

# Perbaikan Tanah Lunak Kombinasi *Preloading* dengan *Prefabricated Vertical Drain* Studi Kasus Rencana Tanggul Lapindo Porong

M. Noer Hamsyah<sup>1</sup>, Gati Sri Utami<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Teknik sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

Email: \*[fita.fina3@gmail.com](mailto:fita.fina3@gmail.com)

## Abstract

*Sidoarjo mud is a volcanic mudflow disaster which until now still emits massive mud, therefore the PPLS plans to increase the construction of the embankment on the east side of the main embankment area to increase the strength of the embankment so that it can anticipate if one day there is an overflow so it does not penetrate the area. other. In the previous soil investigation stage, it was shown that the embankment area had subgrade with a relatively small N-SPT value with a thick soft soil layer up to a depth of 30 meters. The construction of this embankment is planned to be built on subgrade conditions which are classified as soft soil so that in the process before the construction of the embankment is very necessary with the improvement of the subgrade.*

*The method of improving soft soil with thickness is proposed using a combination of preloading with PVD to accelerate settlement.*

*To obtain a design height of 5.50 m, the required initial embankment height is 6.77 m with a compression of 1.307 m. The preloading system without the combination of PVD the time a consolidation degree of 90% ( $U = 90\%$ ) for 82.34 years. While the combination preloading system with PVD size 10 x 0.5 cm with a rectangular installation pattern and installation distance (S) 0.80 m, the time consolidation degree 90% ( $U = 90\%$ ) for 3 weeks. Implementation of gradual hoarding at a rate of 0.5 / week for 14 weeks.*

**Keywords:** embankment, *H*-initial, *H*-final, *Preloading*, *PVD*

## Abstrak

Lumpur Sidoarjo merupakan bencana semburan lumpur vulkanik yang hingga saat ini masih mengeluarkan lumpur secara besar-besaran, oleh karena itu PPLS berencana untuk menambah pembangunan tanggul di sisi timur kawasan utama tanggul untuk menambah kekuatan tanggul sehingga dapat mengantisipasi jika suatu saat kelak. terjadi overflow sehingga tidak menembus area tersebut. lain. Pada tahap investigasi tanah sebelumnya, terlihat bahwa area tanggul memiliki tanah dasar dengan nilai N-SPT yang relatif kecil dengan lapisan tanah lunak yang tebal hingga kedalaman 30 meter. Pembangunan tanggul ini rencananya akan dibangun pada kondisi tanah dasar yang tergolong tanah lunak sehingga pada proses sebelum pembangunan tanggul sangat diperlukan adanya perbaikan tanah dasar.

Metode perbaikan tanah lunak dengan ketebalan diusulkan menggunakan kombinasi *preloading* dengan PVD untuk mempercepat penurunan.

Untuk mendapatkan tinggi desain 5,50 m, tinggi tanggul awal yang dibutuhkan adalah 6,77 m dengan kompresi 1,307 m. Sistem *preloading* tanpa kombinasi PVD waktu derajat konsolidasi 90% ( $U = 90\%$ ) selama 82,34 tahun. Sedangkan sistem *preloading* kombinasi dengan PVD ukuran 10 x 0,5 cm dengan pola pemasangan persegi panjang dan jarak pemasangan (S) 0,80 m, derajat konsolidasi waktu 90% ( $U = 90\%$ ) selama 3 minggu. Pelaksanaan penimbunan bertahap dengan kecepatan 0,5 / minggu selama 14 minggu.

**Kata Kunci:** tanggul, *H*-inisial, *H*-final, *preloading*, *PVD*

## 1. Pendahuluan

Semburan lumpur Sidoarjo hingga saat ini terus aktif sehingga Pusat pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS) berencana membangun tanggul di sisi timur tanggul utama guna mengantisipasi luapan lumpur agar tidak meluas didaerah sekitar. Lumpur Sidoarjo diklasifikasikan menjadi empat kelas yaitu air berlumpur, lumpur basah, lumpur kering, dan lumpur mulai mengering. Lumpur basah memiliki potensi yang besar untuk merusak tanggul [1]

Jika kandungan mineral montmorillonite kepadatan dominan pada tanah lempung, maka tanah lempung lunak umumnya memiliki plastisitas yang tinggi. Tanah lempung yang daya dukung rendah, kadar air yang tinggi, koefisien permeabilitas tanah yang relative rendah sehingga air sukar terdrainasi, serta tingkat kompresibilitas tanah yang tinggi menyebabkan tanah berpotensi mengalami pemampatan yang massif secara perlahan dalam jangka waktu panjang. Apabila kondisi tanah yang terdapat dilapangan tersebut memiliki sifat-sifat yang tidak menguntungkan seperti yang telah disebutkan diatas, maka struktur bangunan yang berada diatasnya amat berpotensi mengalami kerusakan atau bahkan kegagalan struktur bangunan.

Metode umum yang sering digunakan dalam mengatasi penurunan adalah dengan Pra-pembebanan (*preloading*). Caranya dengan member beban sementara di atas tanah lunak bias berupa pasir, kerikil, atau campuran keduanya yang selanjutnya diambil kembali jika dirasa penurunan sudah cukup. Namun metode ini kurang efektif dan perlu adanya percepatan terhadap waktu konsolidasinya. Hal ini bias dipadukan dengan menggunakan *vertical drain* material yang digunakan adalah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD).

Lokasi Porong di jadikan sebagai tempat studi kasus, karena pada wilayah tersebut akan di rencanakan pembangunan tanggul diatas tanah lumpur. Mengingat tanah lumpur memiliki konsistensi yang sangat lunak, maka perbaikan tanah dinilai sangat perlu untuk di lakukan sebelum di laksanakan pembangunan tanggul.

## 2. Karakteristik Tanah Lunak

Tanah merupakan akumulasi partikel mineral yang tersementasi (terikat secara kimiawi) satu sama lain yang terbentuk akibat pelapukan dari batuan. Proses penghancuran dalam pembentukan tanah dari batuan terjadi secara fisis dan kimiawi. Secara fisis dapat diakibatkan dengan erosi oleh air, angin atau perpecahan akibat pembekuan dan pencairan es dalam batuan. Sedangkan cara kimiawi, mineral batuan induk diubah menjadi mineral-mineral baru melalui reaksi kimia.

Lapisan tanah yang lunak adalah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*) yang memiliki nilai standar penetrasi (N-SPT) yang <4 atau tanah organik seperti gambut yang mempunyai kadar air alamiah yang sangat tinggi. Tanah lempung merupakan jenis tanah berbutir halus dengan ukurannya <2 $\mu$  atau 5 $\mu$  [2]. Tanah lempung merupakan tanah yang bersifat kohesif sehingga memiliki: (1) Nilai prosentase kadar air (*water content*) berkisar antara 30% - 50% pada kondisi jenuh air, (2) Berat volume berkisar antara 0.9 t/m<sup>3</sup> sampai dengan 1.25 t/m<sup>3</sup>, (3) Angka pori berkisar antara 0.9 sampai 1.4, dan (4) *Spesific Gravity* rata-rata berkisar antara 2.7 sampai 2.9. [3]

Klasifikasikan lempung berdasarkan kadar air seperti pada Tabel 1.

**Tabel 1. Klasifikasi tanah lempung berdasarkan kadar air**

Tipe tanah lempung	Kadar air (%)
Kaku	21
Lembek	30 – 5
Lunak	90 – 120
Batas cair > 50%	

### 2.1 Penurunan Tanah (*Settlement*)

Penurunan (*settlement*) pada tanah dasar akan terjadi apabila tanah dasar tersebut menerima penambahan beban di atasnya. Penurunan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah,

relokasi partikel, dan keluarnya air atau udara dari dalam pori. Pada umumnya, penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu: (1) Penurunan segera/ *immediate settlement*, merupakan penurunan akibat perubahan elastic dari tanah kering, basah, dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan *immediate settlement* ini umumnya didasarkan pada teori elastisitas dan (2) Penurunan konsolidasi/ *consolidation settlement*, merupakan penurunan yang disebabkan oleh keluarnya air dari pori-pori didalam tanah. Penurunan konsolidasi dibagi lagi menjadi dua bagian, yaitu: konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder. [4]

Besarnya amplitudo/penurunan tanah total adalah:

$$St = Si + Scp + Scs + Slat \tag{1}$$

Dimana :

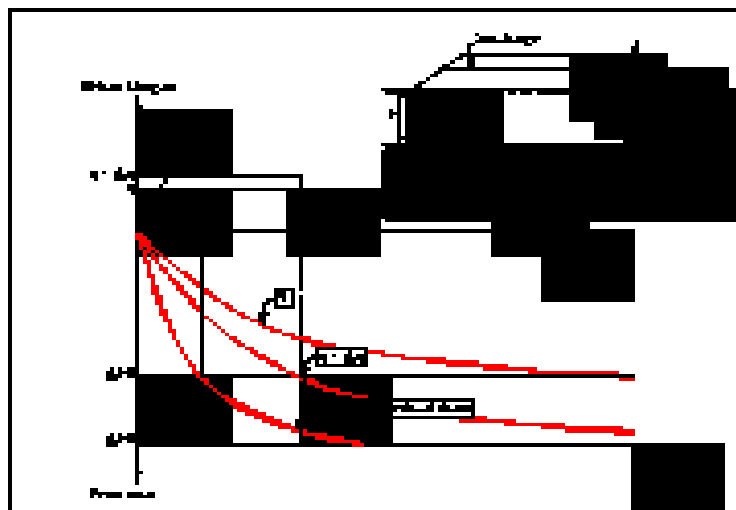
- St = total *settlement*
- Si = *immediate settlement*
- Scp = *consolidation primer settlement*
- Scs = *consolidation secondary settlement*
- Slat = *settlement* akibat pergerakan tanah arah lateral

## 2.2 Perbaikan Tanah Lunak

Perbaikan tanah lunak dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas karakteristik tanah, utamanya parameter kuat geser tanah yang berfungsi sebagai pendukung agar sebuah struktur mampu menahan konstruksi yang akan dibangun dengan deformasi yang diizinkan. Secara umum perbaikan dan perkuatan tanah dimaksudkan untuk: (1) Menaikkan daya dukung & kuat geser, (2) Menaikkan modulus, (3) Mengurangi kompresibilitas, (4) Mengontrol stabilitas volume (*shrinking & swelling*), (5) Mengurangi kerentanan terhadap likuifaksi, (6) Meperbaiki kualitas material untuk pendukung sebuah konstruksi, dan (7) Memperkecil pengaruh lingkungan.

## 2.3 Metode Pra-Pembebanan (*preloading*)

Metode *preloading* adalah suatu proses pemampatan tanah dengan jalan pemberian beban sementara sebelum konstruksi yang sesungguhnya didirikan. Bila diperlukan dan memungkinkan, besarnya *preloading* dapat melebihi beban konstruksi yang akan didirikan. Beban tambahan ini disebut *surcharge*. Pemberian *surcharge* akan mempercepat proses *preloading* sebagai mana diperlihatkan dalam gambar 1 [5].



Gambar 1. Prinsip Metode Preloading

**2.4 Perencanaan Vertical Drain**

Pada tanah lempung yang mengalami waktu konsolidasi sangat lama diperlukan suatu system untuk mempercepat proses konsolidasi. Pada umumnya, percepatan konsolidasi dilakukan dengan memasang tiang-tiang vertical sehingga dengan mudah dapat mengalirkan air (*vertical drain*).

*Vertical drain* yang mudah mengalirkan air biasanya berupa *sand drain*/tiang pasir atau bahan geosintetis yang dikenal dengan "*wick drain*" atau juga dikenal sebagai *Prevabricated Vertical Drain* (PVD). Pada umumnya PVD banyak digunakan karena kemudahan dalam pemasangan dilapangan. Tiang-tiang atau lubang-lubang tersebut dipasang didalam tanah pada jarak tertentu sehingga memperpendek jarak aliran drainase pori – pori (*drainage path*)[5]

**2.5 Menghitung Derajat Konsolidasi Rata-rata**

Harga  $U_v$  dicari dengan persamaan :

$$T_v = \frac{t \cdot C_v}{H_{dr}^2} \tag{2}$$

Dimana :

- H<sub>dr</sub> = ketebalan lapisan tanah yang dipasang PVD
- C<sub>v</sub> = harga C<sub>v</sub> pada tanah pada lapisan setebal panjang C<sub>v</sub>
- T<sub>v</sub> = waktu konsolidasi yang dipilih

$$U_v = \left( 2 \cdot \frac{T_v}{\pi} \right) \tag{3}$$

$$U_h = \left[ 1 - \frac{1}{e^{\left( \frac{1}{D^2 \cdot x^2 \cdot f(n)} \right)}} \right] \tag{4}$$

Derajat konsolidasi rata-rata  $\bar{u}$  dapat dihitung dengan persamaan :

$$\bar{U} = [1 - (1 - U_h) \cdot (1 - U_v)] \times 100\% \tag{5}$$

Akibat dari settlement, harga dari koefisien keseragaman (C<sub>u</sub>) meningkat, sehingga dapat meningkatkan daya dukung tanah secara signifikan. Untuk menghitung besar settlement dari lapisan tanah yang dipasang PVD, diperlukan nilai dari " $\bar{U}_{gab}$  (derajat konsolidasi)" untuk nilai "waktu (t)" yang bervariasi. Untuk tanah timbunan yang berlapis-lapis dengan harga C<sub>v</sub> dan ketebalan berbeda-beda, maka :

$$C_v (rata - rata) = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left( \frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right)^2} \tag{6}$$

$$t = \frac{(H_{di} - gab)^2}{C_v (rata - rata)^2} \tag{7}$$

dimana :

- H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>n</sub> = tebal lapisan tanah lempung yang mengalami pemampatan.
- C<sub>v1</sub>, C<sub>v2</sub>, C<sub>vn</sub> = harga C<sub>v</sub> untuk masing-masing lapisan tanah yang bersangkutan.

**2.6 Waktu Konsolidasi Akibat Vertical Drain**

Perhitungan dan penentuan waktu penurunan tanah dasar dengan menggunakan PVD berdasarkan teori aliran pasir vertikal, menggunakan asumsi konsolidasi linier satu dimensi: [6]



$$t = \left(\frac{D^2}{8Ch}\right) F(N) \left(\frac{1}{1-\bar{U}_h}\right) \left(\frac{D^2}{8Ch}\right) F(N) \left(\frac{1}{1-\bar{U}_h}\right) \tag{8}$$

Dimana:

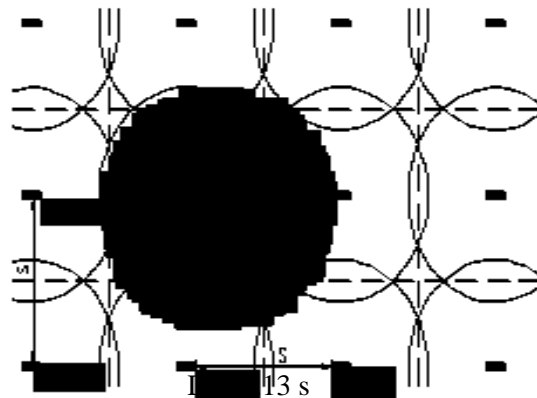
- D = diameter cylinder (zona yang dipengaruhi oleh drain)
- = 1.13 s untuk pola pemasangan PVD segiempat
- = 1.05 s untuk pola pemasangan PVD segitiga
- = s adalah jarak PVD
- Ch = koefisien konsolidasi arah horizontal
- F(N) = faktor jarak drain

$$= \left(\frac{n^2}{n^2-1^2}\right) \left[\ln(n) - \frac{3}{4} - \left(\frac{1}{4n^2}\right)\right] \left(\frac{n^2}{n^2-1^2}\right) \left[\ln(n) - \frac{3}{4} - \left(\frac{1}{4n^2}\right)\right] \tag{9}$$

Atau

$$= \left(\frac{n^2}{n^2-1^2}\right) \left[\ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{4n^2}\right)\right] \left(\frac{n^2}{n^2-1^2}\right) \left[\ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{4n^2}\right)\right] \tag{10}$$

dw = diameter ekivalen PVD



Gambar 2. Pemasangan Vertical Drain Pola Segi Empat

### 2.7 Perencanaan Preloading Secara Bertahap

Pada preloading dengan beban bertahap, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ketinggian timbunan rencana sangat tergantung dari peningkatan daya dukung tanah dasarnya, penambahan setiap lapisan beban preloading menuju kepada ketinggian yang masih mampu dipikul oleh tanah dasarnya agar tidak terjadi kelongsoran disebut dengan ketinggian kritis timbunan yang dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$H_{cr} = \frac{C \cdot N_c}{\gamma_{timb} \cdot SF} \tag{11}$$

Dimana :

- C = Kohesi
- Nc = parameter daya dukung yang nilainya tergantung Ø

$\gamma_{\text{timbunan}}$  = berat volume timbunan

SF = angka keamanan

Perhitungan  $C_u$  baru setelah dilakukan tahapan penimbunan

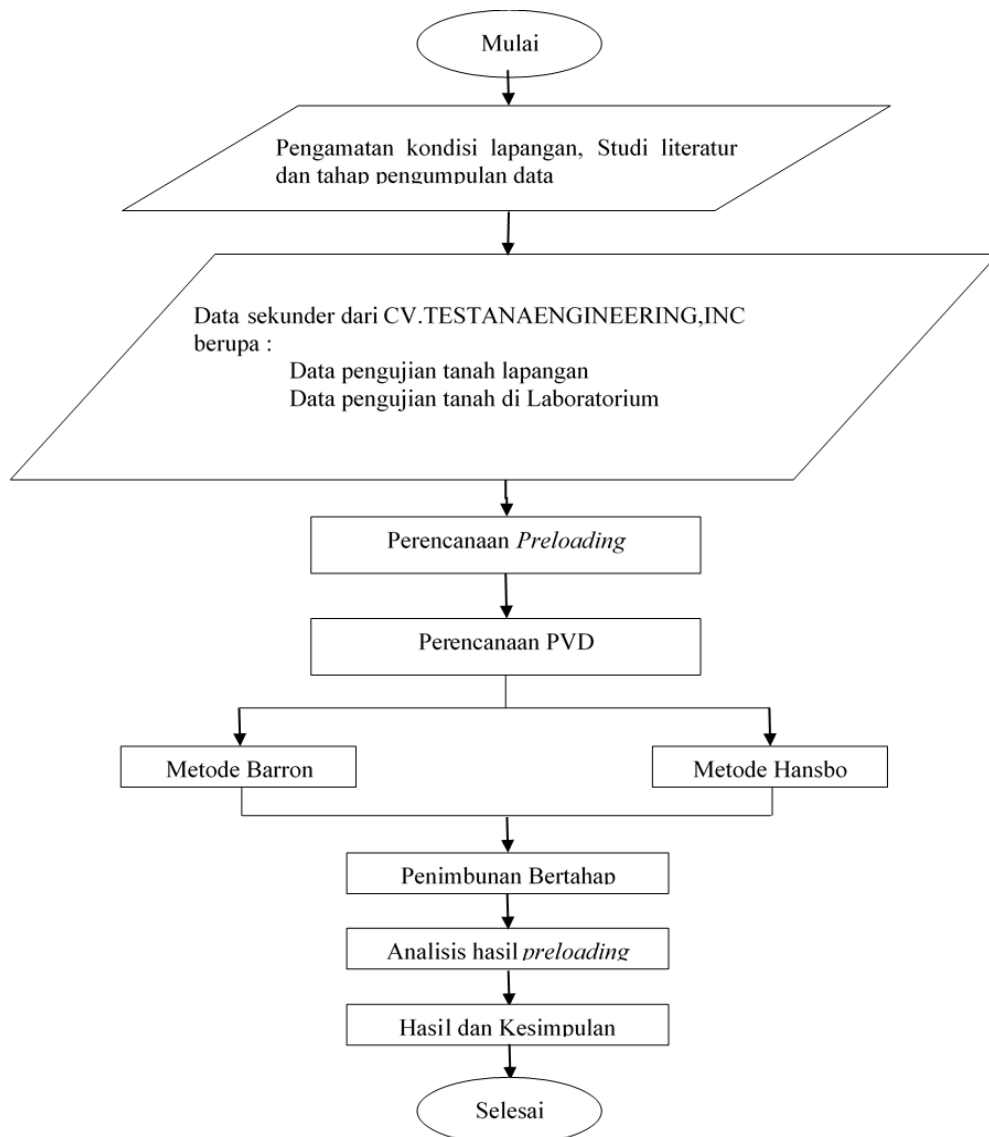
$$C_u \text{ baru} = 0.74 + (0.19 - 0.0016 PI) \sigma' \text{ baru} \tag{12}$$

$$\sigma' \text{ baru} = P_o' + \sum (\Delta p_{(n)} U_{(n)}) \tag{13}$$

$$\Delta p_{(n)} U_{(n)} = \left( \left( \frac{\sigma_{(n)'}'}{\sigma_{(n-1)'}'} \right)^{U_{(n)}} * \sigma_{(n-1)'}' \right) - \sigma_{(n-1)'}' \left( \left( \frac{\sigma_{(n)'}'}{\sigma_{(n-1)'}'} \right)^{U_{(n)}} * \sigma_{(n-1)'}' \right) - \sigma_{(n-1)'}' \tag{14}$$

### 3. Metode Penelitian

Tahap penelitian akan di paparkan secara ringkas oleh gambar 3 berikut



Gambar 3. Diagram Alir

4. Hasil dan Pembahasan Data Tanah

Tabel 2 : data parameter tanah hingga kedalaman kompressible

No.	Depth, D (m)	N-SPT (blow)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (t/m <sup>3</sup> )	Liquid limit, LL	Plasticity Index, PI	angka pori, e	kadar air, w <sub>c</sub>	jenis tanah (pasir/lempung)	cohesion	Gs	Cc	Cs	Cv
1	1,5	1	1,420	0,717	1,437	58,00	30,00	2,570	98,00	lempung	0,08	2,560	0,850	0,07	0,00403
2	4	2	1,420	0,717	1,437	58,00	30,00	2,570	98,00	lempung	0,08	2,560	0,850	0,07	0,00403
3	6,5	1	1,640	1,067	1,649	49,00	28,00	1,390	99,00	lempung	0,05	2,550	0,240	0,02	0,00408
4	8	1	1,640	1,067	1,649	49,00	28,00	1,390	99,00	lempung	0,05	2,550	0,240	0,02	0,00408
5	10	1	1,460	0,741	1,452	49,00	28,00	2,470	100,00	lempung	0,10	2,570	0,700	0,04	0,00401
6	12	1	1,460	0,741	1,452	49,00	28,00	2,470	100,00	lempung	0,10	2,570	0,700	0,04	0,00401
7	14	2	1,470	0,762	1,469	72,00	30,00	2,410	100,00	lempung	0,11	2,600	0,720	0,09	0,00288
8	16	1	1,470	0,762	1,469	72,00	30,00	2,410	100,00	lempung	0,11	2,600	0,720	0,09	0,00288
9	18	2	1,480	0,775	1,482	83,00	35,00	2,420	100,00	lempung	0,09	2,650	0,690	0,08	0,00181
10	20	1	1,480	0,775	1,482	83,00	35,00	2,420	100,00	lempung	0,09	2,650	0,690	0,08	0,00181
11	22	2	1,480	0,775	1,482	83,00	35,00	2,420	100,00	lempung	0,09	2,650	0,690	0,08	0,00181
12	24	2	1,480	0,775	1,482	83,00	35,00	2,420	100,00	lempung	0,09	2,650	0,690	0,08	0,00181
13	26	3	1,500	0,814	1,500	80,00	34,00	2,180	100,00	lempung	0,17	2,590	0,770	0,09	0,00261
14	28	4	1,500	0,814	1,500	80,00	34,00	2,180	100,00	lempung	0,17	2,590	0,770	0,09	0,00261
15	30	3	1,500	0,814	1,500	80,00	34,00	2,180	100,00	lempung	0,17	2,590	0,770	0,09	0,00261

4.1 Perhitungan Settlement

Perhitungan penurunan akibat beban timbunan (q) dilakukan dengan menggunakan beban timbunan sebesar : 3t/m<sup>2</sup>, 5t/m<sup>2</sup>, 12t/m<sup>2</sup>, 18t/m<sup>2</sup>, 24t/m<sup>2</sup>, 28t/m<sup>2</sup>. Besarnya penurunan tanah dasar dengan variasi beban timbunan seperti pada tabel 3.

Tabel 3.Konsolidasi untuk tiap bebantimbunan

Q <sub>timb</sub> (t/m <sup>2</sup> )	S <sub>c<sub>timb</sub></sub> (m)
3	0,821
5	1,267
12	2,345
18	2,983
24	3,488
28	3,775

4.2 Perhitungan Tinggi Timbunan Awal (H<sub>inisial</sub>) dan Tinggi Timbunan Akhir (H<sub>final</sub>)

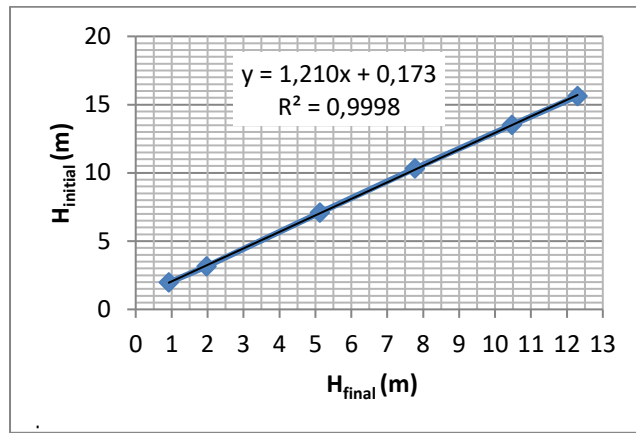
Tinggi timbunan awal dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan

$$H_{inisial} = \frac{H_{final} + (Sc) \times (\gamma_{timb} - \gamma'_{timb})}{\gamma_{timb}} \tag{15}$$

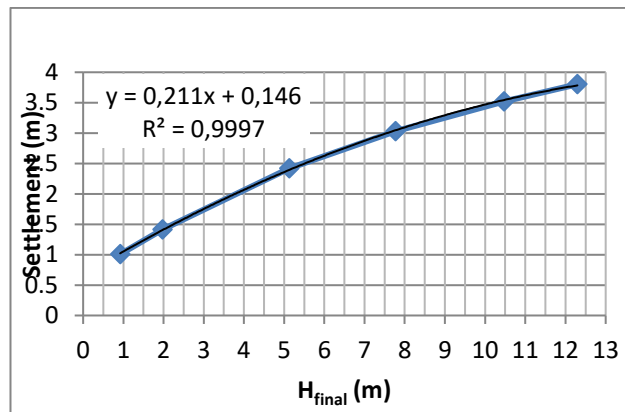
Dari perhitungan penurunan dan H<sub>inisial</sub> akibat variasi beban di atas didapat hasil yang akan disajikan pada tabel 4.

Tabel 4 Hasil perhitungan Settlement, H<sub>inisial</sub> dan H<sub>final</sub> akibat beban timbunan dan Surcharge

No.	Q <sub>timb</sub> (t/m <sup>2</sup> )	SC <sub>timb</sub> (m)	H <sub>inisial</sub> timb (m)	Traffic Load (G <sub>m</sub> fil C)	H-Bongkar traffic (m)	Tebal Pavement (m)	Settlement Pavement (m)	Total Settlement (m)	H <sub>inisial</sub> timb-pav (m)	Tinggi Final (m)
1	3	0.821	1.874	1.230	0.606	0.570	0.187	1.008	1.965	0.921
2	5	1.267	3.075	0.670	0.330	0.570	0.145	1.412	3.145	1.973
3	12	2.345	7.043	0.200	0.099	0.570	0.076	2.421	7.080	5.131
4	18	2.983	10.307	0.200	0.099	0.570	0.049	3.032	10.330	7.770
5	24	3.488	13.506	0.200	0.099	0.570	0.032	3.520	13.522	10.473
6	28	3.775	15.615	0.200	0.099	0.570	0.570	3.803	15.629	12.297



Gambar 4. Hubungan antara H<sub>inisial</sub> dan H<sub>final</sub> akibat beban timbunan



Gambar 5. Hubungan antara H-final vs Settlement akibat beban timbunan

### 4.3 Perhitungan Koefisien Konsolidasi Gabungan (C<sub>v gab</sub>)

C<sub>v gab</sub> dihitung sampai kedalaman 30 meter dengan menggunakan rumus :

$$C_v \text{ (rata - rata)} = \frac{(H_1+H_2+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}}\right)^2} \tag{16}$$

Tabel 5. Harga C<sub>v gab</sub> dan C<sub>h gab</sub> untuk lapisan tanah terkonsolidasi sampai kedalaman 30m

no.	Kedalaman (m)	H <sub>i</sub> (cm)	C <sub>v i</sub> (cm <sup>2</sup> /dt)	√C <sub>v i</sub> (cm <sup>2</sup> /dt)	H <sub>i</sub> √C <sub>v i</sub>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0 - 1.50	150	0,00403	0,06348	2362,86406
2	1.50 - 4.00	250	0,00403	0,06348	3938,10676
3	4.00 - 6.50	250	0,00403	0,06348	3938,10676
4	6.50 - 8.00	150	0,00408	0,06387	2348,34109
5	8.00 - 10.00	200	0,00408	0,06387	3131,12146
6	10.00 - 12.00	200	0,00401	0,06332	3158,33221
7	12.00 - 14.00	200	0,00401	0,06332	3158,33221
8	14.00 - 16.00	200	0,00288	0,05367	3726,77996
9	16.00 - 18.00	200	0,00288	0,05367	3726,77996
10	18.00 - 20.00	200	0,00181	0,04254	4701,00495
11	20.00 - 22.00	200	0,00181	0,04254	4701,00495
12	22.00 - 24.00	200	0,00181	0,04254	4701,00495
13	24.00 - 26.00	200	0,00261	0,05109	3914,80146
14	26.00 - 28.00	200	0,00261	0,05109	3914,80146
15	28.00 - 30.00	200	0,00261	0,05109	3914,80146
	Σ	3000		Σ	55336,1837
	Σ H <sub>i</sub> <sup>2</sup>	9000000		Σ $\frac{H_i^2}{\sqrt{C_{vi}}}$	3062093226,69341

### 4.4 Perhitungan Waktu Konsolidasi

Waktu konsolidasi tanpa PVD

$$C_{v \text{ gab}} = 0,002939166$$

$$C_{v \text{ gab}} = 1777,607537$$

$$t_{90} = \frac{T_{90\%} \left(\frac{H_{di}}{C_{v \text{ gab}}}\right)^2}{C_{v \text{ gab}}}$$

$$C_{h \text{ gab}} = \frac{T_{90\%} (H_{di})^2}{2^* C_{v \text{ gab}}}$$

$$C_{h \text{ gab}} = 3555,215075$$

$$(17) = \frac{0,848 * (3000)^2 + 0,848 * (3000)^2}{1777,607537} = \frac{15536160}{1777,607537} = 8740,4969,47$$

minggu



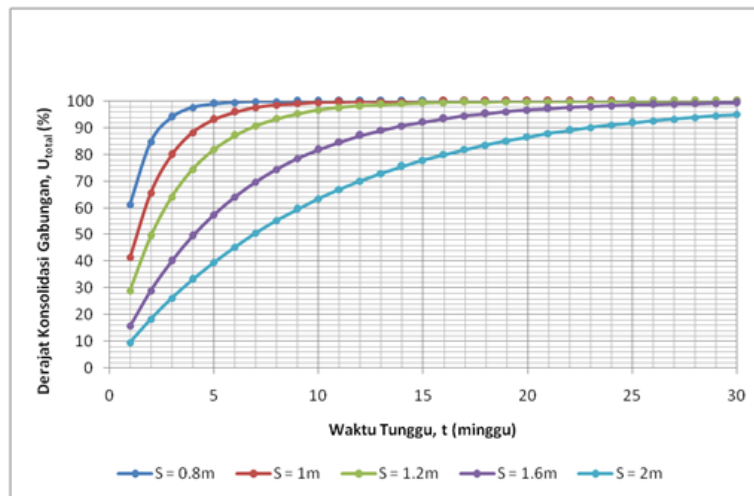
= 82,34 tahun

Karena proses pemampatan yang sangat lama, yaitu 2596654969,47 minggu atau 82,34 tahun, maka diperlukan pemasangan vertical drain dan salah satu jenis yang digunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) untuk mempercepat waktu konsolidasi.

4.4. Waktu konsolidasi dengan PVD

Tabel 6. Derajat konsolidasi gabungan untuk pola pemasangan PVD segiempat

t	T <sub>v</sub>	U <sub>v</sub> (%)	S=0,80 m		S=1 m		S=1,2 m		S=1,6 m		S=2 m	
			U <sub>h</sub> %	U <sub>gab</sub> %	U <sub>h</sub> %	U <sub>gab</sub> %	U <sub>h</sub> %	U <sub>gab</sub> %	U <sub>h</sub> %	U <sub>gab</sub> %	U <sub>h</sub> %	U <sub>gab</sub> %
1	1,98E-04	0,0112	60,70	61,32	41,40	41,45	28,93	28,99	15,68	15,75	9,55	9,63
2	3,95E-04	0,0159	84,55	84,90	65,66	65,70	49,49	49,55	28,90	28,99	18,19	18,29
3	5,93E-04	0,0194	93,93	94,10	79,88	79,90	64,10	64,15	40,05	40,14	26,01	26,12
4	7,90E-04	0,0224	97,61	97,69	88,21	88,23	74,49	74,53	49,45	49,54	33,08	33,19
5	9,88E-04	0,0251	99,06	99,10	93,09	93,10	81,87	81,90	57,38	57,46	39,47	39,59
6	1,19E-03	0,0275	99,63	99,65	95,95	95,96	87,11	87,14	64,06	64,14	45,25	45,37
7	1,38E-03	0,0297	99,86	99,86	97,63	97,63	89,59	90,86	69,70	69,76	50,48	50,60
8	1,58E-03	0,0317	99,94	99,95	98,61	98,61	92,46	93,51	74,45	74,51	55,21	55,32
9	1,78E-03	0,0336	99,98	99,98	98,61	99,19	94,54	95,39	78,45	78,51	59,49	59,60
10	1,98E-03	0,0355	99,99	99,99	99,18	99,52	96,05	96,72	81,83	81,88	63,36	63,46
11	2,17E-03	0,0372	100,00	100,00	99,52	99,72	97,14	97,67	84,68	84,72	66,86	66,96
12	2,37E-03	0,0388	100,00	100,00	99,72	99,84	97,93	98,34	87,08	87,12	70,03	70,12
13	2,57E-03	0,0404	100,00	100,00	99,84	99,90	98,5	98,82	89,11	89,14	72,89	72,97
14	2,77E-03	0,0420	100,00	100,00	99,90	99,94	98,92	99,16	90,82	90,85	75,48	75,56
15	2,96E-03	0,0434	100,00	100,00	99,94	99,97	99,22	99,41	92,26	92,28	77,82	77,90
16	3,16E-03	0,0449	100,00	100,00	99,97	99,98	99,43	99,58	93,47	93,49	79,94	80,01
17	3,36E-03	0,0462	100,00	100,00	99,98	99,99	99,59	99,70	94,49	94,51	81,86	81,92
18	3,56E-03	0,0476	100,00	100,00	99,99	99,99	99,7	99,79	95,36	95,37	83,59	83,65
19	3,75E-03	0,0489	100,00	100,00	100,00	100,00	99,78	99,85	96,09	96,10	85,16	85,21
20	3,95E-03	0,0501	100,00	100,00	100,00	100,00	99,84	99,89	96,70	96,71	86,58	86,63
21	4,15E-03	0,0514	100,00	100,00	100,00	100,00	99,89	99,92	97,22	97,23	87,86	87,91
22	4,35E-03	0,0526	100,00	100,00	100,00	100,00	99,92	99,95	97,65	97,66	89,02	89,06
23	4,54E-03	0,0538	100,00	100,00	100,00	100,00	99,94	99,96	98,02	98,03	90,07	90,11
24	4,74E-03	0,0549	100,00	100,00	100,00	100,00	99,96	99,97	98,33	98,34	91,02	91,05
25	4,94E-03	0,0561	100,00	100,00	100,00	100,00	99,97	99,98	98,59	98,60	91,87	91,91
26	5,14E-03	0,0572	100,00	100,00	100,00	100,00	99,98	99,99	98,81	98,82	92,65	92,68
27	5,33E-03	0,0583	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,99	99,00	99,00	93,35	93,38
28	5,53E-03	0,0593	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,99	99,16	99,16	93,99	94,02
29	5,73E-03	0,0604	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	100,00	99,29	99,29	94,56	94,59
30	5,93E-03	0,0614	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	100,00	99,40	99,40	95,08	95,10



Gambar 6. Hubungan waktu konsolidasi dan derajat konsolidasi pola pemasangan segi empat.

Berdasarkan gambar 5, jarak antar PVD berpengaruh terhadap derajat konsolidasi, semakin panjang jarak antar PVD semakin kecil derajat konsolidasi untuk waktu yang sama. Artinya semakin panjang jarak PVD semakin lama waktu yang dibutuhkan tanah untuk mengalami penurunan.

#### 4.5 Perhitungan Timbunan Bertahap

Tahap penimbunan dilakukan dengan perhitungan sehingga tidak menyebabkan kelongsoran pada tanah timbunan tersebut sampai ketinggian yang diharapkan

Data				
H-Final	:	5,5	m	
H- Initial	:	6,773	m	diambi
Peningkatan Cu yang diperhitungkan sedalam 4 * H-Innitial.				1 : 7,00 m
Kedalaman	:	28,00		
	:	0	m	
Kecepatan penimbunan	:	0,5	meter / minggu	
Kemiringan lereng	:	1 : 2		
Total tahapan	:	13,55	tahap	= 1 taha
			kgc/m	4 p
Cu Lapisan tanah 1	:	0,08	2	
Cu Lapisan tanah 2	:	0,05	kgc/m <sup>2</sup>	
Cu Lapisan tanah 3	:	0,1	kgc/m <sup>2</sup>	
Cu Lapisan tanah 4	:	0,11	kgc/m <sup>2</sup>	
Cu Lapisan tanah 5	:	0,09	kgc/m <sup>2</sup>	
			kgc/m	
Cu Lapisan tanah 6	:	0,17	2	
Σ Cu	:	0,6	kgc/m <sup>2</sup>	
Cu rata-rata (Σ Cu / 6)	:	0,1	kgc/m <sup>2</sup>	
	:	1	t/m <sup>2</sup>	
Sudut geser tanah (f)	:	37	°	
Safety factor (SF)	:	1,5		
Nc (f tanah dasar = 0)	:	5,7	(dari grafik terzaghi)	
H-kritis	:		(Cu rata-rata * Nc)/(γtimbunan * SF)	
	:	2,021	m	
Jml. tahap tanpa menunggu	:	4,0426	tahap	= 4 taha
				p
Tinggi timbunan awal	:	2,0	m	

#### Kontrol akhir minggu ke 4 atau 4 tahapan tanpa menunggu

Cu Lapisan tanah asal 1	:	1,52584	t/m <sup>2</sup>
Cu Lapisan tanah asal 2	:	1,94630	t/m <sup>2</sup>

Cu Lapisan tanah asal 3	:	2,29404	t/m <sup>2</sup>
Cu Lapisan tanah asal 4	:	2,59306	t/m <sup>2</sup>
Cu Lapisan tanah asal 5	:	3,04742	t/m <sup>2</sup>
Cu Lapisan tanah asal 6	:	3,56074	t/m <sup>2</sup>
	:	14,9674	
$\Sigma$ Cu lapisan tanah asal	:	1	t/m <sup>2</sup>
Cu rata-rata ( $\Sigma$ Cu / 6)	:	2,49457	t/m <sup>2</sup>
Cu baru rata-rata = 2,49 t/m <sup>2</sup>	>	Cu awal =	1 t/m <sup>2</sup>

Sudut geser tanah ( $\phi$ )	:	30°
Safety factor (SF)	:	1,5
Nc ( $\phi$ tanah dasar = 0)	:	5,7
H-kritis	:	(Cu rata-rata * Nc)/( $\gamma$ timbunan * SF)
	:	5,0422 > 2 m

(Tahap penimbunan dapat dilanjutkan)

Perhitungan settlement setelah 4 tahap timbunan (t = 4 minggu) tanpa menunggu dengan menggunakan persamaan grafik hubungan *H-Initial vs settlement*.

persamaan y	:	0,211x + 0.146
H-Initial (x)	:	2,00 m
Untuk Sc 100 % = y	:	0,57 m
U gab (t = 4 minggu)	:	97,09 m
Untuk Sc (t = 4 minggu)	:	0,55 m
H-Final setelah 4 minggu	:	1,45 m
$\Delta$ H-Kritis	:	3,6 m > 0,5 m
		(dilanjutkan 7 tahap penimbunan tanpa menunggu)

#### **Kontrol akhir minggu ke 11 atau 7 tahap berikutnya tanpa menunggu**

$$\begin{aligned} \text{Cu baru rata-rata} &= 20,0265 / 6 \\ &= 3,33776 \text{ t/m}^2 > \text{Cu sebelumnya} = 2,49 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H-Kritis baru} &= \frac{3,337766 * 5,7}{1,88 * 1,5} \\ &= 6,7465 \text{ m.} \end{aligned}$$

H-Kritis baru = 6,7465 m > H-kritis sebelumnya = 5,5 m (Tahap penimbunan dapat dilanjutkan)

$$\begin{aligned} \text{U gab (t = 11 minggu)} &= 100\% = 1 \\ \text{Untuk Sc (t = 11 minggu)} &= 1 * 1,307 = 1,307 \text{ m} \\ \text{H-Final setelah 11 minggu} &= 5,5 - 1,307 = 2,55 \text{ m} \end{aligned}$$

$\Delta$ Hkritis = 2,55 (dilanjutkan 3 tahap penimbunan selanjutnya)

#### **Kontrol akhir minggu ke 14 atau 3 tahap berikutnya tanpa menunggu**

$$\begin{aligned} \text{Cu baru rata-rata} &= 20,7227 / 6 \\ &= 3,45379 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H-Kritis baru} &= \frac{3,45379 * 5,7}{1,88 * 1,5} \\ &= 6,9811 \text{ m.} \end{aligned}$$

H-Kritis baru = 6,7465 m > 6,77 m (H-initial rencana)

$$\begin{aligned}
 U \text{ gab (t = 14 minggu)} &= 100\% = 1 \\
 \text{Untuk Sc (t = 14 minggu)} &= 1 * 1,307 = 1,307 \text{ m} \\
 \text{H-Final setelah 14 minggu} &= 7 - 1,307 = 5,694 \text{ m} > 5,5 \text{ m (Hfinal rencana)}
 \end{aligned}$$

no.	Tahapan n	Tahap n	Minggu														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	Tanah asli																
1	0.0 - 0.5	1,0	■														
2	0.5 - 1.0	2,0		■													
3	1.0 - 1.5	3,0			■												
4	1.5 - 2.0	4,0				■											
5	2.0 - 2.5	5,0					■										
6	2.5 - 3.0	6,0						■									
7	3.0 - 3.5	7,0							■								
8	3.5 - 4.0	8,0								■							
9	4.0 - 4.5	9,0									■						
10	4.5 - 5.0	10,0										■					
11	5.0 - 5.5	11,0											■				
12	5.5 - 6.0	12,0												■			
13	6.0 - 6.5	13,0													■		
14	6.5 - 7.0	14,0														■	

legenda:  : Pekerjaan timbunan  
 : Penundaan pekerjaan timbunan

Gambar 7. Jadwal tahapan penimbunan

### 5. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasannya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Untuk memperoleh H-Final rencana setinggi 5,50 m, maka tinggi timbunan awal (H-Initial) untuk pelaksanaan 6,77m dengan pemampatan sebesar 1,307 m.
2. Sistem *preloading* tanpa kombinasi PVD waktu untuk pemampatan mencapai derajat konsolidasi sebesar 90% (U=90%) adalah selama 82,34 tahun.
3. Sistem *preloading* dengan kombinasi PVD ukuran 10 x 0,5 cm pola pemasangan segi empat dan jarak pemasangan (S) 0,80m, waktu untuk pemampatan yang dibutuhkan mencapai derajat konsolidasi hingga 90% (U= 90%) adalah selama 3 minggu.
4. Pelaksanaan penimbunan secara bertahap dengan kecepatan 0,5m/minggu selama 14minggu

### Referensi

- [1] Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo, 2016. Data Semburan Lumpur Sidoarjo, Surabaya : Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo.
- [2] Bowles J.E, 1984, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, Second Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- [3] Das, B.M. 1985. *Mekanika Tanah 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. Jakarta :Erlangga.
- [4] Das, B.M. 1985 *Mekanika Tanah 2 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. Jakarta :Erlangga.

- [5] Kuswanda, Wahyu P. 2016. *Perbaikan Tanah Lempung Lunak Metoda Preloading Pada Pembangunan InfrastrukturTransportasi di Pulau Kalimantan*. Seminar TeknikSipilLambungMangkurat. Banjarmasin. 2016
- [6] Barron, R. A. 1948. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Transactions ASCE*, 113 (2346): 718-724