

PERBAIKAN TANAH DENGAN MENGGUNAKAN PVD dan TIMBUNAN (*PRELOADING*) di ITS SURABAYA

Eri Andrian Yudianto

Jurusan Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang

ABSTRAK

Kebutuhan bangunan di daerah yang ramai sangatlah menantang, terutama daerah seperti di Surabaya. Dari daerah yang ramai seperti di Surabaya adalah tanah yang lunak adalah karakter jenisnya berupa tanah lempung montmorillonite atau bentonite. Untuk mengatasi kebutuhan itu dibutuhkan Prefabricated Vertical Drain (PVD) guna mempercepat proses konsolidasi tanah. Kebutuhan PSD ini sudah layak digunakan bagi bangunan-bangunan tinggi atau area yang luas.

Kondisi dengan menggunakan PVD berbagai variasi pola (segitiga) dan jarak pemasangan 1,0 m. Metode yang digunakan meliputi analisis data uji lapangan dan laboratorium tanah, perhitungan parameter konsolidasi, serta simulasi waktu konsolidasi berdasarkan konfigurasi PVD yang berbeda. Kesemuanya dikumpulkan dan dihitung dengan akurat dan benar.

Dari hitungan dan beberapa metode, penggunaan beberapa PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi bila dibandingkan dengan tidak menggunakan. Bila menggunakan PVD dapat mempercepat $d = 1,0$ meter $U \approx 90\%$ dalam 7 minggu (pola segitiga), Nilai CV gabungan = $0,05092 \text{ m}^2/\text{minggu}$, Faktor waktu (T_v) = $0,00056$, Derajat Konsolidasi (U_v) = $0,0267\%$, Koefisien Horizontal (C_h) = $0,10184 \text{ m}^2/\text{minggu}$, Faktor waktu (T_h) = $0,0452$, Derajat konsolidasi (U_h) = $27,8\%$.

Kata kunci: tanah lunak, konsolidasi, PVD, preloading, penurunan, pola pemasangan

ABSTRACT

Constructing buildings in densely populated areas—such as Surabaya—presents significant challenges, particularly due to the prevalence of soft soils, specifically montmorillonite or bentonite clays. To address these conditions, Prefabricated Vertical Drains (PVDs) are employed to accelerate the soil consolidation process; this solution is well-suited for high-rise buildings and large-scale developments.

The study evaluated PVD installation using a triangular pattern with a 1.0-meter spacing. The methodology involved analyzing field and laboratory soil test data, calculating consolidation parameters, and simulating consolidation times based on various PVD configurations. All data were compiled and calculations performed with precision.

The results indicate that the use of PVDs significantly accelerates consolidation compared to untreated conditions. Specifically, with a 1.0-meter spacing in a triangular pattern, the system achieved approximately 90% consolidation ($U \approx 90\%$) within 7 weeks. Calculated values included: combined $C_v = 0.05092 \text{ m}^2/\text{week}$, time factor (T_v) = 0.00056 , degree of consolidation (U_v) = 0.0267% , horizontal coefficient (C_h) = $0.10184 \text{ m}^2/\text{week}$, time factor (T_h) = 0.0452 , and degree of consolidation (U_h) = 27.8% .

Keywords: soft soil, consolidation, PVD, preloading, settlement, installation pattern

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagai bangunan bertingkat yang dirancang menunjang berbagai aktivitas akademik dan administratif, ITS Tower 3 menuntut struktur yang stabil dan aman. Tanah lunak sangat tidak ideal untuk langsung menopang beban bangunan, karena berpotensi penurunan (*settlement*) yang signifikan. Proyek ini menggunakan kombinasi preloading dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD)

2.1. Tanah Lunak

Menurut Terzaghi (1967) tanah lempung kohesif diklasifikasikan tanah lunak apabila daya dukung lebih kecil dari $0,5 \text{ kg/cm}^2$ dan nilai Standard Penetration Test lebih kecil dari 4 ($N\text{-value} < 4$). Berdasarkan penelitian lapangan, tanah lunak dapat dengan mudah diremas menggunakan jari tangan. Karakteristik umum tanah lunak mencakup kadar air yang berkisar 80-100%, batas cair antara 80-100%, batas plastis antara 30-45%, dan uji sieve analysis lebih dari 90% butiran akan lolos dari saringan no 200, serta memiliki kuat geser antara 20-40 kN/m².

II. DASAR TEORI

Tabel 2.1. Klasifikasi Tanah Lempung Berdasarkan Kuat Geser Tekan Bebas

Konsistensi Tanah	Identifikasi di Lapangan	q_u (kg/cm^2)	q_u (kPa)	Nilai N SPT
Sangat Lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inci dengan kepala tangan	< 0.25	< 25	0 – 2

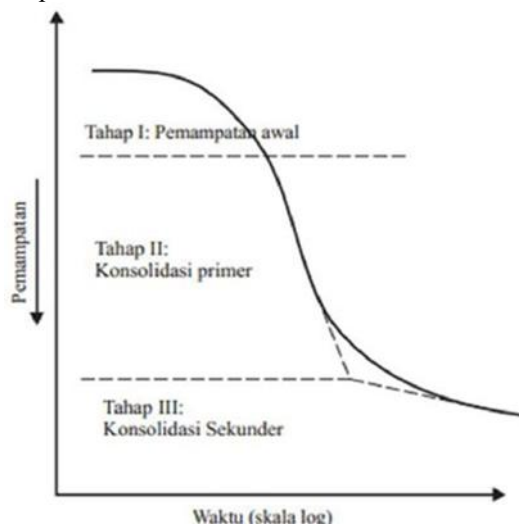
Lunak	Dengan mudah ditembus beberapa inci dengan ibu jari	0.25 – 0.5	25 – 50	2 – 4
Sedang	Dapat ditembus beberapa inci pada kekuatan sedang dengan ibu jari	0.5 – 1.0	50 – 100	4 – 8
Kaku	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari, tapi dengan kekuatan besar	1.0 – 2.0	100 – 200	8 – 15
Sangat Kaku/Keras	Melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari. Dengan kesulitan, melekuk bila ditekan dengan kuku ibu jari	> 2.0 – 4.0	200 – 400	15 – 30
Sangat Kaku	Tidak dapat ditembus, sangat keras	> 4.0	> 400	> 30

2.2. Penurunan Tanah (Settlement)

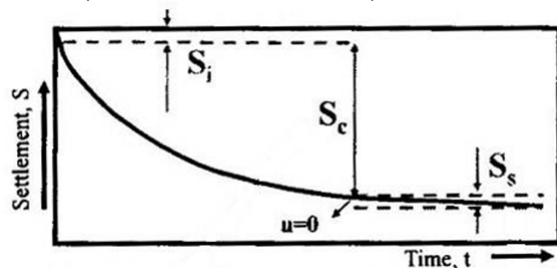
Dari grafik, ada tiga fase berbeda yang dapat terjadi:

- Fase I : pemampatan awal (*initial compression*), disebabkan oleh beban awal (*preloading*)
- Fase II : konsolidasi primer (*primary consolidation*), tekanan air pori secara perlahan menjadi tekanan efektif akibat keluarnya air dari pori tanah
- Fase III : konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), terjadi setelah semua tekanan air pori telah hilang

Tiga komponen yang menyebabkan terjadinya penurunan tanah yaitu: $S_t = S_i + S_c + S_s$. Penurunan sekunder terjadi setelah konsolidasi selesai, tekanan air pori $u = 0$.



Gambar 2.1. Hubungan antara waktu (skala log) dan pemampatan selama konsolidasi akibat penambahan beban. (Sumber : Das, B. M. 2007)



Gambar 2. 2. Grafik Hubungan antara penurunan dengan waktu. Sumber: Gouw, (2010)

2.3. Indeks Pemampatan (*Compression Index Cc*) dan Pengembangan (*Swell Indeks, Cs*)

Terzaghi dan Peck (1967), untuk lempung yang tak terganggu rusak (*undisturbed*) $C_c = 0,009 (LL - 10)$ dan untuk lempung yang terbentuk kembali (*remolded*) $C_c = 0,007 (LL - 10)$, LL = batas cair dalam persen. Indeks pengembangan lebih kecil dari indeks pemampatan umumnya $C_s \approx 1/5 - 1/10 C_c$.

2.4. Koefisien Konsolidasi (c_v)

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

$$90\%, T_{90} = 0,848. \text{ Jadi, } T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H^2 dr} \text{ Atau } c_v = \frac{0,848 H^2 dr}{t_{90}}$$

Rumus tambahan untuk menentukan C_v terhadap tanah berlapis-lapis dengan ketebalan yang berbeda

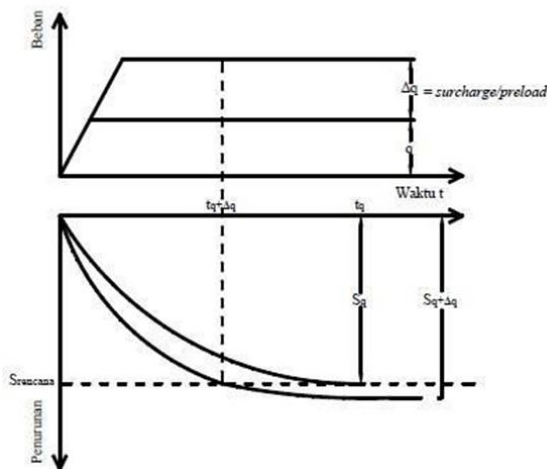
$$C_{v \text{ gabungan}} = \frac{(H_1 + H_2 + H_3 + \dots + H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}} \right)^2}$$

2.5. Perbaikan Tanah Lunak

2.5.1. Perbaikan Tanah dengan Pembebanan Awal (*Preloading*)

Metode pembebanan awal adalah teknik penempatan beban timbunan berdasarkan nilai penurunan tanah, timbunan tidak terbuang dan berfungsi sebagai fondasi untuk suatu bangunan. Preload-ing dapat menurunkan penurunan yang terjadi dan mengurangi penurunan yang tidak merata. Pergerakan air pori hanya berlangsung secara vertikal. Perhitungan durasi

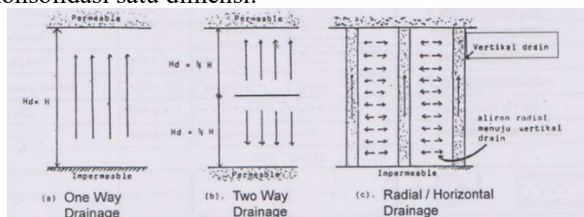
$$\text{waktu konsolidasi di lapangan } t = \frac{T_v H^2 dr}{C_v}$$



Gambar 2.7. Perbandingan waktu dan penurunan tanpa dan dengan surcharge. Sumber : Das, B. M. 2007)

2.5.2. Teori Vertikal Drain

Dengan PVD, proses konsolidasi bisa berlangsung dengan lebih cepat. Teori mendasar konsolidasi radial sekitar drainase vertikal adalah pengembangan dari teori konsolidasi satu dimensi.



Gambar 2.10. Perubahan Jarak Tempuh Air dengan Kehadiran Drain Vertikal Prefabrikasi. Gouw, (2010)

1. Jarak tempuh air, air berkurang dan tekanan air pori berlebih bisa diserap dengan lebih cepat.
2. Nilai koefisien konsolidasi horizontal (C_h) lebih tinggi dibanding koefisien konsolidasi vertikal (C_v). Nilai koefisien konsolidasi (C_c) tinggi mempercepat proses konsolidasi.

2.5.3. Faktor yang mempengaruhi kinerja Prefabricated Vertical Drain

Faktor yang mempengaruhi kinerja *Prefabricated Vertical Drain* antara lain:

- a. Jarak antar *Prefabricated Vertikal Drain* yang dinyatakan dengan Fungsi $F(n)$ Oleh Hansbo (1979) harga $F(n)$ didefinisikan sebagai berikut:

$$F(n) = \frac{n^2}{n-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} ;$$

$$F(n) = \frac{1}{1-\frac{1}{n^2}} \ln(n) - \frac{3-\frac{1}{n^2}}{4} ; \text{Nilai } \frac{1}{n^2} \approx 0 ;$$

$$F(n) = \ln n - \frac{3}{4}$$

- b. Faktor Well Resistance

Factor yang dapat mengurangi kapasitas tampung PVD kurang dengan bertambahnya tekanan lateral. Hal ini karena tertekannya lapisan filter masuk ke dalam saluran inti, kemudian saluran akan tertekan bersama-sama.

$$F_r = \pi z(L-z) \frac{k_h}{q_w}$$

- c. Factor akibat efek smear

Besarnya pengaruh tergantung dari bentuk dan ukuran mandrel, struktur tanah serta prosedur pemasangan. Jamiolkowski et al (1981)

$$d_s = \left(\frac{s_s}{d_e}\right) d_m$$

$$d_s = 2d_m^2$$

$$F_s = \left(\left(\frac{k_h}{k_s} \right) - 1 \right) \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right)$$

(1981)

2.5.4. Faktor Penggunaan Prefabricated Vertical Drain

1. Waktu, Pada tanah ($t=0$) Air pori mengalir ke arah vertikal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi vertikal (C_v), lapisan tanah lunak (H_{dr}). Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari tebal lapisan tanah lunak (H_{dr}) dibagi

$$T_v = \frac{C_v t}{H_{dr}^2}$$

dengan koefisien konsolidasi vertikal.

2. Kecepatan Penurunan, Dilakukan perhitungan penurunan (S_c) sesuai dengan beban yang direncanakan untuk bangunan. Jika penurunan dibiarkan, perbedaan penurunan akan merusak lapisan perkerasan. Dianggap, $\Delta S = \frac{1}{2} S_c$.

3. Daya Dukung Tanah, Kemampuan dukung tanah dasar meningkat seiring dengan kenaikan nilai C_u (kekuatan geser tak tereduksi). Memakan waktu yang relatif singkat (hanya beberapa bulan), dan harga U dapat mendekati 100%.

2.5.5. Waktu Konsolidasi dengan Prefabricated Vertical Drain

Penentuan waktu konsolidasi oleh Hansbo (1979) dalam Mochtar (2012) dapat dibuat dengan persamaan

$$t = \left(\frac{D^2}{8C_h} \right) \cdot (F(s) + F(r) + F(n)) \cdot \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right).$$

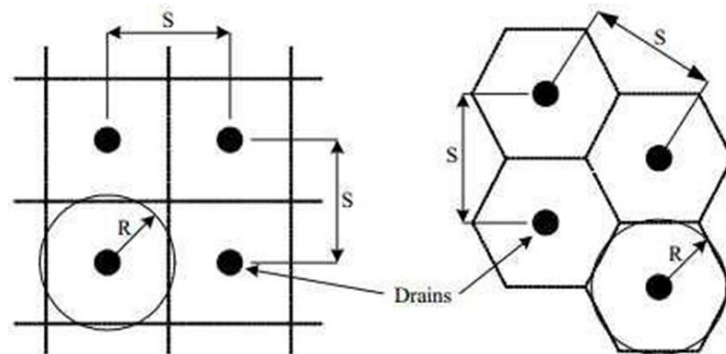
Untuk F_s dianggap sama dengan F_n dikarenakan nilai yang didapat mendekati F_n , sedangkan F_r nilainya dianggap

$$\text{not} t = \left(\frac{D^2}{8C_h} \right) \cdot 2F(n) \cdot \ln \left(\frac{1}{1-U_h} \right)$$

(Sumber: Barron, 1948; Hansbo, 1979)

2.5.6. Menentukan Kedalaman Prefabricated Vertical Drain

Setelah didapat kedalaman PVD, jaraknya dapat ditentukan berdasarkan (Gambar 2.15). Dimana semakin dekat jarak PVD maka semakin cepat pula waktu yg dibutuhkan



Gambar 2.16. Pola *Prefabricated Vertical Drain* (pola persegi, pola segitiga)

Sumber: Jurnal perbaikan tanah lunak untuk konstruksi jalan pada proyek jalan lingkar utara Brebes Tegal (2023)

Pola pemasangan drainase vertikal yang biasa dipakai adalah pola segitiga dan pola persegi. Pola Segiempat:

$$D = 1.13 S \text{ atau } S^2 = \frac{\pi D^2}{4} \text{ atau Pola Segitiga } D = 1.05$$

$$S \text{ atau } 6 \left(\frac{1}{2} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{2} S \right) = \frac{\pi D^2}{4}$$

2.5.7. Parameter Tanah untuk Penentuan Derajat Konsolidasi *Prefabricated Vertikal Drain*

Derajat Konsolidasi Vertikal ditentukan oleh Barron (1948) dalam Bergado (1996) dengan persamaan berikut: Untuk T_v antara 0 s/d 60%

$$U_v = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}} \right) \times 100\% \text{ , Untuk } T_v > 60\%$$

$$U_v = (100 - 10^\alpha)\% \text{ , Dimana: } \alpha = \frac{1.781 - T_v}{0.933}$$

(Sumber : Das, B. M. 2007).

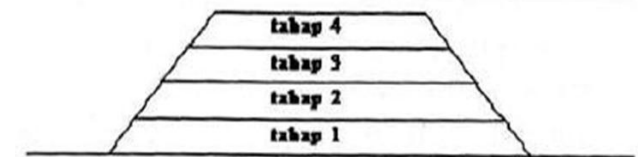
2.6. Timbunan Bertahap

Perhitungan tinggi kritis untuk mengetahui timbunan memerlukan perbaikan tanah dasar atau sudah stabil. 1) Hitung kuat geser tak terdrainase (C_u) 2) Ambil berat isi (γ) 3) Tinggi timbunan maksimum yang aman tanpa

$$H_c = \frac{N_c C_u}{\gamma}$$

perbaikan tanah

Timbunan diletakkan lapis demi lapis sesuai rencana. Rumus disesuaikan harga C_c dan C_s .



Gambar 2.17. Timbunan diletakkan secara bertahap
Sumber : Yogyakarta Dwiaji Ari, 2017

III. XXX

3.1. Data Primer

Data pimer yang didapatkan meliputi :



Gambar 3.1 Pembangunan Proyek Gedung ITS Tower 3. Sumber : Google earth

3.2. Data Sekunder

Nama proyek : Package CWI-1
construction of ITS Tower

Pemilik Proyek

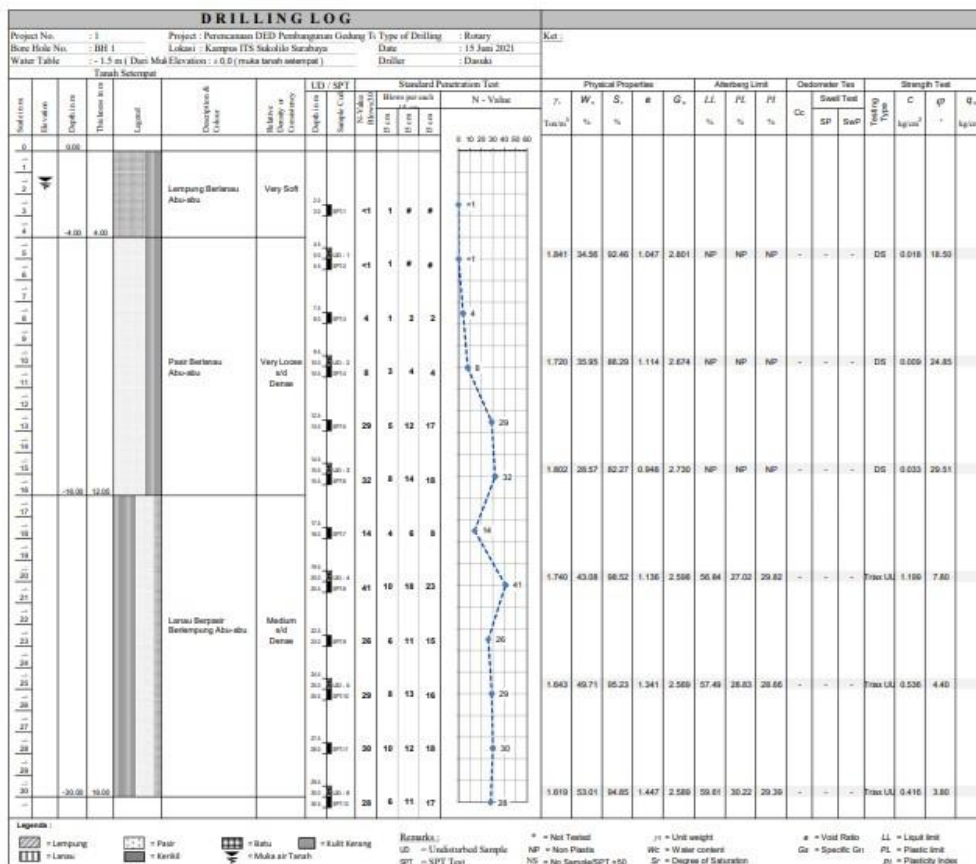
Jumlah lantai

: Institut Teknologi Sepuluh
November

: 14 lantai

Lokasi : Kampus ITS Sukolilo,
Surabaya Jawa Timur

Gambar 3.3 Tampak Depan Gedung ITS Tower 3,
Sumber: PT Adhi Karya



b.

Gambar 3.4. Data N SPT BH -1 Gedung Menara Tower 3 ITS. Sumber : PT Adhi Karya

Bore Hole			BH I					
Sample Depth (m)			-5.0	-10.0	-15.0	-20.0	-25.0	-30.0
Physical Properties	Unit weight γ_t	(t/m^3)	1.841	1.720	1.802	1.740	1.643	1.619
	Dry unit weight γ_d	(t/m^3)	1.368	1.265	1.402	1.216	1.097	1.058
	Saturation Unit Weight γ_{sat}	(t/m^3)	1.880	1.792	1.888	1.748	1.670	1.649
	Water content W_c	(%)	34.56	35.95	28.57	43.08	49.71	53.01
	Degree of Saturation S_r	(%)	92.43	86.33	82.29	98.49	95.24	94.86
	Porosity n	(%)	51.15	52.69	48.66	53.19	57.28	59.13
	Void Ratio e		1.047	1.114	0.948	1.136	1.341	1.447
	Specific Gravity G_s		2.801	2.674	2.730	2.598	2.569	2.589
Atterberg Limit	Liquid limit LL	(%)	NP	NP	NP	56.84	57.49	59.61
	Plastic limit PL	(%)	NP	NP	NP	27.02	28.83	30.22
	Plasticity Index PI	(%)	NP	NP	NP	29.82	28.66	29.39
Grain Size Distribution	Gravel	(%)	1.77	6.97	4.26	0.00	0.00	0.00
	Sand	(%)	75.40	72.97	59.17	13.21	12.77	17.85
	Silt	(%)	18.93	15.13	31.80	77.76	80.22	75.20
	Clay	(%)	3.90	4.93	4.77	9.03	7.01	6.95
	Koef. Keseragaman CU		*	*	*	*	*	*
	Koef. Kelengkungan CC		*	*	*	*	*	*
Unconfined Compression Test	Peak Deviator Stress, q_u	(kg/cm^2)	*	*	*	*	*	*
	Undisturbed Cohesion, C_u	(kg/cm^2)	*	*	*	*	*	*
	Modulus Elasticity, E_{50}	(kg/cm^2)	*	*	*	*	*	*
	Strain at failure	(%)	*	*	*	*	*	*
Triaxial Test	Friction Angle	(degree)	*	*	*	7.80	4.40	3.80
	Cohesion Intercept	(kg/cm^2)	*	*	*	1.199	0.536	0.416
	Drainage condition		*	*	*	UU	UU	UU
Direct Shear Test	Friction Angle	(degree)	18.50	24.85	29.51	*	*	*
	Cohesion Intercept	(kg/cm^2)	0.018	0.009	0.033	*	*	*
Lab. Vane Shear Test	Shear Undrained, C_u	(Ton/m^2)	*	*	*	*	*	*
	Shear Undrained, C_u	(kg/cm^2)	*	*	*	*	*	*
Consolidation Test	Preconsolidation Pressure	(kg/cm^2)	*	*	*	*	*	*
	Compression Index, C_c		*	*	*	*	*	*
Remarks :								
* : No Test NP = No Plastic NS = No Sample/SPT > 50								

Tabel 3.1. Hasil Tes Laboratorium. Sumber: PT Adhi Karya

IV. HASIL PERHITUNGAN

4.1. Data Uji Laboratorium Tanah

Berikut adalah hasil pengujian laboratorium terhadap sampel tanah:

Tabel 4.1 Data uji laboratorium tanah

Keterangan	UDS
Berat isi basah (γ_t) (t/m^3)	1,841
Kadar air (w) (%)	34,56
Derajat kejenuhan (S_r) (%)	92,46
Angka pori (e)	1,047
Berat jenis butiran (G_s)	2,801
Berat isi kering (γ_d) (t/m^3)	1,368
Berat isi jenuh (γ_{sat}) (t/m^3)	1,880
Porositas (%)	51,15

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} = \frac{2,801 \cdot 1}{1 + 1,047} = \frac{2,801}{2,047} = 1,368 \text{ t/m}^3 \text{ (OK)}$$

$$n = \frac{e}{1 + e} = \frac{1,047}{2,047} = 0,5115 = 51,15\% \text{ (OK)}$$

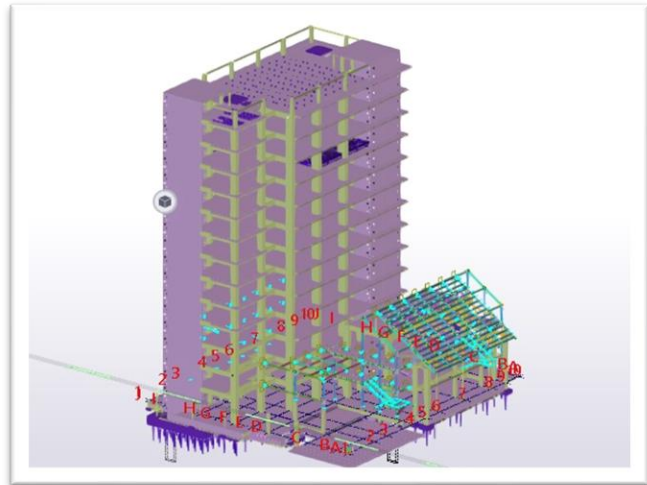
4.3. Beban Rencana Bangunan

$$S_r = \frac{w \cdot G_s}{e} = \frac{0,3456 \cdot 2,801}{1,047} = \frac{0,9685}{1,047} = 0,9246 = 92,46\% \text{ (OK)}$$

4.2. Penentuan Nilai Indeks kompresi (C_c) dan koefisien Konsolidasi (C_v)

Nilai indeks kompresi / Indeks pemampatan (C_c) bisa didapat melalui rumus empiris bila tidak ada uji laboratorium. Nilai *Compression Index* (C_c). $C_c = 0.156 \times e_0 + 0.0107 = 0.156 \times 1.047 + 0.0107 = 0,174$. Nilai koefisien konsolidasi vertikal (C_v) adalah untuk menentukan lama waktu konsolidasi tanah. Indeks Pemampatan (C_c) = 0,174 Angka pori (e_0) = 1,047 ; $\Delta\sigma = 5,667 \text{ t/m}^2 = 55,59 \text{ kPa}$; koefisien kompresi (m_v) $m_v = \frac{C_c}{(1+e_0) \cdot \Delta\sigma} = \frac{0,174}{(1+1,047) \cdot 55,59} = \frac{0,174}{113,793} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$; koefisien konsolidasi vertikal (C_v) $C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{1 \times 10^{-5}}{1,5 \times 10^{-3} \cdot 9,81} = \frac{1 \times 10^{-5}}{0,0147} = 0,00068 \text{ m}^2/\text{s}$

Gambar 4.1 Pemodelan Rencana Bangunan di aplikasi Tekla
(Sumber: Hasil pemodelan rencana bangunan di program bantu Tekla)



Total luas rencana bangunan = 1381,84 m². Maka beban yang bekerja pada permukaan tanah sebesar Beban rencana

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

4.3.1 Menghitung Faktor Pengaruh Beban (I)

Menurut Das (2007), parameter m dan n sebagai berikut:
 $m = \frac{B}{z}$, $n = \frac{L}{z}$. Mencari i rumusnya adalah $i = \frac{1}{4} \left(\frac{m}{\sqrt{1+m^2}} + \frac{n}{\sqrt{1+n^2}} \right)$. Nilai faktor pengaruh beban (i) diperoleh dari grafik yang disusun dari nilai m dan n. Diketahui data B = 10,5 m, L = 12 m dan z perhitungan dilakukan per 1,0 m.

Tabel 4.1. Perhitungan nilai $m = B/z$ dan $n = L/z$

Kedalaman (z)	$m = B/z$	$n = L/z$	I
1	10,5	12,0	0,4980
2	5,25	6,00	0,4922
3	3,50	4,00	0,4829
4	2,625	3,00	0,4708
5	2,10	2,40	0,4565
6	1,75	2,00	0,4407
7	1,50	1,71	0,4240
8	1,31	1,50	0,4069
9	1,17	1,33	0,3898
10	1,05	1,20	0,3731

4.3.2 Menghitung distribusi tegangan (ΔP)

Sebagai berikut $\Delta P = q_0 \times I = 29,35 \text{ t/m}^2 \times 0,4980 = 14,6163 \text{ t/m}^2$

Tabel 4.2. Distribusi tegangan (ΔP)

Kedalaman (m)	$q_0(\text{t/m}^2)$	I	$(\Delta P)(\text{t/m}^2)$
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

4.3.3 Menghitung tekanan Overbuden (P_o')

Tabel 4.3. overburden per lapis

Kedalaman (m)	$P_o' (\text{t/m}^2)$
1	1,857

$$\text{Menghitung } y_{sat} = \frac{y_w \cdot (Gs+1)}{1+e} = 1,857 \text{ t/m}^3$$

Data tanah h = 1 m ; $\gamma_t = 1,857 \text{ t/m}^3$; $e_0 = 1,047$;
 $\gamma'1(y_{sat1} - y_w) = 0,857$

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

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

Rumus $P' = P_o' + \Delta P = P_o + \Delta P = 1,857 + 14,6163 = 16,4733 \text{ t/m}^2$

Tabel 4.4. Perhitungan tegangan efektif Akhir ($P' = P_o + \Delta P$)

Kedalaman (m)	$P_o \text{ (t/m}^2\text{)}$	$\Delta P \text{ (t/m}^2\text{)}$	$P' = P_o + \Delta P \text{ (t/m}^2\text{)}$
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

Diketahui data tanah dasar sebagai berikut:

Koefisien konsolidasi lapisan 1 (C_v 1) =

$0,00068 \text{ m}^2 / \text{s}$

Tebal lapisan 1 (H_1) =

$5,0 \text{ m} = 500,0 \text{ cm}$

Koefisien konsolidasi lapisan Gab

$$= \frac{(H_1 + H_2)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_v1}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_v2}}\right)^2} = \frac{(500 + 500)^2}{\left(\frac{500}{\sqrt{0,00068 \text{ cm}^2/\text{det}}} + \frac{500}{\sqrt{0,00107 \text{ cm}^2/\text{det}}}\right)^2}$$

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

Untuk nilai U antara 0 – 60 %:

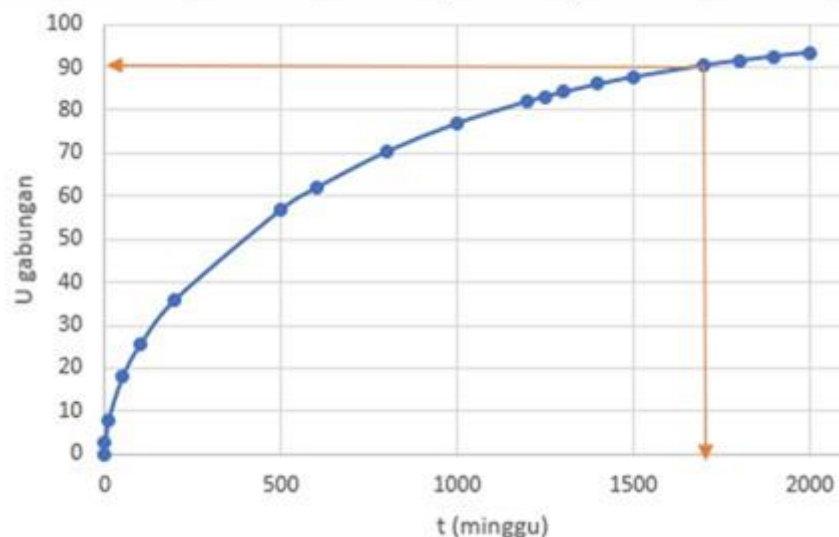
$$\text{Derajat Konsolidasi (U)} = \left(2 \sqrt{\frac{T_v}{\pi}}\right) \times 100\% =$$

$$\left(2 \sqrt{\frac{0,0005092}{3,14}}\right) \times 100\% = 0,025 = 2,5 \%$$

Untuk nilai U > 60 %:

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

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



Grafik 4.1 Hubungan antara derajat konsolidasi (U) dan waktu (t)
(Sumber: Hasil Perhitungan Derajat Konsolidasi (U_v))

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

4.4. Perhitungan PVD Dengan Pola Segitiga Dan Variasi Jarak Yang Berbeda

4.4.1 Derajat Konsolidasi Menggunakan Pola Segitiga Dengan Jarak 1,0 m

Perhitungan diameter ekuivalen vertical drain (d_w)

Lebar (a) = 100 mm Lebar (b) = 3 mm

Diameter ekuivalen (d_w) $= \frac{a+b}{2} = \frac{100+3}{2} = 51,5$
mm = 0,0515 m

Perhitungan nilai factor tahanan akibat jarak antara PVD

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

Perhitungan untuk mencari nilai koefisien horizontal (Ch)

$$\text{Koefisien Horizontal (Ch)} = 2 \times C_v = 2 \times 0,05092 = 0,10184 \text{ m}^2/\text{minggu}$$

Perhitungan Derajat konsolidasi arah horizontal (Uh)

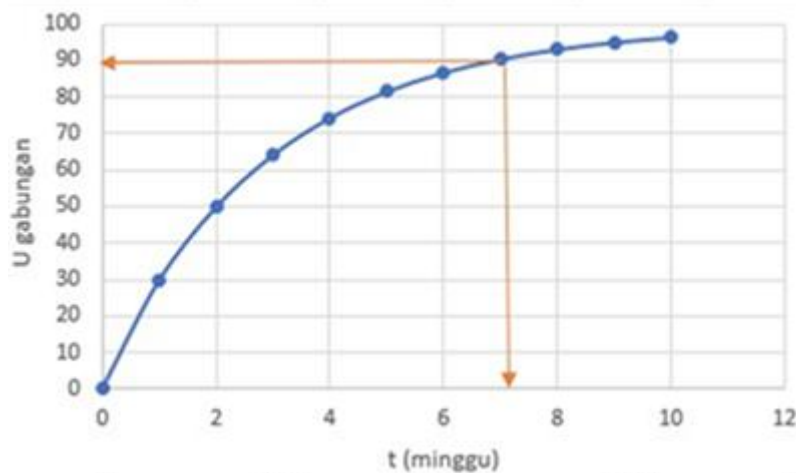
$$\text{Derajat konsolidasi (Uh)} = \left[1 - \left[\frac{1}{\exp \left[\frac{8 \times c_h \times t}{D^2 \times F(n)} \right]} \right] \right] = \left[1 - \left[\frac{1}{\exp \left[\frac{8 \times 0,10184 \times 1}{1,05^2 \times 2,265} \right]} \right] \right] = 0,278 = 27,8 \%$$

Perhitungan nilai derajat konsolidasi gabungan

$$U_{gab} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) = 1 - (1 - 0,0245)(1 - 0,278) = 0,297 = 29,7 \%$$

Tabel 4.5. Perhitungan derajat konsolidasi gabungan (U_{gab}) pola segitiga jarak 1,00 m

T (minggu)	H (m)	Cv gab (m ² /minggu)	Tv	Uv	(1-Uv)	Uh	1-Uh	Ugab	Sct (m)
1	10	0.05092	0.000509	0.025462	0.974538	0.278433	0.721567	0.296806	0.13849
2	10	0.05092	0.001018	0.036009	0.963991	0.479341	0.520659	0.49809	0.232409
3	10	0.05092	0.001528	0.044102	0.955898	0.62431	0.37569	0.640879	0.299034
4	10	0.05092	0.002037	0.050925	0.949075	0.728915	0.271085	0.74272	0.346553
5	10	0.05092	0.002546	0.056936	0.943064	0.804394	0.195606	0.815531	0.380527
6	10	0.05092	0.003055	0.06237	0.93763	0.858857	0.141143	0.86766	0.40485
7	10	0.05092	0.003564	0.067367	0.932633	0.898156	0.101844	0.905017	0.422281
8	10	0.05092	0.004074	0.072019	0.927981	0.926513	0.073487	0.931805	0.43478
9	10	0.05092	0.004583	0.076387	0.923613	0.946974	0.053026	0.951025	0.443748
10	10	0.05092	0.005092	0.080519	0.919481	0.961738	0.038262	0.964819	0.450185



Grafik 4.2. Hubungan derajat konsolidasi (U) dan waktu (t) menggunakan PVD pola segitiga dengan jarak 1 m

Dari tabel dan grafik diatas dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi (U_v)= 90% dengan jarak PVD 1m adalah 7 minggu. Jadi, penurunan S_c ($U_{90\%}$) = 90% X S_c = 90,5 % x 0,4666 m = 0,422 m.

4.5. Penggunaan Preloading Untuk Penggunaan PVD Pola Segitiga

Mencari nilai daerah ekuivalen drainase vertical berbentuk pola segitiga yaitu:

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

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

Perhitungan diameter ekuivalen vertical drain (dw)

Lebar (a) dan (b) = 100 mm dan = 3 mm

$$\text{Diameter ekuivalen (dw)} = \frac{a+b}{2} = \frac{100+3}{2} = 51,5 \text{ mm} = 0,0515 \text{ m}$$

Perhitungan nilai factor tahanan akibat jarak antara PVD

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

Kuat geser undrainet akibat pemampatan awal (Cu1) awal = 1 t/m²

Berat volume tanah efektif = 0,857 t/m²

Tebal lapisan tanah yang dimampatkan (H):

$$H = \text{Kedalaman total} - \text{Sc lapisan 1} - \text{Sc lapisan 2} = 10,00 - 0,2924 - 0,17424 = 9,530 \text{ m}$$

$$\text{Overburden efektif (Po')} = \gamma' \times (\text{Sc tot} - \text{Sc lap1}) = 0,857 \times (0,466 - 0,0,2924) = 0,149 \text{ t/m}^2$$

Hasil perhitungan penurunan total adalah Sc total = 0,466 m, untuk mempermudah maka dibulatkan Sc total = 1,00 m

$$\text{Cu/Po'} = 0,11 + 0,0037 \text{ PI} = 0,11 + 0,0037 \cdot 25$$

$$\text{Kuat geser undrained akibat pemampatan (Cu)} = 0,0302 \text{ t/m}^2 = \text{Cu} + \text{Cu1} = 1 + 0,0302 = 1,0302 \text{ t/m}^2$$

Berat volume tanah timbunan (g_{timb}) = 1,8 t/m³, Kohesi (cu) = 1,0302 t/m²

$$\text{Tinggi timbunan kritis (Hcr)} = \frac{2 \times \text{cu}}{\gamma_{\text{timb}}} = \frac{2 \times 1,0302}{1,8} = 1,1446 \text{ m}$$

Untuk memudahkan dalam pelaksanaan maka tinggi timbunan yang digunakan sebesar 1 m.

$$\text{Indeks Pemampatan (Cc)} = 0,174, \text{ Angka pori (e0)} = 1,047$$

Tebal lapisan tanah (Hi) = 1,0 m (perhitungan tiap 1,00 m)

$$\text{Konsolidasi Primer (Sc)} = \left[\frac{Cc}{1+e0} \text{ Hi Log} \left(\frac{\Delta P + P\sigma}{P\sigma} \right) \right] = \left[\frac{0,174}{1+1,047} \text{ Hi Log} \left(\frac{16,4166+1,841}{1,841} \right) \right] = 0,0844 \text{ m}$$

Tabel 4.6. Penurunan dengan menggunakan PVD (Sc) dan beban timbunan

Kedalaman (m)	H (m)	Cc	e0	Po' (t/m ²)	ΔP (t/m ²)	Po' + ΔP (t/m ²)	Sct (m)	Sct 90 % (m)
1	1	0.174	1.047	1.857	16.4166	18.2736	0.084408	0.075968
2	1	0.174	1.047	3.215	16.24557	19.46057	0.06647	0.059823
3	1	0.174	1.047	4.072	15.9736	20.0456	0.05884	0.052956
4	1	0.174	1.047	4.929	15.61777	20.54677	0.0527	0.04743
5	1	0.174	1.047	5.786	15.19782	20.98382	0.047559	0.042803
6	1	0.184	1.114	6.524	14.73359	21.25759	0.044651	0.040186
7	1	0.184	1.114	7.262	14.24315	21.50515	0.041038	0.036934
8	1	0.184	1.114	8	13.74165	21.74165	0.037792	0.034013
9	1	0.184	1.114	8.738	13.24105	21.97905	0.034867	0.031381
9.53	0,53	0.184	1.114	9.12914	13.50605	22.63519	0.034324	0.030892
Total							0.50265	0.452385

(Sumber: Hasil Perhitungan Penurunan menggunakan PVD (Sc) dan beban timbunan)

Menghitung Derajat Konsolidasi untuk U gabungan Pola Segitiga jarak 1 m

$$\text{Nilai CV gabungan} = 0,05092 \text{ m}^2 / \text{minggu}$$

$$\text{Faktor waktu (Tv)} = \frac{t \times cv}{H_{dr}^2} = \frac{1 \times 0,05092}{9,53^2} = 0,00056$$

Untuk nilai U antara 0 – 60 %:

$$\text{Derajat Konsolidasi (Uv)} = \left(2 \sqrt{\frac{Tv}{\pi}} \right) \times 100\% = \left(2 \sqrt{\frac{0,00056}{3,14}} \right) \times 100\% = 0,0267 \%$$

$$\text{Koefisien Horizontal (Ch)} = 2 \times \text{Cv} = 2 \times 0,05092 = 0,10184 \text{ m}^2 / \text{minggu}$$

$$\text{Faktor waktu (Th)} = \frac{t \times ch}{D^2} = \frac{1 \times 0,10184}{1,5^2} = 0,0452$$

$$\text{Derajat konsolidasi (Uh)} = \left[1 - \left[\frac{1}{\exp \left(\frac{8 \times ch \times t}{D^2 \times F_n} \right)} \right] \right] = \left[1 - \left[\frac{1}{\exp \left(\frac{8 \times 0,0452 \times 1}{1,05^2 \times 2,264} \right)} \right] \right] = 0,278 = 27,8 \%$$

Tabel 4.7. Perhitungan derajat konsolidasi (U_{gab}) *preloading* 1 pola segitiga jarak 1 m

t (minggu)	H (m)	C_v (m^2 /minggu)	C_h (m^2 /minggu)	T_v	U_v	(1- U_v)	U_h	(1- U_h)	U_{gab}	S_c (m)
1	9.53	0.05092	0.10184	0.000561	0.027	0.973	0.278	0.722	0.298	0.138889
2	9.53	0.05092	0.10184	0.001121	0.038	0.962	0.479	0.521	0.499	0.232807
3	9.53	0.05092	0.10184	0.001682	0.046	0.954	0.624	0.376	0.642	0.299379
4	9.53	0.05092	0.10184	0.002243	0.053	0.947	0.729	0.271	0.743	0.346836
5	9.53	0.05092	0.10184	0.002803	0.060	0.940	0.804	0.196	0.816	0.380752
6	9.53	0.05092	0.10184	0.003364	0.065	0.935	0.859	0.141	0.868	0.405026
7	9.53	0.05092	0.10184	0.003925	0.071	0.929	0.898	0.102	0.905	0.422416

(Sumber: Hasil Perhitungan U_{gab} dan *preloading*)

4.6. Rekapitulasi Hasil Perhitungan kombinasi *Preloading* dan variasi jarak PVD

Pola Pemasangan Segitiga				
Jarak PVD	Pembebanan	T(minggu)	S_c (m)	U
1,0 m	Sebelum <i>Preloading</i>	7	0.422	90.5
	<i>Preloading</i>	1	0.139	29.8
	Total Penurunan	8	0.561	>0,4194

(Sumber: Hasil Rekapitulasi kombinasi *preloading* dan variasi jarak PVD)

Dari hasil rekapitulasi perhitungan kombinasi *preloading* dengan pola baik persegi maupun segitiga didapatkan bahwa seluruh cara diatas baik penggunaan pola dan variasi jarak dapat digunakan. Kemudian pola yang efektif untuk cepatnya waktu adalah dengan menggunakan pola segitiga daripada pola persegi. Variasi jarak juga berpengaruh semakin kecil penggunaan variasi jarak maka semakin cepat pula waktu yang ditempuh untuk mencapai penurunan.

VI. KESIMPULAN

Dalam analisis ini, perhitungan difokuskan hingga pencapaian derajat konsolidasi $U = 90\%$.

1. Besar penurunan tanah (S_c) sebesar $\pm 0,467$ m diperlukan waktu sekitar 1.700 minggu atau setara dengan lebih dari 32 tahun.
2. Penurunan tanah yang terjadi relatif konstan pada kisaran 0,418 – 0,424 m, dengan jarak pemasangan yang rapat pada jarak 1,0 m, saat $U \approx 90\%$ hanya dalam 7 minggu (pola segitiga).
3. Variasi jarak penggunaan PVD yang paling efisien terhadap durasi perencanaan pekerjaan perbaikan tanah. Semakin rapat jarak pemasangan, semakin cepat derajat konsolidasi tercapai. Pada jarak 1,0 m merupakan yang paling efisien.

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 (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 : tanah lunak di Jalan Tol Pasuruan-in engineering practice. New York, NY: John Wiley & Sons.
- 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., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics*