

Modifikasi Perbaikan Tanah Dasar Tol Semarang–Demak: Metode *Vacuum Preloading* dengan *Prefabricated Vertical Drain*

Deris Faisa Ralindra^{1,*}, Aan Fauzi¹, Mohammad Aulia Shohibul Hikam¹, Fitria Wahyuni¹, Triaswati M. N.¹, Sukobar¹, A. Faiz Hadi Prajitno¹

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: deris@its.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	18 Oktober 2021	<i>The Semarang–Demak Toll Road Development Project provides information that conditions in these areas were dominated by rice fields and swamps with high groundwater levels. At STA 21+000 to 22+350, the subgrade was very soft to a depth of 24 m, so subgrade improvement needs to be done to eliminate soil compression. The soil improvement method used was Vacuum Preloading with Prefabricated Vertical Drain. The results of the planning showed that the installation of a vacuum pump at the project site has a pressure of 101.28 kPa. The effectiveness of the pump was 80%, making the vacuum pressure 81.02 kPa or the equivalent of 4.89 meters of soil pile. The square PVD installation pattern with a distance of 100 cm was chosen on the basis of consideration of the consolidation time. This design reduces the time it takes for the soil to reach a 90% degree of consolidation, from 256 years to 16 weeks. The Vacuum Preloading method reduces the heap height, as in STA 21+950. This method also creates a subgrade embankment of only 7.767 m.</i>
Diperbaiki	22 April 2022	
Disetujui	28 April 2022	

Keywords: *subgrade, toll, vacuum preloading, PVD*

Abstrak

Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang–Demak memberikan informasi bahwa kondisi di tempat tersebut didominasi oleh sawah dan rawa dengan elevasi muka air tanah yang tinggi. Pada STA 21+000 s/d 22+350 merupakan tanah dasar yang sangat lunak hingga kedalaman 24 m, sehingga perbaikan tanah dasar perlu dilakukan untuk menghilangkan pemampatan tanah. Metode perbaikan tanah yang digunakan adalah *Vacuum Preloading* dengan *Prefabricated Vertical Drain*. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa pemasangan pompa *vacuum* pada lokasi proyek memiliki tekanan sebesar 101,28 kPa. Efektivitas pompa sebesar 80% membuat tekanan *vacuum* menjadi 81,02 kPa atau setara 4,89 m timbunan tanah. Pola pemasangan PVD persegi dengan jarak 100 cm dipilih atas dasar pertimbangan waktu konsolidasi. Desain ini mengurangi waktu yang diperlukan tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, dari 256 tahun menjadi 16 minggu. Metode *Vacuum Preloading* mengurangi tinggi timbunan tanah, seperti pada STA 21+950. Metode ini juga membuat timbunan *subgrade* hanya setinggi 7,767 m.

Kata kunci: tanah dasar, tol, *vacuum preloading, PVD*

1. Pendahuluan

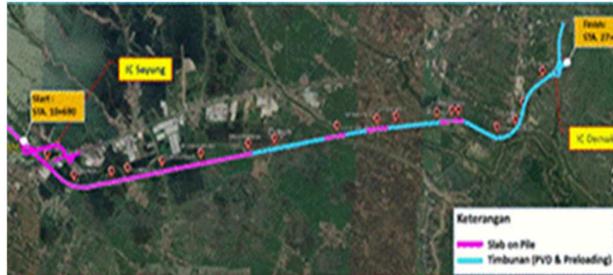
Pembangunan jalan Tol Trans Jawa yang dimulai pada akhir tahun 2019 diharapkan akan mengurangi kemacetan pada jalan nasional pantura yang sering terjadi setiap harinya akibat bertambahnya volume kendaraan. Salah satu pengembangan jalan tol tersebut adalah jalan Tol Semarang–Demak. Bagi pemerintah daerah dan investor, kehadiran jalan tol ini akan menjadi daya tarik untuk berinvestasi pada sektor industri manufaktur, properti, dan pariwisata pada koridor yang dilalui ekonomi daerah di sekitar kawasan yang dilalui. Berdasarkan hasil penyelidikan awal yang dilakukan, tanah dasar dari proyek Jalan Tol Semarang–Demak memiliki sifat yang sangat lunak hingga kedalaman 30 m. Sifat tanah yang lunak pada kawasan ini juga disebutkan dalam beberapa penelitian terkait [1]. Tanah lunak adalah tanah kohesif yang sebagian besar terdiri atas butir-butir yang sangat kecil

seperti lempung dan lanau. Adapun lapisan tanah lunak memiliki karakteristik rendahnya gaya geser, plastisitas dan kemampuan tinggi, koefisien permeabilitas rendah, serta daya dukung rendah [2].

Karakteristik tanah lunak seperti yang telah disebutkan di atas akan menyebabkan beberapa masalah, terutama angka keamanan yang kecil seperti penurunan jalan yang mengakibatkan jalan retak. Lebih lanjut, rendahnya daya dukung akan menyebabkan kerugian, mulai dari kerugian dari sisi biaya konstruksi yang mahal hingga keselamatan konstruksi yang terancam tidak stabil bahkan roboh [3]. Oleh karena itu, pada lokasi proyek ini perlu dilakukan perbaikan tanah dasar agar daya dukung tanah meningkat dan besarnya pemampatan berkurang.

Jalan Tol Semarang Demak direncanakan memiliki panjang 27 km, yang dibagi menjadi dua paket pekerjaan.

Paket 1 dimulai dari STA 0+00 s/d 10+690 menghubungkan Kota Semarang dengan Sayung (Demak). Sedangkan Paket 2 dimulai dari STA 10+690 hingga STA 27+000 menghubungkan Sayung dengan Kota Demak. Dalam perencanaannya, main road Tol Semarang Demak dibagi menjadi 2 jenis perkuatan yaitu Slab On Pile dan Timbunan (*Vacuum Preloading* dengan PVD). Pada studi ini yang akan di analisa adalah area dengan perkuatan timbunan menggunakan *Vacuum Preloading* dengan PVD seperti terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Pembagian Jalan Tol Semarang-Demak [4]

Metode *preloading* dengan sistem timbunan tanah memerlukan waktu yang cukup lama untuk mencapai beban rencana. Hal tersebut dikarenakan penambahan beban dilakukan secara bertahap, seiring penambahan ketinggian timbunan tanah yang hanya bisa ditambahkan setinggi 50 cm per lapisannya. Selain itu, dibutuhkan waktu tunggu agar lapisan tanah tidak mengalami longsor saat nantinya ditambah lapisan di atasnya. Dengan adanya proses yang memakan waktu tersebut, penulisan merencanakan penggunaan metode alternatif, yaitu metode *Vacuum Preloading*. Metode tersebut dapat mempersingkat waktu untuk mencapai beban rencana, dimana beban *vacuum* sebesar 80kPa dapat langsung tercapai dalam waktu 14 hari [5].

Metode *Vacuum Preloading* awalnya diusulkan oleh Kjellman pada tahun 1952 dan dikerjakan oleh Royal *Swedish Geotechnical Institute* sebagai metode untuk memperbaiki tanah berbutir halus. Metode ini memanfaatkan tekanan atmosfer sebagai beban tambahan sementara untuk memperbaiki tanah lunak berbutir halus [5]. Dengan cara mengurangi tekanan air pori di dalam tanah, maka tegangan efektif dapat meningkat tanpa mengubah tegangan total. Penggunaan metode ini dapat mempercepat waktu untuk mencapai beban rencana *preloading* serta mengurangi ketinggian timbunan tanah.

Metode serupa telah banyak dilakukan dalam mengatasi permasalahan pekerjaan konstruksi bangunan, terutama dalam pembangunan jalan tol. Penelitian serupa pada jalan tol Pematang Panggang–Kayu Agung mengungkapkan bahwa pola pemasangan ini mampu mempercepat penurunan dari

130 tahun menjadi hanya 19 minggu [6]. Metode serupa juga dilakukan oleh peneliti lain pada proyek tol trans Sumatera [7], bahkan di luar negeri seperti China telah menerapkan metode ini karena dijelaskan bahwa *vacuum preloading* yang dikombinasi dengan PVD telah terbukti menjadi metode efektif pada perawatan pondasi lunak [8].

Dari hasil perencanaan, nantinya didapatkan beban rencana yang dibutuhkan untuk melakukan *preloading* dengan terlebih dahulu melakukan koreksi tekanan atmosfer agar sesuai dengan efektivitas pompa *vacuum*. Selanjutnya dilakukan perhitungan waktu konsolidasi alami diikuti dengan desain pemasangan PVD dan rencana tinggi timbunan awal agar mencapai elevasi rencana setelah terjadi penurunan konsolidasi.

2. Metode

A. Studi Literatur

Mempelajari dan memahami konsep-konsep yang digunakan dalam menentukan karakteristik dan parameter tanah, metode perbaikan tanah dasar, dan metode percepatan pemampatan konsolidasi. Adapun bahan studi yang akan dipakai dalam perencanaan ini adalah sebagai berikut.

- Analisa parameter tanah
- Teori Pemampatan tanah
- Metode *preloading* dengan sistem *vacuum*
- Metode *Prefabricated Vertical Drain*

B. Pengumpulan dan Analisa Data Lapangan

Data-data yang digunakan dalam perencanaan ini adalah data sekunder, yaitu sebagai berikut.

a) Data perencanaan *main road* Tol Semarang Demak yang meliputi:

- Denah lokasi
- Elevasi rencana jalan
- *Cross section* jalan
- Beban rencana lalu lintas

b) Data tanah yang mencakup:

- Data hasil uji *Standart Penetration Test* (SPT)
- Bor log
- Sifat fisik tanah
- Sifat teknis tanah

c) Data perencanaan perbaikan tanah

C. Analisis Parameter Tanah Dasar

Analisa tanah dilakukan menggunakan analisis statistik dan parameter tanah yang berasal dari data hasil penyelidikan di lapangan dan laboratorium. Dari hasil analisa dapat digunakan untuk menghitung *settlement* akibat beban rencana dan timbunan serta waktu konsolidasi alami sebelum dilakukan perbaikan tanah.

a) Perhitungan *Settlement* Akibat Beban Rencana dan Timbunan

Perhitungan pemampatan yang terjadi pada lapisan tanah dilakukan setelah dilakukan perbaikan tanah. Pada perencanaan ini akan dihitung akibat beban timbunan yang diberikan. Perhitungan pemampatan akan dilaksanakan pada setiap tahap pekerjaan agar tidak terjadi kegagalan perencanaan.

b) Perhitungan Waktu Konsolidasi Alami

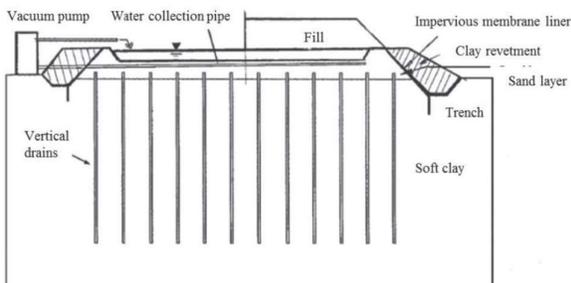
Perhitungan waktu konsolidasi alami ini digunakan untuk mengetahui waktu penurunan sebelum dilakukan perbaikan tanah dasar.

D. Perencanaan Perbaikan Tanah

Setelah mengetahui besarnya penurunan tanah yang terjadi akibat konsolidasi, beserta lamanya waktu konsolidasi alami maka selanjutnya direncanakan perbaikan tanah dasar apabila kedua kriteria tersebut memenuhi persyaratan. Dalam penulisan ini perbaikan tanah dasar yang digunakan adalah *Vacuum preloading* dengan PVD.

a) Perencanaan *Vacuum Preloading*

Pada tahapan ini direncanakan metode pemasangan pompa *vacuum*, efektivitas pompa *vacuum* didapatkan dengan mengoreksi tekanan atmosfer di lokasi pelaksanaan proyek (Kota Demak).

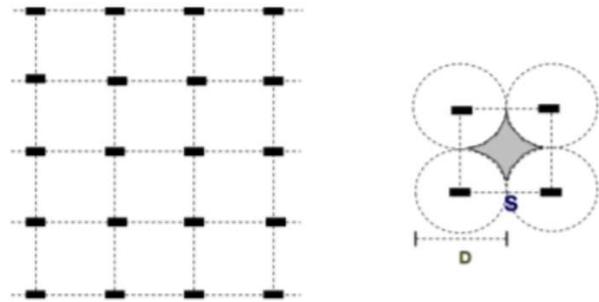


Gambar 2. Ilustrasi metode *vacuum preloading* + PVD [9]

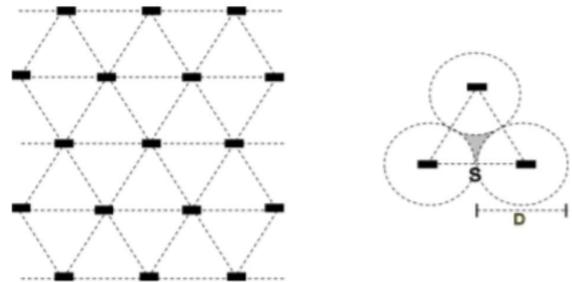
Konsep dasar dari metode *vacuum preloading* adalah menerapkan tekanan hisap pada massa tanah yang terisolasi untuk mengurangi tekanan atmosfer dan tekanan air pori di dalam tanah, sehingga konsolidasi tanah dan tegangan efektif meningkat tanpa perubahan tegangan total.

b) Perencanaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)

Tahapan selanjutnya yaitu melakukan perencanaan pemasangan PVD. Dengan menentukan terlebih dahulu jarak antar PVD serta pola pemasangannya. Kemudian dipilih kombinasi yang paling efektif untuk digunakan pada proyek Tol Semarang Demak. Dua pola yang dapat digunakan, yaitu pola segitiga dan segiempat yang ditampilkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



Gambar 3. PVD dengan Pola Susunan Segiempat [10]



Gambar 4. PVD dengan Pola Susunan Segitiga [10]

E. Perhitungan Waktu Konsolidasi dan Derajat Konsolidasi

Selanjutnya adalah perhitungan waktu konsolidasi dan derajat konsolidasi. Hasil dari perhitungan yang diperoleh pada sub bab sebelumnya digunakan pada perhitungan ini. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut.

- 1) Menghitung waktu konsolidasi arah vertikal
- 2) Menghitung derajat konsolidasi arah vertikal
- 3) Menghitung waktu konsolidasi arah horizontal
- 4) Menghitung derajat konsolidasi arah horizontal
- 5) Menghitung derajat konsolidasi radial
- 6) Perhitungan dihentikan apabila derajat konsolidasi radial sudah mencapai 90%
- 7) Membuat grafik hubungan waktu konsolidasi dengan derajat konsolidasi.

3. Hasil dan Pembahasan

A. Tinggi Timbunan *Vacuum*

Untuk mendapatkan beban timbunan akibat pompa *vacuum*, terlebih dahulu dilakukan koreksi tekanan atmosfer. Tekanan atmosfer $P = 1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 101,3 \text{ kPa}$. Ketinggian lokasi proyek dari muka air tanah (h) adalah +1,5 meter, sehingga besar tekanan atmosfer berdasarkan ketinggian lokasi proyek Tol Semarang–Demak adalah 101,28 kPa.

Pada perencanaan metode *vacuum preloading* efektivitas pompa yang sering digunakan adalah 80%. Sehingga tekanan *vacuum* tidak dapat dicapai secara maksimal. Oleh karena itu, tekanan *vacuum* menjadi 8,26 ton/m², sehingga apabila

beban *vacuum* tersebut dikonversi menjadi tinggi timbunan tanah dengan perhitungan dengan persamaan 1.

$$\begin{aligned}
 H_{vakum} &= \frac{\gamma_{timb}}{q_{vakum}} & (1) \\
 &= \frac{1,69 \text{ ton/m}^3}{8,26 \text{ ton/m}^2} \\
 &= 4,89 \text{ m}
 \end{aligned}$$

B. Penurunan Konsolidasi Akibat Beban Rencana

Pada bab sebelumnya sudah diperhitungkan beban variasi timbunan. Beban tersebut lalu digunakan untuk perhitungan penurunan tanah konsolidasi akibat beban rencana. Dalam perencanaan ini lapisan tanah dibagi menjadi ketebalan 1 meter per lapisannya, dengan total lapisan sebanyak 24 lapis. Hal tersebut dilakukan agar perhitungan yang dilakukan semakin mendekati penurunan asli yang terjadi di lapangan. Hasil dari perhitungan tertera pada **Tabel 1** dan **Gambar 3**.

Setelah mengetahui besaran penurunan tanah maka bisa dilakukan perhitungan tinggi timbunan akhir setelah penurunan konsolidasi tanah terjadi. Sehingga tinggi timbunan akhir (H_{final}) akibat penambahan timbunan awal 1 meter tertera pada **Tabel 2** dan **Gambar 4**.

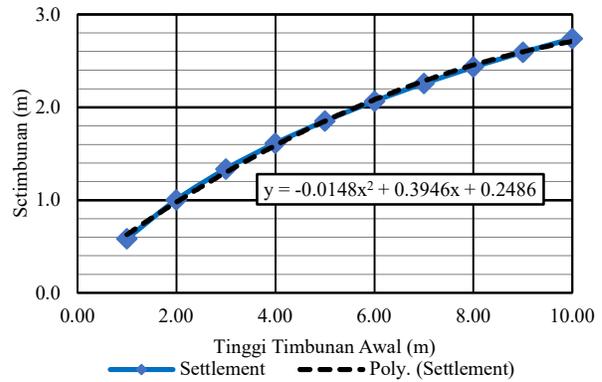
Tabel 1. Penurunan Konsolidasi Tanah Akibat Variasi Tinggi Timbunan Awal

Tinggi Timbunan, $H_{initial}$ (m)	Beban Timbunan, Q_{timb} (ton/m ²)	Penurunan Tanah, S_c (m)
1	1,69	0,583
2	3,38	1,004
3	5,07	1,335
4	6,76	1,612
5	8,45	1,853
6	10,14	2,066
7	11,83	2,258
8	13,52	2,432
9	15,21	2,592
10	16,9	2,740

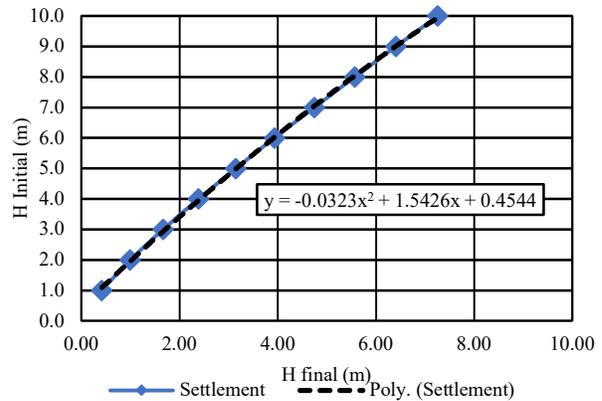
Tabel 2. Tinggi Timbunan Akhir Akibat Variasi Tinggi Timbunan

Tinggi Timbunan, $H_{initial}$ (m)	Tinggi Timbunan Akhir, H_{final} (m)
1	0,417
2	0,996
3	1,665
4	2,388
5	3,147
6	3,934

Tinggi Timbunan, $H_{initial}$ (m)	Tinggi Timbunan Akhir, H_{final} (m)
7	4,742
8	5,568
9	6,408
10	7,260



Gambar 3. Grafik Hubungan Penurunan Konsolidasi Tanah dengan Tinggi Timbunan Awal



Gambar 4. Hubungan Tinggi Timbunan Awal dan Tinggi Timbunan Akhir

C. Perencanaan Tinggi Timbunan Awal

Perencanaan STA 21+000, $H_{timb} = 3,624 \text{ m}$

$$\begin{aligned}
 H_{final} &= H_{timb} + H_{vakum} \\
 &= 3,624 \text{ m} + 4,889 \text{ m} \\
 &= 8,513 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{initial} &= -0,0323x^2 + 1,5426x + 0,4544 \\
 &= -0,0323(8,513 \text{ m})^2 + 1,5426(8,513 \text{ m}) + 0,4544 \\
 &= 11,246 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{nyata} &= H_{initial} - H_{vakum} \\ &= 11,246 \text{ m} - 4,889 \text{ m} \\ &= 6,357 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_c &= -0,0148x^2 + 0,3946x + 0,286 \\ &= -0,0148(11,246 \text{ m})^2 + \\ &\quad 0,3946(11,246 \text{ m}) + 0,286 \\ &= 2,814 \text{ m} \end{aligned}$$

Perencanaan STA 21+025, $H_{timb} = 3,297 \text{ m}$

$$\begin{aligned} H_{final} &= H_{timb} + H_{vakum} \\ &= 3,297 \text{ m} + 4,889 \text{ m} \\ &= 8,186 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{initial} &= -0,0323x^2 + 1,5426x + 0,4544 \\ &= -0,0323(8,186 \text{ m})^2 + \\ &\quad 1,5426(8,186 \text{ m}) + 0,4544 \\ &= 10,918 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{nyata} &= H_{initial} - H_{vakum} \\ &= 10,918 \text{ m} - 4,889 \text{ m} \\ &= 6,357 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_c &= -0,0148x^2 + 0,3946x + 0,286 \\ &= -0,0148(10,918 \text{ m})^2 + \\ &\quad 0,3946(10,918 \text{ m}) + 0,286 \\ &= 2,793 \text{ m} \end{aligned}$$

Perhitungan dilanjutkan hingga STA 22+350. Hasil perencanaan timbunan awal dan estimasi penurunan dapat dilihat pada **Tabel 5**. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan *Vacuum Preloading* dapat mengurangi tinggi timbunan nyata yang ada di lapangan. Sebagai contoh perbandingan dengan kondisi di proyek dengan menggunakan *Soil Preloading* pada STA 21+000 tinggi timbunannya diketahui adalah 6,931 m. Data tersebut diketahui dari hasil wawancara dan pengamatan langsung di lokasi proyek. Hasil dari perhitungan perencanaan metode *Vacuum Preloading* membuktikan bahwa metode tersebut dapat mengurangi tinggi timbunan tanah. Pada akhir masa penimbunan tidak perlu dilakukan pemotongan timbunan *preloading*, karena beban *preloading* sudah digantikan dengan beban dari Pompa *Vacuum*.

D. Perhitungan Load Rasio

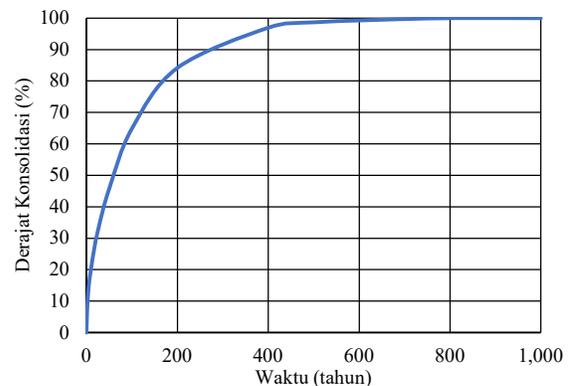
Load rasio perlu dihitung untuk memastikan apakah total pembebanan yang direncanakan (beban *vacuum* dan beban timbunan), telah memenuhi beban yang direncanakan pada kondisi layan. Karena pada perencanaan ini efek gaya angkat (*buoyancy effect*) tidak diperhitungkan maka, sesuai dengan SNI 8460 tahun 2017, nilai rasionya harus melebihi 1,3. Perhitungan *Load Rasio* dijelaskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} LR &= \frac{Q_{timb} + Q_{vakum}}{Q_{timb} + Q_p + Q_T} \\ &= \frac{13,126 \text{ ton/m}^2 + 8,262 \text{ ton/m}^2}{13,126 \text{ ton/m}^2 + 1,260 \text{ ton/m}^2 + 1,115 \text{ ton/m}^2} \\ &= 1,383 \geq 1,3 \text{ (Load Rasio Mencukupi)} \end{aligned}$$

Nilai *load rasio* melebihi 1,3 sehingga bisa dipastikan bahwa perencanaan perbaikan tanah dasarnya aman. Perhitungan tersebut dilanjutkan pada setiap STA.

E. Waktu Konsolidasi Alami

Waktu konsolidasi alami dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik Waktu Konsolidasi Alami

F. Perencanaan PVD

Setelah dipastikan bahwa tanah dasar pada area yang ditinjau memerlukan perbaikan tanah, maka selanjutnya direncanakan perbaikan tanah dasar. Perbaikan yang dilakukan adalah percepatan penurunan konsolidasi tanah menggunakan PVD. Pada penjelasan sebelumnya telah diketahui bahwa kedalaman tanah lunak adalah 24 meter, maka dalam perencanaannya PVD dipasang hingga kedalaman 24 m. Lebar PVD yang dipasang adalah 10 cm dengan tebal 0,4 cm. Untuk jarak pemasangan PVD dibuat bervariasi dari 80 cm, 100 cm, 120 cm, 140 cm, 160 cm, 180 cm dan 200 cm sebagaimana tertera pada **Tabel 4**. Pola pemasangan dihitung menggunakan pola segitiga dan segi empat. Selanjutnya ditentukan konfigurasi mana yang paling efektif dan dapat digunakan pada pelaksanaan.

Pada penelitian ini, batas waktu rencana tunggu *preloading* pada proyek adalah 120 hari atau sekitar 17 minggu, sehingga tidak memungkinkan pemasangan jarak pemasangan lebih dari 100 cm, karena waktu konsolidasinya lebih dari 17 minggu. Penggunaan jarak pemasangan 80 cm bisa digunakan apabila ingin dilakukan percepatan pada proyek, namun dengan catatan panjang pemasangan PVD akan

semakin bertambah. Perbandingan hubungan waktu konsolidasi dengan derajat konsolidasi desain pemasangan PVD pola segitiga dan persegi secara berturut-turut dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**. Desain PVD yang dianggap paling efektif adalah pola persegi dengan jarak 100 cm. Dengan desain tersebut, lama waktu yang diperlukan tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90% selama 16 minggu.

Tabel 3. Waktu Konsolidasi Alami

Waktu (tahun)	Faktor Waktu, T_v	Derajat Konsolidasi, U_v (%)
0	0,00	0,00
1	0,00	6,49
5	0,02	14,51
10	0,03	20,52
25	0,08	32,44
50	0,17	45,88
100	0,33	64,88
200	0,66	84,15
400	1,32	96,90
500	1,65	98,63
750	2,48	99,82
1000	3,31	99,98

Tabel 4. Waktu Konsolidasi Alami

Jarak Pemasangan PVD (cm)	Lama Waktu untuk Konsolidasi 90% (minggu)	
	Pola Segitiga	Pola Persegi
80	8	9
100	13	16
120	20	24
140	29	35
160	40	47
180	52	62
200	67	> 70

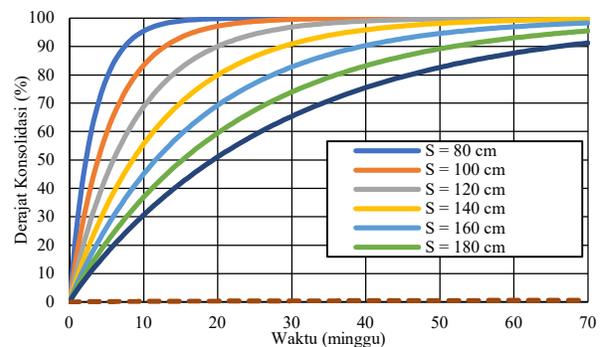
4. Simpulan

Pada perencanaan perbaikan tanah dasar yang dilakukan pada Proyek Tol Semarang–Demak STA. 21+000 s/d 22+350 menggunakan metode *Vacuum Consolidation* dengan *Prefabricated Vertical Drain*, dapat disimpulkan bahwa:

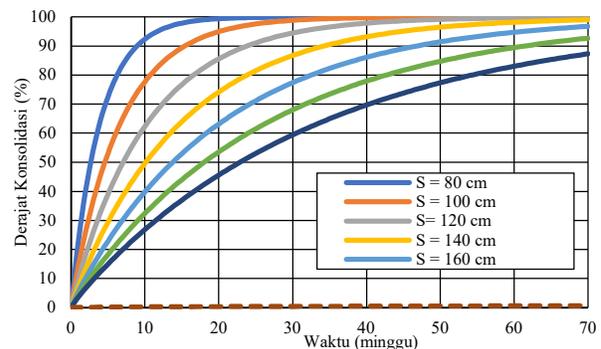
1. Tanah dasar pada lokasi proyek Tol Semarang–Demak STA. 21+000 s/d 22+350 merupakan tanah lempung lunak yang memiliki kompresibilitas sangat besar hingga kedalaman 24 meter. Apabila tidak dilakukan perbaikan tanah dasar, maka waktu konsolidasi alami dari tanah tersebut hingga mencapai derajat konsolidasi 90% adalah 256 tahun.
2. Pada perencanaan ini, pemasangan pompa *vacuum* pada lokasi proyek memiliki tekanan sebesar 101,28 kPa.

Dengan efektivitas pompa sebesar 80% maka tekanan *vacuum* menjadi 81,02 kPa atau setara 4,89 meter timbunan tanah. Desain PVD yang dianggap paling efektif adalah pola persegi dengan jarak 100 cm. Dengan desain tersebut, lama waktu yang diperlukan tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90% menurun sangat drastis, dari 256 tahun menjadi hanya 16 minggu.

3. Penggunaan Metode *Vacuum Preloading* juga mengurangi tinggi timbunan tanah, seperti pada STA. 21+950 apabila menggunakan *soil preloading* tinggi timbunan mencapai 10,637 meter sedangkan dengan menggunakan *Vacuum Preloading* timbunan *subgrade* hanya setinggi 7,767 meter.



Gambar 6. Perbandingan Hubungan Waktu Konsolidasi dengan Derajat Konsolidasi pada Desain Pemasangan PVD Pola Segitiga



Gambar 7. Perbandingan Hubungan Waktu Konsolidasi dengan Derajat Konsolidasi pada Desain Pemasangan PVD Pola Persegi

5. Daftar Pustaka

- [1] O. G. Ranty and T. Andayono, “Perbaikan Tanah Dengan Metode Prefabricated Vertical Drain Pada Proyek Jalan Tol,” vol. 8, no. 1, pp. 32–37, 2021.
- [2] H. N. Siska and Y. A. Yakin, “Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Lunak di Gedebage,”

- RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 2, no. 4, p. 44, 2016, [Online]. Available: <https://ejournal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/1143>.
- [3] C. E. Putra and C. A. Makarim, "Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Lunak dan Sangat Lunak pada Jalan Tol," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 3, no. 4, p. 1137, 2020, doi: 10.24912/jmts.v3i4.8382.
- [4] A. A. Fahmi and A. F. Muhammad, "Laporan Kerja Praktek Proyek Jalan Tol Semarang - Demak PT. PP (Persero) Tbk.," Surabaya, 2021.
- [5] L. Yu and M. Djunaidy, "A vacuum consolidation method application case for improving dredging slurry," 2015.
- [6] P. P. Putra, W. Y. Widarti, and E. P. Oktavian, "Analisis Perbaikan Tanah Lunak dengan Kombinasi Preloading dan Prefabricated Vertical Drain pada Pembangunan Jalan Tol Pematang Panggang – Kayu Agung, Sumatera Selatan," *J. Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, vol. 4, no. 2, pp. 107–112, 2020.
- [7] A. C. Sinulingga and A. Suhendra, "Analisis Derajat Konsolidasi Berdasarkan Hasil Pembacaan Piezometer Pada Proyek Tol Trans Sumatera," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, p. 447, 2021, doi: 10.24912/jmts.v0i0.11069.
- [8] H. Wu and L. M. Hu, "Numerical model of soft ground improvement by vertical drain combined with vacuum preloading," *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 7, pp. 2066–2071, 2013, doi: 10.1007/s11771-013-1708-3.
- [9] J. Q. Shang, M. Tang, and Z. Miao, "Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study," *Can. Geotech. J.*, vol. 35, no. 5, pp. 740–749, 1998, doi: 10.1139/cgj-35-5-740.
- [10] I. B. Mochtar, *Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS, 2000.

Tabel 5. Hasil Perencanaan Timbunan Awal dan Estimasi Penurunan Tanah

STA	Tinggi Timbunan Awal, $H_{initial}$ (m)	Tinggi Timbunan Nyata, H_{nyata} (m)	Estimasi Penurunan, S_c (m)
21+000	11,246	6,357	2,814
21+025	10,918	6,029	2,793
21+050	10,742	5,853	2,780
21+075	10,624	5,735	2,770
21+100	10,541	5,652	2,764
21+125	10,486	5,597	2,759
21+150	10,290	5,401	2,742
21+175	10,193	5,304	2,733
21+200	10,095	5,207	2,724
21+225	10,008	5,119	2,715
21+250	9,901	5,012	2,705
21+275	9,226	4,337	2,629
21+300	9,721	4,832	2,686
21+325	9,773	4,884	2,691
21+350	9,706	4,817	2,684
21+375	9,782	4,893	2,692
21+400	9,884	4,996	2,703
21+425	9,935	5,046	2,708
21+450	10,013	5,124	2,716
21+475	10,168	5,279	2,731
21+500	10,199	5,311	2,734
21+525	10,245	5,356	2,738
21+550	10,407	5,518	2,752
21+575	10,398	5,510	2,752
21+600	10,459	5,570	2,757
21+625	10,686	5,797	2,775
21+675	11,152	6,263	2,809
21+700	11,372	6,483	2,822
21+725	11,122	6,233	2,807
21+750	11,388	6,499	2,823
21+775	11,666	6,778	2,838
21+800	11,966	7,077	2,851
21+825	12,203	7,314	2,860
21+850	12,430	7,542	2,867
21+875	11,999	7,110	2,853

STA	Tinggi Timbunan Awal, $H_{initial}$ (m)	Tinggi Timbunan Nyata, H_{nyata} (m)	Estimasi Penurunan, S_c (m)
21+900	12,545	7,656	2,870
21+925	12,627	7,738	2,871
21+950	12,656	7,767	2,872
21+975	12,250	7,362	2,862
22+000	11,825	6,936	2,845
22+025	12,176	7,287	2,859
22+050	12,010	7,121	2,853
22+075	11,900	7,011	2,849
22+100	11,814	6,925	2,845
22+125	11,654	6,765	2,837
22+150	10,895	6,006	2,791
22+175	10,353	5,464	2,748
22+200	10,393	5,504	2,751
22+225	10,884	5,995	2,790
22+250	10,558	5,669	2,765
22+275	11,135	6,246	2,807
22+300	11,320	6,431	2,819
22+325	11,575	6,687	2,833
22+350	11,772	6,883	2,843