

## ANALISIS PENURUNAN KONSOLIDASI DEPO KONTAINER DAN PENERAPAN *PRE-LOADING* DENGAN *PREFABRICATED VERTICAL DRAIN*

Heri Khoeri<sup>1\*,2</sup>, Badaruddin<sup>2</sup>, Wisnu Isvara<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

<sup>2</sup>PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id>

<sup>3</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

<sup>1\*</sup>[heri.khoeri@umj.ac.id](mailto:heri.khoeri@umj.ac.id)

**Abstrak:** Rencana pembuatan depo kontainer pada area urugan di Kawasan Belikat Nusantara Cakung dengan kondisi tanah lunak, potensi terjadinya penurunan konsolidasi merupakan masalah geoteknik umum yang harus dihadapi. Penyiapan lahan secara konvensional tentunya akan memerlukan waktu yang relatif lama. Untuk area yang luas dengan rencana beban 5 tumpuk kontainer atau sekitar 5 ton/m<sup>2</sup>, aplikasi pre-loading dinilai merupakan pilihan yang paling tepat. Studi ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengurangan waktu konstruksi aplikasi *pre-loading* dengan menggunakan *prefabricated vertical drain (PVD)* dibandingkan pre-loading tanpa PVD. Dengan menggunakan analisis konsolidasi 1D dengan bantuan software MIDAS Soil work, diketahui bahwa pengaplikasian PVD dapat mempercepat waktu untuk mencapai 95% derajat konsolidasi dari 700 hari menjadi hanya 90 hari.

Kata kunci: konsolidasi, penurunan, pre-loading, prefabricated vertical drain.

**Abstract:** The plan to establish a container depot on fill areas in the Belikat Nusantara Cakung Region with soft soil conditions poses a common geotechnical challenge of potential consolidation settlement. Conventional site preparation would undoubtedly require a relatively long time. For large areas with a planned load of 5 stacked containers or approximately 5 tons/m<sup>2</sup>, pre-loading application is considered the most appropriate choice. This study was conducted to determine the extent of construction time reduction with pre-loading application using prefabricated vertical drains (PVD) compared to pre-loading without PVD. By employing 1D consolidation analysis with the assistance of MIDAS Soil work software, it was found that the application of PVD could accelerate the time to achieve 95% consolidation degree from 700 days to just 90 days.

Keywords: consolidation, settlement, pre-loading, prefabricated vertical drain.

### I. PENDAHULUAN

Penurunan konsolidasi merupakan masalah geoteknik umum yang biasanya ditemukan di daerah dengan tanah lunak, hal ini disebabkan oleh pengurangan tekanan air pori yang diinduksi oleh peningkatan tekanan dalam massa tanah [1]. Salah satu metode untuk mengatasi masalah pada tanah lunak ini adalah dengan pemberian pembebanan awal (*preloading*) hingga proses konsolidasi yang diinginkan tercapai, yaitu tercapainya penurunan primer (*primary settlement*). Untuk mempercepat proses itu digunakan *Prefabricated vertical drain (PVD)*.

*Prefabricated vertical drain* adalah sistem drainase buatan yang diletakkan secara vertikal pada lapisan tanah lunak. Pada umumnya PVD adalah bahan sintesis cetakan untuk drainase. Bahan tersebut terdiri atas dua komponen, yaitu serat penyaring geotekstil (*geotextile filter fabric*) untuk membuat aliran air masuk dengan mudah ke dalam pori-pori tanah, kemudian plastik inti drainase (*plastic drain core*) yang berfungsi sebagai media pengumpul dan penyalur air. Pada umumnya PVD terbuat dari bahan yang memiliki ketahanan dari bahan-bahan penyusun tanah agar tetap stabil atau normal, seperti polypropylene, polystyrene, dan polyester.

Banyak penelitian menunjukkan bahwa penggunaan PVD dapat mempercepat penurunan primer pada kasus di tanah lunak diantaranya pada konstruksi jalan tol [2], [3], landasan pacu [1], [4], pembangunan perumahan [5], *Behandle Area* Pelabuhan [6], rel ganda kereta api [7] dan lainnya.

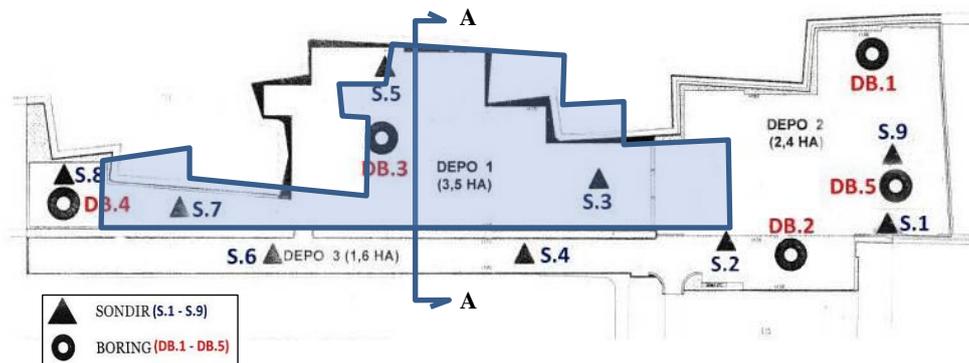
Verikalitas PVD penting untuk diperhatikan pada saat instalasi, dimana berdasarkan hasil percobaan PVD yang terpasang sempurna lebih efektif dibandingkan dengan yang memiliki kemiringan  $4^{\circ}45'$  [8]. Pada kasus perbaikan tanah dengan PVD dan preloading, ditemukan bahwa nilai  $k$  aktual sekitar separuh dari nilai  $k$  hasil uji laboratorium, dimana deviasi rata-rata Kuadrat menunjukkan bahwa penurunan tanah yang diprediksi oleh analisis numerik sekitar 30% dari penyelesaian aktual [9].

Proyek perluasan Depo Kontainer Isi Blok F Kawasan Cakung terdiri dari 3 area dengan luasan serta elevasi tanah asli yang berbeda, konstruksi Depo kontainer ini berada diatas tanah lunak dengan ketebalan mencapai 9 m s/d 14 m dengan nilai  $N_{spt}$  2 s/d 4. Depo 1 memiliki luasan 3.44 Ha dengan elevasi tanah asli rerata +3.25 m, sementara desain elevasi final +4.25 m sehingga dibutuhkan tambahan timbunan 1 m. Secara histori, area Depo 1 ini telah dilakukan pekerjaan penimbunan 3 tahun sebelumnya dengan ketebalan timbunan rerata mencapai 3 m. Diketahui penurunan tanah pada Depo 1 sejak mulai ditimbun 3 tahun sebelumnya mencapai 25 cm s/d 30 cm. Tidak terdapat pekerjaan perbaikan tanah saat pekerjaan penimbunan dilakukan. Beban servis rencana sebesar 5 ton/m<sup>2</sup> dimana ekuivalen dengan merata tumpukan kontainer 5 tingkat. Permasalahan utama konstruksi diatas tanah lempung lunak dengan elevasi muka air tanah cukup rendah adalah penurunan jangka panjang akibat proses konsolidasi, yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada struktur [10].

Tujuan analisis geoteknik dalam penelitian ini adalah memperkirakan penurunan konsolidasi yang akan terjadi pada Depo-1 berdasarkan beban rencana (beban peti kemas 5 t/m<sup>2</sup>) dan beban timbunan hingga mencapai elevasi +4.25 m dan membandingkan antara dengan *pre-loading* tanpa PVD dengan *pre-loading* menggunakan PVD.

## II. METODOLOGI

Penelitian dilakukan di Depo-1 kontainer isi blok F kawasan cakung dengan luas 3,5 Ha seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Denah rencana depo (warna biru muda) dan lokasi titik pengujian tanah

Tahapan penelitian yang dilakukan pada studi ini, meliputi survey pendahuluan, pengumpulan data sekunder, investigasi tanah, interpretasi parameter geoteknik, pemodelan konsolidasi 1D dan analisis konsolidasi 1D.

### Survey Pendahuluan dan Pengumpulan Data Sekunder

Melakukan site visit untuk mengamati secara langsung lokasi tiga area Depo kontainer isi blok F kawasan cakung, dan mengumpulkan sejumlah data sebelumnya yang ada untuk pembangunan area sekitar.

### Penyelidikan tanah

Investigasi Tanah, investigasi yang dilakukan meliputi pengeboran tanah, *standard penetration test (SPT)*, pengambilan contoh tanah tidak terganggu (*UDS*) [11], dan pengujian laboratorium *UDS (index dan engineering properties)* [12], [13] [14], [15], [16], [17], [18].

### Analisis Konsolidasi

Analisis konsolidasi dilakukan untuk mengetahui penurunan tanah sebagai fungsi waktu untuk dua model yang berbeda. Model pertama analisis dengan pengaplikasian *pre-loading* 5 t/m<sup>2</sup> tanpa *PVD*, sementara model kedua dengan *PVD*. Penurunan tanah akibat proses konsolidasi dihitung dengan menggunakan formula yang diusulkan oleh Terzaghi yang dikenal dengan analisis konsolidasi 1 dimensi. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan MIDAS Soil Work [19], [20]. Analisis konsolidasi dengan memperhitungkan tahapan konstruksi seperti disampaikan dalam **Error! Reference source not found.**

Tabel I. Analisis berdasarkan tahapan konstruksi

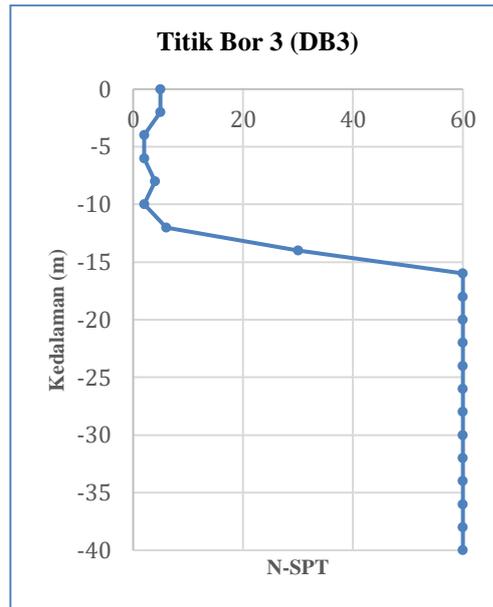
Tahapan Konstruksi	Analisis Penurunan Tanah Akibat Proses Konsolidasi Tanpa PVD	Analisis Penurunan Tanah Akibat Proses Konsolidasi dengan PVD
Tahap 1	Analisa kondisi awal untuk menghitung tegangan awal pada masa tanah serta set to zero displacement yang terjadi sehingga berkesesuaian dengan kondisi asli dilapangan.	Analisa kondisi awal untuk menghitung tegangan awal pada masa tanah serta set to zero displacement yang terjadi sehingga berkesesuaian dengan kondisi asli dilapangan.
Tahap 2	Memulai penimbunan layer 1 dengan ketebalan 3 m	Memulai penimbunan layer 1 dengan ketebalan 3 m
Tahap 3	Dibiarkan berkonsolidasi selama 3 tahun	Dibiarkan berkonsolidasi selama 3 tahun
Tahap 4	Melakukan penimbunan layer ke 2 dengan ketebalan 1 m	Memasang Vertical Drain dengan jarak 1.8 quadri lateral patern dan melakukan penimbunan layer ke 2 dengan ketebalan 1 m
Tahap 5	Dibiarkan berkonsolidasi selama 90 hari	Dibiarkan berkonsolidasi hingga mencapai 95% derajat konsolidasi
Tahap 6	Memberikan applied load container 5 t/m <sup>2</sup> berupa pre-loading 2 m tanah	Memberikan applied load container 5 t/m <sup>2</sup> berupa pre-loading 2 m tanah
Tahap 7	Dibiarkan terjadi konsolidasi selama 3 tahun	Dibiarkan terjadi konsolidasi hingga mencapai 95% derajat konsolidasi.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Penyelidikan Tanah

Secara umum, 9 titik sondir ringan yang dilakukan juga menunjukkan *refusal* yang cukup seragam pada kedalaman sekitar 13-15 m, dimana refusal ini sesuai dengan hasil pemboran dan profil  $N_{SPT}$  yang menunjukkan bahwa pada kedalaman ini lapisan tanah berupa pasir-lanauan padat dengan  $N_{SPT} \approx 30$  yang tidak dapat ditembus oleh uji sondir ringan.

Nilai  $N_{SPT}$  dan jenis tanah hingga akhir pengeboran pada kedalaman 40 m, serta simplifikasi stratifikasi dan parameter-parameter tanah yang digunakan dalam desain dan analisis ditunjukkan dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Profil N-SPT DB-3

Dari pengamatan muka air tanah saat pekerjaan bor berlangsung, muka air tanah berada pada kedalaman 5.5 ~ 12 m dengan rata-rata 8 m. Untuk desain muka air tanah diambil pada kedalaman -3.0m dibawah muka tanah asli.

#### Pemodelan konsolidasi 1D

Parameter tanah yang digunakan untuk analisa numerik adalah data DB2 dan DB 3.

##### ▪ Data tanah lempung (clay)

Berat satuan volum (kering)	= 12 kN/m <sup>3</sup>
Berat satuan volume (basah)	= 18 kN/m <sup>3</sup>
Kohesi (cu)	= 8 kN/m <sup>2</sup>
Sudut geser dalam	= 2
Koefisien permeabilitas hor (kx)	= 0.006 m/hari
Koefisien permeabilitas ver (kz)	= 0.006 m/hari
Kondisi drainase	= Drainase tunggal
Nilai N spt	= 2
Indeks kompresi (cc)	= 0.74
Indeks ekspansi (cs)	= 0.1
OCR	= 1.8
Koefisien kons. Sekueder (c <sub>α</sub> )	= 0.007
Angka pori (e <sub>0</sub> )	= 1.2

##### ▪ Data Tanah untuk lapisan pasir

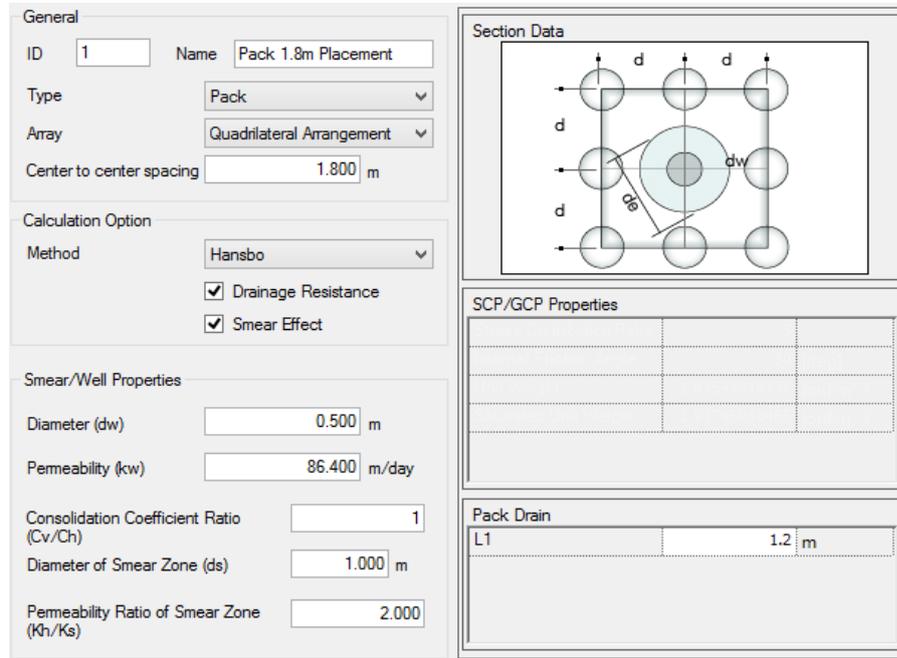
Berat satuan volum (kering)	= 19 kN/m <sup>3</sup>
Berat satuan volume (basah)	= 19 kN/m <sup>3</sup>
Kohesi (cu)	= 15 kN/m <sup>2</sup>
Sudut geser dalam	= 25
Metode perhitungan	= Debeer

##### ▪ Data Tanah Timbunan

Berat satuan volum (kering)	= 19 kN/m <sup>3</sup>
Berat satuan volume (basah)	= 20 kN/m <sup>3</sup>
Kohesi (cu)	= 4 kN/m <sup>2</sup>
Sudut geser dalam	= 30

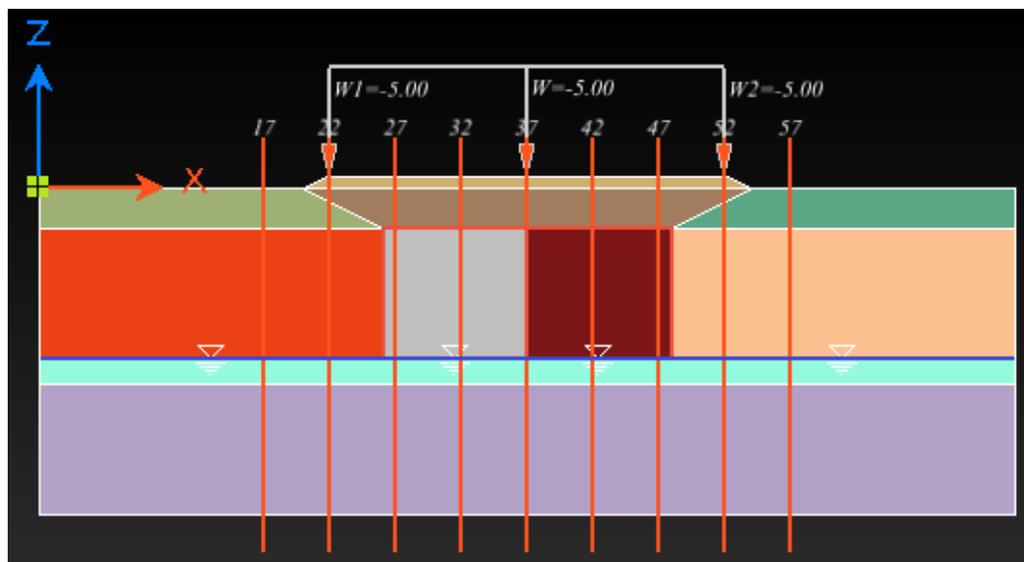
▪ Data Prevafricated Vertical Drain (PVD)

- Layout = Quadrilateral arrangement
- Jarak pusat ke pusat = 1.8 m
- Metode perhitungan = Hansbo
- Diameter = 0.5 m
- Koefisien permeability = 86.4 m/hari
- Rasio koefisien konsolidasi (cv/vh) = 1
- Diameter smear zone = 1 m
- Permeability rasio smear zone (kh/ks) = 2



Gambar 3. Pemodelan PVD

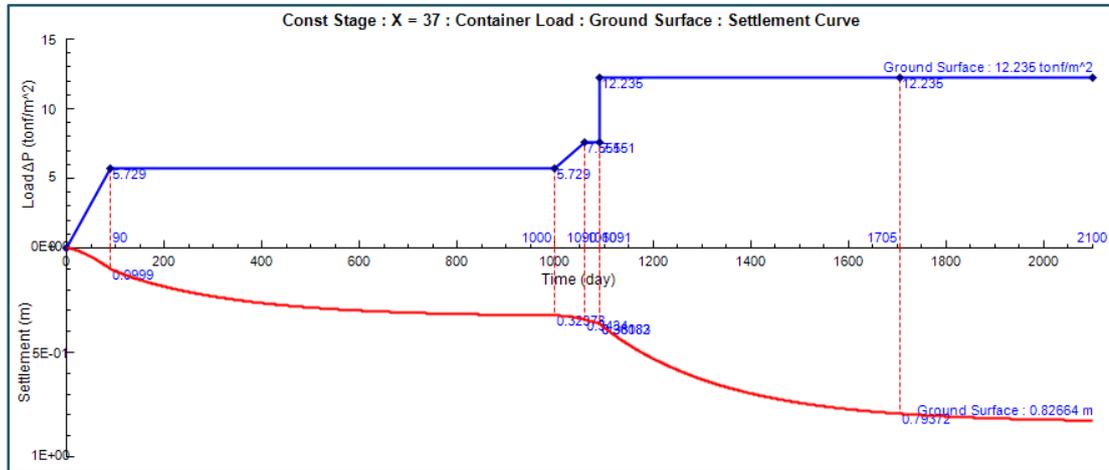
Pemodelan PVD dalam Midas Soil seperti diberikan pada Gambar 3. Sementara geometri tanah asli menggunakan potongan melintang A (Gambar 1), dengan pemodelan dalam Midas Soil seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Geometri model analisis konsolidasi 1D Depo-1

**Hasil analisa konsolidasi 1d kondisi penimbunan tanpa PVD**

Hasil analisis konsolidasi pada  $x=37$  m yaitu pada posisi tengah timbunan area depo (Lihat Gambar 4) dengan tanpa PVD digambarkan dalam Gambar 5 dan dijabarkan dalam Tabel II.

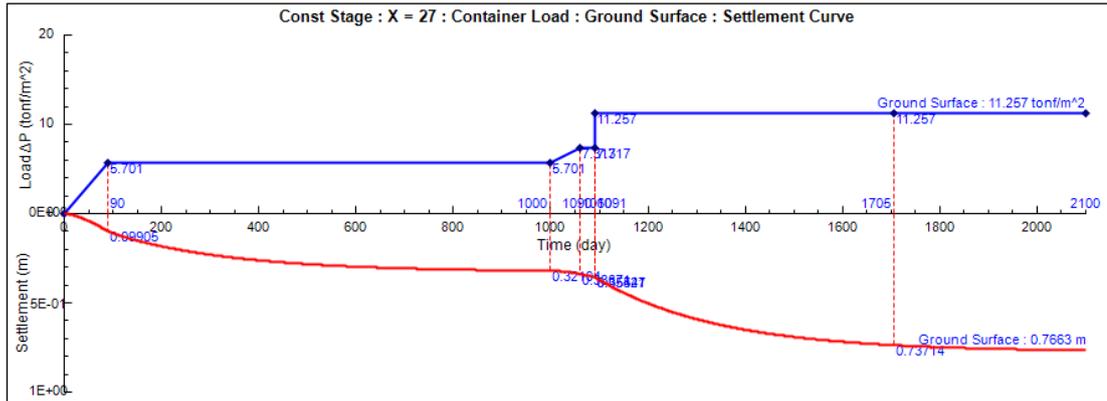


Gambar 5. Kurva beban dan penurunan tanah pada  $x=37$  m (tanpa PVD)

Tabel II. Hasil perhitungan pada  $x=37$  m (Tanpa PVD)

Construction Stage	Time (day)	Total Settlement (m)	Total Degree of Consolidation (%)	Total Residual Settlement (m)
Settlement Completed	0	0.835406	100	0
Before Embankment	0	0	0	0
Fill 1 Settlement Complete	90	0.099898	11.96	0.735508
Fill 1 Embankment Loadin	1000	0.32378	38.76	0.511626
Fill 2 Settlement Complete	1060	0.343402	41.11	0.492004
Fill 2 Embankment Loadin	1090	0.360831	43.19	0.474574
Container Load Settlement	1091	0.361815	43.31	0.473591
Container Load Embankme	1705	0.793724	95.01	0.041682
Calculation Completed	2100	0.826645	98.95	0.008761

Koordinat  $x=37$  m berada tepat pada tengah badan timbunan. Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka diketahui total penurunan akibat proses konsolidasi adalah 0.835 m atau 83.5 cm dan waktu konsolidasi yang dibutuhkan sehingga mencapai 95% derajat konsolidasi adalah 1705 hari atau 705 hari dari selesainya pekerjaan timbunan level akhir. Sementara sisa penurunan adalah 4.16 cm. Sementara hasil analisis konsolidasi pada  $x=27$  m yaitu pada posisi tengah timbunan area depo (Lihat Gambar 4) tanpa PVD digambarkan dalam Gambar 6 dan dijabarkan dalam Tabel III.



Gambar 6 Kurva beban dan penurunan tanah pada x=27 m (tanpa PVD)

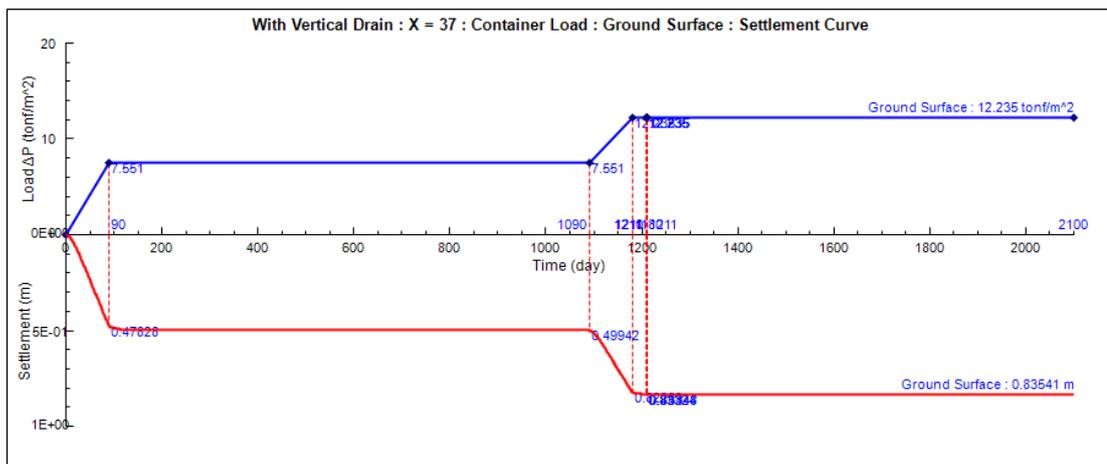
Tabel III. Hasil perhitungan pada x=27 m (tanpa PVD)

Construction Stage	Time (day)	Total Settlement (m)	Total Degree of Consolidation (%)	Total Residual Settlement (m)
Settlement Completed	0	0.774068	100	0
Before Embankment	0	0	0	0
Fill 1 Settlement Complete	90	0.099053	12.8	0.675015
Fill 1 Embankment Loadin	1000	0.321041	41.47	0.453027
Fill 2 Settlement Complete	1060	0.338711	43.76	0.435357
Fill 2 Embankment Loadin	1090	0.354407	45.79	0.419661
Container Load Settlement	1091	0.355267	45.9	0.418801
Container Load Embankme	1705	0.737135	95.23	0.036932
Calculation Completed	2100	0.766305	99	0.007763

Koordinat x=27 m berada tepat pada tepih badan timbunan. Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka diketahui total penurunan akibat proses konsolidasi adalah 0.774 m atau 77.4 cm dan waktu konsolidasi yang dibutuhkan sehingga mencapai 95% derajat konsolidasi adalah 1705 hari atau masih sekitar 705 hari berakhirnya pekerjaan penimbunan level akhir. Sementara sisa penurunan adalah 3.6 cm.

**Hasil analisa konsolidasi 1d kondisi penimbunan dengan PVD**

Hasil analisis konsolidasi pada x=37 m yaitu pada posisi tengah timbunan area depo (Lihat Gambar 4) dengan tanpa PVD digambarkan dalam Gambar 7 dan dijabarkan dalam Tabel IV.



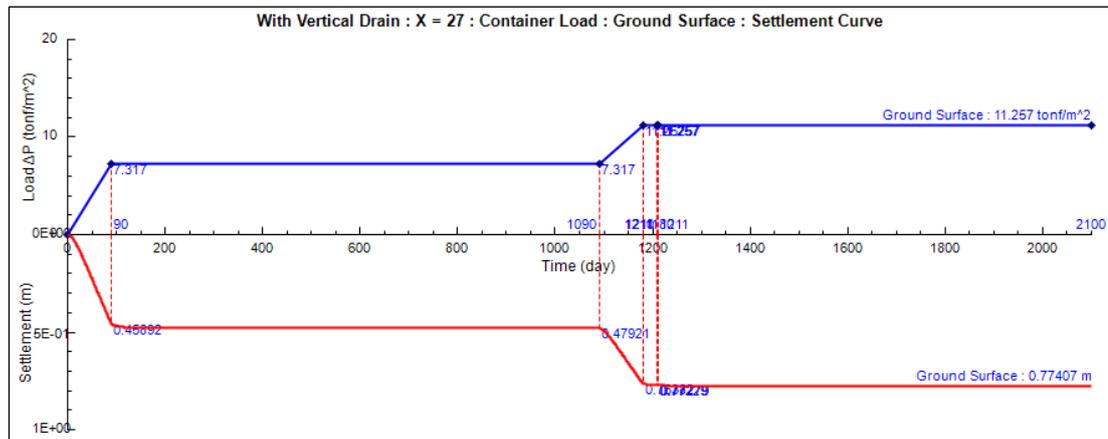
Gambar 7 Kurva beban dan penurunan tanah pada x=37 m (dengan PVD)

Tabel IV. Hasil perhitungan pada x=37 m (dengan PVD)

Construction Stage	Time (day)	Total Settlement (m)	Total Degree of Consolidation (%)	Total Residual Settlement (m)
Settlement Completed	0	0.835406	100	0
Before Embankment	0	0	0	0
Fill 1 Settlement Complete	90	0.478277	57.25	0.357129
Fill 1 Embankment Loadin	1090	0.499423	59.78	0.335983
Fill 2 Settlement Complete	1180	0.822894	98.5	0.012512
Fill 2 Embankment Loadin	1210	0.833239	99.74	0.002167
Container Load Settlement	1211	0.83348	99.77	0.001925
Container Load Embankme	1211	0.83348	99.77	0.001925
Calculation Completed	2100	0.835406	100	0

Koordinat x=37 m berada tepat pada tepih badan timbunan. Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka diketahui total penurunan akibat proses konsolidasi adalah 0.835 m atau 83.5 cm dan waktu konsolidasi yang dibutuhkan sehingga mencapai 95% derajat konsolidasi adalah 1211 hari atau masih sekitar 11 hari (kurang dari satu bulan) berakhirnya pekerjaan penimbunan level akhir. Sementara sisa penurunan adalah 0.1 cm.

Sementara hasil analisis konsolidasi pada x=27 m yaitu pada posisi tengah timbunan area depo (Lihat Gambar 4) tanpa PVD digambarkan dalam Gambar 8 dan dijabarkan dalam Tabel V.



Gambar 8 Kurva beban dan penurunan tanah pada x=27 m (dengan PVD)

Tabel V. Hasil perhitungan pada x=27 m (dengan PVD)

Construction Stage	Time (day)	Total Settlement (m)	Total Degree of Consolidation (%)	Total Residual Settlement (m)
Settlement Completed	0	0.774068	100	0
Before Embankment	0	0	0	0
Fill 1 Settlement Complete	90	0.458923	59.29	0.315144
Fill 1 Embankment Loadin	1090	0.479214	61.91	0.294854
Fill 2 Settlement Complete	1180	0.76382	98.68	0.010248
Fill 2 Embankment Loadin	1210	0.772289	99.77	0.001779
Container Load Settlement	1211	0.772789	99.83	0.001279
Container Load Embankme	1211	0.772789	99.83	0.001279
Calculation Completed	2100	0.774068	100	0

Koordinat  $x=27$  m berada tepat pada tepih badan timbunan. Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka diketahui total penurunan akibat proses konsolidasi adalah 0.774 m atau 77.45 cm dan waktu konsolidasi yang dibutuhkan sehingga mencapai 95% derajat konsolidasi adalah 1211 hari atau masih sekitar 11 hari (kurang dari satu bulan) berakhirnya pekerjaan penimbunan level akhir. Sementara sisa penurunan adalah 0.12 cm.

#### IV. KESIMPULAN

Penurunan konsolidasi maksimum pada Depo 1 adalah 82.3 cm dan dibutuhkan waktu 1700 hari untuk mencapai 95 derajat konsolidasi. Berdasarkan histori bahwa penimbunan pada depo 1 ini sudah dilakukan sejak 3 tahun sebelumnya dan telah terjadi penurunan rerata sebesar 30 cm. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan dimana penurunan setelah 3 tahun beroperasi adalah 32 cm sehingga sisa penurunan dari Depo 1 hingga mencapai 95% derajat konsolidasi adalah 50.3 cm dan sisa waktu konsolidasi primer adalah 700 hari. Dengan pemasangan *PVD quadrilateral* dengan jarak pusat ke pusat adalah 1.8 m ditambah dengan pre-loading dapat mempercepat penurunan konsolidasi yang akan terjadi menjadi kurang dari 3 bulan. Sehingga saat dioperasikan rerata penurunan menjadi kurang dari 25 mm.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Teknologi Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id> yang telah memberikan dukungan dalam penulisan artikel ini.

#### REFERENSI

- [1] A. Meilani, R. Ahmad, and F. Fikri, "Analysis of settlement prediction due to preloading and vertical drain applications on runway construction," *E3S Web of Conferences*, vol. 156, p. 02002, Mar. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202015602002.
- [2] H. Susiazti, M. Widiastuti, R. Widyati, and R. Widayati, "Analisis Penurunan Konsolidasi Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD)," *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan teknologi sipil*, vol. 4, no. 1, May 2020.
- [3] F. P. Chandra, "Analisis Perbandingan Penurunan Tanah Terhadap Fungsi Waktu Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD)," Brawijaya University, Malang, 2020.
- [4] A. H. Ahsan, G. Yanti, and S. W. Megasari, "Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum Consolidation dengan Variasi Jarak Pemasangan PVD," *Konstruksia*, vol. 13, no. 1, pp. 54–68, 2021.
- [5] H. M. Fadhillah, "Perencanaan Perbaikan Tanah Lunak Pada Pembangunan Cluster D Kawasan Kota Summarecon Bandung Menggunakan Kombinasi Metode Vacuum Consolidation Dengan Prefabricated Vertical Drain," Universitas Brawijaya, Malang, 2018. [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/9073>
- [6] P. V. Purana and R. Iskandar, "Analisis Penurunan Tanah Lunak Menggunakan PVD Memakai Program Plaxis (Studi Kasus Proyek Pembangunan Behandle Area Pelabuhan Kuala Tanjung)," Universitas Sumatera Utara, Medan, 2019. [Online]. Available: <https://repositori.usu.ac.id/handle/123456789/45925>
- [7] A. Prativi, S. Widi Astuti, A. Ependi, T. Bangunan dan Jalur Perkeretaapian, and A. Perkeretaapian Indonesia Madiun, "Aplikasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) untuk Stabilisasi Tanah Dasar pada Proyek Pembangunan Jalur Ganda Kereta Api di Km 437+300 Sampai Km 438+500 Gombong, Kebumen," *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, vol. III, 2019.
- [8] R. B. Reang, S. K. Pal, and S. Paul, "Importance of Verticality of PVD in Consolidation Settlement of Prefabricated Vertical Drain-Improved Soft Soils," 2022, pp. 391–398. doi: 10.1007/978-981-16-1831-4\_36.
- [9] S. A. Saputro, A. Setyo Muntohar, and H. Jiun Liao, "Ground settlement prediction of embankment treated with prefabricated vertical drains in soft soil," *MATEC Web of Conferences*, vol. 195, p. 03014, Aug. 2018, doi: 10.1051/matecconf/201819503014.

- [10] B. Badaruddin and H. Khoeri, “Analisis Numerik Pada Perpindahan Abutment Jembatan Akibat Konstruksi Tanggul: Studi Kasus Pada Jembatan Yang Dimiliki Oleh Perkebunan Kelapa Sawit,” *Konstruksia*, vol. 8, no. 2, 2017.
- [11] BSN, *SNI 4153:2019, Metode uji penetrasi standar (SPT) dan pengambilan contoh tanah dengan tabung belah (ASTM D 1586-11, IDT)*. Indonesia, 2019.
- [12] BSN, *SNI 03-4804-1998, Metode pengujian berat isi dan rongga udara dalam agregat*. Indonesia, 1998.
- [13] ASTM, *ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. 2017.
- [14] BSN, *SNI 3423: 2008, Cara uji analisis ukuran butir tanah*. Indonesia, 2008.
- [15] ASTM, *ASTM D4767-20, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. 2020.
- [16] BSN, *SNI 2813: 2018, Cara Uji Kuat Geser Langsung Tanah Terkonsolidasi dan Terdrainase*. 2018.
- [17] ASTM, *D2573M-18, Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils*. 2018.
- [18] ASTM, *ASTM D2850-23, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. 2023.
- [19] MIDAS, “Introduction to SoilWorks for Practical Design.” MIDAS Information Technology, 2022.
- [20] MIDAS, “SoilWorks Verification Summary.” MIDAS Information Technology, 2023.