

ANALISIS PERBAIKAN TANAH METODE PRELOADING KOMBINASI PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD) PADA PEMBANGUNAN JALAN TOL TRANS SUMATERA

Larasati Putri Yustiana^{1,*}, Novita Anggraini², Moch. Sholeh³

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang³

Email: larasatiputri2107@gmail.com¹, novita.anggraini@polinema.ac.id², moch.sholeh@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Pada Proyek Jalan Tol Indrapura – Kisaran terdapat permasalahan berupa tanah lempung lunak (*soft clay*). Setelah dilakukan penyelidikan tanah berupa penyelidikan N-SPT diketahui bahwa tanah lunak ($N > 5$) pada area yang akan dilewati proyek jalan tol ini sampai pada kedalaman 17m dengan muka air tanah berada pada 0.47m dibawah permukaan tanah. Penurunan konsolidasi merupakan masalah geoteknik yang umum terjadi, terutama di daerah yang terdiri dari tanah lunak. Hal ini disebabkan oleh keluarnya air pori yang diakibatkan peningkatan tegangan pada massa tanah. Pada pembangunan jalan tol di atas tanah lunak memerlukan analisis yang berkaitan dengan besar dan lama penurunan konsolidasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis penurunan tanah ketika tanpa adanya perbaikan tanah dibandingkan dengan perbaikan tanah menggunakan metode *Preloading* kombinasi dengan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD). *Preloading* merupakan suatu teknik metode perbaikan tanah dimana konsolidasi tanah dapat dicapai dalam jumlah yang cukup besar sebelum pembebanan konstruksi rencana. Berdasarkan penyelidikan tanah, karakteristik lapisan tanah merupakan tanah lempung yang berpotensi mengalami penurunan konsolidasi yang cukup besar dan lama. Hasil analisis penurunan jalan tol di daerah penelitian adalah sebesar 3,655 meter. Dibutuhkan waktu 84 tahun untuk konsolidasi primer mencapai derajat konsolidasi 90%. Namun, pada metode Hansbo diterapkan *preloading* kombinasi PVD dengan mencoba dua pola konfigurasi yaitu segitiga dan segiempat pada kedalaman 17 meter, untuk variasi jarak pemasangan PVD 0,8m; 1m; 1,25m; 1,5m dan 1,75m. Kesimpulan dari jarak pemasangan PVD dan *preloading* yang efisien adalah pemasangan dengan pola segiempat dan berjarak 1,25m dengan waktu 23 minggu untuk mencapai derajat konsolidasi 90%. Maka, dapat disimpulkan metode perbaikan tanah lunak menggunakan *preloading* dengan kombinasi PVD terbukti efisien untuk mempercepat proses konsolidasi tanah.

Kata kunci : Konsolidasi, Tanah Lunak, Metode *Preloading*, *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)

ABSTRACT

In the Indrapura - Kisaran Toll Road Project there is a problem in the form of soft clay. After a soil investigation in the form of an N-SPT investigation, it is known that the soft soil ($N > 5$) in the area that will be passed by this toll road project is up to a depth of 17m with a groundwater table at 0.47m below the ground surface. Consolidation settlement is a common geotechnical problem, especially in areas consisting of soft soils. It is caused by the discharge of pore water due to increased stress in the soil mass. The construction of toll roads on soft soils requires analysis related to the magnitude and duration of consolidation settlement. The purpose of this research is to analyze the settlement of soil when there is no soil improvement compared to soil improvement using *Preloading* method combined with *Prefabricated Vertical Drains* (PVD). *Preloading* is a soil improvement method technique in which a considerable amount of soil consolidation can be achieved prior to planned construction loading. Based on the soil investigation, the characteristics of the soil layer are clayey soils that have the potential to experience a large and long consolidation settlement. The result of the toll road settlement analysis in the study area is 3.655 meters. It takes 84 years for primary consolidation to reach 90% consolidation degree. However, in the Hansbo method, PVD combination *preloading* was applied by trying two configuration patterns, namely triangular and quadrilateral at a depth of 17 meters, for variations in PVD installation spacing of 0.8m; 1m; 1.25m; 1.5m and 1.75m. It was concluded that the most efficient PVD and *preloading* spacing was the rectangular pattern and 1.25m spacing with 23 weeks to achieve 90% degree of consolidation. Therefore, it can be concluded that the soft soil improvement method using *preloading* in combination with PVDs proved to be efficient to accelerate the soil consolidation process.

Keywords : Consolidation Settlement, *Prefabricated Vertical Drains* (PVD), *Preloading* Method, Soft Soil

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Tanah lunak disebut sebagai tanah yang bermasalah saat dilakukan sebuah konstruksi. Terdapatnya tanah lunak pada lokasi proyek dapat menyebabkan berbagai macam problema salah satunya tanah amblas jika akan dibangun sebuah infrastruktur jalan diatas tanah tersebut. Untuk menanggulangi permasalahan yang dapat muncul, maka perlu dilakukan perbaikan tanah (*soil improvement*). Terdapat beberapa metoda perbaikan tanah dimana untuk tanah lunak metoda perbaikan yang tersedia diantaranya *preloading (with vertical drain)*, *vacuum consolidation*, *lightweight fill*, *stone column*, *jet grouting*, *fracture grouting*, *ground freezing*, dan *vitrification*. Dari berbagai metoda tersebut memiliki tujuan untuk mempercepat proses konsolidasi pada tanah lunak. Konsolidasi ini dapat terjadi karena adanya penambahan tegangan yang diakibatkan pembebanan dari tanah timbunan diatas tanah dasar. Konsolidasi atau disebut juga proses pemampatan harus selesai dilakukan sebelum infrastruktur dibangun maka sebelum dibangun infrastruktur perlu dilakukan percepatan konsolidasi.

Yognanta (2017), melakukan penelitian mengenai perbaikan tanah pada tanah lunak pada konstruksi penambahan jalan akses pelabuhan Trisakti-Liang Anggang. Penelitian dilakukan dengan mengkombinasikan metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* untuk memperbaiki tanah yang memiliki tujuan untuk mengetahui besarnya penurunan yang di akibatkan oleh metode *preloading* dan juga mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan menggunakan *preloading* dengan PVD. Hasil penelitian menunjukkan konsolidasi yang terjadi sebesar 0,876 m dan didapatkan besarnya lama waktu penurunan yaitu 64,13 tahun dapat dipercepat menjadi 4,25 bulan dengan menggunakan PVD pola segitiga yang berjarak 1,2 m. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan *preloading* dan PVD mampu mempercepat waktu konsolidasi.

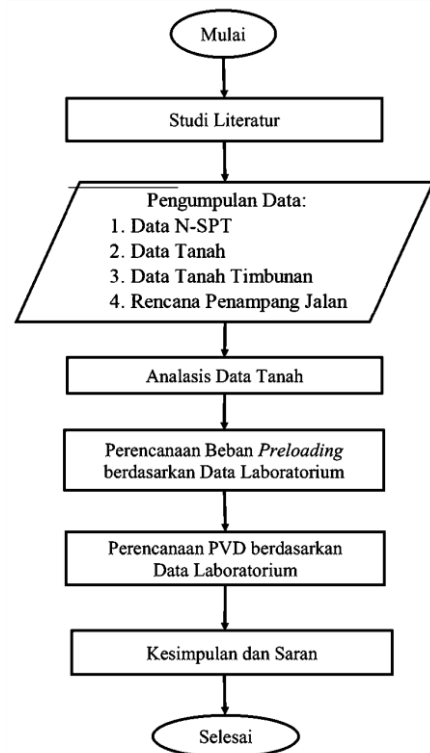
Sebelum dilakukan pembangunan infrastruktur maka perlu dilakukan test penyelidikan tanah pada proyek Jalan Tol Indrapura – Kisaran STA. 112+410 sampai STA. 112+55. Penyelidikan tanah yang dilakukan dilapangan dapat menggunakan *Standart Penetration Test* (SPT). Menurut Terzaghi didalam Braja. M Das tanah lanau diklasifikasikan sebagai tanah lunak apabila mempunyai nilai standard penetration test lebih kecil dari 5 ($N-SPT \leq 5$). Pada proyek Jalan Tol Indrapura – Kisaran STA. 112+410 sampai STA. 112+550 setelah dilakukan penyelidikan tanah diketahui bahwa kondisi lapisan tanah pada lokasi ini memiliki nilai N-SPT yang kurang dari 5. Hal ini menunjukkan bahwa tanah yang akan dilewati proyek jalan tol ini memiliki tanah dengan jenis tanah lunak. Dari hasil pengklasifikasian tanah lunak menurut nilai SPT pada lokasi ini, terdapat tanah lunak dengan ($N-SPT \leq 5$) sampai pada kedalaman 17 meter dengan didapatkan posisi muka air tanah berada pada 0,47 meter dibawah permukaan tanah.

Untuk menanggulangi problema yang dapat timbul karena tanah lunak perlu dilakukan perbaikan tanah pada

proyek Jalan Tol Indrapura – Kisaran STA. 112+410 sampai STA. 112+550. Perbaikan tanah ini perlu dilakukan sebelum proses pembangunan infrastruktur dimulai diatas tanah lunak. Maka pada lokasi proyek ini akan dilakukannya perbaikan tanah dengan menggunakan perbaikan tanah metode *Preloading* yang dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). Berdasarkan latar belakang tersebut, penulisan tugas akhir ini mempunyai judul “**Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode *Preloading* kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Pada Proyek Jalan Tol Trans Sumatera**”.

2. METODE

Tahapan penelitian dari awal sampai akhir dapat diuraikan sebagai berikut.



Gambar 1. Bagan Alir

1) Pengumpulan Data

Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini sebagai berikut.

- a) Data Tanah
- b) Data Timbunan dan Rencana Penampang Jalan
- c) Data N-SPT

2) Analisa Data Tanah

Pada tahap analisa tanah yaitu menentukan kedalaman tanah lunak jika ditinjau dari hasil data N-SPT. Lalu dilanjutkan untuk menghitung pemampatan tanah atau konsolidasi tanah yang dapat terjadi, maka dilakukan terlebih dahulu pengidentifikasian tanah tersebut termasuk kedalam tanah *over consolidated* (OC Soil) atau *normally consolidated* (NC Soil). Jika nilai *Over Consolidated Ratio* (OCR) didapatkan sebesar 1 maka termasuk tanah *normally consolidated* (NC Soil), sedangkan jika didapat nilai $OCR > 1$ maka termasuk tanah *over consolidated* (OC Soil). Berikut rumus yang digunakan untuk menganalisis tanah.

Rumus yang akan digunakan untuk menghitung besar konsolidasi (S_c) oleh Terzaghi (1942) adalah sebagai berikut.

$$P'o = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \times \frac{1}{2} \text{ Lapisan} \quad (1)$$

$$P_c = P'o + \Delta p \quad (2)$$

Untuk menghitung konsolidasi tanah, perlu untuk menentukan jenis tanah tersebut dengan menghitung nilai *Over Consolidate Ratio* (OCR). Nilai OCR dapat dihitung dengan rumus berikut,

$$\text{Over Consolidate Ratio (OCR)} = \frac{P_c}{P'o} \quad (3)$$

3) Menentukan Beban *Preloading* dan Pemampatan Tanah

Untuk menentukan besarnya beban *Preloading* dapat disesuaikan dengan beban rencana konstruksi dan beban kerja diatas tanah. Maka, perlu dilakukan perhitungan beban *preloading* yang meliputi besarnya pemampatan tanah (S_c) dan tinggi timbunan awal yang direncanakan berdasarkan data tersebut. Setelah menganalisis tanah, dapat dihitung penurunan tanah tersebut akibat tinggi timbunan rencananya dengan rumus berikut.

A. Konsolidasi Tanah (*Settlement*)

a. Tanah *Normally Consolidated* (NC Soil)

$$S_{ci} = \left(\frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P'o + \Delta P}{P'o} \right) H_i \quad (4)$$

b. Tanah *Over Consolidated* (OC Soil)

$$1. \text{ Bila } (P'o + \Delta P) \leq P_c' \\ S_{ci} = \left(\frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P'o + \Delta P}{P'o} \right) H_i \quad (5)$$

$$2. \text{ Bila } (P'o + \Delta \sigma) \geq P_c' \\ S_{ci} = \left(\frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P'o + \Delta P}{P'o} + \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{P'o + \Delta P}{P'o} \right) H_i \quad (6)$$

$$\Delta P = 2 \times I \times q \quad (7)$$

Dengan :

S_{ci} = konsolidasi pada lapis tanah yang ditinjau (m)

H_i = tebal lapisan tanah yang ditinjau (m)

C_c = *Compression Index* (kPa)

e_0 = angka pori awal lapisan tanah yang ditinjau

C_s = *Swelling Index* dari lapisan tanah yang ditinjau (kPa)

$P'o$ = tegangan *overburden* efektif (kN/m²)

P_c = tegangan prakonsolidasi efektif (*effective past overburden pressure*) (kN/m²)

ΔP = penambahan tegangan vertikal di titik yang ditinjau (kN/m²)

q = tegangan vertikal efektif di permukaan tanah (kN/m³)

I = *Influence Factor*, dapat dicari dengan persamaan:

$$I = \frac{B_1 + B_2}{B_2} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} \times (\alpha_2) \text{ (radian)} \quad (8)$$

Dengan :

B_1 = Lebar dari setengah timbunan

B_2 = Panjang kemiringan timbunan

α_1 = $\tan^{-1}\{(B_1+B_2)/z\} - \tan^{-1}(B_1/z)$

α_2 = $\tan^{-1}(B_1/z)$

B. Waktu Konsolidasi Tanah Lunak

Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari tebal lapisan tanah lunak (H_{dr}) dibagi dengan koefisien konsolidasi vertikal (C_{vgab}).

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{C_{vgab}} \quad (9)$$

Dengan :

t = Waktu konsolidasi (tahun)

H_{dr} = tebal lapisan yang mengalami konsolidasi (m)

T_v = faktor waktu, sesuai dengan derajat konsolidasi U (%)

4) Perencanaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)

Perencanaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) yaitu proses menentukan pola, jarak, dan kedalaman pemasangan PVD yang paling efektif saat digunakan. Tentu saja penentuan penggunaan pola dan jarak PVD ini mempertimbangkan aspek lamanya waktu konstruksi dan biaya proyek. Menurut rumus Hansbo penggunaan PVD yang tepat pada buku (Hardiyatmo, 2020) sebagai berikut.

a. Diameter Equivalen (D)

Diameter yang digunakan pada pola pemasangan PVD dapat dihitung dengan persamaan,

Pola Segiempat:

$$D = 1.13S \quad (10)$$

Pola Segitiga:

$$D = 1.05S \quad (11)$$

b. Koefisien Konsolidasi Arah Horizontal (Ch)

Koefisien konsolidasi arah horizontal ditentukan melalui persamaan.

$$Ch = v \left(\frac{kh}{kv} \right) Cv \quad (12)$$

Dimana perbandingan antara koefisien permeabilitas horizontal dan vertikal berkisar antara 2 hingga 5 kali C_v .

c. Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal Gabungan

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right)^2} \quad (13)$$

Dengan:

H_1 = Tebal lapisan ke-1 (m)

H_n = Tebal lapisan ke-n (m)

C_{vn} = Nilai C_v pada lapisan ke-n (cm²/detik)

d. Gabungan Faktor Hambatan Akibat Jarak Antara PVD (F_n)

$$F(n) = ((n^2/(n^2 - 1)) \times (\ln(n) - 3/4 - (1/(4n^2))) \quad (14)$$

$$n = \frac{n}{dw} \quad (15)$$

e. Derajat Konsolidasi Arah Vertikal (U_v)

Derajat konsolidasi arah vertical dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$U_v = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) \quad (16)$$

f. Derajat Konsolidasi Horizontal (U_h)

Menurut Barron (1948), besarnya derajat konsolidasi dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut,

$$U_h = \left[\left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{t \times 8 \times Ch}{D^2 \times 2 \times F(n)} \right)}} \right) \right] \quad (17)$$

g. Menghitung Derajat Konsolidasi Rata-rata (U_r)

Derajat konsolidasi rata-rata dapat diperoleh dengan persamaan berikut,

$$U_r = (1 - (1 - U_h) \times (1 - U_v)) \quad (18)$$

Dengan:

U_r = derajat konsolidasi tanah akibat aliran vertical dan horizontal

U_v = derajat konsolidasi vertikal

U_h = derajat konsolidasi horizontal

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Tanah

1) Analisa Parameter Tanah

Data tanah yang akan digunakan pada lokasi penyelidikan tanah Proyek Pembangunan Jalan Tol Jalan Tol Indrapura – Kisaran, Sumatra Utara Seksi 1 STA. 112+410 sampai STA. 112+550 adalah *Standart Penetration Test* (SPT) hasil *boring log* dan data dari laboratorium. Karena tersedianya gambar stratigrafi dari proyek, maka gambar stratigrafi di komparasikan dengan kedalaman tanah lunak berdasarkan data Bore Hole dengan nilai N-SPT. Pada BH-5 ini nilai N-SPT didapat sampai kedalaman 50,45 m dan muka air tanahnya berada pada 0,47 m. Pada lokasi BH-5 untuk kedalaman 1 m sampai 17 m menunjukkan nilai N-SPT sebesar 1-3. Hal tersebut menunjukkan pada lokasi BH-5 pada kedalaman 1 m sampai 17 m merupakan tanah lunak.

Tabel 1. Klasifikasi tanah

Korelasi N-SPT untuk Titik BH-05					
Kedalaman (m)	h (m)	N- SPT (t/m ³)	Konsistensi Tanah		
0.30 - 3.15	2.8	2	Sangat Lunak (<i>very soft</i>)		
3.15 - 5.15	2	3	Lunak (<i>soft</i>)		
5.15 - 17.15	12	2	Sangat Lunak (<i>very soft</i>)		
17.15 - 19.15	2	11	Kaku (<i>stiff</i>)		
19.15 - 25.15	6	22	Sangat kaku (<i>very stiff</i>)		
25.15 - 27.15	2	4	Lunak (<i>soft</i>)		
27.15 - 31.15	4	11	Kaku (<i>stiff</i>)		
31.15 - 33.15	2	3	Lunak (<i>soft</i>)		
33.15 - 41.15	8	8	Sedang (<i>medium stiff</i>)		
41.15 - 47.15	6	13	Kaku (<i>stiff</i>)		
47.15 - 50.45	3.3	27	Sangat kaku (<i>very stiff</i>)		

2) Data Tanah Timbunan

Rencana tanah timbunan pada penampang jalan tersebut sebagai berikut:

- H rencana = 10 m
- Lebar timbunan = 49.5 m
- γ_{sat} timbunan = 18.84 kN/m³
- Kemiringan timbunan = 1 : 2

B. Perencanaan *Preloading*

Perencanaan ini diawali dengan menghitung pemampatan yang disebabkan beban-beban yang berada diatas tanah dasar. Pemampatan ini dihitung dengan cara menentukan asumsi H rencana. Pada Perencanaan *settlement* ini beban yang digunakan selain beban *preloading* yaitu menggunakan beban rencana perkerasan dan beban rencana lalu lintas. Untuk beban lalu lintas dan beban perkerasan ini nantinya akan dibogkar setelah mencapai konsolidasi maksimalnya. Nilai beban (q) yang akan digunakan didapat dari perkalian antara H rencana dengan γ_{sat} timbunan.

Tabel 2. Beban timbunan

H rencana (m)	γ_{sat} timbunan (kN/m ³)	q timbunan (kN/m ²)
1	18.84	18.84
2	18.84	37.68
3	18.84	56.52
4	18.84	75.36
5	18.84	94.2
6	18.84	113.04
7	18.84	131.88
8	18.84	150.72
9	18.84	169.56
10	18.84	188.4

Untuk tebal perkerasan yang digunakan sebesar 0.5 m. Lalu akan didapatkan beban rencana perkerasan dengan rumus tebal rencana perkerasan dikalikan dengan γ_{beton} ($0.5 \times 24 = 12$ kN/m²). Untuk beban lalu lintas yang digunakan sesuai dengan kelas jalan menurut SNI 8460-2017, yaitu jalan tol termasuk kelas jalan 1 dengan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m².

C. Pemampatan (*Settlement*)

Pemampatan tanah ini ditinjau pada seluruh lapisan tanah lunak. Berikut ini merupakan perhitungan pemampatan tanah yang disebabkan tanah timbunan 1 m pada lapisan lunak tanah kedalaman 1 m.

1) Tegangan Overburden efektif (P_o')

Tegangan overburden efektif harus dihitung pada tiap lapisan tanah, untuk data tanah lapisan pertama adalah sebagai berikut.

$$h = 1 \text{ m}$$

$$z = 0.5 \text{ m}$$

$$\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} \text{ tanah} = 14.37 \text{ kN/m}^3$$

$$P_{o1} = (\gamma_{sat} \text{ tanah} - \gamma_w) \times z$$

$$= (14.37 - 9.81) \times 0.5 \text{ m}$$

$$= 2.28 \text{ kN/m}^2$$

2) Penambahan tegangan (ΔP)

Perhitungan dibawah ini untuk lapisan pertama timbunan 1 m.

$$q = 18.84 \text{ kN/m}^2$$

$$z = 0.5 \text{ m}$$

$$B_1 = 14.719 \text{ m}$$

$$B_2 = 1 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = 0.123 \text{ (radian)}$$

$$\alpha_2 = 88.054 \text{ (radian)}$$

$$I = \frac{B_1 + B_2}{B_2} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} \times (\alpha_2) \text{ (radian)}$$

$$= 89.998 \text{ (radian)}$$

$$\Delta p = 2 \times q \times I$$

$$= (2 \times 18.84 \times 89.998) / 180$$

$$= 18.839 \text{ kN/m}^2$$

3) Pemampatan (Sc)

Data tanah untuk timbunan 1 m pada lapisan tanah lunak pertama sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{OCR} &= \frac{P_{c'}}{P_{o'}} \\ &= \frac{21.12}{2.28} \\ &= 9.27 > 1 \text{.....(OC)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{o'} + \Delta p &= 2.28 + 18.839 \\ &= 21.12 \text{ kN/m}^2 \text{}(P_{o'} + \Delta p \leq P_{c'}) \end{aligned}$$

Maka perhitungan pemampatannya,

$$P_{o1} = 2.28 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta p_1 = 18.84 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{c'} = 60.10 \text{ kN/m}^2$$

$$H_1 = 1 \text{ m}$$

$$C_s = 0.077$$

$$e = 2.09$$

$$Sc_1 = \left(\frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{P_{o'} + \Delta p}{P_{o'}} \right) H_i$$

$$Sc_1 = \left(\frac{0.077}{1+2.09} \log \frac{2.28 + 18.84}{2.28} \right) 1$$

$$Sc_1 = 0.024 \text{ m}$$

Total pemampatan yang terjadi pada tanah dengan besar beban $q = 18.84 \text{ kN/m}^2$ dan $H \text{ rencana} = 1 \text{ m}$ pada kedalaman tanah lunak 17 m adalah 0.062 m.

Untuk perhitungan besarnya pemampatan tanah akibat beban rencana perkerasan dan beban rencana lalu lintas proses dan rumus yang digunakan sama seperti untuk perhitungan pemampatan akibat beban timbunan 1 m diatas. Selanjutnya menghitung besarnya tinggi timbunan awal berdasarkan besarnya tinggi timbunan akhir dan total pemampatan tanah. Pada $H \text{ rencana} = 1 \text{ m}$ didapatkan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} H_{\text{awal total}} &= H_{\text{awal timbunan}} + \text{tebal rencana perkerasan} \\ &\quad + \text{tebal beban rencana lalu lintas} \\ &= 2.40 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 0.6 \text{ m} \\ &= 3.50 \text{ m} \end{aligned}$$

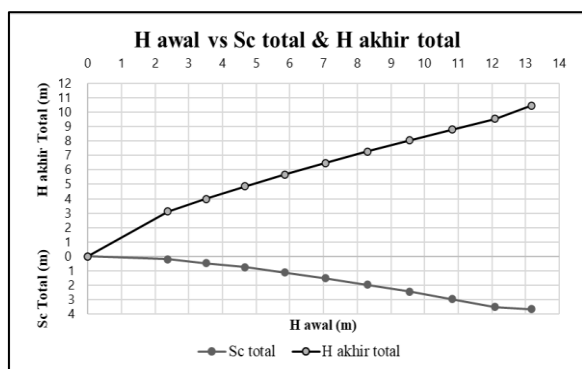
Maka untuk menghitung besarnya nilai H akhir, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} H_{\text{akhir total}} &= H_{\text{awal total}} - Sc_{\text{timbunan}} - Sc_{\text{akibat}} \\ &\quad \text{rencana perkerasan} - Sc_{\text{akibat rencana beban}} \\ &\quad \text{lalu lintas} \\ &= 3.50 - 0.110 - 0.061 - 0.073 \\ &= 3.26 \end{aligned}$$

Dari hasil Tabel 3. dapat dibuat grafik hubungan antara nilai nilai yang sudah didapat yang disajikan pada Gambar 2.

Tabel 3. Hasil Sc , H_{awal} , dan H_{akhir}

Tahap	q (Kn/m^2)	Sc preloading (m)	H_{awal} (m)	$H_{\text{awal total}}$ (m)	Sc Perkerasan (m)	Sc Lalu Lintas (m)	Sc total (m)	$H_{\text{akhir total}}$ (m)
1	18.84	0.110	2.40	3.50	0.061	0.073	0.244	3.26
2	37.68	0.345	3.51	4.45	0.051	0.060	0.456	4.00
3	56.52	0.657	4.67	5.61	0.043	0.052	0.752	4.85
4	75.36	1.027	5.85	6.79	0.037	0.046	1.110	5.68
5	94.20	1.443	7.06	8.00	0.033	0.041	1.517	6.49
6	113.04	1.898	8.30	9.24	0.030	0.036	1.964	7.27
7	131.88	2.384	9.55	10.49	0.024	0.033	2.442	8.04
8	150.72	2.901	10.81	11.75	0.022	0.030	2.954	8.80
9	169.56	3.445	12.09	13.03	0.021	0.027	3.492	9.54
10	188.40	3.609	13.18	14.12	0.020	0.026	3.655	10.46

Gambar 2. Hubungan antara Sc total dan H_{awal} dengan H_{akhir}

D. Waktu konsolidasi tanpa PVD

Perhitungan waktu konsolidasi ini digunakan untuk menentukan perbaikan tanah dasar yang akan dilakukan. Perhitungan waktu konsolidasi dengan kondisi

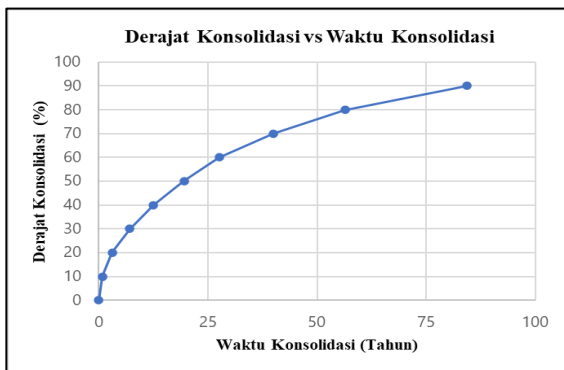
tanpa perbaikan tanah dengan nilai C_v sebesar $0.000297 \text{ cm}^2/\text{detik}$, sebagai berikut

$$H_{dr} = 17 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} C_v \text{ gab} &= \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right)^2} \\ &= \frac{(4 + 13)^2}{\left(\frac{4}{\sqrt{0.001}} + \frac{13}{\sqrt{0.0009}} \right)^2} \\ &= 0.00092 \text{ cm}^2/\text{sec} \end{aligned}$$

$$T_v 90\% = 0.840$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_{90} \times H_{dr}^2}{C_{vgab}} \\ &= \frac{0.840 \times 17^2}{0.00092 \times 3153.6} \\ &= 84.27 \text{ tahun} \end{aligned}$$



Gambar 3. Grafik waktu konsolidasi dengan derajat konsolidasi tanpa PVD

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% adalah sekitar 84 tahun. Maka, untuk mempercepat proses pembangun jalan ini perlu dilakukan perbaikan tanah lunak dengan pemasangan PVD agar sesuai dengan waktu rencana pembangunan.

E. Perencanaan PVD

Spesifikasi PVD yang digunakan yaitu CT-D832, dengan lebar 100 mm dan tebal 5 mm. Panjang pemasangan PVD yang digunakan pada perencanaan sedalam tanah lunak. Dalam perencanaan perbaikan tanah ini akan menggunakan variasi dua pola pemasangan yaitu pola segitiga dan pola segiempat. Untuk besarnya variasi jarak yang akan digunakan sebesar 0,8 m; 1,0 m; 1,25 m; 1,5 m; dan 1,75 m. Variasi ini dilakukan agar didapatkan jarak pemasangan PVD yang paling efisien untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dan sesuai dengan waktu perencanaannya.

Berikut perhitungan untuk pola pemasangan segitiga dengan jarak pemasangan (s) 0,80 m dan kedalaman pemasangan 17 m.

$$C_v = 0.00092 \text{ cm}^2/\text{detik} \\ = 0.0558 \text{ m}^2/\text{minggu}$$

$$C_h = 3 \times C_v \\ = 3 \times 0.0558 \\ = 0.1115 \text{ m}^2/\text{minggu}$$

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

$$D = 1.05 \times s \\ = 1.05 \times 0.8 \\ = 0.84 \text{ m}$$

$$dw = \frac{2(a+b)}{\pi} \\ = \frac{2(0.1 + 0.005)}{\pi} \\ = 0.0667 \text{ m}$$

$$n = \frac{D}{dw} \\ = \frac{0.84}{0.0667} \\ = 12.56 \text{ m}$$

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \times \left(\ln(n) - \frac{3}{4} - \frac{1}{(4n^2)} \right) \\ = \left(\frac{12.56^2}{12.56^2 - 1} \right) \times \left(\ln(12.56) - \frac{3}{4} - \frac{1}{(4 \times 12.56^2)} \right) \\ = 1.7903$$

Setelah mendapatkan nilai faktor waktu maka, dilanjutkan mencari nilai derajat konsolidasi tanah arah vertikal, derajat konsolidasi tanah arah horizontal dan rata-rata.

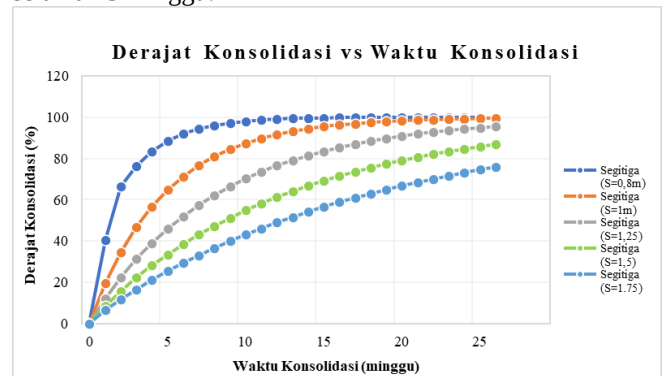
$$T_v = \frac{t \times C_v}{(Hdr)^2} \\ = \frac{1 \times 0.0557}{17^2} \\ = 0.000193$$

$$U_v = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) \times 100\% \\ = \left(2 \sqrt{\frac{0.000193}{\pi}} \right) \times 100\% \\ = 0.0157 \\ = 1.57\%$$

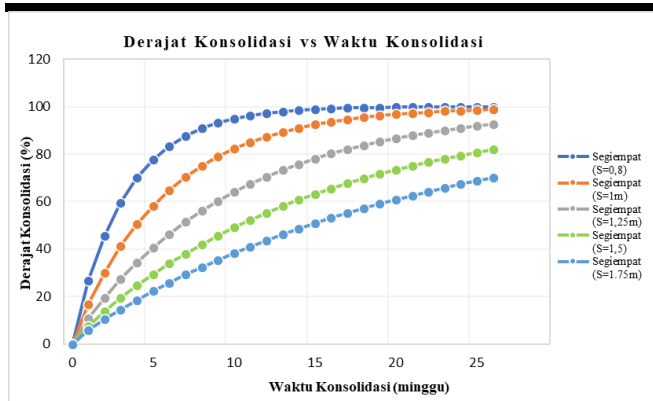
$$U_h = \left[\left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{t \times 8 \times C_h}{D^2 \times 2 \times F(n)} \right)}} \right) \right] \\ = \left[\left(1 - \frac{1}{e^{\left(\frac{1 \times 8 \times 0.0558}{0.84^2 \times 2 \times 1.7903} \right)}} \right) \right] \\ = 0.297 \\ = 29.7\%$$

$$U_r = [1 - (1 - U_h)(1 - U_v)] \times 100 \\ = [1 - (1 - 0.297)(1 - 0.0157)] \times 100 \\ = 29.7\%$$

Perhitungan tersebut dilakukan untuk seluruh variasi pola dan jarak rencana yang telah ditentukan. Perhitungan tersebut juga ditinjau setiap minggu hingga didapatkan nilai U_r mencapai 90%. PVD direncanakan waktu tunggu pemampatannya selama 12 sampai 24 minggu, karena jika umur PVD lebih dari 24 minggu mulai mengalami berkurangnya kemampuan penyerapan *vertical drain*. Derajat konsolidasi yang harus dicapai yaitu 90%. Sehingga jika ditinjau dari waktu tunggu PVD yaitu 12 sampai 24 minggu dan juga proses pentahapan timbunan sebesar 28 minggu, maka didapat jarak pemasangan yang optimal yaitu untuk pola segiempat $s = 1.25 \text{ m}$ yang membutuhkan waktu selama 23 minggu.



Gambar 4. Grafik Hubungan Derajat Konsolidasi dan Waktu Konsolidasi dengan Pemasangan Pola Segitiga



Gambar 5. Grafik Hubungan Derajat Konsolidasi dan Waktu Konsolidasi dengan Pemasangan Pola Segiempat

4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis pada penelitian ini didapatkan hasil:

1. Besarnya konsolidasi tanah (*settlement*) yang terjadi akibat adanya beban timbunan, beban perkerasan dan beban lalu lintas yang adalah sebesar 3.655 m.
2. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% tanpa menggunakan PVD selama 84 tahun. Untuk penurunan tanah menggunakan bantuan PVD membutuhkan waktu 23 minggu sesuai dengan pola pemasangan dan jaraknya.
3. Pola pemasangan yang dipilih untuk merencanakan pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) pada lokasi ini adalah pola segiempat dengan jarak (*s*) sebesar 1.25. Pola segiempat ini dipilih karena di lapangan proses pemasangannya lebih mudah dilakukan dibanding dengan pemasangan PVD dengan pola segitiga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1.] Bowles, J.E., 1997, Analisis Dan Desain Pondasi Jilid 1, PT Erlangga, Jakarta.
- [2.] B. M. Das.,1995, "MEKANIKA TANAH Jilid 1 (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)," pp. 1–291, Erlangga, Jakarta.
- [3.] I. B. Mochtar., 2000, Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan Pada Tanah Bermasalah (Problematic Soils).
- [4.] Mochtar, Noor Endah. 2012. Modul Ajar Metode Perbaikan Tanah (RC09-1402). Surabaya: Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS.C. Terzaghi, "Principles of Soil Mechanics : IV Settlement and Consolidation of Clay."
- [5.] S. Hansbo, 1979, "Consolidation of Clay By Band-Shaped Prefabricated Drains.," Gr. Eng., vol. 12, no. 5, pp. 16–18, 21.
- [6.] Sarawati, I.F.2017. Perencanaan Perbaikan Tanah Lunak Pada Pembangunan Kawasan Kota Summarecon Bandung Area Mall Menggunakan Metode Preload Kombinasi Pvd Dan Phd.Malang: Universitas Brawijaya.
- [7.] Braja M, Das.,(2019) Principles Of Foundation Engineering, Ninth Edition, Cengage Learning.
- [8.] Braja M, Das.,(2010) Principles Of Geotechnical, Seventh Edition, Cengage Learning.

- [9.] Hardiyatmo, H.c. (2020) Perbaikan Tanah, Gadjah Mada University Press.
- [10.] Badan Standarisasi Nasional (2017) 'SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik'.
- [11.] Haq, M.F (2017) "Perencanaan Timbunan dan Konstruksi Penahan Tanah Untuk Terminal Penumpang di Pelabuhan Bima, Nusa Tenggara Barat".Surabaya:Institute Teknologi Sepuluh November.
- [12.] Yogyananta, D.A (2017) "Prediksi Pemampatan dan Perbaikan Tanah Metode Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) Berdasarkan Data Sondir dan Data Laboratorium pad Penambahan Ruas Jalan Akses Pelabuhan Trisakti-Liang Anggang".Surabaya:Institute Teknologi Sepuluh November.