

Perencanaan Perbaikan Tanah dengan Menggunakan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) dan Timbunan (*Preloading*) pada Pembangunan Gedung ITS Tower 3

Agista Tri Kurniawan^{1*}, Eding Iskak Imananto² dan Eri Andrian Yudianto³

^{1,2,3}Fakultas Teknik dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang.

E-mail: agistatri0308@gmail.com

Abstract

The construction of ITS Tower 3 in Surabaya faces challenges due to the presence of soft clay soil characterized by low bearing capacity, high compressibility, and low permeability, which pose risks of significant settlement and endanger the stability of high-rise structures. To address this issue, soil improvement was planned using the preloading method combined with Prefabricated Vertical Drain (PWD) installation to accelerate the consolidation process. This study aims to analyze the magnitude of soil settlement and consolidation time under untreated conditions and compare them with conditions after applying PWD with different installation patterns (triangular and square) and spacing variations (1.0 m–1.6 m). The research methods include analyzing field and laboratory soil test data, calculating consolidation parameters, and simulating consolidation time based on different PWD configurations. The results show that PWD application significantly accelerates consolidation time compared to untreated soil, with triangular patterns at closer spacing providing higher efficiency despite requiring higher costs. Furthermore, the combination of preloading and PWD proved effective in accelerating initial settlement before structural construction, thereby reducing the risk of long-term deformation.

Keywords: Consolidation, PVD, Preloading, Settlement, Installation pattern, Soft soil.

Abstrak

Pembangunan Gedung ITS Tower 3 di Surabaya menghadapi tantangan kondisi tanah lempung lunak yang memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, serta permeabilitas rendah yang berpotensi menimbulkan penurunan (settlement) signifikan dan membahayakan stabilitas struktur gedung bertingkat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan perencanaan perbaikan tanah menggunakan metode preloading dan pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PWD) guna mempercepat proses konsolidasi. Studi ini bertujuan menganalisis besarnya penurunan tanah dan waktu konsolidasi pada kondisi tanpa perbaikan serta membandingkannya dengan kondisi setelah penerapan PWD dengan variasi pola (segitiga dan persegi) dan jarak pemasangan (1,0 m–1,6 m). Metode penelitian meliputi analisis data uji lapangan dan laboratorium tanah, perhitungan parameter konsolidasi, serta simulasi waktu konsolidasi berdasarkan konfigurasi PVD yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan PWD secara signifikan mempercepat waktu konsolidasi dibandingkan kondisi tanpa perbaikan, dengan pola segitiga berjarak rapat memberikan efisiensi konsolidasi lebih tinggi meskipun membutuhkan biaya lebih besar. Selain itu, kombinasi metode preloading dan PWD terbukti efektif mempercepat penurunan awal sebelum pembangunan struktur, sehingga risiko deformasi jangka panjang dapat diminimalkan.

Kata kunci: Konsolidasi, PVD, Preloading, Penurunan, Pola pemasangan, Tanah lunak.

*Corresponding Author's email: agistatri0308@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur dan gedung bertingkat di Indonesia terus mengalami perkembangan seiring dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap fasilitas publik, pendidikan, dan perkantoran. Di berbagai kota besar, gedung-gedung tinggi mulai banyak dibangun sebagai solusi terhadap keterbatasan lahan dan sebagai bagian dari modernisasi kawasan urban. Salah satu bentuk implementasi pembangunan ini adalah proyek Gedung ITS Tower 3 di lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Sebagai bangunan bertingkat yang dirancang untuk menunjang berbagai aktivitas akademik dan administratif, ITS Tower 3 menuntut struktur yang stabil dan aman. Namun, lokasi proyek berada di atas tanah lempung lunak yang memiliki karakteristik kurang menguntungkan, seperti daya dukung yang rendah, kadar air yang tinggi, serta sifat kompresibilitas tinggi dan permeabilitas rendah. Tanah seperti ini sangat tidak ideal untuk langsung menopang beban bangunan, karena berpotensi mengalami penurunan (settlement) yang signifikan dalam jangka panjang, bahkan dapat menimbulkan keretakan dan kerusakan struktural pada bangunan.

Untuk mengatasi tantangan tersebut, salah satu metode perbaikan tanah yang banyak diterapkan di berbagai proyek konstruksi adalah kombinasi metode preloading dan pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PVD). Metode ini bekerja dengan cara mempercepat proses konsolidasi tanah, yaitu dengan memberi beban awal (preloading) untuk mendorong keluarnya air pori dari dalam tanah, serta memasang PVD sebagai jalur vertikal yang mempercepat aliran air ke permukaan. Dengan begitu, penurunan tanah yang besar bisa terjadi lebih awal, sebelum struktur bangunan dibangun, sehingga risiko deformasi di kemudian hari dapat diminimalkan.

Namun, efektivitas metode ini sangat dipengaruhi oleh konfigurasi teknis pemasangan PVD, terutama dalam hal jarak antar drain dan pola pemasangan (seperti pola segitiga, persegi, atau persegi panjang). Jarak yang terlalu rapat bisa mempercepat proses konsolidasi tetapi berdampak pada peningkatan biaya, sedangkan jarak yang terlalu renggang dapat mengurangi efisiensi waktu dan hasil konsolidasi. Demikian pula, pola pemasangan berpengaruh terhadap distribusi tekanan air pori dan sebaran drainase dalam tanah. Oleh karena itu, pemilihan variasi jarak dan pola PVD menjadi faktor penting dalam mencapai keseimbangan antara efektivitas teknis dan efisiensi biaya dalam perbaikan tanah lunak.

Pada proyek pembangunan Gedung ITS Tower 3, perencanaan metode perbaikan tanah menggunakan kombinasi preloading dan PVD perlu mempertimbangkan data geoteknik lokasi, ketebalan lapisan tanah lunak, waktu konsolidasi yang diinginkan, serta alternatif variasi jarak dan pola pemasangan PVD yang paling sesuai. Studi ini akan menganalisis efektivitas beberapa konfigurasi PVD untuk menentukan perencanaan terbaik yang dapat

mempercepat proses konsolidasi dengan tetap mempertimbangkan faktor teknis dan ekonomis.

Dengan melakukan analisis mendalam terhadap variasi jarak dan pola pemasangan PVD dalam proyek ini, diharapkan hasil studi ini dapat memberikan masukan teknis yang aplikatif bagi perencanaan perbaikan tanah pada proyek-proyek sejenis, sekaligus memperkaya referensi akademik dalam bidang teknik geoteknik, khususnya dalam penanganan tanah lunak untuk bangunan bertingkat di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Untuk dapat memahami tata cara serta memilih cara (metode) yang sesuai untuk perbaikan tanah. Setelah mengetahui kondisi dan jenis tanah tersebut, perlu dilakukan Langkah sebagai berikut:

a. Penentuan Nilai Indeks Kompresi (Cc) dan Koefisien Konsolidasi (Cv)

Langkah awal dalam perencanaan perbaikan tanah adalah menentukan karakteristik fisik dan mekanik tanah. Nilai indeks kompresi (Cc) menunjukkan seberapa besar kemampuan tanah untuk mengalami perubahan volume akibat tekanan beban. Koefisien konsolidasi (Cv) menggambarkan kecepatan tanah dalam melepas air pori akibat pembebangan. Nilai Cv juga diperoleh melalui uji laboratorium atau dapat ditaksir menggunakan pendekatan korelasi berdasarkan jenis tanah dan tingkat kepadatannya.

b. Penentuan Beban Rencana Bangunan dan Faktor Pengaruh Beban

Beban rencana bangunan ditentukan berdasarkan perhitungan beban struktur bangunan secara menyeluruh, termasuk beban mati dan beban hidup. Nilai ini kemudian digunakan untuk menganalisis seberapa besar tekanan yang akan diteruskan ke lapisan tanah di bawahnya. Untuk mengetahui distribusi tekanan beban ke dalam tanah, digunakan suatu pendekatan yang memperhitungkan bentuk dan ukuran pondasi serta kedalaman tanah.

c. Penentuan Parameter Teknis Tanah

Beberapa parameter penting perlu dihitung untuk memahami kondisi tanah sebelum dilakukan perbaikan, di antaranya adalah tekanan overburden (tekanan tanah akibat berat sendiri), tekanan air pori (akibat keberadaan muka air tanah), serta tegangan efektif yang merupakan perbedaan antara keduanya. Parameter-parameter ini sangat penting dalam menilai kemampuan tanah menopang beban tambahan. Selain itu, dilakukan juga perhitungan distribusi tegangan tambahan dari beban bangunan untuk mengetahui seberapa besar perubahan tekanan yang terjadi di setiap kedalaman.

d. Perhitungan Penurunan Konsolidasi

Penurunan konsolidasi adalah perubahan volume tanah akibat keluarnya air dari pori-pori tanah karena beban yang diberikan. Perhitungan dilakukan per lapisan tanah berdasarkan karakteristik fisik masing-masing lapisan serta tekanan yang diterima. Hasil dari perhitungan ini menunjukkan besarnya penurunan yang dapat terjadi selama masa konsolidasi berlangsung.

e. Perhitungan Waktu Konsolidasi Sebelum Menggunakan PVD

Setelah mengetahui besarnya penurunan, selanjutnya dihitung waktu yang diperlukan untuk terjadinya konsolidasi hingga mencapai derajat tertentu, misalnya 90 persen. Perhitungan ini mempertimbangkan sifat tanah (melalui nilai Cv) serta ketebalan lapisan tanah lunak yang perlu didrainase.

f. Penggunaan PVD dengan Pola Segitiga dan Pola Persegi dengan Variasi Jarak

Untuk mempercepat proses konsolidasi, digunakan vertical drain (PVD) yang dipasang secara sistematis dalam pola tertentu.. Beberapa variasi jarak antar drainase dicoba, misalnya mulai dari 1 meter hingga 1,6 meter, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kecepatan konsolidasi dan efisiensi sistem perbaikan. Setiap variasi jarak menghasilkan durasi konsolidasi yang berbeda.

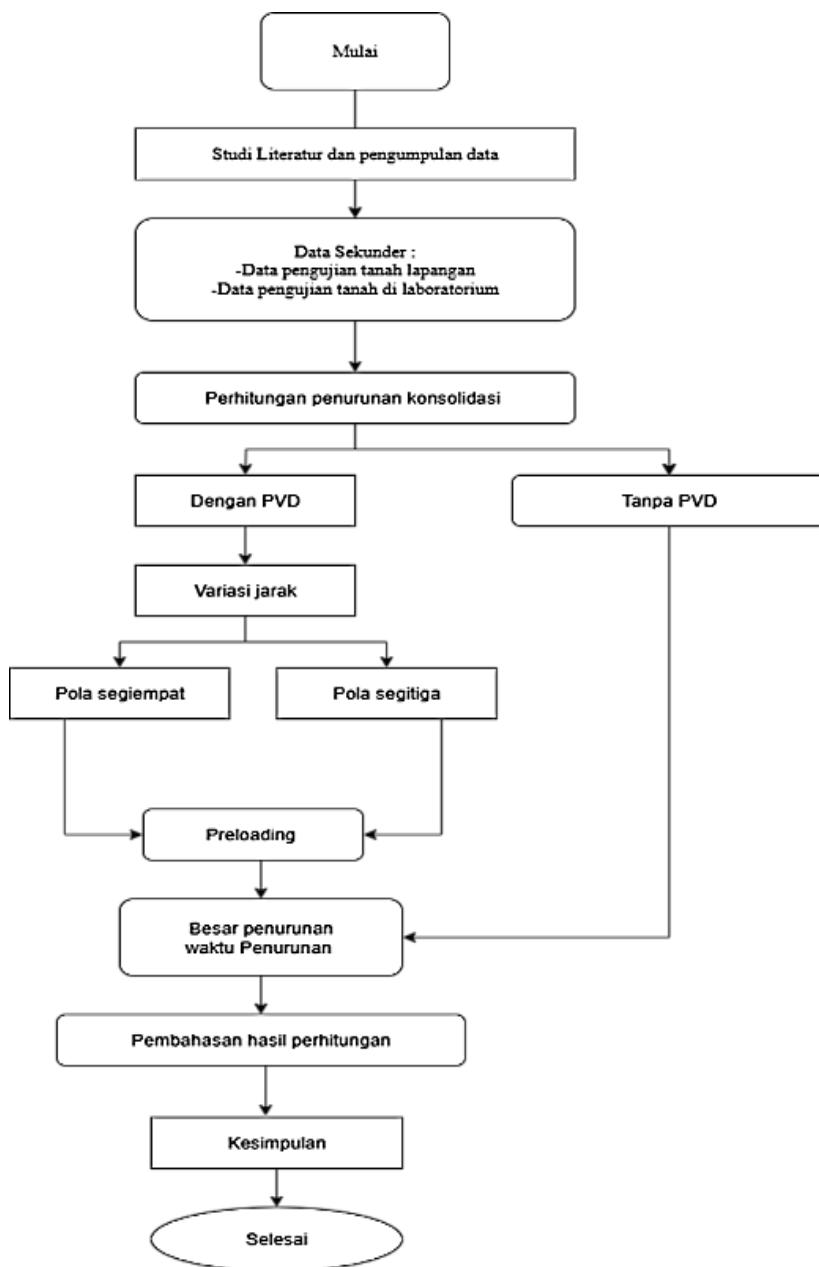
g. Penambahan Timbunan Sementara (*Preloading*)

Preloading adalah metode dengan menambahkan beban timbunan sementara di atas area yang diperbaiki, dengan tujuan untuk mempercepat proses konsolidasi.

h. Evaluasi dan Pengambilan Kesimpulan

Tahap akhir adalah evaluasi dari seluruh hasil perhitungan dan analisis. Penilaian dilakukan terhadap nilai penurunan tanah, kecepatan konsolidasi, efektivitas penggunaan PVD pada berbagai pola dan jarak, serta manfaat penggunaan preloading.

Sebelum melakukan Studi dan perencanaan diperlukan bagan alir atau flow chart. Pada Bagan alir/flow chart ini sebagai urutan langkah-langkah pelaksanaan sampai terdapat kesimpulan.

**Gambar 1** Diagram Alir Penelitian

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Tanah Awal

Data tanah yang digunakan dalam analisis ini diperoleh dari hasil pengeboran tanah (borlog) pada titik BH-1 yang terletak di lokasi pembangunan Gedung Tower 3 ITS Surabaya. Pengujian dilakukan pada tanggal 15 Juni 2021 dengan menggunakan metode pengeboran rotary, serta dilengkapi dengan pengambilan sampel utuh (Undisturbed Sample/UDS) dan data uji laboratorium. Permukaan muka air tanah tercatat berada pada kedalaman $\pm 1,5$ m dari permukaan tanah.

3.2 Stratigrafi Tanah

Berdasarkan hasil borlog BH-1, lapisan tanah dari permukaan hingga kedalaman 30meter yaitu:

Tabel 1 Jenis Tanah dan Keterangannya

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Keterangan
0-4	Lempung berlanau abu-abu	<i>Very soft</i>
4-16	Pasir berlanau abu-abu	<i>Very loose-dense</i>
16-30	Lanau berpasir berlempung abu-abu	<i>Medium-dense</i>

Dari data nilai N-SPT di atas, lapisan tanah dari permukaan hingga kedalaman 4meter memiliki nilai N-SPT sebesar 1, yang mengindikasikan tanah sangat lunak (*very soft*) dengan daya dukung yang sangat rendah dan potensi penurunan yang tinggi. Selanjutnya, pada kedalaman 5 hingga 10 meter, nilai N-SPT secara bertahap meningkat dari 1 (kedalaman 6 m), 4 (kedalaman 8 m), hingga 8 (kedalaman 10 m). Meskipun terdapat peningkatan nilai pukulan, klasifikasi tanah pada kedalaman tersebut masih menunjukkan kondisi sangat lepas hingga lepas (*very loose to loose*) yang belum cukup stabil terhadap pembebanan jangka panjang.

3.3 Penentuan Nilai Indeks kompresi (Cc) dan koefisien Konsolidasi (Cv)

Tabel berikut menyajikan berbagai persamaan empiris yang digunakan untuk memperkirakan angka pemampatan (Compression Index, Cc) berdasarkan hasil penelitian beberapa ahli. Nilai Cc dapat ditentukan dari parameter indeks tanah seperti batas cair (LL), rasio pori awal (e_0), maupun kadar air alami (W_a). Persamaan-persamaan ini digunakan sebagai pendekatan awal dalam analisis konsolidasi tanah lempung, terutama ketika data hasil uji laboratorium tidak tersedia.

Tabel 2 Persamaan Empiris untuk Menentukan Angka Pemampatan (Cc)

Persamaan	Acuan	Daerah Pemakaian
$C_c = 0.007(LL - 7)$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (<i>remolded</i>)
$C_c = 0.01 W_a$		Lempung Chicago
$C_c = 1.15 (e_0 - 0.27)$	Nishida	Semua lempung
$C_c = 0.30 (e_0 - 0.27)$	Hough	Tanah kohesif anorganik: lanau, lempung berlanau, lempung
$C_c = 0.0115 W_a$		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
$C_c = 0.0046 (LL - 9)$		Lempung Brazilia
$C_c = 0.75 (e_0 - 0.27)$		Tanah dengan plastisitas rendah
$C_c = 0.208 e_0 + 0.0083$		Lempung Chicago
$C_c = 0.156 e_0 + 0.0107$		Semua lempung

Nilai *Compression Index (Cc)* pada kedalaman 5 m yaitu:

$$Cc = 0.156 \times e_0 + 0.0107$$

$$Cc = 0.156 \times 1.047 + 0.0107$$

$$Cc = 0,174$$

Nilai *Compression Index (Cc)* pada kedalaman 10 m yaitu:

$$Cc = 0.156 \times e_0 + 0.0107$$

$$Cc = 0.156 \times 1.114 + 0.0107$$

$$Cc = 0,184$$

Dari perhitungan diatas nilai *Compression Index (Cc)* pada kedalaman 5m dan 10m adalah 0,174 dan 0,184.

Menghitung koefisien konsolidasi vertical (C_v) pada kedalaman 5 m:

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{1 \times 10^{-5}}{1,5 \times 10^{-3} \cdot 9,81} = \frac{1 \times 10^{-5}}{0,0147} = 0,00068 \text{ } m^2 /s$$

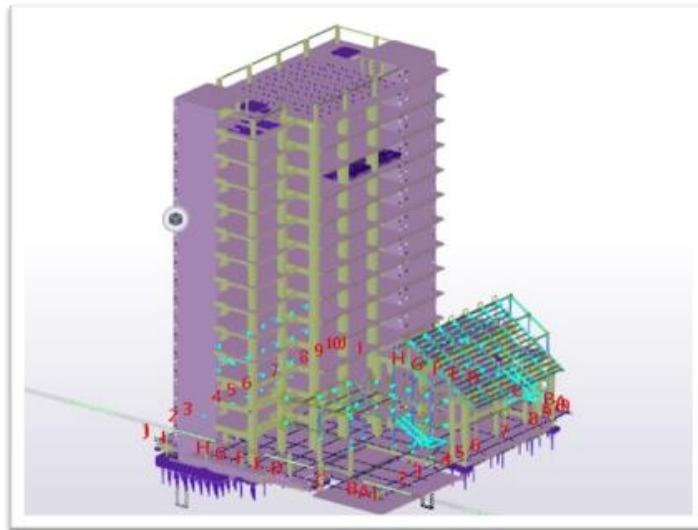
Menghitung koefisien konsolidasi vertical (C_v) pada kedalaman 10 m:

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{1 \times 10^{-5}}{9,5 \times 10^{-4} \cdot 9,81} = \frac{1 \times 10^{-5}}{0,00932} = 0,00107 \text{ } m^2 /s$$

Dari perhitungan diatas nilai koefisien konsolidasi vertical (C_v) pada kedalaman 5m dan 10m adalah $0,00068 \text{ } m^2 /s$ dan $0,00107 \text{ } m^2 /s$.

3.4 Beban Rencana Bangunan

Gambar berikut menunjukkan model tiga dimensi struktur gedung yang terdiri dari bangunan utama bertingkat dan bangunan sayap dengan atap baja. Model ini menggambarkan elemen-elemen struktur seperti kolom, balok, pelat lantai, serta sistem atap yang terhubung secara keseluruhan. Penomoran grid dan elemen struktur digunakan untuk mempermudah identifikasi posisi elemen pada analisis struktur, baik untuk evaluasi kekuatan maupun rehabilitasi bangunan.



Gambar 2 Pemodelan Rencana Bangunan di Aplikasi Tekla

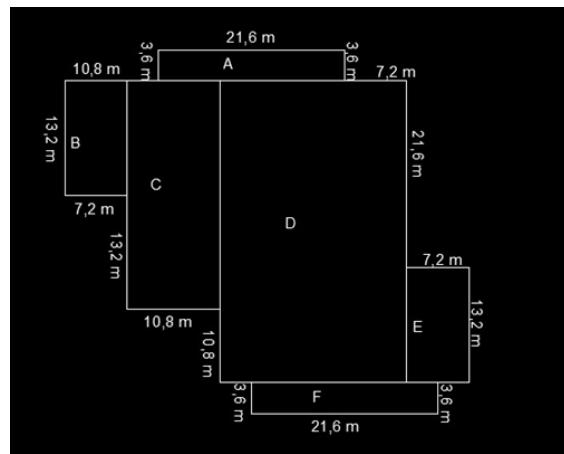
Gambar berikut menampilkan daftar profil struktur baja yang dihasilkan dari perangkat lunak Tekla Structures. Tabel tersebut berisi informasi mengenai jenis profil, jumlah komponen, total panjang elemen, serta total berat masing-masing elemen. Data ini digunakan untuk mengetahui kebutuhan material secara keseluruhan dalam proyek, baik untuk keperluan fabrikasi maupun estimasi biaya. Total keseluruhan tercatat sebanyak 10.232 komponen dengan berat total sekitar 40.548,84 ton.

EKLA STRUCTURES List: Profiles					Page: 16
Contract No: TS1000					Date 28.07.2025
Title: Tekla Structures Project Name					Time: 13:38:20
Date:					
Type	Qty.	Profile	Total Length [mm]	Total Weight [kg]	
B	1	PLT200x3604	3754	6487.2	
B	5	PLT200x3605	3800	31757.3	
B	1	PLT200x3754	4291	7732.2	
B	1	PLT200x3800	3597	6129.9	
B	2	PLT233x550	12895	8116.4	
B	3	PLT233x600	18600	16420.0	
B	1	PLT233x751	19151	8039.7	
RU	368	ROD19	329	0.0	
Z	48	TRIBUN+8.4	7159	425661.7	

Total 10232Parts					40548.84 T

Gambar 3 Total beban pada Rencana Bangunan

Dari hasil pemodelan bangunan Gedung Menawa 3 Tower ITS menggunakan aplikasi Tekla Structures, diperoleh total beban struktur sebesar 40548,84 ton. Setelah mendapatkan total beban struktur kemudian mencari luas total area Gedung.

**Gambar 4** Rencana Luas Area Rencana Bangunan

Total luas rencana bangunan = 1381,84 m²

Maka beban yang bekerja pada permukaan tanah sebesar:

$$\text{Beban rencana bangunan} = \frac{40548,84}{1381,84} = 29,35 \text{ t/m}^2$$

Jadi beban rencana bangunan yang digunakan untuk perhitungan penurunan tanah sebesar 29,35 t/m².

3.5 Menghitung Faktor Pengaruh Beban (I)

Dalam analisis konsolidasi tanah, perhitungan pengaruh tegangan vertikal akibat beban pondasi sangat penting. Salah satu pendekatan umum yang digunakan adalah berdasarkan faktor pengaruh beban (i) yang bergantung pada bentuk pondasi dan kedalaman titik pengamatan.

Tabel 3 Distribusi Tegangan

Kedalaman (m)	q_0 (t/m ²)	i	ΔP (t/m ²)
1	29,35	0,498	14,6166
2	29,35	0,4922	14,44557
3	29,35	0,4829	14,1736
4	29,35	0,4708	13,8177
5	29,35	0,4565	13,39782
6	29,35	0,4407	12,93359
7	29,35	0,424	12,44315
8	29,35	0,4069	11,94165
9	29,35	0,3898	11,44105
10	29,35	0,3731	10,95019

3.6 Menghitung Tekanan Overbuden (P_o')

Tabel berikut menunjukkan distribusi tegangan efektif tanah (P_o') terhadap kedalaman. Nilai P_o' meningkat seiring bertambahnya kedalaman, yang menandakan semakin besar beban tanah yang ditopang oleh lapisan di bawahnya akibat berat tanah di atasnya. Pola kenaikan ini bersifat linier dan umum terjadi pada kondisi tanah berlapis seragam dengan berat isi konstan.

Tabel 4 Tekanan Overbuden

Kedalaman (m)	P_o' (t/m ²)
1	1,857
2	3,215
3	4,072
4	4,929
5	5,786
6	6,524
7	7,262
8	8,000
9	8,738
10	9,475

3.7 Menghitung Tegangan Efektif Akhir ($P_o' + \Delta P$)

Rumus dari nilai Tegangan efektif akhir (P') yaitu:

$$P' = P_o' + \Delta P$$

Dengan:

P_o' = Tegangan efektif awal (t/m²)

ΔP = Perubahan Tegangan Akibat Beban (t/m²)

Tegangan efektif akhir (P') lapis 1

$$P' = P_o' + \Delta P$$

$$P' = 1,857 + 14,6163$$

$$P' = 16,4733 \text{ t/m}^2$$

Tabel 5 Tegangan Efektif Akhir

Kedalaman (m)	P_o' (t/m ²)	ΔP (t/m ²)	$P_o' + \Delta P$ (t/m ²)
1	1,857	14,6166	16,4736
2	3,215	14,44557	17,6606
3	4,072	14,1736	18,2456
4	4,929	13,8177	18,7477
5	5,786	13,39782	19,1838
6	6,524	12,93359	19,4576
7	7,262	12,44315	19,7052
8	8	11,94165	19,9417
9	8,738	11,44105	20,1791
10	9,475	10,95019	20,4252

3.8 Perhitungan Penurunan Tanah dan Waktu Konsolidasi Tanpa Penggunaan PVD

Penurunan tanah (Konsolidasi primer)

Data perhitungan

Indeks Pemampatan (C_{c1-5m}) = 0,174

Indeks Pemampatan (C_{c6-10m}) = 0,184

Angka pori (e_{01-5m}) = 1,047

Angka pori (e_{01-5m}) = 1,114

Tebal lapisan tanah (H_i) = 1 m (perhitungan tiap 1m)

$$\text{Konsolidasi Primer (}S_c\text{)} = \left[\frac{C_c}{1 + e_0} H_i \log \left(\frac{\Delta P + p_o}{p_o} \right) \right]$$

$$\text{Konsolidasi Primer (}S_c\text{)} = \left[\frac{0,174}{1 + 1,047} H_i \log \left(\frac{14,6166 + 1,857}{1,857} \right) \right]$$

Konsolidasi Primer (S_c) = 0,08058 m

Tabel 6 Penurunan Tanah Tanpa Menggunakan PVD (S_c)

Kedalaman (m)	H_i (m)	C_c	e_0	P_o (t/m ²)	ΔP (t/m ²)	S_c (m)
1	1	0,174	1,047	1,857	14,6166	0,08058
2	1	0,174	1,047	3,215	14,44557	0,062887
3	1	0,174	1,047	4,072	14,1736	0,055366
4	1	0,174	1,047	4,929	13,8177	0,049316
5	1	0,174	1,047	5,786	13,39782	0,044249
6	1	0,184	1,114	6,524	12,93359	0,041306
7	1	0,184	1,114	7,262	12,44315	0,037733
8	1	0,184	1,114	8	11,94165	0,034526
9	1	0,184	1,114	8,738	11,44105	0,031638
10	1	0,184	1,114	9,475	10,95019	0,029053
Total						0,466636

Jadi penurunan total akibat beban rencana bangunan diatas tanpa menggunakan PVD didapat $S_c = 0,466636$ m.

Waktu Penurunan

Diketahui data tanah dasar sebagai berikut:

Koefisien konsolidasi lapisan 1 ($C_v 1$) = 0,00068 m² /s

Koefisien konsolidasi lapisan 1 ($C_v 2$) = 0,00107 m² /s

Tebal lapisan 1 (H_1) = 5 m = 500 cm

Tebal Lapisan 2 (H_2) = 5 m = 500 cm

$$\text{Koefisien konsolidasi lapisan Gab} = \frac{(H_1 + H_2)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{CV_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{CV_2}} \right)^2}$$

$$\text{Koefisien konsolidasi lapisan Gab} = \frac{(500 + 500)^2}{\left(\frac{500}{\sqrt{0,00068 \text{ cm}^2/\text{det}}} + \frac{500}{\sqrt{0,00107 \text{ cm}^2/\text{det}}} \right) 2}$$

Koefisien konsolidasi lapisan Gab = $0,000842132 \text{ cm}^2/\text{det} = 0,05092 \text{ m}^2/\text{minggu}$

Waktu (t) = 1 minggu = 604800 detik

Tebal tanah yang mampat (H_{dr}) = 10 m = 1000 cm

$$\text{Faktor waktu (T}_v\text{)} = \frac{t \times C_v}{H_{dr}^2}$$

$$\text{Faktor waktu (T}_v\text{)} = \frac{1 \times 0,05092}{(10)^2}$$

$$\text{Faktor waktu (T}_v\text{)} = 0,0005092$$

Untuk nilai U antara 0 - 60 %:

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = \left(2 \sqrt{\frac{0,0005092}{3,14}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = 0,025 = 2,5\%$$

Untuk nilai U > 60 %:

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = (100 - 10^a)\%$$

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = \left(100 - 10^{\frac{1,78 - 0,31032}{0,933}} \right) \%$$

$$\text{Derajat Konsolidasi (U}_v\text{)} = 62 \%$$

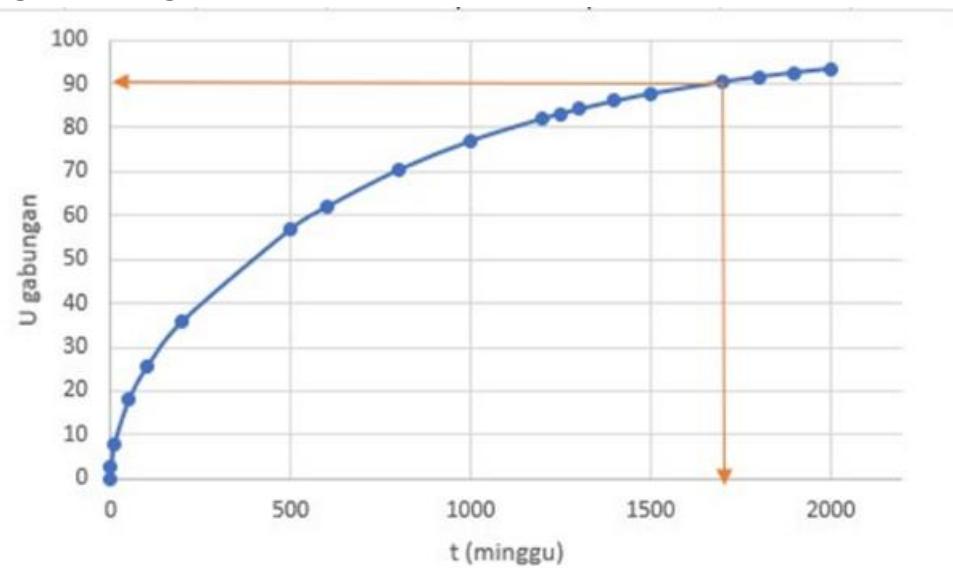
Tabel 7 Perhitungan Derajat Konsolidasi (U_v) Tanpa PVD

t (minggu)	C _v (m ² /minggu)	T _v	U _v
1	0.05092	0.000509	0.025462
10	0.05092	0.005092	0.080519
50	0.05092	0.02546	0.180046
100	0.05092	0.05092	0.254624
200	0.05092	0.10184	0.360093
500	0.05092	0.2546	0.569356
600	0.05092	0.30552	0.619491
800	0.05092	0.40736	0.704055
1000	0.05092	0.5092	0.769825
1200	0.05092	0.61104	0.820979
1250	0.05092	0.6365	0.831881
1300	0.05092	0.66196	0.84212
1400	0.05092	0.71288	0.860764

Tabel 7 Perhitungan Derajat Konsolidasi (U_v) Tanpa PVD (Lanjutan)

t (minggu)	C_v ($m^2/minggu$)	T_v	U_v
1500	0.05092	0.7638	0.877207
1700	0.05092	0.86564	0.904496
1800	0.05092	0.91656	0.915774
1900	0.05092	0.96748	0.925721
2000	0.05092	10.184	0.934492

Dengan grafik sebagai berikut:



Gambar 5 Hubungan antara derajat konsolidasi (U) dan waktu (t) tanpa menggunakan PVD

Dari tabel dan grafik diatas dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (U_v) = 90% adalah 1700 minggu atau 32,61 tahun. Jadi, penurunan $S_c = 90\% \times 0,4666 \text{ m} = 0,41994 \text{ m}$.

3.9 PVD dengan Pola Segitiga dan Variasi Jarak yang Berbeda

Mencari nilai daerah ekuivalen drainase vertical berbentuk pola segitiga yaitu:

$$\text{Daerah ekuivalen (D)} = 1,05 \times S$$

$$\text{Jarak (s)} = 1 \text{ m (Jarak PVD)}$$

$$\text{Daerah ekuivalen (D)} = 1,05 \times s$$

$$\text{Daerah ekuivalen (D)} = 1,05 \times 1$$

$$\text{Daerah ekuivalen (D)} = 1,05$$

Hasil analisis daerah ekuivalen (D) untuk jarak 1 -1,6 m

Tabel 8 Hasil Analisis Daerah Ekuivalen (D) untuk Jarak 1 -1,6 m

S	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
D	1,05	1,26	1,365	1,47	1,575	1,68

Perhitungan diameter ekuivalen *vertical drain* (dw)

Lebar (a) = 100 mm

Lebar (b) = 3 mm

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = \frac{a + b}{2}$$

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = \frac{100 + 3}{2}$$

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = 51,5 \text{ mm} = 0,0515 \text{ m}$$

Perhitungan nilai factor tahanan akibat jarak antara PVD

$$\text{Faktor tahanan (F(n))} = \left[\ln \frac{D}{dw} - \frac{3}{4} \right]$$

$$\text{Faktor tahanan (F(n))} = \left[\ln \frac{1,05}{0,0515} - \frac{3}{4} \right] = 2,265$$

Hasil analisis faktor hambatan akibat jarak PVD untuk jarak 1m – 1,6 m

Tabel 9 Hasil Analisis faktor Hambatan Akibat Jarak PVD untuk Jarak 1 -1,6 m

S	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
F(n)	2,265	2,447	2,527	2,601	2,670	2,735

3.10 PVD dengan Pola Persegi dan Variasi Jarak yang Berbeda

Mencari nilai daerah ekuivalen drainase vertical berbentuk pola persegi yaitu:

Daerah ekuivalen (D) = 1,13 X S

Jarak (s) = 1 m (Jarak PVD)

Daerah ekuivalen (D) = 1.13 x S

Daerah ekuivalen (D) = 1.13 x 1

Daerah ekuivalen (D) = 1.13

Hasil analisis daerah ekuivalen (D) untuk jarak 1 -1,6 m

Tabel 10 Hasil Analisis Daerah Ekuivalen (D) untuk Jarak 1 -1,6 m

S	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
D	1,13	1,356	1,469	1,582	1,695	1,808

Perhitungan diameter ekuivalen *vertical drain* (dw)

Lebar (a) = 100 mm

Lebar (b) = 3 mm

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = \frac{a + b}{2}$$

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = \frac{100 + 3}{2}$$

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = 51,5 \text{ mm} = 0,0515 \text{ m}$$

Perhitungan nilai faktor tahanan akibat jarak antara PVD

$$\text{Faktor tahanan } (F(n)) = \left[\ln \frac{D}{dw} - \frac{3}{4} \right]$$

$$\text{Faktor tahanan } (F(n)) = \left[\ln \frac{1,13}{0,0515} - \frac{3}{4} \right] = 2,338$$

Hasil analisis factor hambatan akibat jarak PVD untuk jarak 1m – 1,6 m

Tabel 11 Hasil Analisis faktor Hambatan Akibat Jarak PVD untuk Jarak 1 -1,6 m

S	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
F(n)	2,338	2,521	2,601	2,675	2,744	2,808

3.11 Rekapitulasi Perhitungan PVD Menggunakan Pola Segitiga dan Persegi

Tabel berikut menyajikan hasil pengamatan terhadap penurunan tanah (settlement) pada berbagai jarak Prefabricated Vertical Drain (PWD) dengan pola pemasangan segitiga. Pengujian dilakukan untuk melihat pengaruh jarak PVD terhadap laju konsolidasi tanah selama proses preloading. Data yang disajikan mencakup waktu pembebahan (T), besarnya penurunan tanah (Sct), serta tingkat konsolidasi (U) pada setiap tahap pengujian, baik sebelum maupun sesudah proses preloading.

Tabel 12 Hasil Perhitungan Penggunaan PVD Pola Segitiga dengan Variasi Jarak

Jarak PWD	Pembebahan	T (minggu)	Sct (m)	U
1 m	Sebelum Preloading	7	0.422	90.5
	Preloading 1	8	0.139	29.8
	Total Penurunan	8	0.561	>0.4194
1,2 m	Sebelum Preloading	11	0.424	90.4
	Preloading 1	12	0.098	21.1
	Total Penurunan	12	0.522	>0.4194
1,3 m	Sebelum Preloading	13	0.421	91.8
	Preloading 1	15	0.140	31.9
	Total Penurunan	15	0.561	>0.4194
1,4 m	Sebelum Preloading	15	0.418	90.9
	Preloading 1	17	0.140	33.5
	Total Penurunan	17	0.558	>0.4194
1,5 m	Sebelum Preloading	18	0.421	90.3
	Preloading 1	20	0.115	27.3
	Total Penurunan	20	0.536	>0.4194
1,6 m	Sebelum Preloading	21	0.421	90.3
	Preloading 1	24	0.142	30.5
	Total Penurunan	24	0.563	>0.4194

Tabel berikut memperlihatkan hasil pengamatan terhadap penurunan tanah (settlement) pada berbagai jarak Prefabricated Vertical Drain (PWD) dengan pola pemasangan persegi. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui pengaruh jarak

antar PVD terhadap besarnya penurunan dan derajat konsolidasi tanah selama proses preloading.

Tabel 13 Hasil Perhitungan Penggunaan PVD Pola Persegi dengan Variasi Jarak

Jarak PVD	Pembebanan	T (minggu)	Sct (m)	U
1 m	Sebelum Preloading	8	0.418	89.5
	Preloading 1	9	0.119	25.6
	Total Penurunan	9	0.537	>0.4194
1,2 m	Sebelum Preloading	13	0.423	90.4
	Preloading 1	14	0.085	18.4
	Total Penurunan	14	0.508	>0.4194
1,3 m	Sebelum Preloading	15	0.419	90.9
	Preloading 1	17	0.130	28
	Total Penurunan	17	0.549	>0.4194
1,4 m	Sebelum Preloading	18	0.404	90
	Preloading 1	20	0.130	28.4
	Total Penurunan	20	0.534	>0.4194
1,5 m	Sebelum Preloading	21	0.419	90.1
	Preloading 1	23	0.101	21.7
	Total Penurunan	23	0.520	>0.4194
1,6 m	Sebelum Preloading	24	0.418	90.5
	Preloading 1	27	0.140	30.1
	Total Penurunan	27	0.558	>0.4194

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perhitungan kombinasi preloading dengan variasi jarak dan pola pemasangan PVD, diperoleh beberapa kesimpulan penting terkait percepatan konsolidasi tanah lunak. Dalam analisis ini, perhitungan difokuskan hingga pencapaian derajat konsolidasi $U = 90\%$ yang umum digunakan dalam perencanaan teknik geoteknik. Kemudian dapat diambil Kesimpulan sebagai berikut:

1. Dampak durasi waktu dan besar penurunan tanah akibat konsolidasi tanpa penerapan PVD dan timbunan. Konsolidasi alami tanpa pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PWD) dan timbunan berlangsung sangat lambat. Dari hasil perhitungan, untuk mencapai derajat konsolidasi sekitar 90% dengan besar penurunan tanah (Sc) sebesar $\pm 0,467$ m diperlukan waktu sekitar 1.700 minggu atau setara dengan lebih dari 32 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa konsolidasi alami tidak efisien untuk mendukung percepatan pembangunan karena durasi yang dibutuhkan sangat panjang sementara penurunan yang dicapai relatif kecil.
2. Pengaruh waktu dan besar penurunan tanah akibat konsolidasi dengan penerapan PVD (sebelum preloading). Pemasangan PVD secara signifikan

mempercepat proses konsolidasi dibandingkan dengan kondisi tanpa PVD. Dari hasil analisis, penurunan tanah yang terjadi relatif konstan pada kisaran 0,418–0,424 m dengan derajat konsolidasi mendekati 90%. Perbedaan yang nyata terlihat pada durasi waktu yang dibutuhkan. Dengan jarak pemasangan yang rapat, misalnya pada jarak 1,0 m, konsolidasi dapat mencapai $U \approx 90\%$ hanya dalam 7 minggu (pola segitiga) atau 8 minggu (pola persegi). Sementara itu, pada jarak 1,6 m, waktu yang dibutuhkan meningkat menjadi 21 minggu (pola segitiga) dan 24 minggu (pola persegi). Dengan demikian, penerapan PVD mampu menurunkan durasi konsolidasi dari puluhan tahun menjadi hanya beberapa minggu hingga bulan, tanpa mengubah besar penurunan akhir tanah.

3. Pola penggunaan PVD yang paling efisien terhadap durasi perencanaan pekerjaan perbaikan tanah di lokasi pembangunan Gedung ITS Tower 3. Berdasarkan hasil perbandingan, pola pemasangan PVD berbentuk segitiga lebih efisien dibandingkan dengan pola persegi dalam mempercepat tercapainya derajat konsolidasi target. Pada setiap variasi jarak yang sama, pola segitiga selalu menunjukkan waktu konsolidasi yang lebih singkat. Misalnya, pada jarak 1,0 m pola segitiga memerlukan waktu 7 minggu sedangkan pola persegi membutuhkan 8 minggu, demikian pula pada jarak 1,6 m pola segitiga membutuhkan 21 minggu sementara pola persegi membutuhkan 24 minggu. Dengan demikian, pola segitiga dapat direkomendasikan sebagai konfigurasi yang paling efisien untuk mempercepat perbaikan tanah di lokasi pembangunan.
4. Variasi jarak penggunaan PVD yang paling efisien terhadap durasi perencanaan pekerjaan perbaikan tanah di lokasi pembangunan Gedung ITS Tower 3. Efisiensi durasi konsolidasi sangat dipengaruhi oleh jarak antar PVD. Semakin rapat jarak pemasangan, semakin cepat derajat konsolidasi tercapai. Hasil analisis menunjukkan bahwa jarak 1,0 m merupakan yang paling efisien, karena dengan pola segitiga konsolidasi 90% dapat tercapai hanya dalam waktu 7 minggu, sedangkan dengan pola persegi memerlukan 8 minggu. Pada jarak yang lebih renggang, seperti 1,6 m, waktu yang dibutuhkan meningkat signifikan hingga mencapai 21–24 minggu. Oleh karena itu, variasi jarak 1,0 m dengan pola segitiga dapat direkomendasikan sebagai pilihan paling optimal untuk mempercepat perbaikan tanah pada proyek pembangunan Gedung ITS Tower 3.

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan dalam studi ini, ada beberapa hal yang bisa disarankan sebagai masukan untuk pelaksanaan di lapangan maupun untuk studi selanjutnya. Harapannya, saran-saran ini bisa membantu penerapan metode PVD secara lebih efektif dan efisien di proyek-proyek pembangunan di atas tanah lunak.

1. Pola pemasangan PVD berbentuk segitiga menunjukkan hasil yang lebih cepat dalam hal waktu konsolidasi dan besarnya penurunan tanah. Oleh karena itu, pola ini lebih disarankan karena lebih efektif dalam mempercepat keluarnya air pori dari tanah.
2. Jarak antar-PVD sangat memengaruhi hasil. Jarak yang terlalu jauh membuat proses konsolidasi lebih lama, sedangkan jarak yang terlalu rapat bisa meningkatkan biaya pemasangan. Maka dari itu, pemilihan jarak sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan waktu dan anggaran yang tersedia, agar tetap efisien secara teknis maupun ekonomi.
3. Untuk ke depannya, disarankan agar dilakukan studi lanjutan yang melibatkan pengujian langsung di lapangan. Hal ini penting untuk membandingkan hasil perhitungan dengan kondisi nyata, serta mempertimbangkan faktor lain seperti jenis tanah yang berbeda, kondisi air tanah, dan metode preloading yang digunakan secara bertahap.

REFERENSI

- Andria, T., Rustamaji, R. M., & Priadi, E. (2020). Kajian pemampatan tanah lunak dengan metode PVD-PHD di Pelabuhan Kijing Kabupaten Mempawah. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(2).
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan perancangan geoteknik (SNI 8460:2017). BSN.
- Das, B. M. (2007). *Principles of geotechnical engineering*. Boston, MA: PWS Publishing Company.
- Dewi, N. P. A., & Firmansyah, M. (2021). Analisa kinerja metode vacuum consolidation dan PVD dalam proyek reklamasi pantai di Surabaya. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Fadilla, R. N., & Pradiptiya, A. (2022). Analisis daya dukung pondasi spun pile dievaluasi dengan kalendering dan PDA. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology*, 3(2), 18–25.
- Gouw, T. L., & Gunawan, A. (2020). Can a pile load tested to ‘failure’ be used as a working pile? *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 51(2), 65–72.
- Kumalasari, P. T. (2015). Sejarah perkembangan dan kegunaan *prefabricated vertical drain* (PVD) sebagai salah satu metode perbaikan tanah dasar lunak. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), D44–D45.
- Kuswanda, W. P. (2015). Problematika pembangunan infrastruktur pada tanah lempung lunak dan alternatif metoda penanganannya. Dalam Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat: Pembangunan Berkelanjutan di Lahan Basah (pp. 270–288).
- Lestari, M. I., Manoppo, F. J., & Rondonuwu, S. G. (2018). Analisis kestabilan tanah timbunan (embankment) pada tanah rawa dengan menggunakan bambu (Studi kasus: Jalan Tol Manado-Bitung). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 8(2), 1–10.
- Li, R. (2020). Perbaikan tanah lempung lunak dengan metode prefabricated vertical drain (PVD). *Jurnal Poli-Teknologi*, 19(2), 197–206.

- PT Adhi Karya. (2021). Data laboratorium mekanika tanah dan batuan. Laboratorium Transportasi dan Geoteknik Fakultas Vokasi Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS.
- Rasyid, D. R., Zaika, Y., & Munawir, A. (2020). Prefabricated vertical drain (PVD) sebagai alternatif perbaikan tanah lunak yang dipasang dengan pola segiempat dengan variasi jarak (Studi kasus: tanah lunak di Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo). *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil*, 1(2).
- Rendon-Herrero, O. (1980). Universal compression index equation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(11), 1179–1199.
- Santoso, B., & Riyadi, A. (2019). Studi percepatan konsolidasi tanah lunak menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) dan *preloading* pada proyek Jalan Tol Jakarta-Cikampek II. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Siswanto, A. B., Wijaya, U., & Widawati, E. (2023). Perbaikan tanah lunak untuk konstruksi jalan pada proyek Jalan Lingkar Utara Brebes-Tegal. *Journal of Civil Engineering and Technology Sciences*, 2(3), 31–43.
- Terzaghi, K. (1925). Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage. Leipzig: Franz Deuticke.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). Soil mechanics in engineering practice. New York, NY: John Wiley & Sons.