

Pemampatan Tanah Lunak pada Berbagai Kedalaman *Prefabricated Vertical Drain* di Reklamasi Pelabuhan Belawan, Kota Medan

Kamal Hasan Iskandar^{1*} dan Asep Sapei¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Penulis korespondensi: kamal_240298@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Proyek reklamasi Pelabuhan Belawan tahap II direncanakan sebagai area penyimpanan kontainer. Berdasarkan tes penyelidikan tanah (SPT test), tanah pada lokasi ini diklasifikasikan sebagai tanah lunak dengan kedalaman 11 m. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan stabilitas tanah karena tanah tersebut memiliki kompresi potensial yang besar. Metode yang digunakan adalah *Preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). Kedalaman PVD yang dipilih memiliki perbedaan dampak dan pengaruh terhadap performansinya. Penelitian ini dilaksanakan untuk menentukan kedalaman PVD yang optimum untuk menahan kompresi dan waktu setlemen dengan derajat konsolidasi sebesar 90%. Variasi kedalaman PVD yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dari kedalaman tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa lokasi yang potensial terjadi subsiden adalah 2.4 m. Tanpa PVD, membutuhkan waktu 50.670 hari untuk mencapai 90% konsolidasi. Sedangkan dengan PVD, hanya membutuhkan 66-69 hari tergantung dari prosentase kedalaman PVD. Semakin dalam PVD, semakin kecil kompresi residunya. Kedalaman 50% PVD merupakan yang optimum berdasarkan waktu dan residu kompresi dengan total biaya sebesar Rp 7,09 Milyar.

Kata kunci: kompresi; peningkatan kualitas tanah; PVD; tanah lunak

Diterima: 06 Juli 2021

Disetujui: 31 Maret 2022

Sitasi:

Iskandar, K.H.; Sapei, S. Pemampatan Tanah Lunak Pada Berbagai Kedalaman *Prefabricated Vertical Drain* di Reklamasi Pelabuhan Belawan, Kota Medan. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2022; 7 (1): 01-16.,
<https://doi.org/10.29244/jsil.7.1.1-16>

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan terbesar di dunia [1]. Hal ini menjadikan pelabuhan sebagai memiliki peran penting dalam peningkatan ekonomi nasional. Salah satu pelabuhan besar dan berpengaruh yang ada di Indonesia adalah Pelabuhan Belawan. Peningkatan aktivitas bongkar muat di pelabuhan ini mendorong pemerintah melakukan pengembangan dengan membangun terminal kontainer baru. Pembangunan terminal ini dilakukan dengan cara reklamasi. Reklamasi tersebut merupakan bagian dari kawasan Pelabuhan Belawan, yang berada pada semenanjung antara Sungai Belawan dan Sungai Deli [2].

Hal yang perlu diperhatikan pada tanah reklamasi adalah stabilitas tanah dolokasi tersebut [3]. Kekuatan tanah pada daerah reklamasi ini sangat penting karena tanah tersebut berfungsi untuk menahan beban besar seperti kontainer, *crane* dan truk kontainer. Oleh karena itu tanah yang akan dipergunakan untuk mendukung konstruksi harus dipersiapkan terlebih dahulu sebelum dipergunakan [4]. Jika tidak, maka infrastruktur yang dibangun berpotensi mengalami kerusakan sebelum mencapai umur yang direncanakan [5].

Terdapat banyak cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas tanah seperti yang terdapat pada SNI 8460:2017 [6]. Pada proyek reklamasi Pelabuhan Belawan ini menggunakan metode perbaikan tanah menggunakan metode *preloading with prefabricated vertical drain*. Metode ini dipilih dikarenakan tanah di lokasi merupakan tanah lunak *compressible*. Banyak faktor yang mempengaruhi efektivitas metode ini diantaranya kedalaman PVD. Benda ini berfungsi untuk mempercepat proses pemampatan tanah dengan mengalirkan air (air pori) tanah [7]. Ketika lapisan tanah mengalami beban di atasnya, maka air pori akan mengalir keluar dari lapisan tersebut dan volumenya akan berkurang atau mengalami konsolidasi. Dengan demikian tanah yang dimampatkan akan mengalami peningkatan dari segi daya dukungnya [8]. Telah banyak pengerjaan perbaikan tanah dilakukan menggunakan metode *preloading* dengan PVD. Tetapi informasi dan juga penelitian mengenai efektivitas penggunaan PVD belum banyak dilakukan. Oleh karenanya diperlukan penelitian terkait kedalaman PVD yang efektif sehingga biaya dan waktu pengerjaan dengan metode ini lebih optimum.

2. Metodologi

Pada penelitian ini memperhatikan kriteria yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017 [6]. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data *borlog* dan SPT tanah, peta dan *layout* lokasi reklamasi, hasil tes laboratorium tanah serta data material PVD. Tahapan pada penelitian ini dimulai dengan mencari kedalaman tanah lunak dari hasil bor log. Setelah itu dilakukan perhitungan nilai rerata parameter tanah menggunakan persamaan (1), (2) dan (3) [9], [10] dan [11]. Tahap selanjutnya dilakukan perhitungan penurunan tanah akibat beban dan berat tanah menggunakan persamaan (4) s.d (9) [12]. Lalu dilakukan perhitungan dan analisis terhadap pola dan spasi PVD yang efektif menggunakan persamaan yang dibuat oleh [13] yaitu persamaan (9) s.d (12). Selain itu pada tahap ini dilakukan perhitungan derajat konsolidasi gabungan (U_r) menggunakan persamaan (13).

Setelah pola dan spasi PVD efektif didapatkan kemudian dilanjutkan mencari PVD efektif dari variasi 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Tahap selanjutnya adalah perhitungan *rate of settlement* (RoS) dan *tolerable settlement* menggunakan persamaan (18) dan (19). Nilai RoS yang diizinkan dengan penurunan pelaksanaan telah mencapai 90% terhadap penurunan total adalah ≤ 2 cm/tahun [14]. Sementara *tolerable settlement* yang diizinkan tidak melebihi 0.002 [15]. Setelah kedalaman PVD efektif didapatkan selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap biaya total pada kedalaman efektif tersebut.

$$\bar{X} - \frac{STD}{\sqrt{n}} t(db) < \mu < \bar{X} + \frac{STD}{\sqrt{n}} t(db) \tag{1}$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{2}$$

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1+H_2+\dots+H_i)^2}{\left[\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_i}{\sqrt{C_{vi}}}\right]^2} \tag{3}$$

$$S_{ci} = H_i \left[\frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \right] \tag{4}$$

$$S_{ci} = H_i \left[\frac{C_s}{1+e_0} \log \frac{\sigma_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \right] \tag{5}$$

$$\sigma'_0 = (\gamma_{sat} - 1) \times Z \tag{6}$$

$$\sigma_c = \sigma'_{0awal} + \sigma'_{0titik \text{ yang ditinjau}} \tag{7}$$

$$\Delta\sigma = 2 \times I \times q \tag{8}$$

$$I = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{(A+B)}{A} (\alpha + \beta) - \frac{B}{A} (\beta) \right] \tag{9}$$

Dimana $\beta = \tan^{-1} \left(\frac{B}{z} \right)$; $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{A+B}{z} \right) - \beta$

$$dw = 2 \times \left(\frac{a+b}{\pi} \right) \tag{10}$$

$$A_e = 1/4 \times (1,13 \times S)^2 \tag{11}$$

$$A_e = 1/4 \times (1,05 \times S)^2 \tag{12}$$

$$U_r = [1 - (1 - U_h) \times (1 - U_v)] \times 100\% \tag{13}$$

$$U_h = \left[1 - \exp \left(- \frac{8 \times t \times C_v}{D^2 \times 2 \times F(n)} \right) \right] \times 100\% \tag{14}$$

$$U_v = (100-a) \% ; a = 10^{\left(\frac{1,781 - Tv}{0,933} \right)} \tag{15}$$

$$Tv = \frac{t \times C_v}{H^2} \tag{16}$$

$$F(n) = \ln \left(\frac{D}{dw} \right) - \frac{3}{4} \tag{17}$$

$$RoS = \text{Sisa } S_{c \ 10 \ \text{Tahun}} \times \frac{10 \ \text{Tahun}}{100 \ \text{cm}} \tag{18}$$

$$\beta = \frac{S_i - S_j}{L} \tag{19}$$

Keterangan:

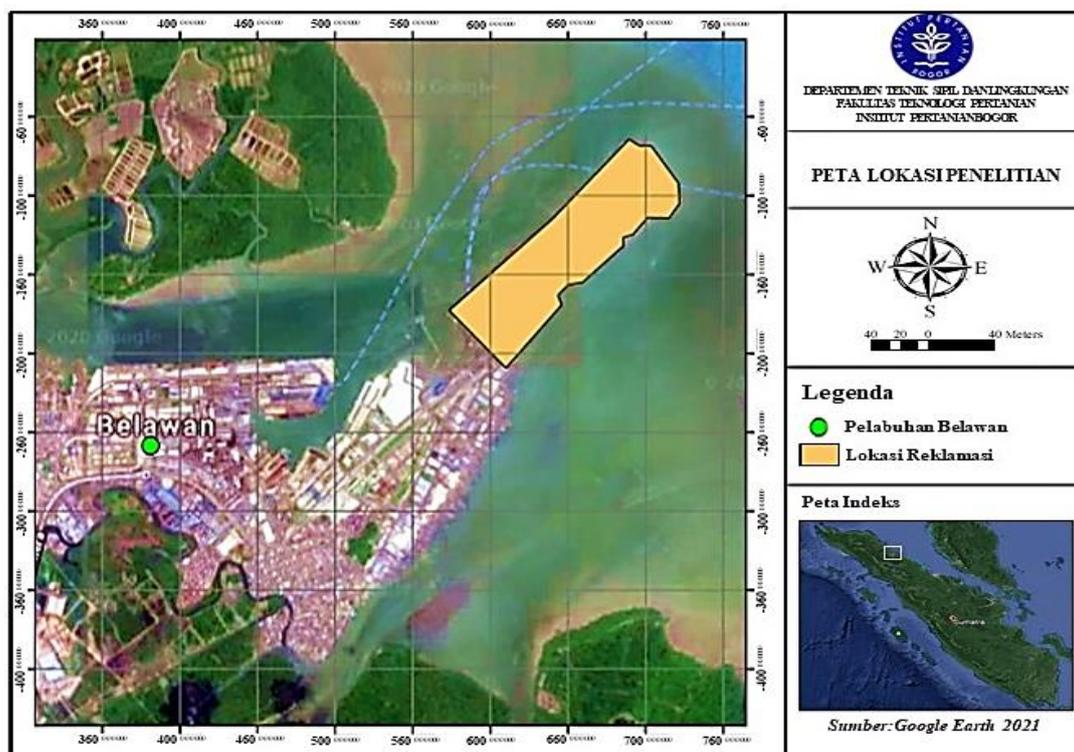
- \bar{X} = rata-rata
- STD = standar deviasi
- n = banyak data
- $t_{(db)}$ = pengali derajat kebebasan, nilai bisa dilihat pada lampiran 1
- μ = nilai parameter tanah
- C_v = koefisien konsolidasi untuk aliran air pori arah vertical (cm²/det)
- S_{ci} = pemampatan konsolidasi pada lapisan ke-i
- H_i = tebal lapisan tanah *compressible* ke-i
- e_0 = angka pori awal (*initial void ratio*)
- C_c = indeks kompresi lapisan tanah ke-i
- C_s = indeks mengembang lapisan tanah ke-i
- $\Delta\sigma$ = distribusi tegangan tanah (di tengah lapisan ke-i) akibat beban timbunan
- σ'_0 = tekanan vertikal efektif tanah dari suatu titik di tengah-tengah lapisan ke-i akibat beban tanah sendiri di atas titik tersebut di lapangan (*effective overburden pressure*)
- σ_c = tegangan prakonsolidasi efektif (*effective past overburden pressure*)

- B = tolerable settlement
 S_i = penurunan di titik tengah (m)
 S_j = penurunan pada titik selain titik tengah (m)
 L = jarak antara titik tengah dengan titik yang di tinjau (m)
 D = diameter ekivalen dari lingkaran tanah yang merupakan daerah pengaruh *drain* vertikal (m)
 Ch = koefisien konsolidasi tanah arah horisontal (cm^2/det)
 Uh = derajat konsolidasi tanah arah horizontal (%)
 Tv = faktor waktu
 Uv = derajat konsolidasi araf vertikal (%)
 H_i = tebal lapisan ke- i yang mengalami konsolidasi (panjang aliran yang harus ditempuh air pori) (m)
 C_v = koefisien konsolidasi untuk aliran air pori arah vertical (cm^2/det)
 t = lama konsolidasi, dipilih sembarang (satuan waktu)
 a = lebar dari potongan melintang PVD (m)
 b = tebal dari potongan melintang pita PVD (m)
 S = jarak/spasi antara PVD (m)
 A_e = daerah tangkapan PVD (m^2)

3. Hasil dan Pembahasan

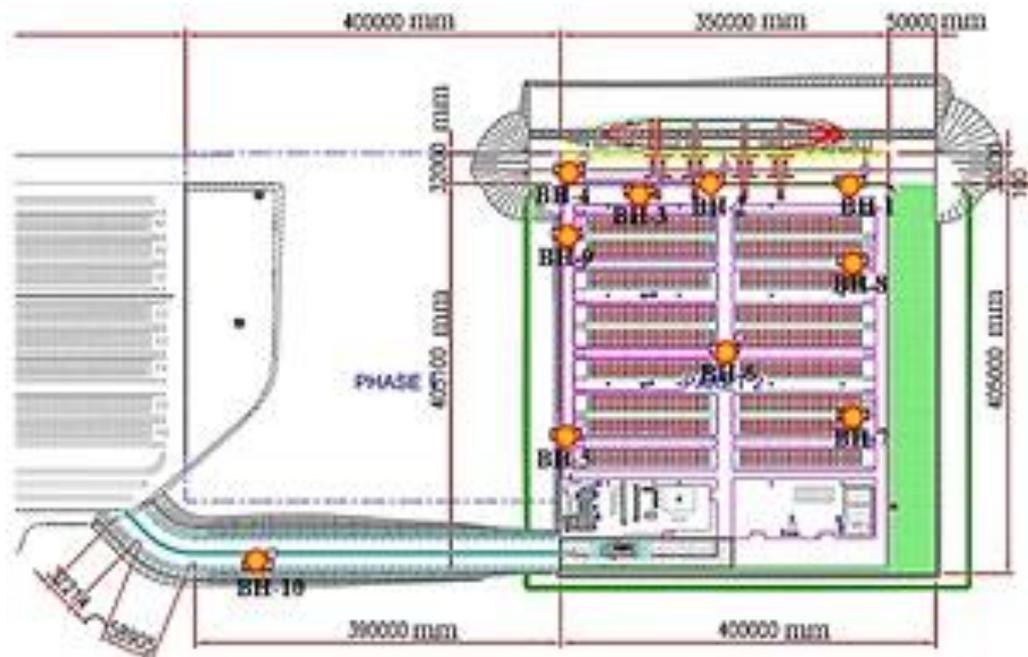
3.1. Lokasi Penelitian

Proyek reklamasi pelabuhan terminal peti kemas belawan fase 2 terletak pada semenanjung yang dibatasi Sungai Belawan di bagian utara dan Sungai Deli di bagian selatan dan juga terletak di timur laut pantai sumatera ± 27 km dari Medan, Sumatera Utara. Proyek ini merupakan lanjutan dari pekerjaan fase 1. Pekerjaan utama pada proyek pelabuhan terminal peti kemas belawan fase 2 adalah pekerjaan pengerukan, reklamasi dan pembuatan dermaga. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi penelitian.

Luas area pengerjaan yaitu sebesar 17.4 Ha yang terdiri dari area dramaga, *container yard* dan area *cause way*. Namun pada pengerjaan pemasangan PVD hanya dilakukan pada area dramaga dan area *container yard*. Pada kedua bagian area tersebut terdapat 9 titik bor (BH-1 s.d BH-9) untuk melakukan penyelidikan lapangan (SPT). *Layout* lokasi titik bor dapat dilihat pada Gambar 2.

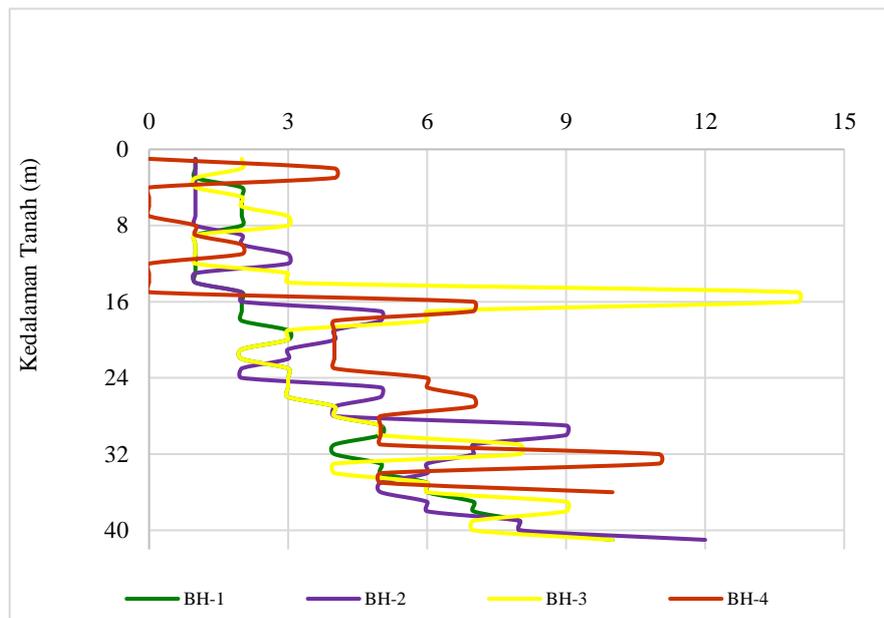


Gambar 2. *Layout* titik bor.

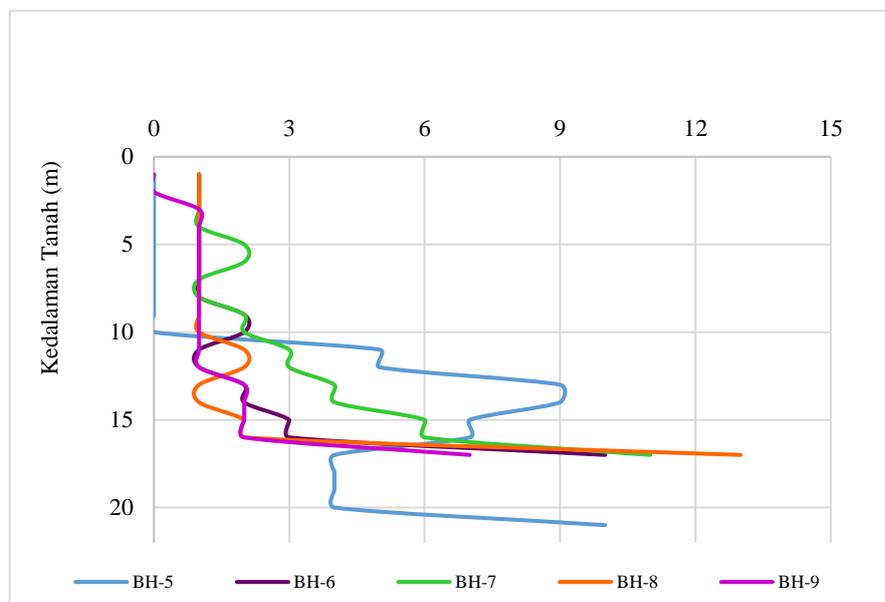
Berdasarkan hasil penyelidikan lapangan dapat diketahui pada lapisan atas di titik BH-1, BH-4, BH-5, BH-6, BH-7, dan BH-8 didominasi oleh tanah lempung lunak. Sebagian lempung lunak tersebut tercampur pasir dan juga lanau dan juga terdapat lempung organik. Namun untuk sifat plastisitas secara keseluruhan adalah relatif rendah. Untuk lapisan tengah, pada titik ini rata-rata masih didominasi oleh lempung namun dengan kandungan pasir maupun lanau cukup banyak dibandingkan dengan lapisan atas dan sifat plastisitasnya cenderung rendah hingga sedang. Sedikit berbeda pada titik BH-2, BH-3 dan BH-9. Lapisan atas di titik tersebut didominasi oleh pasir berlanau dan organik dengan plastisitas yang rendah. Sementara dilapisan tengah masih didominasi dengan pasir namun dengan kandungan lempung dan lanau yang cukup tinggi.

3.2. Kedalaman Tanah Lunak

Nilai kedalaman tanah lunak semakin kecil dari titik BH-1 ke titik BH-9. Selain itu terlihat bahwa tanah semakin dalam cenderung mengalami peningkatan nilai SPT. Pengecualian pada titik BH-3, dimana terjadi peningkatan dan penurunan pada nilai SPT secara drastis pada kedalaman 16 m. Hal itu dikarenakan jenis tanah pada kedalaman tersebut adalah pasir berlempung dengan plastisitas sedang. Menurut [16], tanah jenis pasir berlempung memiliki konsistensi keras (*hard*) sehingga saat di uji dengan SPT akan menunjukkan nilai yang tinggi. Nilai SPT pada masing-masing *bore hole* (BH) dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.



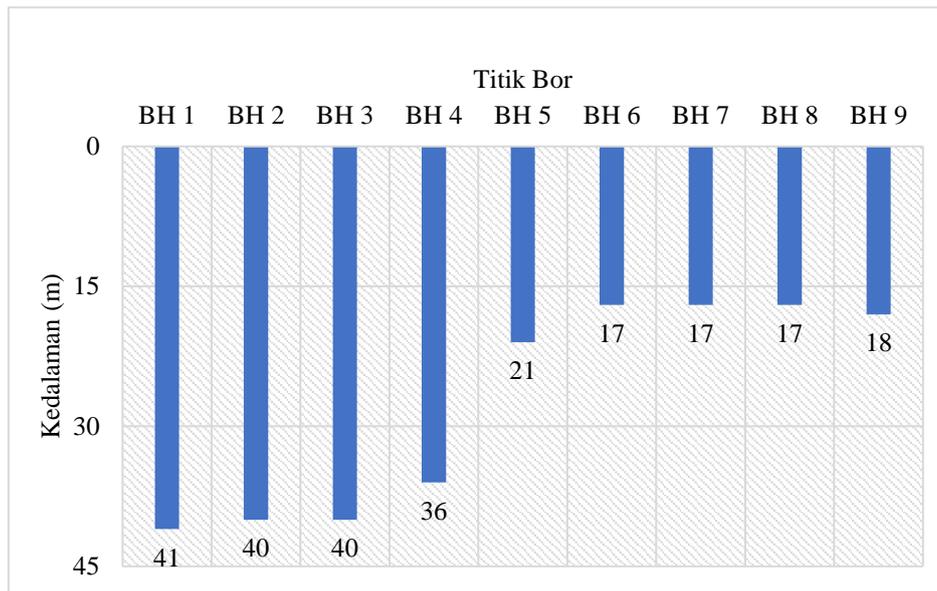
Gambar 3. Nilai SPT per meter kedalaman tanah titik bor 1 s.d 4.



Gambar 4. Nilai SPT per meter kedalaman tanah titik bor 5 s.d 9.

Penentuan kedalaman tanah yang akan di pancang dengan PVD dilakukan pada tanah dengan nilai SPT 10. Menurut [7], tanah dengan nilai tersebut tergolong tanah konsistensi sedang (*medium*). Nilai H diambil dengan menggunakan pendekatan kedalaman terdalam dari hasil bor pada masing-masing titik. Hal yang perlu dipastikan kembali bahwa nilai tersebut terus meningkat dan tidak turun kembali secara drastis ketika penyelidikan dilanjutkan dibawahnya. Seperti yang terjadi pada titik BH-3. Nilai SPT pada titik tersebut di kedalaman 16 m sebesar 14. Namun nilai tersebut kembali turun menjadi 6 pada kedalaman 18 m dan kembali meningkat secara perlahan-lahan hingga kembali menyentuh n-SPT 10 pada kedalaman 40 m. Pada kedalaman tersebut nilai SPT tidak kembali turun namun cenderung meningkat. Dengan demikian batas kedalaman tanah lunak (n-SPT >10) titik BH-3 bukanlah pada kedalaman 16 m,

namun pada kedalaman 40 meter. Kedalaman tanah lunak pada masing-masing titik bor dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kedalaman tanah lunak di titik bor.

Berdasarkan data dari bor log didapatkan bahwa kedalaman untuk mencapai tanah dengan konsistensi menengah (*medium*) atau N-SPT 10 berbeda-beda disetiap titik. Kedalaman tanah terbesar yaitu 41 berada pada titik BH-1 dan terkecil sedalam 17 m pada BH-6 s.d 7. Namun, kedalaman yang dipilih diambil berdsarkan kedalaman terdalam. Kondisi tersebut ditemukan pada titik BH-1 yaitu sedalam 41 m. Sehingga titik tersebut dikatakan sebagai titik dengan tanah lunak terdalam.

3.3. Rerata Parameter Tanah

Perhitungan rerata parameter tanah dilakukan di laboratorium. Pengambilan sampel tanah dengan cara *undisturbed soil sampling* (UDS) yang diambil pada kedalaman tertentu dengan ketebalan sampel sebesar 50 cm pada masing-masing titik. Parameter tanah yang diolah menggunakan metode statistik distribusi diantaranya adalah *liquid limit* (LL), *Water content* (W_n), berat volum jenuh (γ_{sat}), angka pori (e_0), dan indeks kompresi (C_c). Sementara nilai C_v gabungan dihitung dengan persamaan (3). Hasil perhitungan nilai rerata parameter menggunakan etode statistik dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil perhitungan rerata nilai C_v dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Nilai rerata parameter tanah.

Parameter Tanah	Nilai rerata akhir
γ_{sat} (t/m ³)	1.541
C_c	0.794
LL (%)	76.739
e_0	1.748
G_s	2.58
W_n (%)	72.631

Tabel 2. Nilai C_v gabungan.

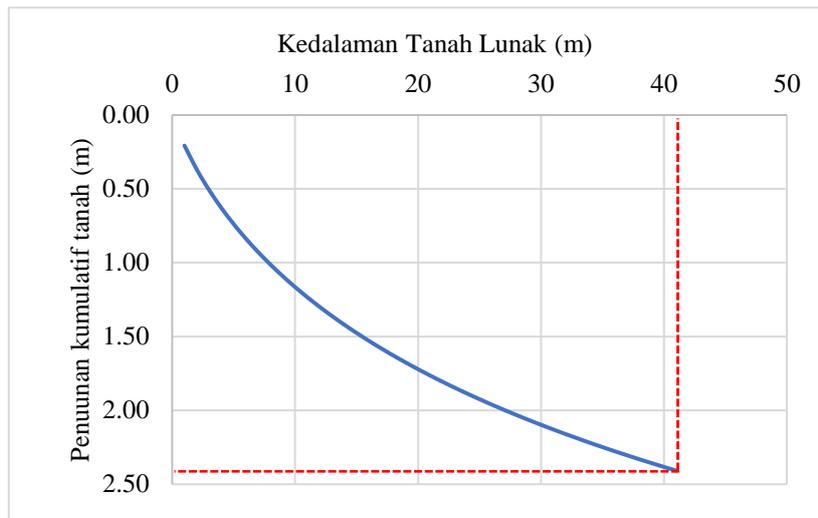
Kedalaman (m)	C_v (cm ² /det)			
	ΔH (m)	C_v Rerata	$(C_v$ Rerata) ²	$H / (C_v$ Rerata) ²
1 s.d 5	5	0.0012	0.041	123.216
5 s.d 10	5	0.0019	0.043	115.936
10s.d 15	5	0.0027	0.052	95.596
15 s.d 20	5	0.0025	0.050	99.169
20 s.d 25	5	0.0027	0.052	95.992
25 s.d 30	5	0.0028	0.053	94.582
30 s.d 35	5	0.0038	0.062	81.004
35 s.d 41	6	0.0023	0.048	124.034
Total	41			829.530
(Total) ²	1681			688120.700
Cv Gab				0.0024

Perhitungan nilai C_v gabungan dilakukan dengan membagi lapisan tanah lunak sedalam 41 m menjadi 8 lapisan. Tebal (ΔH) masing-masing lapisan sebesar 5 m kecuali pada lapisan akhir yang memiliki ketebalan sebesar 6 m. Sementara $C_{v\text{rerata}}$ adalah rata-rata dari nilai-nilai C_v yang berada pada ketebalan tanah (ΔH) dari lapisan yang telah ditentukan. Nilai C_v gabungan didapatkan sebesar 0,00244 cm²/det.

3.4. Penurunan Tanah Secara Alami

Tanah pada lokasi pekerjaan dirancang untuk menahan beban luar sebesar 5 tingkat peti kemas atau sekitar 6.67 t/m². Dengan asumsi berat jenis tanah timbunan sebesar 1,75 t/m³ maka didapatkan tinggi timbunan sebesar 3,81 m. Selain itu juga digunakan tinggi perkerasan sebesar 1 m sehingga tinggi *preload* akhir menjadi 4,81 m atau jika dibulatkan menjadi 4,8 m. Tinggi *preload* ini yang kemudian digunakan pada analisis penurunan tanah. Analisis dilakukan per 1 m lapisan tanah dengan kedalaman pengaruh akibat beban yang dianalisis (Z) adalah setengah dari tebal lapisan tanah. Panjang mendatar kemiringan timbunan (A) sebesar 2,4 m dan setengah dari lebar timbunan (B) sebesar 200 m.

Tekanan vertikal efektif (σ'_0) semakin besar ketika tanah semakin dalam. Nilai terbesar tekanan tersebut yaitu sebesar 21.901 t/m² yang berada pada kedalaman 41 m. Seperti halnya σ'_0 , nilai tegangan prakonsolidasi (σ_c) juga semakin besar ketika tanah semakin dalam. Nilai tegangan ini didapatkan dari penambahan nilai tegangan efektif awal ($\sigma'_{0\text{awal}}$) dan tegangan vertikal efektif kedalaman titik yang ditinjau (σ'_0). Nilai $\sigma'_{0\text{awal}}$ yang digunakan pada perhitungan adalah sebesar 2 t/m² yang didapatkan dari uji laboratorium sampel tanah. Nilai kumulatif penurunan tanah permeter dapat dilihat pada Gambar 6.

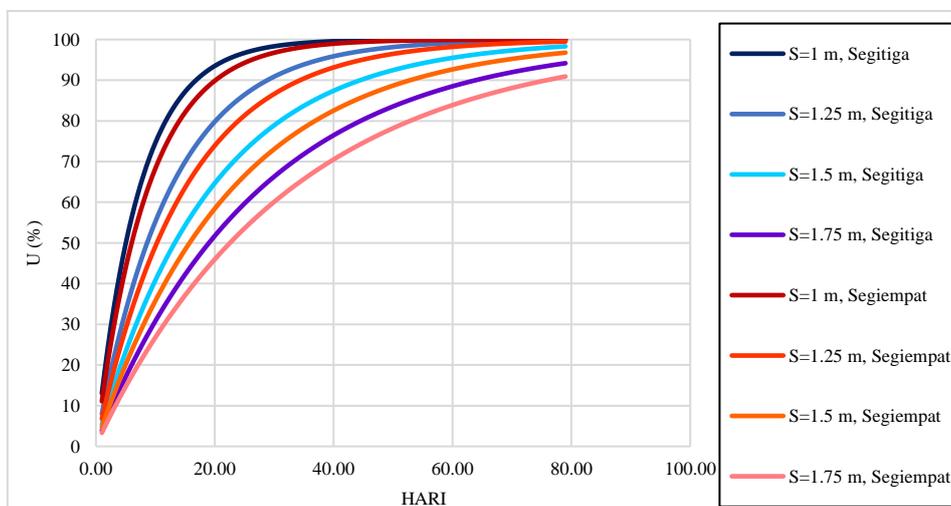


Gambar 6. Pemampatan tanah kumulatif.

Tanah lunak pada lokasi proyek bersifat *over consolidated* (*OC soil*) dikarenakan nilai tegangan pra-konsolidasinya (σ_c) lebih besar dibandingkan tekanan vertikal efektif (σ'_0) pada masing-masing lapisan tanah. Sebaliknya, nilai distribusi tegangan tanah ($\Delta\sigma$) akibat *preload* cenderung mengecil jika tanah semakin dalam. Hal ini disebabkan nilai *influence factor* (*I*) yang juga mengecil ketika tanah semakin dalam. Nilai penurunan (*Sc*) pada lapisan atas tanah lunak lebih besar dibandingkan dengan penurunan pada lapisan bawahnya. Pada lapisan teratas, tanah mengalami penurunan sebesar 0,207 m. Sedangkan pada lapisan paling bawah (kedalaman 41 m), hanya mengalami penurunan sebesar 0,025 m. Sementara untuk besarnya penurunan total pada lapisan tanah lunak sedalam 41 m adalah sebesar 2,407 m.

3.5. Pola dan Spasi PVD Efektif

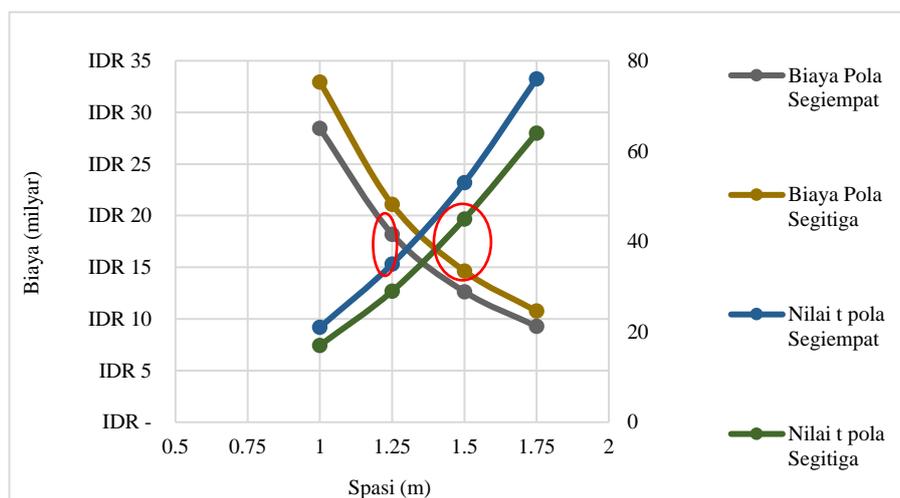
Terdapat dua pola PVD yang digunakan pada analisis yaitu pola segitiga dan pola segiempat. Ukuran PVD yang digunakan sama di setiap pola dan spasi. Tebal dan lebar potongan melintang PVD adalah 0,4 cm dan 10 cm. Sehingga diameter ekuivalen PVD tersebut adalah 5,2 cm. Sentara nilai *Cv* yang digunakan adalah 0,0024 cm²/det dan nilai *Ch* adalah 2 x *Cv* sehingga nilainya adalah 0.0049 cm²/det. Besarnya derajat konsolidasi dari pola dan spasi PVD dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Nilai derajat konsolidasi pada masing-masing pola dan spasi.

SNI 8460-2017 [6] mengharuskan pembangunan boleh dilakukan diatas tanah dengan nilai derajat konsolidasi (U) minimal 90% [6]. Dari gambar 7, pola segitiga memiliki waktu konsolidasi yang lebih pendek dibandingkan pola segiempat. Pada spasi 1 m, pola segitiga membutuhkan waktu konsolidasi selama 17 hari sedangkan pola segiempat membutuhkan waktu selama 21 hari. Pada spasi 1,25 m, pola segitiga membutuhkan waktu konsolidasi selama 29 hari sedangkan pola segi empat membutuhkan waktu 35 hari. Pada spasi 1,5 m, untuk pola segitiga dibutuhkan waktu konsolidasi 45 hari sedangkan pola segiempat butuh waktu lebih lama yaitu 53 hari. Pada spasi 1,75 m, dibutuhkan waktu konsolidasi selama 64 hari pada pola segitiga, sedangkan pola segiempat membutuhkan waktu lebih lama yaitu 76 hari.

Faktor biaya sangat dipengaruhi oleh spasi antar PVD. Prinsipnya adalah spasi yang lebih besar mengakibatkan luasan daerah pengaruh (A_e) ikut membesar. Dengan membesarnya nilai luasan pengaruh maka jumlah titik pemancangan akan menjadi lebih sedikit sehingga ketika dikali dengan kedalaman tanah lunak akan menghasilkan panjang PVD yang lebih pendek. Besarnya biaya didapatkan dengan mengalikan panjang PVD per meter dengan panjang PVD. Pada perhitungan digunakan asumsi biaya PVD adalah Rp4000.-/meter. Besar biaya dan waktu konsolidasi pada pola segitiga dan segiempat dapat dilihat pada Gambar 8.



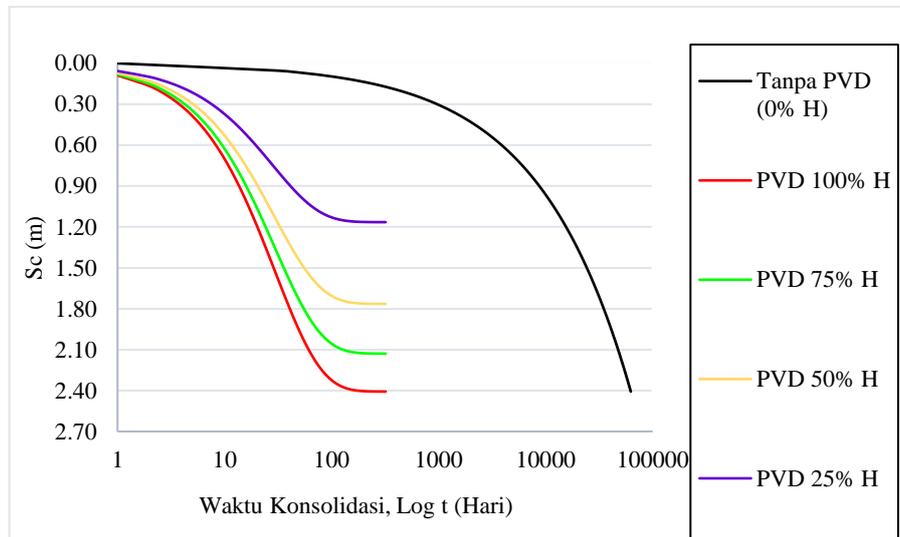
Gambar 8. Biaya dan waktu kosolidasi pada pola segitiga dan segiempat.

Spasi efektif ditentukan berdasarkan pertemuan grafik biaya dan waktu konsolidasi. Spasi yang terdekat dengan titik temu tersebut adalah spasi yang efektif. Pada pola segiempat, spasi yang terdekat dengan titik temu grafik biaya dan waktu konsolidasi adalah spasi 1,25 m. Sehingga bisa dikatakan bahwa spasi tersebut merupakan spasi paling efektif diantara spasi yang lainnya. Hal yang serupa juga ditemukan pada pola segitiga. Pertemuan grafik biaya dan waktu pada pola segitiga berada antara spasi 1,25 m dengan 1,5 m. Namun yang berbeda adalah spasi 1,5 m lebih mendekati pertemuan kedua grafik dibandingkan dengan spasi 1,25 m sehingga spasi 1,5 m dijadikan spasi yang efektif diantara spasi-spasi yang lain pada pola segitiga.

Pada pola segitiga tersebut, biaya pengadaan PVD adalah sebesar 14,64 milyar rupiah sedangkan lama waktu konsolidasi yang dibutuhkan agar mencapai derajat konsolidasi sebesar 45 hari. Sementara pola segiempat dengan spasi 1,25 m didapatkan biaya total sebesar 18,2 milyar rupiah dengan waktu konsolidasi selama 35 hari. Jika dilakukan perbandingan diantara pola segitiga spasi 1,5 m dan pola segiempat spasi 1,25 m, jarak kedua titik waktu konsolidasi dengan titik biaya (lingkaran merah) pada pola segiempat lebih kecil dibandingkan dengan kedua titik biaya dan waktu konsolidasi pada pola segitiga spasi 1,5 m. Dengan demikian pola segiempat dengan spasi 1,25 m dijadikan sebagai pola dan spasi yang paling efektif.

3.6. Waktu dan Sisa Penurunan

Penentuan waktu konsolidasi (t) dilakukan dengan cara menganalisis perubahan derajat konsolidasi (U) dari waktu ke waktu. Analisis dihentikan ketika derajat konsolidasi telah mencapai derajat konsolidasi minimal yang telah ditentukan oleh SNI 8460-2017 [6] yaitu 90%. Derajat konsolidasi dipengaruhi oleh nilai kedalaman PVD yang ditancapkan pada tanah lunak. Semakin dangkal maka semakin cepat tanah tersebut mencapai derajat konsolidasi 90%.



Gambar 9. Grafik penurunan tanah pada masing-masing kedalaman PVD.

Waktu konsolidasi dan derajat konsolidasi 90% yang didapatkan merupakan waktu yang dibutuhkan tanah dan derajat konsolidasi tanah dengan kedalaman tanah sesuai persen kedalaman PVD. Misalnya pada kedalaman 25%, kedalaman tanah dan PVD yaitu sebesar 10 m. Maka waktu konsolidasi yang dihitung adalah waktu tanah agar mencapai derajat konsolidasi 90% dari besar penurunan tanah pada kedalaman 10 m tersebut. Dengan kata lain waktu konsolidasi dan derajat konsolidasi yang didapatkan nilai relatif sesuai persen kedalaman PVD dan kedalaman tanah lunak.

Waktu konsolidasi tecepat pada variasi kedalaman PVD yaitu 66 hari yang terjadi ketika persen kedalaman PVD 25% H. Saat kedalaman PVD menjadi 50% H, dibutuhkan tambahan waktu 2 hari menjadi 68 hari agar derajat konsolidasi 90% tercapai. Pada pemancangan PVD 75% H dan 100% H, waktu yang dibutuhkan agar mencapai derajat konsolidasi 90% yaitu 69 hari. Sementara jika tidak menggunakan bantuan PVD, tanah pada lokasi pengerjaan akan mencapai nilai $U=90\%$ setelah 50670 hari atau 141 tahun kemudian. pada kedalaman PVD 25% dari tanah lunak (H), besarnya penurunana saat derajat konsolidasi 90% adalah 1,05 m. Nilai ini tidak mencapai setengah dari potensial penurunan tanah lunak total (ΣS_c).

Berdasarkan hasil perhitungan penurunan tanah secara alami dengan ketebalan tanah lunak 41 m, diperoleh penurunan total maksimal yaitu sebesar 2,4 m. Pada kedalaman PVD 50% H, PVD hanya dapat menurunkan tanah sebesar 1,59 m atau kurang lebih 2/3 dari penurunan total di lokasi tersebut. Pada kedalaman PVD 75% H dan 100% H memiliki besar penurunan yaitu 1,92 m dan 2,17 m. Sementara besar penurunan tanah tanpa PVD (0% H) saat mencapai $U=90\%$ yaitu sebesar 2,16 m yang didapatkan 141 tahun kemudian.

Nilai derajat konsolidasi 90% pada masing-masing kedalaman PVD merupakan derajat konsolidasi lokal. Meskipun memiliki nilai derajat konsolidasi yang sama yaitu 90% namun besarnya penurunan (S_c) tanah berbeda-beda. Hal ini dikarenakan pada pemancangan PVD yang tidak sedalam tanah lunak (41m) akan menyisakan sebagian tanah dimana tanah tersebut terkonsolidasi dalam jangka waktu sangat lama akibat air pori tanah tersebut tidak mengalir keluar dikarenakan tidak ada PVD. Konsolidasi dari sisa

tanah yang tidak terpancang PVD akan dianggap sebagai konsolidasi alami sehingga perhitungannya menggunakan derajat konsolidasi tanah alami pada tahun sembarang yang ingin di tinjau. Hal ini yang menyebabkan besarnya penurunan pada masing-masing kedalaman PVD berbeda-beda meskipun secara perhitungan tiap variasi kedalaman PVD menunjukkan derajat konsolidasi 90%.

Besarnya sisa pemampatan tanah 10 tahun kemudian sangat dipengaruhi oleh kedalaman PVD. Semakin dalam PVD yang dipancang maka sisa pemampatan pada tanah lunak akan semakin kecil. Sisa pemampatan setelah 10 tahun pada tanah tanpa PVD adalah 1,75 m. Dengan kata lain pada titik ini total penurunan tanah yang terjadi selama 10 tahun hanya sebesar 0,65 m. Pada kedalaman PVD 25% H sisa pemampatan yang belum terjadi adalah sebesar 1,03 m. Dengan demikian tanah yang telah memampat selama 10 tahun akibat PVD sedalam 10 m adalah sebesar 1,37 m.

Sisa pemampatan tanah selama 10 tahun akibat pemasangan PVD 50% H (21 m) adalah 0,62 m dengan besar pemampatan yang telah terjadi adalah 1,78 m. Pada kedalaman PVD 75% H (31 m), tanah telah memampat sebesar 2,03 m setelah 10 tahun kemudian dan sisa tanah yang belum memampat adalah 0,368 m. Sementara saat PVD ditancapkan 100% H (41 m) hanya menyisakan 0,179 m tanah yang belum memampat dengan kata lain tanah yang termampat adalah 2,21 m.

Tabel 3. Nilai Sc dan waktu konsolidasi pada variasi kedalaman PVD.

Persen kedalaman PVD	Waktu konsolidasi untuk mencapai U=90% (hari)	Besar penurunan Saat mencapai U=90% (m)	Sisa penurunan terhadap Sc total (m)	Nilai U terhadap Sc Total (%)
0% H	50670	2.16742	0.24014	90.0%
25% H	66	1.05177	1.35580	43.7%
50% H	68	1.59143	0.81614	66.1%
75% H	69	1.92275	0.48482	79.9%
100% H	69	2.17147	0.23610	90.2%

H = kedalaman tanah lunak (41 m)

Tabel 4. Nilai *rate of settlement* dari variasi kedalaman PVD.

Persen Kedalaman PVD	Penurunan 10 Tahun (m)	Sisa Sc 10 Tahun (m)	Total Pemampatan Setelah 10 Tahun (m)	ROS 10 tahun (cm/tahun)
0% H	0.578	1.752	0.655	5.777
25% H	0.325	1.030	1.377	3.253
50% H	0.196	0.620	1.787	1.958
75% H	0.116	0.368	2.039	1.163
100% H	0.057	0.179	2.228	0.567

H = kedalaman tanah lunak (41 m)

Tabel 4 memperlihatkan bahwa PVD yang semakin dalam akan menurunkan nilai dari *rate of settlement*. Nilai *rate of settlement* tanpa PVD dan PVD kedalaman 25% H berturut-turut adalah 5,777 cm/tahun dan 3,253 cm/tahun. Nilai dari keduanya melebihi dari 2 cm/tahun sehingga kedua variasi kedalaman

PVD ini tidak disarankan untuk digunakan pada lokasi pengerjaan. Sementara pada kedalaman PVD 50% H, 75% H dan 100% H memiliki *rate of settlement* sebesar 1,958 cm/tahun, 1,163 cm/tahun dan 0,567 cm/tahun dimana nilai tersebut masih berada dibawah nilai yang di izinkan.

3.7. Differential Settlement kedalaman PVD

Besarnya nilai *tolerable settlement* bergantung kepada struktur bangunan yang akan dibangun diatas tanah tersebut. Berdasarkan [15], nilai *tolerable settlement* yang digunakan pada perhitungan adalah 0,002. Jika didapatkan nilai yang melebihi nilai ini maka perhitungan penurunan tanah akibat beban seperti yang direncanakan dalam perhitungan tidak dianjurkan untuk di terapkan di lokasi proyek. Kedalaman PVD 0% H menghasilkan nilai *differential settlement* sebesar 0,00003 pada titik 100 m dan nilai tersebut berubah menjadi 0,00015 jika ditinjau 150 m dari pusat beban. Hal ini dikarenakan nilai penurunan tanah di titik 150 m lebih kecil dibandingkan penurunan di titik 100 m dari pusat beban. Hal yang berbeda ketika tanah lunak tersebut di tancapkan dengan PVD.

Besar *differential settlement* pada PVD kedalaman 25%, 50%, 75% dan 100% H di titik 100 m adalah 0,00052, 0,00078, 0,00093 dan 0,00108. Sementara di titik 150 m nilainya berkurang yaitu menjadi 0,00035, 0,00054, 0,00068 dan 0,00085. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin dalam pemancangan PVD maka perbedaan pemampatan juga semakin besar. Selain itu diketahui juga bahwa keseluruhan kedalaman PVD menghasilkan nilai *differential settlement* yang memenuhi ketentuan yang diizinkan yaitu tidak melebihi angka 0,002 sehingga variasi kedalaman PVD dapat di terapkan di lapangan.

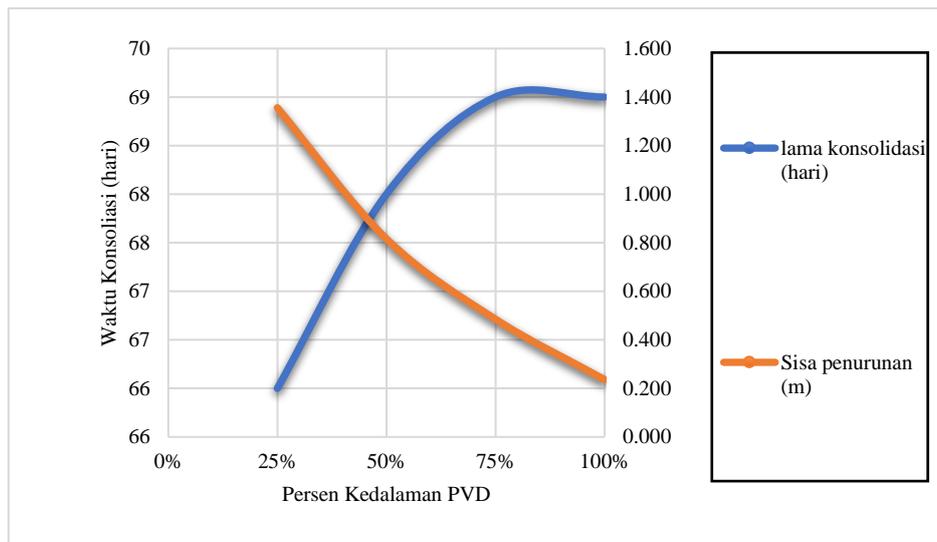
Tabel 5. Nilai *tolerable settlement* pada variasi kedalaman PVD.

Kedalaman PVD (%)	Sc di pusat beban (m)	Sc 100 m dari pusat (m)	Sc 150 m dari pusat (m)	<i>differential settlement</i> (100 m)	<i>differential settlement</i> (150 m)	OK/not OK
0% H	2.16742	2.16429	2.14430	0.00003	0.00015	ok
25% H	1.05177	0.99975	0.99954	0.00052	0.00035	ok
50% H	1.59143	1.51343	1.51071	0.00078	0.00054	ok
75% H	1.92275	1.82946	1.82056	0.00093	0.00068	ok
100% H	2.17147	2.06357	2.04451	0.00108	0.00085	ok

3.8. PVD Efektif dan Total Biaya

Perhitungan PVD optimum dilakukan berdasarkan dampak secara teknis dari PVD terhadap tanah lunak yaitu lama waktu konsolidasi yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dan juga besarnya sisa penurunan tanah. Waktu konsolidasi berbanding terbalik dengan sisa pemampatan. Pertemuan keduanya terjadi antara kedalaman 25% dan 50%. Namun titik pertemuan grafik keduanya lebih mendekati kedalaman 50% dibandingkan dengan 25%. Selain itu, dengan melakukan pengecekan kembali terhadap nilai *rate of settlement* (RoS) dan *differential settlement* (tabel 4.5 dan 4.6), pemasangan PVD 50% tidak melebihi nilai maksimal yang diizinkan. *rate of settlement* yang didapatkan adalah sebesar 1,958 cm/tahun dimana nilai maksimal yang diizinkan adalah 2 cm/tahun.

Nilai *differential settlement* yang dihasilkan adalah 0,00054 dan 0,00078 untuk jarak mendatar 100 m dan 150 m dari pusat beban. Kedua nilai ini masih berada dibawah nilai yang diizinkan yaitu sebesar 0,002. Sementara pada kedalaman PVD 25%, *rate of settlement* yang diperoleh melebihi 2 cm/ tahun sehingga pemasangan PVD pada kondisi ini tidak disarankan. Dengan demikian kedalaman PVD optimum yang dipilih untuk lokasi tersebut adalah PVD kedalam 50% (21 m).



Gambar 10. Perpotongan kurva waktu konsolidasi dan sisa pemampatan.

Terdapat beberapa aspek yang diperhitungkan dalam pembuatan biaya yaitu pengadaan bahan, tenaga kerja, dan alat yang digunakan. Pengadaan bahan mencakup pengadaan PVD itu sendiri dan juga plat angkur yang digunakan ketika akan menancapkan PVD. Tenaga kerja terdiri dari operator *excavator* sebanyak 1 orang, pekerja 5 orang dan mandor sebanyak 1 orang. Sementara alat berupa satu unit *excavator* yang lengannya telah dimodifikasi dan satu mobil pengangkut logistik. Biaya total yang dibutuhkan dalam pengerjaan perbaikan tanah menggunakan PVD kedalaman 50% dari tanah lunak.

Tabel 6. Biaya perbaikan tanah dengan PVD 50% kedalaman tanah lunak.

No.	Pekerjaan	satuan	kuantitas	Harga satuan (Rp)	Harga (Rp)
A	Pengadaan Bahan				
	PVD	meter	2275420	3,000	6,826,259,620
	plat angkur	bh	110996	250	27,749,023
B	Tenaga Kerja				
	Operator				
	Excavator	hari	55	150,000	8,324,707
	Pekerja	hari	277	125,000	34,686,279
	Mandor	hari	55	180,000	9,989,648
C.	Alat				
	Excavator Hitachi				
	berat 50 ton	hari	55	3,080,000	170,933,981
	Mobil Box PVD	hari	55	292,500	16,087,500
				Total	7,094,030,757

Pengerjaan PVD sedalam 50% tanah lunak membutuhkan lama pengerjaan sekitar 55 hari dengan asumsi durasi kerja selama 8 jam/hari dan laju pengerjaan pemancangan PVD adalah 1000 titik/hari. Panjang material PVD yang dibutuhkan pada luas pengerjaan sebesar 174000 m² adalah 2275420 m. Nilai ini didapatkan dari perkalian banyak titik pemancangan yaitu 110996 titik dengan panjang PVD yang dipancang yaitu 21 m. Sementara untuk plat angkur, jumlah yang dibutuhkan sesuai dengan jumlah titik

pemancangan yaitu 110996 buah. Harga material PVD diasumsikan sebesar Rp3.000/m dan plat angkur sebesar Rp250/buah. Jumlah pekerja sebanyak 7 orang dengan rincian 1 orang operator *excavator* dengan asumsi upah sebesar Rp150.000 /hari/orang, 5 orang pekerja dengan asumsi upah sebesar Rp125.000 /hari/orang dan 1 orang mandor dengan asumsi upah sebesar Rp180.000 /hari/orang.

Penggunaan *excavator* dikenakan biaya berupa pembelian bahan bakar (solar) dan biaya penyewaan. Kebutuhan bahan bakar *excavator* diasumsikan sebesar 300 liter/hari sementara biaya penyewaan *excavator* diasumsikan sebesar Rp175.000 /jam. Sementara mobil logistik dikenakan biaya pembelian bahan bakar dengan asumsi penggunaan bahan bakar adalah 25 liter/hari dan biaya perawatan sekitar Rp100.000/hari. Dengan demikian total biaya yang dibutuhkan pada proyek pengerjaan perbaikan tanah dengan menggunakan PVD adalah Rp7.094.030.757.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Kedalaman tanah lunak yang didapatkan dari hasil penyelidikan lapangan pada lokasi reklamasi pelabuhan belawan fase 2 adalah 41 m. Dari kedalaman tersebut yang dapat dimampatkan adalah sebesar 2,407 m. Waktu yang dibutuhkan agar tanah mencapai derajat konsolidasi 90% menggunakan PVD sedalam 25%, 50%, 75% dan 100% tanah lunak berturut-turut adalah 66, 68, 69 dan 69 hari. Sementara jika tidak menggunakan PVD dibutuhkan waktu selama 50670 hari untuk mencapai derajat konsolidasi 90%. Semakin pendek PVD maka waktu konsolidasi semakin lama tetapi penurunan total yang terjadi semakin kecil.
2. Kedalaman PVD yang optimum dari segi waktu konsolidasi dan sisa penurunan adalah kedalaman PVD 50%. Waktu konsolidasi yang didapatkan dengan kedalaman ini adalah 68 hari dengan sisa pemampatan tanah yang dapat dilakukan sebesar 1,59 m dari total pemampatan tanah 2,407 m.
3. Biaya yang dibutuhkan dalam pengerjaan perbaikan tanah menggunakan PVD dengan menggunakan kedalaman yang optimum adalah Rp7.094.030.757

Daftar Pustaka

- [1] Setiono BA. Analisis Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja pelabuhan. *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan*. 2010 Sep 1; 1(1):39-60.
- [2] Hutagalung M, Tarigan SD. Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa (Studi Kasus: Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan Fase-2). *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*. 2019 May 31; 2(1):15-33.
- [3] Balamba S, Sumampouw JE. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Kestabilan Struktur Embankment Pada Daerah Reklamasi (Studi Kasus: Pulau Gangga). *TEKNO*. 2015 Dec 15; 13(64):66-74.
- [4] Sholeh M, Novianto D. Pengaruh Penambahan Serbuk Bata Merah terhadap Stabilitas Tanah Lempung sebagai Tanah Dasar Jalan. *Media Teknik Sipil*. 2012; 10(1):20-26
- [5] Kuswanda WP. Perbaikan Tanah Lempung Lunak Metoda Preloading Pada Pembangunan Infrastruktur Transportasi Di Pulau Kalimantan. *Infoteknik*. 2016; 188-207.
- [6] Badan Standardisasi Nasional [BSN]. *Persyaratan Perancangan Geoteknik 2017*. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional. SNI 8460:2017.
- [7] Mochtar NE. *Metode Perbaikan Tanah*. Surabaya (ID): FTSP ITS. 2012.
- [8] Wesley LD. *Mekanika Tanah*, cetakan VI. Badan Penerbit Pekerjaan Umum. 1977.

- [9] Kadir. *Statistika untuk Penelitian Ilmu-Ilmu Sosial*. Jakarta (ID): Rosemata Sampurna. 2010.
- [10] Absi E. *Stabilite Au Flambage Des Structures Tridimensionnelles*. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances De L Academie Des Sciences. 1965 Jan 1; 260(8):2125.
- [11] Wahyudi H. *Teknik Reklamasi*. Surabaya (ID): Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 1997.
- [12] Das BM. *Principle of Foundation Engineering*, 7th Edition. Stamford (US): CENGAGE Learning. 2011.
- [13] Yeung AT. *Design curves for prefabricated vertical drains*. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 1997 Aug; 123(8):755-759.
- [14] Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah [Kimpraswil] . *Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi*. Jakarta (ID): Kementrian Pekerjaan Umum. 2002.
- [15] NAVFAC DM-7, *Design manual-Soil mechanics, foundations, and earth structures*, Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, Washington, D.C., 1971.
- [16] Bowles J. *Sifat-Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta (ID): Erlangga. 1984.