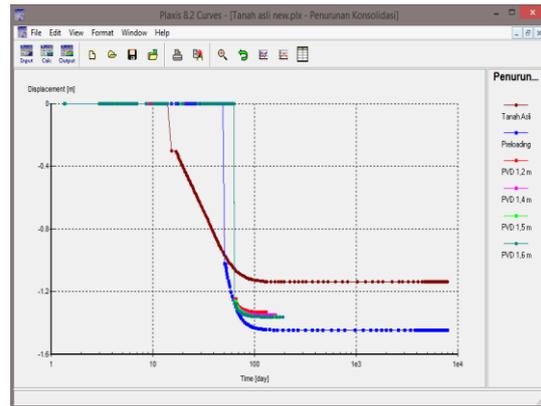
Penurunan Konsolidasi	Waktu Penurunan (hari)	Besarnya Penurunan (m)		Selisih (m)	SF
		Cara Manual	Program PLAXIS		
Tanah asli	7944.860	1.037	1.140	0.103 (9.95%)	5.40
Metode preloading	7944.860	1.370	1.460	0.090 (6.57%)	2.76

Tabel 8. Hasil rekap perhitungan penurunan konsolidasi dengan PVD pola segitiga dan pola segiempat

Penurunan Konsolidasi	Waktu Penurunan (hari)	Besarnya Penurunan (m)		Selisih (m)	SF
		Cara Manual	Program PLAXIS		
PVD pola segitiga jarak 1.2 m	60	1.254	-	-	-
PVD pola segitiga jarak 1.4 m	80	1.237	-	-	-
PVD pola segitiga jarak 1.5 m	95	1.241	-	-	-
PVD pola segitiga jarak 1.6 m	110	1.245	-	-	-
PVD pola segiempat jarak 1.2 m	65	1.235	1.380	0.145 (11.75%)	2.73
PVD pola segiempat jarak 1.4 m	95	1.241	1.400	0.159 (12.79%)	2.72
PVD pola segiempat jarak 1.5 m	110	1.237	1.410	0.173 (13.95%)	2.72
PVD pola segiempat jarak 1.6 m	125	1.235	1.400	0.165 (13.38%)	2.72



Gambar 9. Kurva penurunan konsolidasi dengan PVD pola segitiga dan segiempat berdasarkan perhitungan manual



Gambar 10. Kurva penurunan konsolidasi tanah asli, dengan beban preloading, dan PVD pola segiempat berdasarkan program PLAXIS 8.2.2D

**Pembahasan**

Dari Tabel 7 dan 8, diketahui hasil besar penurunan dengan program PLAXIS lebih besar daripada perhitungan secara manual. Hasil tersebut termasuk ideal, dikarenakan untuk keamanan (*safety factor*) kondisi sesungguhnya atau kondisi di lapangan. Karena biasanya penurunan yang terjadi di lapangan tidak sebesar itu. Hasil yang lebih besar tersebut biasanya dipengaruhi oleh berbagai faktor, yaitu tidak dilakukan pengujian parameter tanah secara mendalam pada proyek jalan tol ini sehingga mengasumsikan parameter tanah yang digunakan sesuai dengan jenis tanahnya. Hal itu memungkinkan parameter tanah yang sesungguhnya tidak sesuai dengan yang dimasukkan ke dalam program, bisa lebih kecil atau bisa juga lebih besar.

Selain itu, perhitungan secara manual dilakukan dengan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi (1943), dimana penurunan tersebut dianggap hanya satu arah yaitu arah vertikal saja. Sedangkan PLAXIS yang digunakan ini merupakan program dua dimensi, dimana dianggap penurunannya disebabkan tegangan dari dua arah yaitu arah vertikal dan arah horizontal serta perhitungan matematikanya yang lebih kompleks.

**PENUTUP**

**Kesimpulan**

Dari hasil perhitungan dan pembahasan, maka dapat disimpulkan beberapa hal yaitu sebagai berikut :

- a. Besar penurunan tanah asli yang terjadi adalah 1,037 m dengan perhitungan manual dan 1,140 m dengan menggunakan program PLAXIS 8.2 2D.
- b. Lama waktu penurunan yang dibutuhkan tanah asli dengan perhitungan manual adalah 7.944,860 hari atau 22,069 tahun, sedangkan untuk lama waktu penurunan dengan program PLAXIS 8.2 2D mengikuti hasil dari perhitungan manual.
- c. Besar penurunan dengan metode *preloading* yang terjadi adalah 1,370 m dengan perhitungan manual dan 1,460 m dengan menggunakan program PLAXIS 8.2 2D. Sedangkan yang dikombinasikan dengan PVD didapat besar penurunan pada kisaran 1,2 m di tiap pola dan jaraknya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.
- d. Lama waktu penurunan yang dibutuhkan dengan metode *preloading* dengan perhitungan manual adalah 7.944,860 hari atau 22,069 tahun, sedangkan untuk lama waktu penurunan dengan program PLAXIS 8.2 2D mengikuti hasil dari perhitungan manual. Untuk yang dikombinasikan dengan PVD didapat lama waktu penurunan yaitu dari rentang waktu 2-4 bulan dengan pola dan jarak pemasangan yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.
- e. Berdasarkan hasil perhitungan, pola pemasangan PVD yang paling efisien dari segi waktu penurunan ialah pola segitiga.

**DAFTAR PUSTAKA**

Ahmad, R., (2016), *Modul Ajar Analisa Stabilitas Lereng*. Samarinda: Jurusan Teknik Sipil Program Studi Rekayasa Jalan dan Jembatan Politeknik Negeri Samarinda.

Craig, R. F., (1989), *Mekanika Tanah*, Edisi Keempat (Soepandji, B. S., Penerjemah). Jakarta: Erlangga.

Das, B. M., (1995), *Mekanika Tanah : Prinsip – Prinsip Rekayasa Geoteknis*

*Jilid 1* (Noor Endah & Indrasurya, B.M., Penerjemah). Jakarta: Erlangga.

Google Maps, (2018), *Peta Lokasi Kegiatan Proyek*. Diakses tanggal 03 Maret 2018.

<https://www.google.co.id/maps/@1.0171305,116.9761666,4899a,35y,305.58h,1.89t/data=!3m1!1e3?hl=en>.

Hardiyatmo, H.C., (2002), *Mekanika Tanah II*, Edisi Ketiga. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H.C., (2008), *Geosintetik untuk Rekayasa Jalan Raya*, Edisi Pertama. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hidayati, A.M. dan Ardana, M.D.W., (2008), *Kombinasi Preloading dan Penggunaan Pre-fabricated Vertical Drains untuk Mempercepat Konsolidasi Tanah Lempung Lunak*. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, Vol. 12, No. 2, 187 – 195.

Julius, (2013), *Analisa Perbandingan Perhitungan Vacuum Preloading Dengan Program PLAXIS 2D dan Perhitungan Manual Dengan Data Aktual Lapangan*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bina Nusantara, Jakarta.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V., (1969), *Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.

Maspanji, D.A., (2016), *Prediksi Penurunan Metode Asaoka Pada Tanah Lunak Yang Diperbaiki Dengan Prefabricated Vertical Drain (Studi Kasus Timbunan Pada Jalan Tol Pejagan – Pemalang)*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah, Yogyakarta.

Pasaribu, T.H., (2012), *Analisa Penurunan Pada Tanah Lunak Akibat Timbunan (Studi Kasus Runway Bandara Medan Baru)*. *Jurnal Teknik Sipil USU*, Vol. 1, No. 2.

PLAXIS b. v., (2007), *PLAXIS Version 8 Material Models Manual*, Netherlands: A.A. Balkema Publishers.

- Rudiansyah, (2015), *Analisis Penurunan (Settlement) Tanah Lunak Dengan Pre-fabricated Vertical Drain (PVD) Menggunakan Program PLAXIS 2D 2012 (Studi Kasus : Pembangunan Port Coal Terminal, di Lubuk Tutung, Kalimantan Timur)*. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Mercu Buana, Jakarta.
- Santoso, K., (2010), *Analisis Soil Improvement Tanah Bekas Tambak Proyek Stadion Utama Surabaya Barat dengan System PVD dan PHD*. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Mercu Buana, Jakarta.
- Siregar, J.A., (2017), *Analisis Perbaikan Tanah Lunak Akibat Pengaruh Penggunaan PVD dan Geotekstil Dengan Menggunakan Metode Analitik dan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus Proyek Jalan Bebas Hambatan Medan-Kualanamu KM 35+622,42)*. Bidang Studi Geoteknik, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Sosrodarsono, S. & Nakazawa, K., (2000), *Mekanika Tanah & Teknik Pondasi*, Cetakan Ketujuh. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Sunggono, K.H., (1984), *Buku Teknik Sipil*. Bandung: Nova.
- Winner, D., (2017), *Perbaikan Tanah Dasar Menggunakan Pre-fabricated Vertical Drain Dengan Variasi Kedalaman dan Perkuatan Lereng Dengan Turap*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Yunita, D.E., (2013), *Analisa Penurunan Konsolidasi Pada Tanah Lempung Akibat Berat Timbunan Pada Proyek Lanjutan Iriasi Kota Bangun*. *Kurva S*, Vol. 1, No. 2, 1203-1214.