PERENCANAAN PERBAIKAN TANAH DENGAN MENGGUNAKAN PVD (*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN*) DAN TIMBUNAN *(PRELOADING)* PADA PEMBANGUNAN GEDUNG ITS TOWER 3

Agista tri kurniawan[1], Eding iskak imananto[2], Eri andrian yudianto[3]

[123)] *Jurusan Teknik Sipil S-1 Institut Teknologi Nasional Malang*
Email: 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* (PVD) 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 PVD 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 PVD configurations. The results show that PVD 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 PVD 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* (PVD) guna mempercepat proses konsolidasi. Studi ini bertujuan menganalisis besarnya penurunan tanah dan waktu konsolidasi pada kondisi tanpa perbaikan serta membandingkannya dengan kondisi setelah penerapan PVD 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 PVD 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 PVD 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

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada studi ini adalah :

1. Apa dampak durasi waktu dan besar penurunan tanah yang disebabkan oleh konsolidasi tanpa penerapan *prefabricated vertical drain* (PVD) dan timbunan?
2. Apa pengaruh waktu dan tingkat penurunan tanah akibat konsolidasi dengan penerapan *prefabricated vertical drain* (PVD) dan timbunan?
3. Pola penggunaan *prefabricated vertical drain* (PVD) yang mana yang paling efisien terkait dengan durasi perencanaan pekerjaan perbaikan tanah di lokasi pembangunan gedung ITS tower 3?
4. Penggunaan variasi jarak *prefabricated vertical drain* (PVD) yang mana yang paling efisien terkait dengan durasi perencanaan pekerjaan perbaikan tanah di lokasi pembangunan gedung ITS tower 3?

1.3. Tujuan Studi

Tujuan studi ini adalah :

1. Menganalisis besarnya penurunan tanah serta waktu konsolidasi tanpa penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan timbunan (*preloading*).
2. Menganalisis dampak waktu dan tingkat penurunan tanah yang diakibatkan oleh konsolidasi dengan penerapan PVD dan beban timbunan.
3. Mengevaluasi perbandingan efektivitas berbagai pola pemasangan PVD dalam hal waktu konsolidasi dan efisiensi pelaksanaan perbaikan tanah.
4. Mengevaluasi perbandingan efektivitas berbagai pola pemasangan PVD dalam hal waktu konsolidasi dan efisiensi pelaksanaan perbaikan tanah.

1.4. Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang terdapat dalam studi ini yang perlu diperhatikan diantaranya adalah;

1. Studi ini hanya mengulas cara perbaikan tanah dengan menggabungkan *preloading* dan PVD.
2. Analisis dilakukan berdasarkan informasi tanah yang ada dari hasil penelitian geoteknik.

3. Penghitungan diarahkan pada perkiraan penurunan Primer karena konsolidasi tanah lempung lunak.
4. Analisis tidak mencakup desain struktur gedung atau sistem pondasi secara rinci.
5. Tidak adanya data laboratorium mengenai uji konsolidasi maka beberapa data menggunakan metode pendekatan rumus empiris.

1.5. Manfaat Studi

Studi ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Secara teoritis menambah wawasan dan referensi ilmiah dalam bidang teknik geoteknik, khususnya mengenai perencanaan perbaikan tanah lunak.
2. Secara praktis memberikan panduan teknis dalam penerapan metode *preloading* dan PVD pada proyek pembangunan gedung di daerah dengan tanah lunak.
3. Bagi institusi dan pihak terkait memberikan pertimbangan teknis dalam pengambilan keputusan desain pondasi dan perbaikan tanah pada proyek ITS Tower 3.
4. Mengurangi risiko kegagalan konstruksi akibat ketidakstabilan tanah dasardan akibat tanah lempung lunak.
5. Memberikan informasi teknis mengenai pengaruh jarak pemasangan, kedalaman, dan waktu konsolidasi terhadap efektifitas Prefabricated Vertical Drain (PVD).

II.Tinjauan Pustaka

2.1 Landasan Teori

2.1.1. Pengertian Tanah

Secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang tersusun dari agregat butiran mineral yang tidak saling terikat secara kimia, bercampur dengan bahan organik hasil pelapukan, serta mengandung cairan dan gas yang mengisi pori-pori antarpartikelnya (Das, 2007). Berdasarkan dominasi ukuran partikelnya, tanah diklasifikasikan menjadi kerikil (gravel), pasir (sand), lanau (silt), dan lempung (clay). Kerikil umumnya berupa pecahan batuan yang kadang mengandung mineral seperti kuarsa, feldspar, dan mineral lainnya, sedangkan pasir didominasi oleh kuarsa dan feldspar. Lanau terdiri atas butiran sangat halus, termasuk partikel berbentuk pipih dari serpihan mika, sementara lempung tersusun dari partikel berukuran mikroskopis hingga submikroskopis berbentuk pipih yang berasal dari mika, mineral lempung, serta mineral halus lainnya (Das, 2007).

Klasifikasi ukuran tanah yang ditampilkan pada Tabel 2.1 merujuk pada beberapa sistem yang telah dikembangkan, antara lain oleh Massachusetts Institute of Technology (MIT), United States Department of Agriculture (USDA), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), U.S. Army Corps of Engineers, dan U.S. Bureau of Reclamation, yang kemudian menjadi dasar terbentuknya Unified Soil Classification System (USCS). Meskipun sistem MIT hanya dicantumkan sebagai tambahan, kontribusinya cukup besar dalam sejarah perkembangan klasifikasi tanah (Das, 2007).

2.1.2. Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan jenis tanah berkoherensi yang tersusun atas partikel berukuran sangat halus, terutama lempung dan lanau. Karakteristik utamanya adalah memiliki kekuatan geser yang rendah, daya mampat (*compressibility*) yang tinggi, serta permeabilitas yang rendah, sehingga daya dukungnya lebih kecil dibandingkan jenis tanah lempung lain. Secara umum, tanah lempung lunak ditandai oleh beberapa sifat, antara lain: (1) memiliki kekuatan geser yang rendah, (2) kekuatan geser semakin menurun ketika kadar air bertambah, (3) kekuatan geser juga berkurang apabila struktur tanah terganggu, (4) dalam kondisi basah bersifat plastis dan mudah mengalami pemampatan, (5) menyusut ketika mengering dan mengembang saat basah, (6) mempunyai kompresibilitas tinggi, serta (7) relatif kedap terhadap aliran air. Terzaghi (1967) menyatakan bahwa lempung kohesif digolongkan sebagai tanah lunak apabila memiliki daya dukung kurang dari 0,5 kg/cm² serta nilai Standard Penetration Test (SPT) lebih kecil dari 4 ($N < 4$).

Secara praktis, hasil observasi di lapangan menunjukkan bahwa tanah lunak dapat diremas dengan mudah menggunakan jari tangan. Menurut Toha (1989), karakteristik umum tanah lunak meliputi kadar air 80–100%, batas cair (liquid limit) 80–100%, batas plastis (plastic limit) 30–45%, lebih dari 90% butiran lolos saringan No. 200 pada uji analisis ayakan, serta memiliki kuat geser 20–40 kN/m². Sementara itu, Edward W. dan Rolf Peter B. (1981) mendefinisikan lempung lunak sebagai lempung dengan tegangan geser lebih kecil dari 25 kPa. Peck dkk. (1953) mengelompokkan jenis lempung berdasarkan hubungan konsistensi, identifikasi, dan kuat tekan bebas (qu), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2. Selain itu, Das (2007) juga membedakan klasifikasi lempung berdasarkan variasi kadar airnya

2.2 Penurunan

Ketika tanah jenuh air menerima tambahan beban, tekanan air pori akan meningkat. Pada tanah

berpasir yang memiliki permeabilitas tinggi, air pori dapat keluar dengan cepat sehingga penurunan segera dan konsolidasi berlangsung hampir bersamaan. Sebaliknya, pada tanah lempung yang memiliki permeabilitas rendah, air pori memerlukan waktu lama untuk keluar sehingga konsolidasi berlangsung secara bertahap. Oleh karena itu, penurunan pada tanah lempung terdiri atas penurunan segera diikuti dengan konsolidasi primer yang memerlukan waktu relatif lama, serta konsolidasi sekunder akibat penyesuaian plastis partikel tanah setelah tekanan air pori berlebih hilang (Das, 2007).

Secara umum, proses konsolidasi menggambarkan berkurangnya volume tanah jenuh dengan permeabilitas rendah akibat keluarnya air pori hingga tekanan air pori berlebih menjadi nol. Hubungan antara pemampatan dan waktu menunjukkan tiga tahapan, yaitu: (1) pemampatan awal akibat beban awal (*initial compression*), (2) konsolidasi primer akibat perubahan tekanan air pori menjadi tekanan efektif, dan (3) konsolidasi sekunder akibat rekonsolidasi plastis butiran tanah. Secara matematis, penurunan total tanah dapat dinyatakan sebagai:

$$St = Si + Sc + Ss$$

dengan St adalah penurunan total, Si penurunan segera, Sc penurunan konsolidasi primer, dan Ss penurunan konsolidasi sekunder (Das, 2007). Penurunan sekunder terjadi setelah proses konsolidasi selesai atau ketika tekanan air pori berlebih (u = 0) (Gouw, 2010)

2.3 Parameter Penurunan Tanah

Penurunan tanah merupakan hal kritis yang harus dikontrol secara ketat dalam perbaikan tanah lunak. Tanah lempung lunak umumnya memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi, sehingga berisiko menimbulkan penurunan berlebih dan tidak seragam (differential settlement). Oleh karena itu, dalam perencanaan dan kontrol dilakukan evaluasi terhadap:

- Penurunan total (St): Maksimal penurunan yang diizinkan mengacu pada SNI 8460:2017, yaitu sebesar 15 cm + b/600, dengan b adalah lebar pondasi dalam cm.
- Penurunan diferensial (Δs): Batas toleransi perbedaan penurunan antar titik struktur adalah 1/300 dari panjang bangunan, agar tidak menyebabkan retak atau deformasi berlebihan pada elemen struktural.

Selain itu, parameter teknis tanah yang digunakan dalam analisis penurunan meliputi:

- C_v (koefisien konsolidasi): Mengukur kecepatan air pori keluar dari dalam tanah.
- Cc *(compression index*): Menunjukkan tingkat kemampatan tanah akibat beban.
- Su atau Cu (*undrained shear strength*): Menunjukkan kekuatan geser tanah dalam kondisi jenuh tanpa drainase.
- qult dan qall (daya dukung tanah ultimit dan izin): Dibandingkan dengan beban kerja aktual untuk memastikan keamanan struktur.

Data parameter-parameter tersebut diperoleh dari hasil pengujian laboratorium (uji oedometer, uji geser tak terdrainase) dan penyelidikan lapangan (SPT, CPT, dan pengeboran). Seluruh nilai ini menjadi acuan dalam proses kontrol dan evaluasi selama pelaksanaan perbaikan tanah, terutama pada fase *preloading* agar proses konsolidasi berlangsung secara aman, stabil, dan efisien sesuai dengan desain teknis.

2.3.1 Indeks Pemampatan (Cc)

Indeks pemampatan yang digunakan untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di lapangan sebagai akibat dari konsolidasi. Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan pemakaian persamaan empiris berikut ini untuk menghitung indeks pemampatan :

Untuk lempung ynag struktur tanahnya tak terganggu/belum rusak (undisturbed)

Cc = 0,009 (LL – 10)

Untuk lempung yang terbentuk kembali (remolded)

Cc = 0,007 (LL – 10)

Dimana LL = batas cair dalam persen

(Sumber: Das, B. M. 2007)

Beberapa perumusan untuk menghitung indeks pemamapatan yang lain banyak tersedia saat ini. Perumusan-perumusan tersebut telah dikembangkan dengan menguji bermacam-macam jenis.

3.2.1 Koefisien Konsolidasi (cv)

Menurut Das, B.M. (2007) Koefisien konsolidasi cv, biasanya akan berkurang dengan bertambahnya batas cair (LL) dari tanah. Rentang (range) dari variasi harga cv untuk suatu batas cair tanah tertentu adalah agak lebar.

Untuk konsolidasi 90%, T90 = 0,848. Jadi

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H^2 dr}$$

Rumus tambahan untuk menentukan Cv terhadap tanah berlapis-lapis dengan ketebalan yang berbeda, waktu penurunan dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$C_{v\ gabungan} = \frac{(H1+H2+H3+_+Hn)^2}{(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}}+\frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}}+\cdots+\frac{Hn}{\sqrt{Cvn}})^2}$$

(Sumber : Das, B. M. 2007)

2.4 *Prefabricated Vertical drain* (PVD)

Metode *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) merupakan teknik perbaikan tanah yang dilakukan dengan memberikan beban awal (*preloading*) pada tanah dasar sesuai dengan rencana beban kerja maupun beban konstruksi. Beban ini dipertahankan hingga tanah dasar mencapai tingkat konsolidasi yang ditargetkan. Setelah konsolidasi yang diinginkan tercapai, beban preload dapat dilepas dan pembangunan struktur utama dapat dimulai..

Dalam penerapannya pada tanah lempung lunak, sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu preload, PVD, drainase horizontal, serta instrumen Beban preload berfungsi memampatkan tanah dasar, sementara PVD mempercepat keluarnya air pori sehingga proses konsolidasi berlangsung lebih cepat. Selanjutnya, drainase horizontal menyalurkan air dari PVD ke arah luar timbunan preload. Instrumen geoteknik dipasang untuk memantau proses perbaikan tanah sekaligus menilai efektivitas metode yang digunakan.

BAB III.METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Analisa Pengelolaan Data

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:

1. 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 pembebanan. Nilai Cv juga diperoleh melalui uji laboratorium atau dapat ditaksir menggunakan pendekatan korelasi berdasarkan jenis tanah dan tingkat kepadatannya.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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,

8. Penambahan Timbunan Sementara (Preloading)

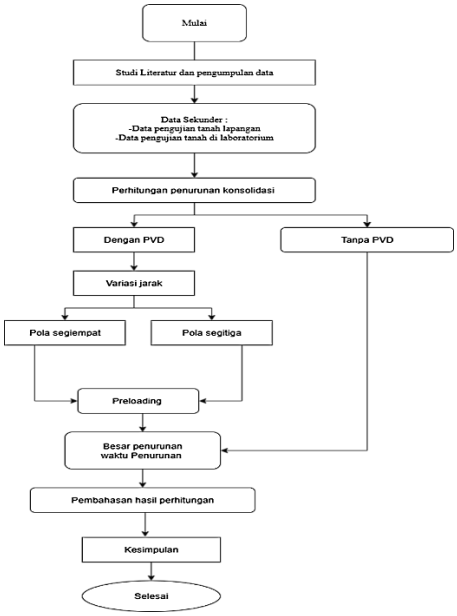
Preloading adalah metode dengan menambahkan beban timbunan sementara di atas area yang diperbaiki, dengan tujuan untuk mempercepat proses konsolidasi.

9. 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*.

3.2 Bagan Alir

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. 3.1 Bagan alir atau flow chart.

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 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 ±1,5 m dari permukaan tanah.

4.1.1 Stratigrafi Tanah

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

Tabel 4.1 Jenis tanah dan keterangannya

Kedalaman (m)	Jenis tanah	Keterangan
0 – 4	Lempung berlanau abu abu	*Very soft*
4 – 16	Pasir berlanau abu abu	*Very loose* s/d *dense*
16 - 30	Lanau berpasir berlempung abu abu	*Medium* s/d *dense*

(Sumber: Data Uji laboratorium tanah)

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.

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

Persamaan	Acuan	Daerah Pemakaian
$C_c = 0.007\ (LL - 7)$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (*remolded*)
$C_c = 0.01\ W_n$		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
$C_c = 0.0115\ W_n$		Tanah organic, gambut, lanau organic, dan lempung
$C_c = 0.0046\ (LL - 9)$		Lempung Brazilia
$C_c = 0.75\ (e_0 - 0.5)$		Tanah dengan plastisida rendah
$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$		Lempung Chicago
$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$		Semua lempung

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

Cc = 0.156 x e0 + 0.0107

Cc = 0.156 x 1.047 + 0.0107

Cc = 0,174

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

Cc = 0.156 x e0 + 0.0107

Cc = 0.156 x 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

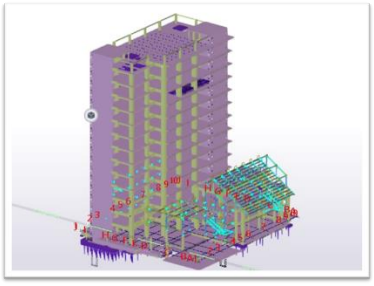
$$C_v = \frac{k}{m_v.\gamma_w} = \frac{1\ x\ 10^{-5}}{1{,}5\ x\ 10^{-3}.9{,}81} = \frac{1\ x\ 10^{-5}}{0{,}0147}$$
$$= 0{,}00068\ m^2/s$$

Menghitung koefisien konsolidasi vertical (C_v) pada kedalaman 10 m

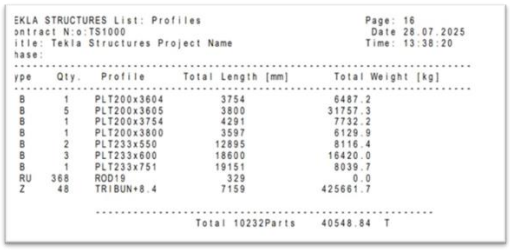
$$C_v = \frac{k}{m_v.\gamma_w} = \frac{1\ x\ 10^{-5}}{9{,}5\ x\ 10^{-4}.9{,}81} = \frac{1\ x\ 10^{-5}}{0{,}00932}$$
$$= 0{,}00107\ m^2/s$$

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

4.3 Beban Rencana Bangunan



Gambar 4.1 Pemodelan Rencana Bangunan di aplikasi Tecla

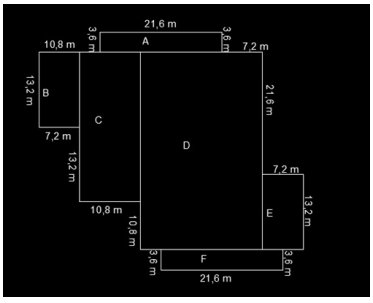


EKLA STRUCTURES List: Profiles — Page: 16
ontract N:o:TS1000 — Date 28.07.2025
itle: Tekla Structures Project Name — Time: 13:38:20
hase:

ype	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 4.2 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 4.3 Rencana Luas area rencana bangunan

Total luas rencana bangunan = 1381,84 m^2

Maka beban yang bekerja pada permukaan tanah sebesar:

Beban rencana bangunan $= \frac{40548{,}84}{1381{,}84}$

$= 29{,}35$ t/m^2

Jadi beban rencana bangunan yang digunakan untuk perhitungan penurunan tanah sebesar 29,35 t/m^2

4.4 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.

Kedalaman (m)	qo (t/m^2)	i	(ΔP) (t/m^2)
1	29,35	0,4980	14,6166
2	29,35	0,4922	14,44557
3	29,35	0,4829	14,1736
4	29,35	0,4708	13,81777
5	29,35	0,4565	13,39782
6	29,35	0,4407	12,93359
7	29,35	0,4240	12,44315
8	29,35	0,4069	11,94165
9	29,35	0,3898	11,44105
10	29,35	0,3731	10,95019

Tabel 4.1 distribusi tegangan

4.5 Menghitung tekanan Overbuden (Po')

Kedalaman (m)	Po' (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	8,00
9	8,738
10	9,475

Tabel 4.2 Tekanan Overbuden

4.6 Menghitung Tegangan Efektif Akhir (Po'+ΔP)

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

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

Dengan:

P_0 = Tegangan efektif awal (t/m^2)

ΔP = Perubahan Tegangan Akibat Beban (t/m^2)

Tegangan efektif akhir (P') lapis 1

$P' = P_O + \Delta P$ = 1,857 + 14,6163

= 16,4733 t/m^2

Kedalaman (m)	P_o (t/m^2)	ΔP (t/m^2)	$P' = P_o + \Delta P$ (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	13,81777	18,7468
5	5,786	13,39782	19,1838
6	6,524	12,93359	19,4576
7	7,262	12,44315	19,7052
8	8,00	11,94165	19,9417
9	8,738	11,44105	20,1791
10	9,475	10,95019	20,4252

Tabel 4.3 tegangan efektif akhir

4.7 Perhitungan Penurunan Tanah dan Waktu konsolidasi Tanpa Penggunaan PVD

Penurunan tanah (Konsolidasi primer)

Data perhitungan

Indeks Pemampatan ($Cc_{1\text{-}5m}$) = 0,174

Indeks Pemampatan ($Cc_{6\text{-}10m}$) = 0,184

Angka pori ($e0_{1\text{-}5m}$) = 1,047

Angka pori ($e0_{1\text{-}5m}$) = 1,114

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

Konsolidasi Primer (Sc)

$= \left[\frac{Cc}{1+e0}\ Hi\ Log\ \left(\frac{\Delta P+po}{po}\right)\right]$

$= \left[\frac{0,174}{1+1,047}\ Hi\ Log\ \left(\frac{14,6166+1,857}{1,857}\right)\right]$

= 0,08058 m

Kedalaman (m)	Hi (m)	Cc	eo	P_o (t/m^2)	(ΔP) (t/m^2)	Sc (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	13,81777	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	8,00	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	0,029035
Total						0,466636

Tabel 4.4 Penurunan tanah tanpa menggunakan PVD (Sc)

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

Waktu Penurunan

Diketahui data tanah dasar sebagai berikut:

Koefisien konsolidasi lapisan 1 (Cv 1)

=0,00068 m^2/s

Koefisien konsolidasi lapisan 1 (Cv 2)

=0,00107 m^2/s

Tebal lapisan 1 (H1) =5 m = 500 cm

Tebal Lapisan 2 (H2) =5 m =500 cm

Koefisien konsolidasi lapisan Gab

$$=\frac{(H1+H2)^2}{(\frac{H1}{\sqrt{CV1}}+\frac{H2}{\sqrt{CV2}})2}$$

$$=\frac{(500+500)^2}{(\frac{500}{\sqrt{0,00068cm^2/det}}+\frac{500}{\sqrt{0,00107\ cm^2/det}})2}$$

=0,000842132 cm^2 /det

=0,05092 m^2 /minggu

Waktu (t) = 1minggu = 604800 detik

Tebal tanah yang mampat (Hdr)

= 10 m = 1000 cm

Faktor waktu (Tv) $=\frac{t\ x\ Cv}{Hdr^2}$

$=\frac{1\ x\ 0,05092}{(10)^2}$

=0,0005092

Untuk nilai U antara 0 – 60 %:

Derajat Konsolidasi (Uv) $=\left(2\sqrt{\frac{Tv}{\pi}}\right)x100\%$

$=\left(2\sqrt{\frac{0,0005092}{3,14}}\right)x100\%$

= 0,025 = 2,5 %

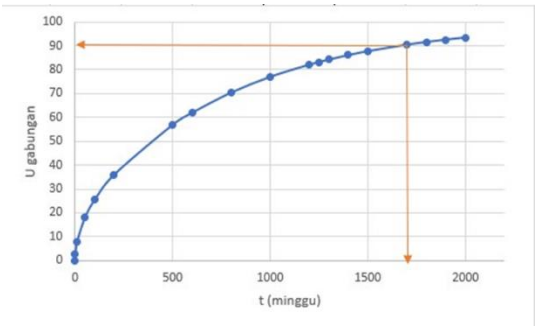
Untuk nilai U > 60 %:

Derajat Konsolidasi (Uv) = (100 -10^a) %

$=\left(100-10^{\frac{1,78-0,31032}{0,933}}\right)\% = 62\ \%$

Tabel 4.5 Perhitungan Derajat Konsolidasi (Uv) Tanpa PVD

t (minggu)	Cv (m^2/minggu)	Tv	Uv
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
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	1.0184	0.934492



Grafik 4.1 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 (Uv)= 90% adalah 1700 minggu atau 32,61 tahun. Jadi, penurunan Sc =90 % x 0,4666 m = 0,41994 m.

4.8 PVD Dengan Pola Segitiga Dan Variasi Jarak Yang Berbeda

Mencari nilai daerah ekuivalen drainase vertical berbentuk pola segitiga yaitu:

Daerah ekuivalen (D) = 1,05 X S

Jarak (s) = 1 m (Jarak PVD)

Daerah ekuivalen (D) = 1,05 x S

= 1,05 x 1

=1,05

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

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

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

= 51,5 mm = 0,0515 m

Perhitungan nilai factor tahanan akibat jarak antara PVD

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

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

= 2,265

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

4.9 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

= 1,13 x 1

=1,13

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

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

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

= 51,5 mm = 0,0515 m

Perhitungan nilai factor tahanan akibat jarak antara PVD

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

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

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

4.10 Rekapitulasi Perhitungan PVD Menggunakan Pola Segitiga Dan Persegi

Pola Pemasangan Segitiga				
Jarak PVD	Pembebanan	T(minggu)	Sct (m)	U
1m	Sebelum *Preloading*	7	0.422	90.5
	Preloading 1	1	0.139	29.8
	Total Penurunan	8	0.561	>0,4194
1,2 m	Sebelum *Preloading*	11	0.424	90.8
	Preloading 1	1	0.098	21.1
	Total Penurunan	12	0.522	>0,4194
1,3 m	Sebelum *Preloading*	13	0.421	90.4
	Preloading 1	2	0.149	31.9
	Total Penurunan	15	0.57	>0,4194
1,4 m	Sebelum *Preloading*	15	0.418	89.7
	Preloading 1	2	0.14	30.1
	Total Penurunan	17	0.558	>0,4194
1,5 m	Sebelum *Preloading*	18	0.421	90.3
	Preloading 1	2	0.115	24.8
	Total Penurunan	20	0.536	>0,4194
1,6 m	Sebelum *Preloading*	21	0.421	90.3
	Preloading 1	3	0.142	30.5
	Total Penurunan	24	0.563	>0,4194

Tabel 4.6 hasil perhitungan penggunaan PVD Pola Segitiga dengan variasi jarak

Pola Pemasangan Persegi				
1,0 m	Sebelum *Preloading*	8	0.418	89.5
	Preloading 1	1	0.119	25.6
	Total Penurunan	9	0.537	>0,4194
1,2 m	Sebelum *Preloading*	13	0.423	90.7
	Preloading 1	1	0.085	18.4
	Total Penurunan	14	0.508	>0,4194
1,3 m	Sebelum *Preloading*	15	0.419	89.8
	Preloading 1	2	0.13	28
	Total Penurunan	17	0.549	>0,4194
1,4 m	Sebelum *Preloading*	18	0.42	90
	Preloading 1	2	0.114	24.6
	Total Penurunan	20	0.534	>0,4194
1,5 m	Sebelum *Preloading*	21	0.419	89.9
	Preloading 1	2	0.101	21.7
	Total Penurunan	23	0.52	>0,4194
1,6 m	Sebelum *Preloading*	24	0.418	89.6
	Preloading 1	3	0.14	30.1
	Total Penurunan	27	0.558	>0,4194

Tabel 4.7 hasil perhitungan penggunaan PVD Pola Segitiga dengan variasi jarak

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 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* (PVD) dan timbunan berlangsung sangat lambat. Dari hasil perhitungan, untuk mencapai derajat konsolidasi sekitar 90% dengan besar penurunan tanah (Sc) sebesar ±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 ≈ 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.

5.2 Saran

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 Segitiga Lebih Baik Dibandingkan Pola Persegi

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. Pemilihan Jarak PVD Perlu Disesuaikan

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. Studi Lanjutan dan Pengamatan Lapangan Diperlukan

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.

DAFTAR PUSTAKA

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.