

## ANALISIS ALTERNATIF PERBAIKAN TANAH LUNAK DAN SANGAT LUNAK PADA JALAN TOL

Christian Eka Putra<sup>1</sup> dan Chaidir Anwar Makarim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
*christian.325160136@stu.untar.ac.id*

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
*chaidir259@gmail.com*

Masuk: 13-07-2020, revisi: 25-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 04-08-2020

### ABSTRACT

*The existence of soft soil is one of the problems in the field of construction. Soft soil is soil that has high water content and low carrying capacity. In the case of this toll road, soil investigation at the site shows that the subgrade in the toll road planning is soft clay soil to a depth of 32 meters so that soil improvement is needed. High landfill built on soft subgrade without reinforcement will experience landslides. So it is necessary to strengthen the landfill and repair the subgrade to prevent road slides. The soil improvement methods in use are vacuum preloading and Prefabricated Vertical Drain with the vacuum functioning as an additional load. In addition to accelerating the consolidation process, the vacuum can also reduce the height of the embankment needed to achieve the desired planned road elevation. Strengthening with geotextile is also carried out on the landfill with a height of 5.94 meters so that there is no landslide on the fill. Using soil improvement methods such as vacuum preloading and prefabricated vertical drain will increase the bearing capacity of the soil so that differences in bearing capacity occur before and after repair.*

*Keywords: soft soil; settlement; PVD; vacuum preloading*

### ABSTRAK

Keberadaan tanah lunak menjadi salah satu masalah dalam bidang konstruksi. Tanah lunak adalah tanah yang memiliki kadar air yang tinggi dan daya dukung yang rendah. Pada kasus jalan tol ini, penyelidikan tanah di lokasi menunjukkan bahwa tanah dasar pada perencanaan jalan tol merupakan tanah lempung lunak hingga kedalaman 32 meter sehingga dibutuhkan perbaikan tanah dasar. Timbunan tinggi yang dibangun di atas tanah dasar lunak tanpa perkuatan akan mengalami kelongsoran. Sehingga diperlukan perkuatan timbunan dan perbaikan tanah dasar untuk mencegah kelongsoran jalan. Metode perbaikan tanah yang digunakan adalah vacuum preloading dan Prefabricated Vertical Drain dengan vacuum berfungsi sebagai beban tambahan. Selain mempercepat proses penurunan, vacuum juga dapat mengurangi tinggi timbunan yang dibutuhkan untuk mencapai elevasi jalan rencana yang diinginkan. Perkuatan dengan *geotextile* juga dilakukan pada timbunan dengan tinggi yang mencapai 5.94 meter supaya tidak terjadi kelongsoran pada timbunan tersebut. Dengan menggunakan metode perbaikan tanah berupa vacuum preloading dan prefabricated vertical drain akan meningkatkan daya dukung tanah sehingga akan diketahui perbedaan daya dukung yang terjadi sebelum dan sesudah diperbaiki.

Kata kunci: tanah lunak; penurunan; PVD; *vacuum preloading*

### 1. PENDAHULUAN

Jalan tol adalah jalan umum yang merupakan bagian sistem jaringan jalan dan akan mempermudah pengguna jalan untuk mempersingkat jarak dan waktu tempuh dari satu tempat ke tempat lain. Ditemukan pada jalan tol ini bahwa kedalaman tanah lunak bervariasi hingga 32 m. Keberadaan Tanah lunak ini memberikan banyak kerugian seperti kurangnya daya dukung yang bisa menyebabkan mahalnya desain perencanaan, angka keamanan yang kecil dan bisa berbahaya dan memberikan kerugian seperti jalan mengalami penurunan yang menyebabkan jalan retak. Dikarenakan kedalaman tanah lunak yang cukup dalam, maka dibutuhkan perbaikan tanah untuk meningkatkan elevasi tanah dan juga menaikkan daya dukung tanah dasar tersebut. *Vertical Drain* dan *Preloading* merupakan beberapa metode yang dapat digunakan sebagai perbaikan tanah. Metode *Vacuum Preloading* (Kjellman, 1952). Dimana *Vacuum Preloading* menghisap air dan udara pada tanah dasar sehingga mempercepat proses konsolidasi yang terjadi.

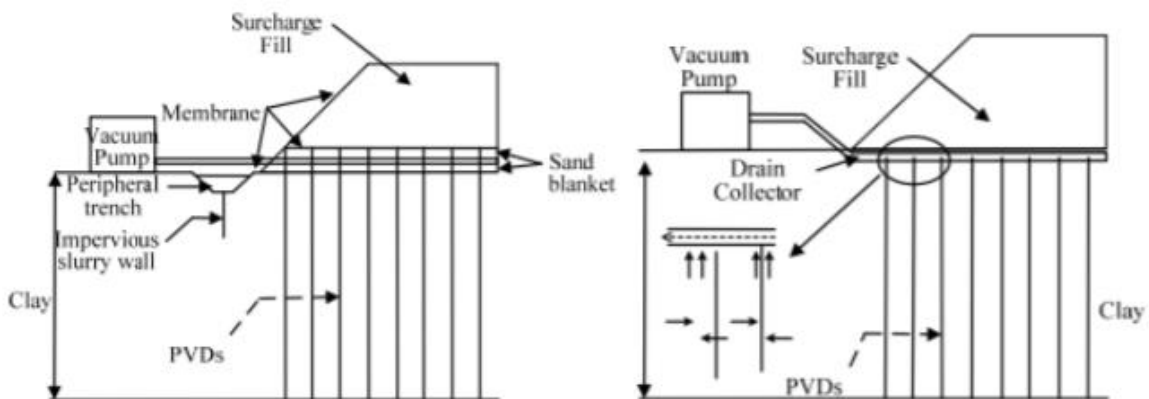
Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pola pemasangan, jarak antar PVD yang baik dan dapat digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi yang terjadi. Selain itu untuk mengetahui desain *vacuum preloading* dan timbunan yang dikombinasikan dengan timbunan dapat memberikan hasil yang sesuai dengan yang diinginkan. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan alternatif desain perbaikan tanah dengan menggunakan PVD dan *vacuum preloading* yang dapat digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi dan meningkatkan daya dukung tanah dasar.

### Tanah lunak

Tanah adalah lapisan permukaan bumi yang berasal dari material induk yang telah mengalami proses lanjut, karena perubahan alami dibawah pengaruh air, udara, dan macam - macam organisme baik yang masih hidup maupun yang telah mati. Tingkat perubahan terlihat pada komposisi, struktur dan warna hasil pelapukan (Dokuchaev, 1870). Tanah lunak memiliki daya dukung tanah yang kecil, pemampatan yang besar dan waktu konsolidasi yang lama (Das, 1998). Tanah lunak dalam konstruksi menjadi permasalahan. Daya dukung yang rendah menyebabkan kerugian, mulai dari kerugian dari sisi biaya konstruksi yang semakin mahal hingga rendahnya angka keamanan sehingga menyebabkan terancamnya keselamatan konstruksi. Struktur yang dibuat tidak mampu berdiri secara stabil bahkan bisa roboh.

### *Vacuum preloading*

Sama seperti PVD, *vacuum preloading* bertujuan untuk mempercepat proses konsolidasi yang terjadi. Vakum pada intinya adalah pengaplikasian beban sebesar 80 Kpa, sekitar 8 ton/m<sup>2</sup> diatas tanah dasar sehingga air pori dan udara didalam tanah menjadi berkurang dan proses konsolidasi dapat dipercepat. Metode vakum ini dapat mengurangi tinggi timbunan yang dibutuhkan sebagai beban untuk *preloading*.

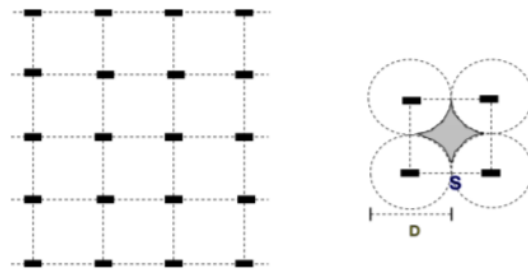


Gambar 1. Diagram metode vakum (Sumber: Indraratna, 2009)

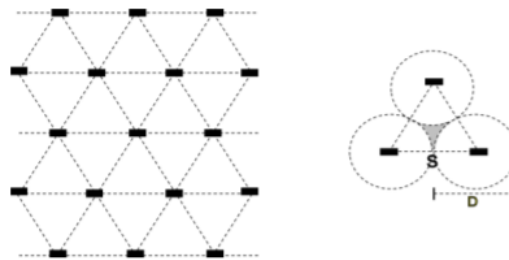
Gambar 1 merupakan gambaran desain yang akan direncanakan, dimana air pada tanah akan keluar melewati PVD dengan preloading (*surcharge fill*) sebagai beban. *Vacuum pump* juga berfungsi sebagai beban pada proses keluarnya air dari tanah.

### *Vertical drain*

Apabila waktu yang dibutuhkan untuk mencapai proses konsolidasi cukup lama, maka dibutuhkan *vertical drain* untuk membantu supaya waktu konsolidasi yang dibutuhkan dapat dipercepat. *Vertical Drain* berfungsi untuk memperpendek jalur air untuk keluar. Ada 2 pola yang dapat digunakan yaitu pola segitiga dan pola segiempat seperti Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Pola susunan PVD bujur sangkar (Sumber: Mochtar, 2000)



Gambar 3. Pola susunan PVD segitiga (Sumber: Mochtar, 2000)

Dalam mendesain PVD, faktor jarak dan koefisien konsolidasi menggunakan nilai arah horizontal. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah metode Baron sebagai berikut :

$$t = \frac{D^2}{8c_h} 2 \cdot F_n \ln \frac{1}{1-U_h} \quad (1)$$

dengan  $t$  = waktu konsolidasi,  $D$  = zona pengaruh PVD,  $c_h$  = koefisien konsolidasi untuk aliran horizontal,  $F_n$  = Faktor jarak *drain*,  $d$  = Diameter ekuivalen dari PVD.

Untuk pola bujur sangkar nilai sebagai berikut :

$$D = 1,13 \times S \quad (2)$$

Untuk pola segitiga :

$$D = 1,05 \times S \quad (3)$$

dengan  $s$  = *spacing* atau jarak antar PVD.

### Penurunan tanah

Jika lapisan tanah diberikan beban, maka tanah akan mengalami penurunan. Penurunan yang disebabkan oleh pengurangan rongga pori dan air di dalam tanah tersebut. Tanah didefinisikan secara umum adalah kumpulan dari bagian-bagian yang padat dan tidak terikat antara satu dengan yang lain (diantaranya mungkin material organik) rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air (Verhoef, 1994). Keluarnya air dan berkurangnya volume dari tanah tersebut menyebabkan naiknya daya dukung tanah dasar. Pada kasus tanah lempung yang berpemeabilitas rendah, tegangan air pori berlebih membutuhkan waktu yang cukup lama untuk teredispasi. Ada dua jenis penurunan konsolidasi yaitu konsolidasi normal (*normally consolidated*) dan konsolidasi berlebih (*over consolidated*) Berdasarkan teori Terzaghi tentang konsolidasi satu dimensi, untuk tanah terkonsolidasi normal dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$S_c = \frac{c_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{Po' + \Delta p}{Po'} \right) \quad (4)$$

dengan  $S_c$  = penurunan konsolidasi,  $c_c$  = nilai *compression index*,  $e_0$  = *Void Ratio* awal,  $H$  = Tinggi awal terkonsolidasi,  $Po'$  = Tegangan *overburden* efektif,  $Po' + \Delta p$  = Tegangan tanah akhir, yaitu tegangan tanah awal + tegangan akibat beban luar.

Sedangkan untuk tanah yang terkonsolidasi berlebih, penurunan dapat dihitung dengan persamaan berikut untuk ( $P_o' + \Delta p > P_c$ ) :

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{P_c'}{P_o'} \right) + \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left( \frac{P_o' + \Delta p}{P_c'} \right) \quad (5)$$

Apabila ( $P_o' + \Delta p < P_c$ ) :

$$S_c = \frac{C_s}{1+e_0} H \log \left( \frac{P_o' + \Delta p}{P_o'} \right) \quad (6)$$

dengan  $P_c'$  = Tegangan Prakonsolidasi.

### Lapisan tanah *compressible*

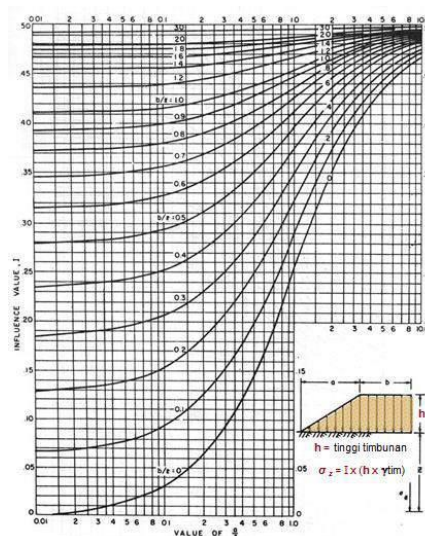
Untuk tebal lapisan tanah *compressible* yang diperhitungkan adalah tanah yang bisa mengalami pemampatan proses konsolidasi primer, yaitu yang memiliki nilai N-SPT > 10 dianggap sudah tidak dapat mengalami konsolidasi. seperti yang tertulis pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan N-SPT terhadap konsistensi tanah lempung (Terzaghi dan Peck, 1967)

Consistency	Unconfined Compression Strength, $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	N-SPT (blows per ft)	Saturated Unit Weight, (kN/m <sup>3</sup> )
Very Soft	0-25	0 - 2	< 16
Soft	25 - 50	2 - 4	16 - 19
Medium	50 - 100	4 - 8	17 - 20
Stiff	100 - 200	8 - 15	18 - 20
Very Stiff	200 - 400	15 - 30	19 - 22
Hard	>400	>30	>20

### Distribusi tegangan tanah

Distribusi tegangan tanah adalah pembagian beban yang diterima oleh tanah. Berdasarkan grafik Osterberg besarnya nilai koefisien pengaruh I untuk perhitungan besarnya tegangan vertikal yang terjadi dapat dilihat pada grafik berikut :



Gambar 4. Grafik faktor pengaruh beban bentuk trapesium (Mochtar)

$$\Delta P = I \times q_o \quad (7)$$

dengan I = faktor pengaruh,  $q_0$  = beban terbagi rata di atas.

### Waktu penurunan konsolidasi

Hal yang mempengaruhi waktu penurunan adalah panjang lintasan air untuk terdisipasi. Pada tanah yang terkonsolidasi tidak dengan menggunakan PVD, pengaliran yang terjadi hanya arah vertikal. Menurut Terzaghi dalam (B. M. Das), lama waktu konsolidasi dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$t = \frac{T_v (H_{dr})^2}{C_v} \quad (8)$$

dengan  $t$  = waktu konsolidasi,  $T_v$  = faktor waktu,  $H_{dr}$  = panjang aliran air,  $C_v$  = koefisien konsolidasi vertikal. Untuk derajat konsolidasi antara 0-60% dirumuskan dengan :

$$U = \left( 2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) 100\% \quad (9)$$

dengan  $U$  = derajat konsolidasi,  $T_v$  = faktor waktu.

## 2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Tahapan pertama, melakukan pengumpulan data data parameter tanah, data beban di atas tanah, beban timbunan, beban jalan tol, data PVD dan juga geometri timbunan.
2. Tahapan kedua, pengumpulan informasi yang berkaitan dengan perhitungan desain PVD dan *vacuum preloading* , penurunan tanah, waktu konsolidasi dari jurnal dan buku yang tersedia.
3. Tahapan ketiga, melakukan korelasi data pada parameter tanah dan pendekatan dari data-data yang ada dan dibutuhkan untuk perhitungan penurunan tanah, waktu konsolidasi dan stabilitas timbunan.
4. Tahapan keempat, melakukan analisis untuk penurunan yang terjadi, waktu penurunan dan derajat konsolidasi, serta stabilitas timbunan dan desain *geotextile* sebagai perkuatan timbunan yang digunakan.
5. Tahapan kelima, penjabaran hasil perencanaan tinggi timbunan *preloading* sesuai dengan hasil yang diinginkan, desain PVD , juga stabilitas timbunan yang dihasilkan. Setelah itu didapatkan hasil kesimpulan apakah metode *vacuum preloading* dan PVD yang direncanakan sesuai dengan yang diinginkan atau tidak.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perencanaan ini digunakan 3 titik bor yang berbeda serta dilakukan pengambilan sampel pada ketiga titik tersebut. Analisis dilakukan dengan geometri timbunan pada BH-1. Setelah dilakukan korelasi parameter pada data tanah, akan dilanjutkan dengan perhitungan tinggi timbunan actual ( $H_{initial}$ ) dengan  $H_{final}$  yang sudah direncanakan. Data korelasi timbunan dari BH-1, BH-2 dan BH-3 adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Data parameter tanah

Soil	Elevation (m)		$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	Po' (kN/m <sup>2</sup> )	Cc	Cu (kN/M <sup>2</sup> )	OCR	Pc (kN/m <sup>2</sup> )
CLAY	0	1,8	17,212	0,45	15,49	0,115	30		
CLAY	1,8	4	17,212	0,55	37,92	0,23	32,688	10,685	405,134
CLAY	4	6	16,615	1,103	52,46	0,866	39,226	3,5969	188,709
CLAY	6	8	15,928	0,55	65,01	0,23	26,151	4,1828	271,917
SILT	8	10	15,481	1,1	76,42	0,47	13,075	1,9624	149,969
SILT	10	14	15,978	1,1	93,86	0,47	13,075	2,1306	199,980
SILT	14	16	15,196	1,5	111	0,686	6,37	1,9809	219,899
SILT	16	18	17,299	1,5	123,5	0,686	13,075	0,8693	107,370
SILT	18	20	17,318	1,5	138,1	0,686	6,537	0,3886	53,685
SILT	20	22	17,318	1,5	152,8	0,686	19,613	1,0544	161,080
SILT	22	28	17,318	1,5	182	0,686	26,151	2,1506	391,503
SILT	28	30	17,358	1,5	211,4	0,686	26,151	1,0167	214,892
SILT	30	32	17,279	1,5	226	0,686	71,915	2,6151	590,985

Untuk menentukan tinggi timbunan yang diperlukan, pertama dihitung terlebih dahulu menghitung tinggi timbunan 1,2,3,4,5 dan 6 meter. Beban total akibat tinggi timbunan dan beban jalan adalah berikut :

Tabel 3. Beban total akibat tinggi timbunan dengan beban jalan

H beban timbunan (m)	Q lalu lintas (ton/m <sup>2</sup> )	H <i>traffic</i> (m)	H total (m)	a (m)	b (m)	q total (ton/m <sup>2</sup> )
1	1,5054	0,9408	1,9408	3,8817	12,55	3,105
2	1,5054	0,9408	2,9408	5,8817	12,55	4,705
3	1,5054	0,9408	3,9408	7,8817	12,55	6,305
4	1,5054	0,9408	4,9408	9,8817	12,55	7,905
5	1,5054	0,9408	5,9408	11,8817	12,55	9,505
6	1,5054	0,9408	6,9408	13,8817	12,55	11,105

Untuk menghitung penurunan sebelumnya perlu menghitung perubahan tegangan seperti contoh :

$$\frac{A}{Z} = 1,3385$$

$$\frac{B}{Z} = 4,328, \text{ dari grafik didapatkan nilai } I = 0,5.$$

Karena beban akibat timbunan berbentuk trapezium maka :

$$\Delta p = 2 \times q \times I = 3,105417$$

$$Po' + \Delta p = 6,970402 \text{ ton/m}^2$$

$Po' + \Delta p < Pc$ , maka :

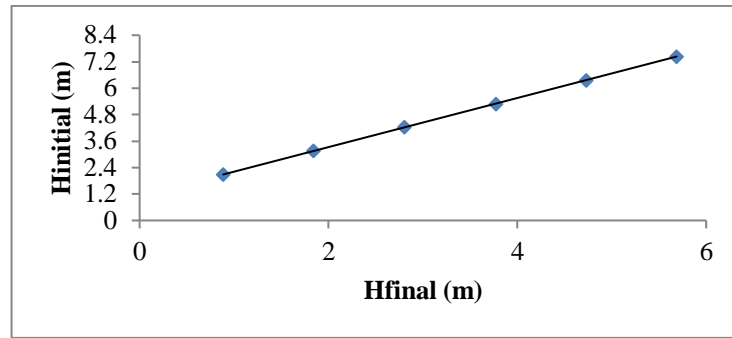
$$S_c = \frac{C_s}{1+e_0} H \log \left( \frac{Po' + \Delta p}{Po'} \right) = 0,01115 \text{ m.}$$

Hasil penurunan tiap lapisan dijumlahkan. Untuk perhitungan beban akibat perkerasan, menggunakan cara sama namun menggunakan grafik berbentuk persegi. Didapatkan hasil  $S_c$ ,  $H_{initial}$ ,  $H_{final}$  akhir sebagai berikut :

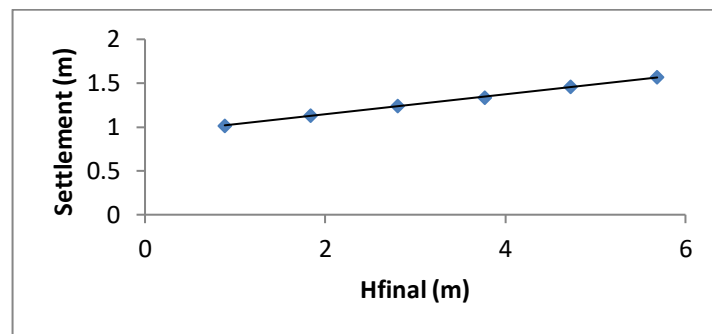
Tabel 4. Hasil  $H_{initial}$ ,  $H_{final}$ ,  $S_{c\text{total}}$

Htimb. (m)	q (ton/m <sup>2</sup> )	Hinitial (m)	Sc Timbunan (m)	Tebal Pavement (m)	Sc beban Pavement (m)	Sc Vacuum (m)	H final (m)	Sc Total (m)
1	3,105	2,081	0,225	0,76	0,0993	0,6910	0,8851	1,0157
2	4,707	3,157	0,346	0,76	0,0966	0,6910	1,8423	1,1342
3	6,305	4,226	0,456	0,76	0,0931	0,6910	2,8045	1,2408
4	7,905	5,289	0,557	0,76	0,0901	0,6910	3,7699	1,3382
5	9,505	6,364	0,677	0,76	0,0880	0,6910	4,7267	1,4570
6	11,105	7,434	0,789	0,76	0,0864	0,6910	5,6865	1,5667

Setelah didapatkan hasil berikut, dapat dibuat grafik hubungan antara  $H_{initial}$  dengan  $H_{final}$  dimana  $H_{final}$  adalah elevasi tinggi jalan yang direncanakan. Pada perencanaan ini akan ditinjau STA 109+000, STA 109+025, STA 109+050, STA 109+075, STA 109+100, STA 109+125, STA 109+150. Berikut grafik hubungan antara  $H_{initial}$  dan  $H_{final}$ , dan  $H_{final}$  dan *settlement* :



Gambar 5. Grafik hubungan antara Hinitial dengan Hfinal



Gambar 6. Grafik hubungan antara Hfinal dan Sc

Dari kedua gambar diatas bisa diambil persamaan untuk mendapatkan nilai Hinitial dan Sc. Dari persamaan tersebut dapat ditentukan berapa Hinitial dan penurunan (Sc) yang dihasilkan sesuai dengan Hfinal yang direncanakan. Hasil akhir yang didapat sebagai berikut :

Tabel 5. Hasil Hinitial, Hfinal, dan Sc

STA	Existing Ground (m)	Hfinal (m)	H initial (m)	Settlement (m)
109+000	2,867	7,222	5,949	1,413
109+025	2,916	6,964	5,607	1,378
109+050	2,965	6,754	5,319	1,349
109+075	3,04	6,594	5,057	1,322
109+100	3,07	6,484	4,901	1,306
109+125	3,06	6,408	4,828	1,299
109+150	3,163	6,333	4,629	1,278

Pada perhitungan ini dicoba variasi pemasangan PVD bujur sangkar dan segitiga dengan jarak pemasangan 0,8 hingga 2 m. Jarak pemasangan dihitung tiap 0,2 m. Berikut contoh perhitungan perencanaan PVD pola pemasangan segitiga :

$$C_v = 0,0457 \text{ m}^2/\text{minggu}$$

$$t = 1 \text{ minggu}$$

$$H_{dr} = 32 \text{ m}$$

$$T_v = \frac{1 \text{ minggu} \times 0,04571 \text{ m}^2/\text{minggu}}{32^2} = 4,46386 \times 10^{-5}$$

$$U_v = \left( 2 \sqrt{\frac{4,46386 \times 10^{-5}}{\pi}} \right) \times 100\% = 7,5389 \times 10^{-3} = 0,753894 \%$$

Setelah mnedapatkan nilai  $U_v$  kita perlu menghitung nilai  $U_h$  sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 C_v &= 0,0457 \text{ m}^2/\text{minggu} \\
 \text{Lebar PVD} &= 100 \text{ mm} \\
 \text{Tebal PVD (b)} &= 4 \text{ mm} \\
 dw &= \frac{2(a+b)}{\pi} \\
 &= 66,20845 \text{ mm} \\
 D &= \text{Diameter ekuivalen dari lingkaran tanah} \\
 &= 1,05 \times S \\
 &= 1,05 \times 0,8 \\
 &= 0,84 \text{ m} = 840 \text{ mm} \\
 n &= D/dw \\
 &= 840 / 66,24203 \\
 &= 12,680769 \\
 F(n) &= \ln(12,680769) - \frac{3}{4} \\
 &= 1,790086 \\
 U_h &= 1 - \left[ \frac{1}{e^{\frac{1 \times 8 \times 0,09142}{0,84^2 \times 2 \times 1,790086}}} \right] = 0,2513722 = 25,127\% \\
 \bar{u} &= [1 - (1 - u_h) \times (1 - U_v)] \times 100\% \\
 \bar{u} &= [1 - (1 - 0,2513722) \times (1 - 7,5389 \times 10^{-3})] \times 100\% \\
 &= 25,7016\%
 \end{aligned}$$

Setelah perhitungan selesai, pola pemasangan segitiga dipilih karena menghasilkan waktu yang lebih cepat untuk tercapainya derajat konsolidasi 90% dengan jarak pemasangan antar PVD adalah 1m. Waktu yang dihasilkan adalah 14 minggu.

Tabel 6. Hasil derajat konsolidasi pada pemasangan PVD pola segitiga

T (minggu)	0,8	1	1,2	1,5	1,7	2
1	25,702	15,829	10,639	6,622	5,132	3,749
2	44,554	28,839	19,792	12,420	9,603	6,947
3	58,592	39,795	27,955	17,798	13,800	9,973
4	69,065	49,044	35,263	22,817	17,771	12,869
5	76,883	56,862	41,816	27,512	21,541	15,651
6	82,722	63,475	47,697	31,910	25,125	18,330
7	87,085	69,070	52,977	36,033	28,536	20,914
8	90,345	73,805	57,720	39,899	31,784	23,408
9	92,782	77,813	61,981	43,528	34,880	25,817
10	94,603	81,207	65,811	46,934	37,830	28,146



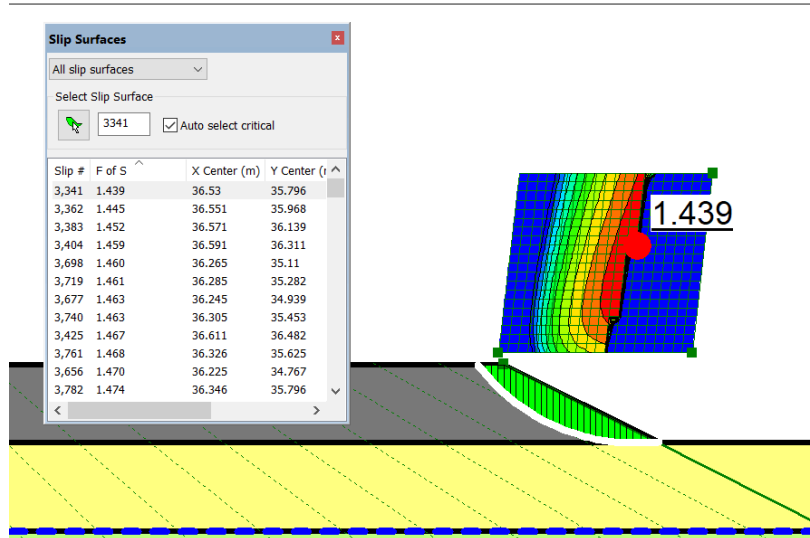
Lanjutan Tabel 6. Hasil derajat konsolidasi pada pemasangan PVD pola segitiga

T (minggu)	0,8	1	1,2	1,5	1,7	2
11	95,964	84,080	69,252	50,131	40,644	30,397
12	96,982	86,514	72,346	53,133	43,327	32,574
13	97,743	88,575	75,128	55,953	45,886	34,680
14	98,312	90,321	77,629	58,601	48,328	36,718
15	98,738	91,799	79,877	61,088	50,658	38,690
16	99,056	93,052	81,899	63,425	52,881	40,599
17	99,294	94,113	83,718	65,621	55,003	42,447
18	99,472	95,012	85,353	67,684	57,028	44,235
19	99,605	95,773	86,824	69,622	58,961	45,967
20	99,705	96,419	88,146	71,443	60,806	47,644
21	99,779	96,965	89,336	73,155	62,567	49,267
22	99,835	97,428	90,406	74,764	64,249	50,840
23	99,876	97,821	91,369	76,275	65,854	52,362
24	99,908	98,153	92,235	77,696	67,387	53,837
25	99,931	98,435	93,014	79,032	68,850	55,265

Tabel 7. Perubahan nilai Cu akibat beban bertahap pada tinggi timbunan kritis

$\sigma'$ (ton/m <sup>2</sup> )	Cu (kN/m <sup>2</sup> )
2,181	11,264
4,502	15,560
5,982	18,298
7,227	20,584
8,387	22,727
10,116	25,922
11,827	29,085
13,069	31,379
14,533	34,085
15,999	36,795
18,931	42,206
21,880	47,654
23,359	50,387

Nilai  $C_u$  baru yang didapatkan dicoba pada program bantu dengan tinggi timbunan kritis yaitu 1,5 m sebagai berikut :



Gambar 7. Hasil analisis program pada timbunan 1,5 m

Penurunan akibat timbunan bertahap dihitung seperti penurunan akibat timbunan dan beban perkerasan seperti berikut :

$$P_o' = 3,865 \text{ t/m}^2$$

$$P_c' = 41,298 \text{ t/m}^2$$

$$e_0 = 0,55$$

$$C_c = 0,23$$

$$C_s = 0,0153$$

$$\Delta p_1 = 0,8 \text{ t/m}^2$$

Karena  $P_o' + \Delta p_1 < P_c$  maka,

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_0} H \log \left( \frac{P_o' + \Delta p}{P_o'} \right)$$

$$S_c = \frac{0,0307}{1 + 0,55} \times 2,2 \times \log \left( \frac{3,865 + 0,8}{3,865} \right)$$

$$= 0,0035601 \text{ m}$$

$S_c$  dijumlahkan pada tiap lapisnya lalu dihitung sesuai dengan derajat konsolidasi dan waktu sebagai berikut untuk minggu 1 :

$$S_{c_{\text{kumulatif}}} = S_c \text{ 1} = 0,0547 \text{ m}$$

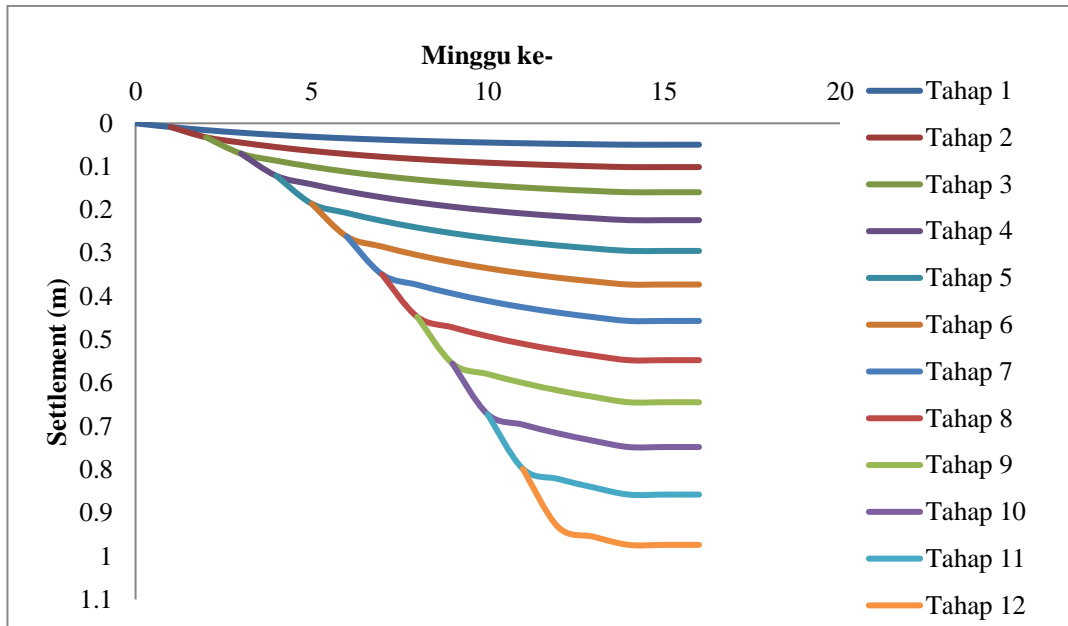
$$U_1 = 15,829 \% = 0,15829$$

$$S_{c_{\text{minggu 1}}} = S_{c_{\text{kumulatif}}} \times U_1$$

$$= 0,0547 \times 0,15829$$

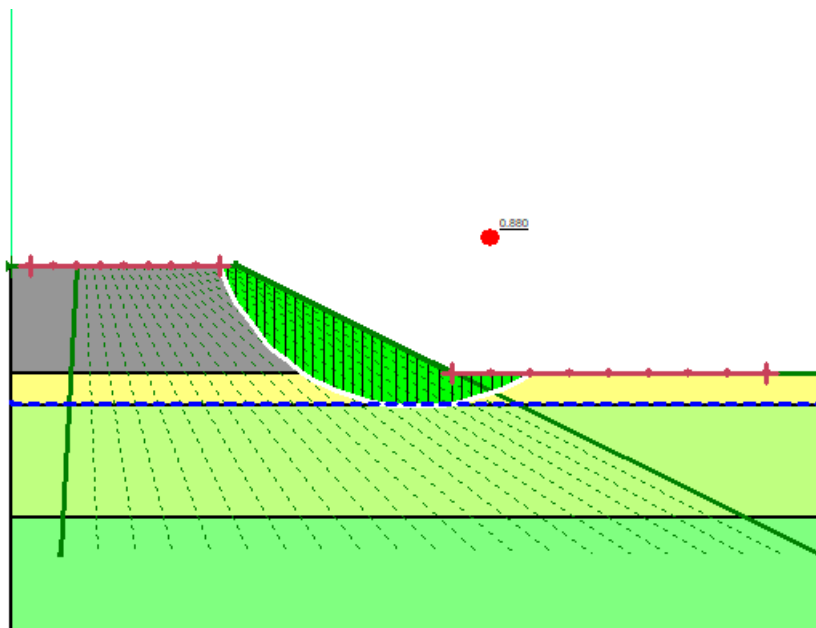
$$= 0,008658 \text{ m}$$

Setelah perhitungan pemampatan selesai, dapat dibuat grafik untuk mengetahui pemampatan yang terjadi setiap minggunya. Grafik pemampatan akibat timbunan bertahap adalah sebagai berikut.



Gambar 8. Grafik *settlement* akibat beban bertahap

Untuk perhitungan stabilitas timbunan akan menggunakan program bantu dicoba pada tinggi timbunan 5,94 m dan didapatkan hasil sebagai berikut :



Gambar 9. Hasil analisa program bantu dengan tinggi timbunan 5.94 m

Untuk perhitungan *geotextile* akan menggunakan *tensile strength* sebesar 200 dan 400 kN/m dan didapatkan hasil sebagai berikut :

$$T_{allow} = T_{ultimate} \times \left( \frac{1}{FS_{id} \times FS_{cr} \times FS_{cd} \times FS_{bd}} \right)$$

$$FS_{id} = 1,5$$

$$FS_{cr} = 3$$

$$FS_{cd} = 1,2$$

$$FS_{bd} = 1,15$$

$$T_{allow} = 200 \times \left( \frac{1}{1,5 \times 3 \times 1,2 \times 1,15} \right)$$

$$SF = 0,88$$

$$R = 11,629$$

$$SF \text{ rencana} = 1,5$$

$$M_R = 2391,3 \text{ kNm}$$

$$M_D = 2717,386 \text{ kNm}$$

$$\Delta M_R = 1684,779 \text{ kNm}$$

Dari hasil perhitungan  $\Delta M_R \leq T_{allow} \times \sum R_i$ , didapat kebutuhan *geotextile* sebanyak 17 lapis dengan jumlah lapis masing-masing 1 lembar.

Panjang *geotextile* di belakang bidang longsor pada lapisan pertama adalah

$$L_e = \frac{T_{allow} \times SF_{rencana}}{2 \times \tau_i \times E}$$

$$= 0,63077 \text{ m}$$

Tabel 8. Perhitungan panjang *geotextile*

Lapisan	Jumlah	$\sigma'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau$ timb (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau$ tanah dasar (kN/m <sup>2</sup> )	Le (m)	Ld (m)	Ltotal (m)	Ltotal (m)
1	1	94,14	54,35	41,38	0,63	8,25	8,88	17,76
2	1	90,22	52,08	40,07	0,65	8,18	8,83	17,67
3	1	86,3	49,82	38,76	0,68	8,01	8,72	17,39
4	1	82,38	47,56	37,45	0,71	7,78	8,49	16,98
5	1	78,45	45,29	36,15	0,74	7,61	8,36	16,72
6	1	74,53	43,03	34,84	0,77	7,38	8,15	16,31
7	1	70,61	40,76	33,53	0,81	7,16	7,98	15,96
8	1	66,69	38,50	32,22	0,85	6,89	7,75	15,51
9	1	62,76	36,23	30,92	0,89	6,65	7,55	15,10
10	1	58,84	33,97	29,61	0,95	6,36	7,31	14,60
11	1	54,92	31,70	28,30	1,00	6,05	7,06	14,13
12	1	50,99	29,44	26,99	1,07	5,74	6,81	13,62
13	1	47,07	27,17	25,69	1,14	5,38	6,53	13,06
14	1	43,15	24,91	24,38	1,22	5,06	6,29	12,58
15	1	39,23	22,64	23,07	1,32	4,72	6,04	12,07
16	1	35,33	20,38	21,76	1,43	4,376	5,80	11,69
17	1	31,38	18,11	20,46	1,56	4,04	5,61	11,21

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

##### Kesimpulan

1. Besar *settlement* total pada jalan tol adalah 1,413528 m dimana penurunan tersebut diakibatkan oleh beban timbunan, beban perkerasan, beban lalu lintas dan juga *vacuum*. Penurunan sebesar 1,413528 m adalah penurunan terbesar yang terjadi pada STA 109+000, sedangkan pada STA yang lain mengalami penurunan bervariasi disebabkan oleh tinggi timbunan yang berbeda sesuai dengan elevasi rencana jalan tol.
2. Elevasi rencana jalan tol tertinggi adalah +7,222 m pada STA 109+000. Tinggi timbunan yang dibutuhkan pada perencanaan PVD penuh setinggi 5,949 m dengan tambahan *existing ground* pada lapangan maka tinggi akhir rencana dapat tercapai.

3. Pemasangan PVD sepanjang tanah lunak menggunakan pola segitiga dengan jarak 1m, dimana untuk tanah mencapai derajat konsolidasi 90% dibutuhkan waktu selama 14 minggu. Apabila dibandingkan dengan pola segiempat dengan jarak 1 m didapatkan bahwa tanah waktu untuk mencapai derajat konsolidasi 90 % adalah 17 minggu.
4. Perkuatan tanah yang dipakai untuk mengatasi kelongsoran adalah geotekstil. Dengan program bantu didapatkan hasil pada timbunan 7 m dibutuhkan 17 lapis /m' geotekstil.
5. *Vacuum Preloading* memberikan hasil penurunan tambahan sebesar 0,691 m dan dapat disimpulkan bahwa keberadaan *vacuum* ini selain dapat mengurangi tinggi timbunan yang dibutuhkan, juga mempercepat terjadinya proses konsolidasi dengan memperbesar hasil pemampaan yang terjadi.

### **Saran**

Perkuatan pada perencanaan ini menggunakan *geotextile*, agar perencanaan bias lebih efisien dan lebih efektif dapat menggunakan *micropile* sebagai variasi lain. Untuk mencapai hasil yang lebih ekonomis dan efektif juga dapat dilakukan variatif kedalaman pemasangan PVD seperti 1/2 atau 2/3 dari kedalaman tanah lunak. Juga pada program bantu dapat dilakukan verifikasi pemograman dan metode lainnya supaya didapatkan hasil yang lebih baik.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- Das, Braja M. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga, 1998.
- Das, Braja M. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1985.
- Dokuchaev. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1870.
- Mochtar, Indrasurya B. *Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS, 2000.
- Terzaghi, Karl and Ralph Brazelton Peck. *Soil Mechanics in Engineering Practise*. Jakarta: Erlangga, 1967.
- Verhoef. *Geologi Untuk Teknik Sipil*. Jakarta: Erlangga, 1994.

