

Perbaikan Tanah Dasar Menggunakan *Pre-Fabricated Vertical Drain* Dengan Variasi Kedalaman Dan Perkuatan Lereng Dengan Turap

Studi Kasus : Lapangan Penumpukan Peti Kemas, Pelabuhan Trisakti, Banjarmasin, Kalimantan Selatan

Dofran Winner, Noor Endah, Putu Tantri Kumalasari
 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember
 Jl. Raya ITS, Surabaya 60111
 E-mail: noormochtar@gmail.com, tantrigeoteknik@gmail.com

Abstrak - Metode perbaikan tanah dasar menggunakan preloading yang dikombinasikan dengan *Pre-fabricated Vertical Drain* (PVD) dipilih untuk proyek pengembangan lapangan penumpukan peti kemas di Pelabuhan Trisakti, Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Selama masa preloading, ternyata kelongsoran selebar 37 meter terjadi di area penumpukan. Diketahui bahwa kelongsoran terjadi saat preloading setinggi 4,0 meter. Agar lapangan penumpukan dapat beroperasi kembali, diperlukan perencanaan untuk perkuatan lereng dan untuk menghilangkan pemampatan tanah dasar di area lapangan penumpukan.

Perbaikan tanah dasar menggunakan preloading yang dikombinasikan dengan *Pre-fabricated Vertical Drain* (PVD) digunakan untuk Zona 3, 4, dan 5, dan perkuatan lereng dengan turap digunakan untuk Zona-1 dan Zona-2 yang merupakan bagian lereng dari lapangan penumpukan. Direncanakan PVD dipasang pada kedalaman yang berbeda: 1/3H, 2/3H, dan H (H adalah ketebalan lapisan tanah lunak) untuk melihat kondisi yang menghasilkan biaya paling murah.

Dari hasil perencanaan yang dilakukan, diketahui bahwa turap yang digunakan adalah *Corrugated Concrete sheet pile type W-600 A1000*. Turap dipasang sedalam 18 meter di Zona-1 dan sedalam 22 meter di Zona-2; selain itu, angker dipasang pada turap untuk meningkatkan kekakuan turap. Hasil perencanaan juga menunjukkan bahwa biaya yang paling ekonomis adalah PVD dipasang sampai 2/3H di Zona-3, dan tanpa PVD di Zona-4 dan Zona-5. Total biaya konstruksi adalah sebesar Rp 843.106.053,00 untuk Zona-1 dan Zona-2; Rp 9.446.530.597,00 untuk Zona-3; Rp 1.869.613.200,00 untuk Zona 4; dan Rp 3.577.392.000,00 untuk Zona 5.

Kata Kunci - Lapangan Penumpukan Peti Kemas, *Pre-fabricated Vertical Drain* (PVD), Preloading, Turap

I. PENDAHULUAN

PELABUHAN Trisakti merupakan pelabuhan terbesar dan tersibuk di Kalimantan yang berfungsi sebagai pintu gerbang arus keluar masuk barang ekspor-impor, maupun barang antar pulau dan negara. Pelabuhan ini memiliki terminal peti kemas, terminal penumpang, terminal curah kering, dan terminal *general cargo*. Pelabuhan Trisakti merupakan pelabuhan kelas IA dalam lingkungan PT Pelindo III.

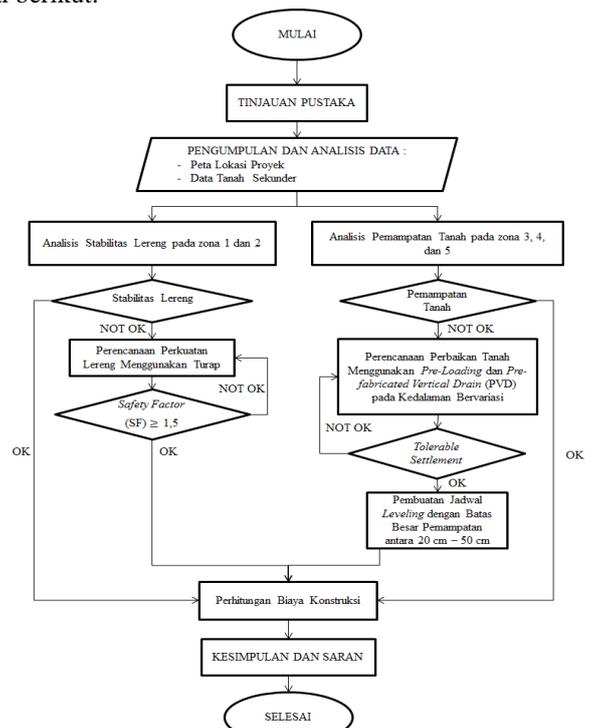
Dengan berjalannya waktu, kebutuhan akan jasa pelabuhan semakin meningkat. Pada tahun 2013, PT Pelindo III merencanakan pengembangan dermaga dan *container yard* (lapangan penumpukan peti kemas)..

Proyek pengembangan dermaga dan *container yard* ini menggunakan metode pra-pembebanan (*pre-loading*) dan pemasangan drainase vertikal (*vertical drain*). Lapangan penumpukan peti kemas ini didesain untuk menerima beban peti kemas 20 kaki dengan berat 24,00 ton per peti kemas setinggi 4 susun; dan peti kemas 40 kaki dengan berat 30,48 ton per peti kemas setinggi 4 susun. Namun, kurang dari satu bulan setelah lapangan penumpukan digunakan, konstruksi mengalami pergeseran, penurunan, dan retak-retak.

Oleh karena permasalahan tersebut, maka dilakukan analisis ulang. Dari hasil analisis tersebut diketahui bahwa kerusakan yang terjadi di *container yard*, dikarenakan adanya timbunan setinggi 4,00 meter, dimana kondisi ini menyebabkan kelongsoran yang berakibat pada terjadinya kerusakan. Oleh karena itu, perbaikan tanah *container yard* harus segera dilakukan agar dapat segera difungsikan kembali.

II. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam perencanaan adalah sebagai berikut:



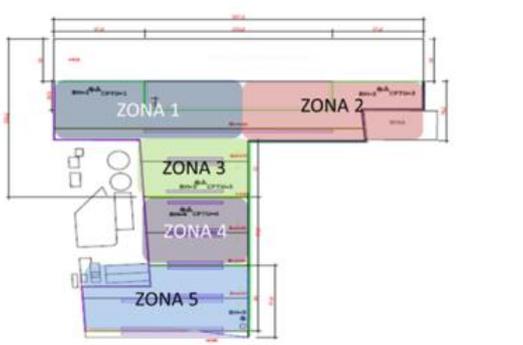
Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Perencanaan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data dan Analisis

Data Tanah Dasar

Data tanah yang digunakan dalam Penelitian ini adalah data *borlog* dan laboratorium dari laporan sementara hasil penyelidikan tanah pada area Penumpukan Petikemas Pelabuhan Trisakti Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Data *borlog* yang tersedia merupakan hasil pekerjaan penyelidikan tanah Tahap I yang meliputi pemboran di 5 (lima) titik dengan kedalaman 50,0 m dan sondir sebanyak 4 (empat) titik. Sampel tanah asli (*undisturbed sample*) diambil dari 5 titik bor, yaitu BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, dan BH-5 pada kedalaman yang berbeda. Rekapitulasi data tanah pada setiap titik bor hasil analisis menggunakan metode statistik distribusi dan rumus korelasi, dapat dilihat pada buku Penelitian Penulis [1]. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa tanah dasar memiliki perbedaan lapisan di setiap titik bor sehingga berdasarkan lokasi-lokasi titik bor tersebut, dilakukan zonifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Zonifikasi

Data Tanah Timbunan

Spesifikasi teknis dari material timbunan adalah sebagai berikut:

- Sifat fisik tanah timbunan :

$$C = 0 \quad \gamma_t = 1,85 \text{ t/m}^2$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 1,85 \text{ t/m}^2 \quad \phi = 30$$

- Geometri Timbunan :

Tinggi tanah timbunan (H_{final}) direncanakan sebesar 1,40 m dari tanah dasar dengan luas area timbunan sebesar 32.000 m².

Data Beban

Kondisi 1 (4 susun peti kemas 20 kaki) :

Panjang = 5,885 m

Lebar = 2,35 m

Berat = 24 ton

Luas = 13,83 m²

$$P_{20} = 4 \times 24 \text{ ton} / 13,83 \text{ m}^2 = 6,94 \text{ ton/m}^2$$

Kondisi 2 (4 susun peti kemas 40 kaki) :

Panjang = 12,033 m

Lebar = 2,35 m

Berat = 30,48 ton

Luas = 28,28 m²

$$P_{40} = 4 \times 30,48 \text{ ton} / 28,28 \text{ m}^2 = 4,31 \text{ ton/m}^2$$

Dari hasil perhitungan di atas, maka dipilih kondisi 1 karena menghasilkan beban terbesar. Setelah itu, menghitung beban dari *rigid pavement* setebal 25 cm:

$$P_{\text{slab}} = \text{tebal rigid pavement} \times \gamma_{\text{beton}}$$

$$= 0,25 \text{ m} \times 2,4 \text{ ton/m}^3 = 0,6 \text{ ton/m}^2$$

Maka, perhitungan beban total adalah sebagai berikut :

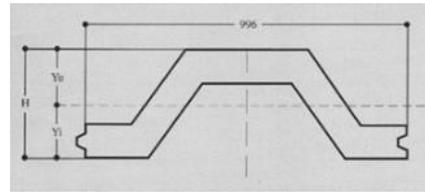
$$q_{\text{beban}} = P_{20} + P_{\text{slab}} = 7,54 \text{ ton/m}^2$$

Data Sheet Pile Beton

Type sheet pile = *Corrugated Type* W-600 A1000

Section Modulus = 25530 cm³

Momen Inersia = 765907 cm⁴



Gambar 3. Penampang Profil Sheet Pile Beton

Data PVD

Jenis PVD yang digunakan pada perencanaan ini adalah *CeTeau Drain* CT-D822 dari produksi PT. Teknindo Geosistem Unggul dengan spesifikasi sebagai berikut :

Weight = 75 g/m Width (b) = 4 mm

Thickness (a) = 100 mm

B. Perencanaan Geoteknik

Analisis Kelongsoran Talud Sebelum Perkuatan

Analisis kelongsoran talud sebelum perkuatan dilakukan untuk memeriksa nilai *Safety Factor* lereng akibat beban yang bekerja. Pemeriksaan dilakukan pada Zona 1, yang diwakili data tanah BH.1 dan Zona 2, yang diwakili data tanah BH.2. Analisis dilakukan dengan beban *surchage* dari beban petikemas sebesar 7,54 t/m². Nilai *safety factor* (SF) yang didapatkan dari analisis menggunakan program bantu *Geoslope* pada Zona 1 dan Zona 2 ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1.

Nilai SF dan R Analisis Stabilitas Talud

Zona	SF	R
1	1.101	34.7
	1.103	28.467
	1.104	26.267
2	0.735	32.14
	0.766	31.84
	0.894	31.5

Dari hasil analisis diperoleh nilai SF untuk Zona 1 adalah diatas satu, sedangkan untuk Zona 2 adalah dibawah satu. Nilai SF Zona 1 walaupun sudah diatas satu, namun masih memiliki tingkat keamanan yang kecil. Oleh karena itu, kedua zona memerlukan perkuatan untuk dapat mencapai *safety factor* rencana yakni sebesar 1,5[2].

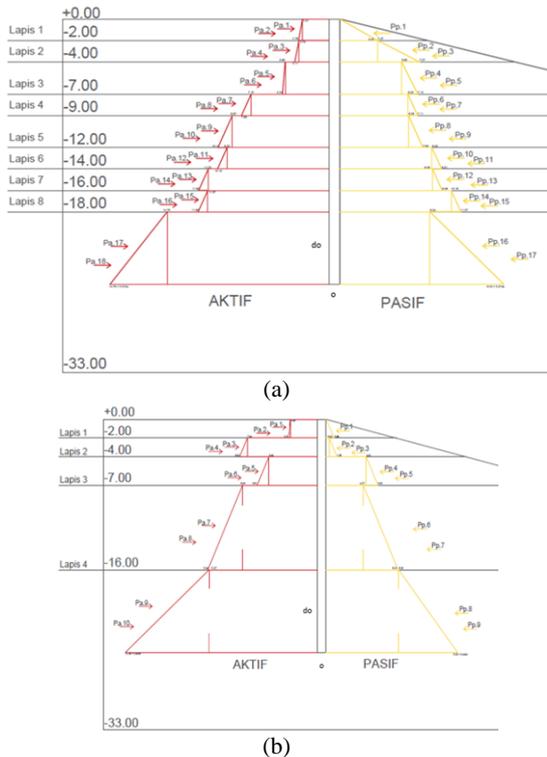
Perencanaan Perkuatan Talud dengan Turap

1. Perencanaan Turap tanpa Angker

Berikut tahapan dalam merencanakan turap tanpa angker:

1. Menentukan Asumsi Kedalaman Turap (do).
2. Nilai do pada BH.1 diasumsi di bawah kedalaman 18 m, sedangkan pada BH.2 diasumsi di bawah kedalaman 16 m.
3. Menghitung Tegangan Horizontal Aktif dan Pasif.
4. Mencari Nilai do.

Sketsa gaya-gaya yang bekerja pada turap ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan gaya-gaya tersebut, dilakukan perhitungan momen yang bekerja. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada [1]. Perhitungan untuk mendapatkan persamaan momen $\Sigma M = 0$ ditunjukkan pada Tabel 2. Titik putar momen berada pada dasar turap.



Gambar 4. Sketsa Gaya-gaya yang Bekerja: (a) BH.1; (b) BH.2

Tabel 2. Perhitungan Persamaan Momen $\Sigma M=0$: (a) BH.1, (b) BH.2

Persamaan Momen BH.1			
AKTIF	$0.07 do^3 + 4.75 do^2 + 124.68 do + 841.64 = 0$		do (m)
PASIF	$0.08 do^3 + 6.70 do^2 + 129.14 do + 929.46 = 0$		
TOTAL	$-0.01 do^3 + -1.95 do^2 + -4.46 do + -87.82 = 0$		0.00
TOTAL PANJANG TURAP (m) :			18.00

Persamaan Momen BH.2			
AKTIF	$0.07 do^3 + 4.74 do^2 + 113.13 do + 738.21 = 0$		do (m)
PASIF	$0.08 do^3 + 5.46 do^2 + 91.91 do + 553.81 = 0$		
TOTAL	$-0.01 do^3 + -0.72 do^2 + 21.22 do + 184.41 = 0$		26.533
TOTAL PANJANG TURAP (m) :			47.84

4. Menghitung Panjang Total Turap.

Setelah menghitung dengan pencarian faktor dari persamaan pangkat tiga, maka didapatkan nilai do untuk BH.1 adalah 0 m, sedangkan untuk BH.2 adalah 26,533 m. Nilai do ini kemudian dikalikan dengan angka keamanan, SF = 1,2 lalu dijumlahkan dengan tebal lapisan tanah di atasnya.

Sehingga total panjang turap yang dibutuhkan pada BH.1 adalah sebesar 18 m, dan pada BH.2 adalah sebesar 47,84 m \approx 48 m.

5. Menentukan Jumlah Turap yang akan Dipasang.

Jumlah turap yang akan dipasang ditentukan dari perbandingan antara *section modulus* yang terjadi akibat momen yang bekerja pada turap dibandingkan dengan *section modulus* dari jenis turap yang digunakan. Dikarenakan *section modulus* turap *Corrugated Type W-600 A1000* adalah sebesar 25530 cm³ dan lebih besar dari *section modulus* akibat momen yang bekerja pada turap, maka hanya dibutuhkan 1 buah turap tiap meter panjang melintang lereng.

Nilai do untuk BH.1 adalah 0 m diakibatkan gaya aktif yang bekerja pada turap lebih kecil dibandingkan dengan gaya pasif. Hal ini sesuai dengan analisis stabilitas lereng yang dilakukan sebelumnya bahwa nilai SF pada zona 1

lebih besar dari 1(satu). Namun, pemasangan turap tetap dilakukan dengan kedalaman 18 m untuk meningkatkan angka keamanan zona 1.

2. Perencanaan Turap Berangker

Perencanaan turap berangker dilakukan hanya pada zona 2. Hal ini dilakukan untuk mengurangi panjang turap yang dibutuhkan karena kebutuhan panjang turap tanpa angker yakni sebesar 48 m. Letak angker berada 1 m dibawah permukaan tanah dasar. Tahapan perhitungan turap berangker kurang lebih sama dengan perhitungan turap tanpa angker, namun yang membedakan adalah titik putar momen berada pada titik angker dipasang dan terdapat perhitungan dimensi angker. Perhitungan persamaan momen di BH.2 akibat angker ditunjukkan pada [1]. Dari hasil perhitungan diketahui total panjang turap adalah 22 m.

1. Menentukan Diameter Baja Angker

Tabel 3 menunjukkan rekapitulasi gaya aktif dan pasif total, serta kuat tarik angker yang dibutuhkan.

Tabel 3.
Rekapitulasi Gaya Aktif, Pasif, dan Tarik Angker

Σ Gaya Aktif (ton)	159.934
Σ Gaya Pasif (ton)	145.9918
Gaya pada Angkur, T (ton)	13.94216

Direncanakan jarak antar angker 2 meter, maka:

$$2 \times T = 27,884 \text{ ton}$$

$$\sigma \text{ Angker} = 1000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma \text{ Angker} = \frac{T}{A} = \frac{2T}{0,25\pi D^2}$$

$$1000 = \frac{T}{A} = \frac{2T}{0,25\pi D^2}$$

$$D = 6 \text{ cm}$$

Maka diameter baja angker yang dibutuhkan adalah 6 cm.

2. Merencanakan Blok Angker

Asumsi dimensi blok angker:

$$H = 2 \text{ m}$$

$$h = 1,5 \text{ m}$$

$$K_o = 0,4$$

Menurut Teng (1962) apabila $H/h \leq 1,5$ maka tinggi blok angker (h) dapat dihitung sebagai H.

Gaya yang bekerja pada blok angker dihitung sebagai berikut:

$$P_a = \frac{1}{2} H^2 \gamma K_a \times 2 = \frac{1}{2} \times 2^2 \times 1,20 \times 0,41 \times 2 = 1,948 \text{ t}$$

$$P_p = \frac{1}{2} H^2 \gamma K_p \times 2 = \frac{1}{2} \times 2^2 \times 1,20 \times 2,46 \times 2 = 11,827 \text{ t}$$

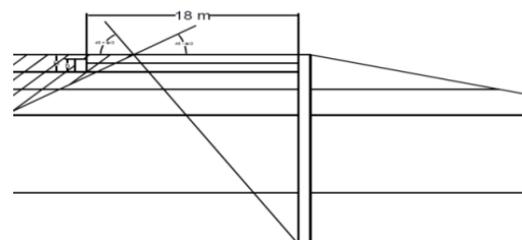
Dengan Persamaan 2.48 pada [1], $T_{ult} = 1,5 \times T$, lebar blok angker (B) dapat dihitung sebagai berikut:

$$20,913 \leq B(11,827 - 1,948) + \frac{1}{3} \cdot 0,4 \cdot 1,20(\sqrt{2,46} + \sqrt{0,41}) \cdot 2^3 \cdot tg30^\circ$$

$$B = 2 \text{ m}$$

3. Menghitung Panjang Baja Angker

Letak angker harus terletak pada daerah di belakang garis kelongsoran[4]. Dari sketsa skalatis letak blok angker, didapatkan panjang angker yang digunakan adalah 18 m. Sketsa panjang angker ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Sketsa Panjang Angker

Analisis Kelongsoran Setelah Perkuatan

Pemeriksaan dilakukan pada zona 1 setelah dipasang perkuatan turap tanpa angker sedalam 18 m dan pada zona 2 setelah dipasang perkuatan turap berangker sedalam 22 m. Tabel 4 berikut ini adalah nilai *safety factor* (SF) yang didapatkan dari analisis menggunakan program bantu *Geoslope* pada Zona 1 dan Zona 2. Dari hasil analisis tersebut, diperoleh *safety factor* stabilitas lereng setelah menggunakan perkuatan pada kedua zona adalah $\geq 1,5$

Tabel 4.

Nilai SF dan R Analisis Stabilitas Setelah Perkuatan

Zona	SF	R
1	1.507	27.23
	1.531	26.15
	1.604	32.4
2	1.501	30.3
	1.504	31.76
	1.524	29.56

Perhitungan Timbunan Preloading

Perhitungan *preloading* direncanakan pada Zona 3, 4, dan 5 yang data tanahnya masing-masing diwakili BH.3, BH.4, dan BH.5. Perencanaan ini memperhatikan pemampatan tanah akibat konsolidasi primer (*primary consolidation*) yaitu pada kondisi *overconsolidated* dengan pertimbangan kondisi tanah yang dipengaruhi oleh fluktuasi muka air laut. Tegangan akibat fluktuasi air sebesar 3 t/m². Perhitungan tersebut memperoleh besar pemampatan (Sc), tinggi timbunan awal (*H-Initial*), dan tinggi timbunan akhir (*H-Final*) untuk perencanaan. Untuk mendapatkan nilai *H-Initial* dilakukan perhitungan pemampatan tanah dasar dengan variasi pemberian beban timbunan (q) [3], sedangkan *H-Final* diketahui setinggi 1,4 m dari permukaan tanah dasar. Perhitungan *H-Initial* dilakukan pada masing-masing alternatif kedalaman *Pre-fabricated Vertical Drain* (PVD) di setiap zona yaitu:

1. Alternatif panjang PVD penuh
2. Alternatif panjang PVD 2/3 tanah lunak
3. Alternatif panjang PVD 1/3 tanah lunak
4. Alternatif tanpa PVD

Variasi kedalaman PVD tersebut akan mengakibatkan tinggi *H-Initial* dan besar pemampatan yang berbeda pada masing-masing variasi. Perbedaan tersebut juga diakibatkan karena perbedaan besarnya tanah lunak yang akan memampat pada setiap zona. Berdasarkan data tanah, diperoleh lapisan mampu mampat ($N-SPT \leq 10$) pada zona 3 sedalam 34 m, zona 4 sedalam 35 m, dan zona 5 sedalam 39 m.

Perhitungan besar pemampatan (Sc) dilakukan terhadap hasil analisis data tanah. Pemampatan dihitung akibat variasi beban timbunan dan beban peti kemas. Perhitungan besar pemampatan dilakukan di tiga titik berbeda, yaitu di titik tengah timbunan, titik berjarak 10 m dari titik tengah timbunan, dan titik berjarak 15 m dari titik tengah timbunan. Perhitungan pada ketiga titik ini dilakukan untuk menghitung besarnya perbedaan pemampatan tanah dasar (*differential settlement*). Penjelasan lebih lanjut tentang *differential settlement* akan dijelaskan pada [1].

Cara perhitungan pemampatan pada alternatif kedalaman PVD yang lain sama seperti perhitungan pemampatan pada alternatif penuh, namun yang membedakan adalah besar lapisan tanah mampu mampat yang terlayani PVD. Perhitungan pemampatan dapat dilihat pada [1].

Setelah dilakukan perhitungan pemampatan, tinggi *H-Initial* dapat diperoleh dengan menggunakan (1):

$$H_{Initial} = \frac{q_{timbunan} + S_c \times (\gamma_{timb} - \gamma'_{timb})}{\gamma_{timb}} \quad (1)$$

H_{beban} merupakan tinggi timbunan yang mewakili beban petikemas dan perkerasan. H_{beban} , atau selanjutnya disebut $H_{bongkar}$, akan dibongkar setelah timbunan mengalami pemampatan sebesar yang direncanakan. Oleh karena itu persamaan H_{final} ditunjukkan pada (2):

$$H_{final} = H_{initial} - H_{bongkar} - S_c \quad (2)$$

Hubungan *H-Initial* dan *H-Final*, serta hubungan *H-Final* dan Sc kemudian dibuatkan grafik. Persamaan yang didapatkan dari grafik digunakan untuk menghitung *H-Initial* timbunan untuk mencapai *H-Final* 1,40 m dan untuk mencari besar pemampatan

Dengan cara yang sama diperoleh hasil perhitungan *H-Initial* dan Sc pada masing-masing variasi kedalaman di tiap titik bor. Rekapitulasi hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5.

Rekapitulasi *H-Initial* dan Sc: (a) BH.3; (b) BH.4; (c) BH.5

(a)

Alternatif PVD	Kedalaman (m)	H-Initial (m)	H-Bongkar (m)	H-Final (m)	Sc (m)
Penuh	34	7,6	4,08	1,40	2,08
2/3 Kedalaman	23	6,7	4,08	1,40	1,26
1/3 Kedalaman	11	5,9	4,08	1,40	0,46

(b)

Alternatif PVD	Kedalaman (m)	H-Initial (m)	H-Bongkar (m)	H-Final (m)	Sc (m)
Penuh	35	7,7	4,08	1,40	2,26
2/3 Kedalaman	23	6,8	4,08	1,40	1,37
1/3 Kedalaman	12	6,1	4,08	1,40	0,64

(c)

Alternatif PVD	Kedalaman (m)	H-Initial (m)	H-Bongkar (m)	H-Final (m)	Sc (m)
Penuh	39	8,6	4,08	1,40	3,13
2/3 Kedalaman	26	7,7	4,08	1,40	2,27
1/3 Kedalaman	13	6,9	4,08	1,40	1,38

Perhitungan Waktu Pemampatan Tanpa PVD

Setelah didapatkan besar pemampatan yang terjadi, dilakukan perhitungan waktu pemampatan. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui perlu atau tidaknya untuk mempercepat waktu pemampatan.

Dari hasil perhitungan pada [1], dengan derajat konsolidasi (U) sebesar 90% , waktu pemampatan pada zona 3 membutuhkan waktu selama 267,1985 tahun. Waktu pemampatan yang lama juga terjadi pada zona 4 dan zona 5, yakni masing-masing selama 287,4894 tahun dan 377,117 tahun.

Perencanaan PVD untuk Mempercepat Pemampatan

Perencanaan PVD dilakukan pada masing-masing variasi kedalaman di masing-masing zona. Pilihan pola pemasangan yang dihitung adalah pola segitiga dan pola segiempat dengan variasi jarak antar titik PVD sebesar 0,8 m; 1,0 m; 1,2 m; 1,4 m; 1,6 m; 1,8 m; dan 2,0 m. Variasi jarak dilakukan untuk mendapatkan jarak pemasangan PVD yang efisien.

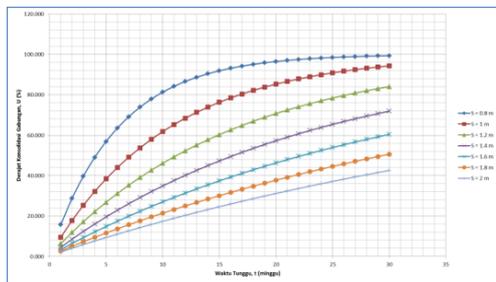
Rekapitulasi seluruh perhitungan dengan variasi jarak antar titik PVD dengan kedalaman bervariasi pada semua zona terdapat pada [1]. Dari perhitungan tersebut dihasilkan grafik hubungan \bar{U} dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi yang direncanakan. Contoh grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6 adalah hasil perhitungan pada zona 3 dengan alternatif PVD penuh. Dari grafik tersebut, dipilih pola pemasangan segitiga spasi 1,00 m dengan derajat konsolidasi sebesar 91% yang dicapai selama 25 minggu. Dengan cara yang sama pada perencanaan PVD 2/3 kedalaman, didapatkan derajat

konsolidasi 90% yang dicapai selama 18 minggu (Gambar 7) dan pada perencanaan PVD 1/3 kedalaman, didapatkan derajat konsolidasi 91% yang dicapai selama 14 minggu (Gambar 8). Pola pemasangan ditetapkan menggunakan pola segitiga dengan spasi 1,00 m pada setiap variasi kedalaman di setiap zona untuk mempermudah perhitungan dan pelaksanaan.

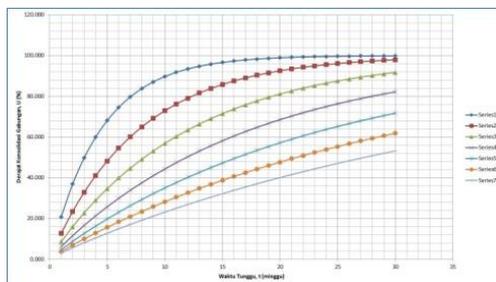
Perhitungan Differential Settlement

Perhitungan *differential settlement* dilakukan untuk menghitung toleransi pemampatan (*tolerable settlement, β*) pada setiap variasi kedalaman PVD di tiap zona akibat perbedaan pemampatan di titik-titik yang telah ditentukan sebelumnya. Rekapitulasi besar pemampatan di tiap titik di bawah timbunan ditunjukkan pada Tabel 6 dan rekapitulasi perhitungan besar pemampatan di tiap titik dapat dilihat pada [1].

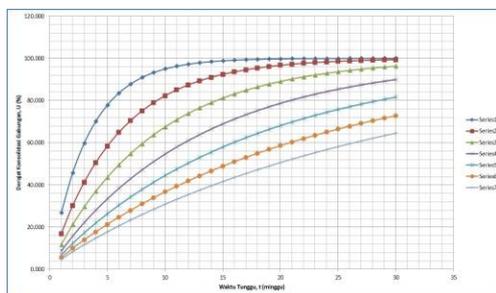
Nilai *tolerable settlement* dipengaruhi oleh jenis struktur di atas tanah dasar. Berdasarkan Tabel 2.5 pada [1], nilai *tolerable settlement* yang digunakan adalah sebesar 0,015. Nilai *tolerable settlement* pada tiap zona dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.36 dari [1]. Rekapitulasi nilai *tolerable settlement* ditunjukkan pada Tabel 7.



Gambar 6 Grafik Hubungan antara Derajat Konsolidasi (\bar{U}) dan Waktu pada Alternatif PVD Penuh di BH.3



Gambar 7 Grafik Hubungan antara Derajat Konsolidasi (\bar{U}) dan Waktu pada Alternatif PVD 2/3 Kedalaman di BH.3



Gambar 8 Grafik Hubungan antara Derajat Konsolidasi (\bar{U}) dan Waktu pada Alternatif PVD 1/3 Kedalaman di BH.3

Tabel 6. Rekapitulasi Besar Pemampatan di Tiap Titik di Bawah Timbunan: (a) BH.3; (b) BH.4; (c) BH.5

(a)

Kedalaman PVD (m)	Lapisan di Bawah PVD (m)	Sc (m)	Sisa Pemampatan (m)	Sisa Pemampatan (m)	Jarak antara Tengah dan Titik 10 m (m)	Sc di Titik 15 m (m)	Sisa Pemampatan (m)
34	0	2.08	0.00	0.00	10	1.82	0.00
23	11	1.26	0.82	0.70	10	1.17	0.65
11	23	0.46	1.63	1.46	10	0.44	1.37
0	34	2.08	2.08	1.91	10	1.82	1.82

(b)

Kedalaman PVD (m)	Lapisan di Bawah PVD (m)	Sc (m)	Sisa Pemampatan (m)	Sc di Titik 10 m (m)	Sisa Pemampatan (m)	Sc di Titik 15 m (m)	Sisa Pemampatan (m)
35	0	2.26	0.00	2.16	0.00	2.11	0.00
23	12	1.37	0.89	1.35	0.82	1.33	0.79
12	23	0.64	1.62	0.64	1.53	0.63	1.48
0	35	2.26	2.26	2.16	2.16	2.11	2.11

(c)

Kedalaman PVD (m)	Lapisan di Bawah PVD (m)	Sc (m)	Sisa Pemampatan (m)	Sc di Titik 10 m (m)	Sisa Pemampatan (m)	Sc di Titik 15 m (m)	Sisa Pemampatan (m)
39	0	3.13	0.00	2.99	0.00	2.92	0.00
26	13	2.27	0.86	2.22	0.77	2.19	0.73
13	26	1.38	1.75	1.38	1.61	1.37	1.55
0	39	3.13	3.13	2.99	2.99	2.92	2.92

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai *Tolerable Settlement* tiap Variasi Kedalaman PVD : (a) Zona 3; (b) Zona 4; (c) Zona 5

(a)

Kedalaman PVD (m)	Tolerable Settlement Titik 10 m, β	Tolerable Settlement Titik 15 m, β	
34	0.0000	0.0000	OK
23	0.0119	0.0116	OK
11	0.0165	0.0168	NOT OK
0	0.0175	0.0179	NOT OK

(b)

Kedalaman PVD (m)	Tolerable Settlement Titik 10 m, β	Tolerable Settlement Titik 15 m, β	
35	0.0000	0.0000	OK
23	0.0075	0.0071	OK
12	0.0095	0.0094	OK
0	0.0098	0.0099	OK

(c)

Kedalaman PVD (m)	Tolerable Settlement Titik 10 m, β	Tolerable Settlement Titik 15 m, β	
39	0.0000	0.0000	OK
26	0.0096	0.0090	OK
13	0.0134	0.0130	OK
0	0.0140	0.0140	OK

Berdasarkan hasil analisis tersebut, variasi PVD 1/3 kedalaman dan tanpa PVD pada zona 3 memiliki nilai *tolerable settlement* yang lebih besar dari 0,015 sehingga tidak dapat digunakan sebagai alternatif dalam perencanaan.

Perhitungan Overlay dan Penentuan Lama Waktu Overlay

Perhitungan *overlay* dilakukan pada alternatif PVD 2/3 kedalaman, PVD 1/3 kedalaman, dan alternatif tanpa PVD di setiap zona. *Overlay (levelling)* dilakukan karena pada ketiga alternatif perencanaan tersebut terdapat sisa pemampatan pada lapisan tanah lunak di bawah lapisan tanah yang terlayani PVD. Besar *overlay* ditentukan setinggi 30 cm. *Overlay* dilakukan pada tiap tahun tertentu ketika pemampatan telah terjadi sebesar 0,3 m. Besar pemampatan yang terjadi dapat diketahui dengan cara menghitung *Rate of Settlement* sehingga dapat diketahui waktu (dalam satuan tahun) diperlukannya *overlay*. Rekapitulasi waktu *overlay* pada setiap alternatif di setiap zona ditunjukkan pada Tabel 8.

Penimbunan Bertahap

Penimbunan bertahap dilakukan untuk mempermudah metode pelaksanaan di lapangan. Pelaksanaan penimbunan bertahap dilakukan dengan menggunakan perencanaan kecepatan penimbunan 0,5 m/minggu. Dengan *H-Initial* yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya, maka jumlah tahapan penimbunan berbeda-beda di tiap alternatif kedalaman PVD.

Perhitungan penimbunan bertahap dilakukan untuk mendapatkan nilai *Cu* baru. Nilai *U* yang digunakan untuk alternatif yang menggunakan PVD adalah menggunakan nilai *U* akibat PVD yang direncanakan. Perhitungan dilakukan pada tiap lapisan tanah akibat tiap tahapan penimbunan. Rekapitulasi perhitungan penimbunan bertahap dan nilai *Cu* dapat dilihat pada [1].

Perhitungan Biaya Material

1. Perhitungan Biaya Perkuatan Lereng

Material yang digunakan dalam perkuatan lereng adalah beton *precast* sebagai material turap dan *deadman* anker, serta material baja untuk *rod* anker. Biaya tiap material adalah sebagai berikut:

- Beton *precast* per m³ = Rp 820.000,00
- Rod anker per kg = Rp 7.100,00

Dimensi perencanaan turap yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 9. Rekapitulasi total biaya yang dibutuhkan di tiap zona ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 9.

Luas Turap (cm ²)	2078
Luas Turap (m ²)	0.2078
Lebar Turap (m)	0.996
Panjang Rod Angkur (m)	18
Diameter Rod Angkur (m)	0.06
Luas Blok Angkur (m ²)	3
Jarak antar Angkur (m)	2
Berat Jenis Baja (kg/m ³)	7850

Tabel 10.

Rekapitulasi Biaya Perkuatan Lereng

ZONA 1	
Panjang Lereng (m)	97.5
Kedalaman Turap yang Dipasang (m)	18.00
Jumlah Turap yang Dipasang	98
Biaya yang Dibutuhkan	Rp300,578,544.00
ZONA 2	
Panjang Lereng (m)	97.5
Kedalaman Turap yang Dipasang (m)	22.00
Jumlah Turap yang Dipasang	98
Jumlah Angkur yang Dipasang	49
Biaya yang Dibutuhkan	Rp542,527,509.91
Total Biaya Turap	Rp843,106,053.91

2. Perhitungan Biaya Alternatif Perbaikan Tanah Dasar

Material yang digunakan dalam perbaikan tanah dasar adalah sirtu sebagai timbunan *preloading* dan *overlay*, serta PVD. Untuk ongkos pembongkaran antara lain adalah ongkos pindah petikemas dan ongkos bongkar pasang paving. Biaya material dan ongkos adalah sebagai berikut:

- Sirtu per m³ = Rp 156.000,00
- PVD per m = Rp 4.500,00
- Ongkos pindah petikemas per peti = Rp 324.000,00
- Ongkos bongkar pasang paving per m² = Rp 19.430,00

Rekapitulasi biaya untuk timbunan *preloading* pada setiap alternatif di tiap zona, rekapitulasi biaya PVD dengan jarak pemasangan 1 m, rekapitulasi biaya pembongkaran, dan rekapitulasi biaya *overlay* termasuk biaya pembongkaran di

tiap tahun perencanaan *overlay* (Tabel 8) ditunjukkan pada [1]. Sedangkan rekapitulasi total biaya awal perencanaan ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11.

Rekapitulasi Total Biaya Awal Perencanaan

Zona	Alternatif PVD	Kedalaman PVD (m)	Biaya Timbunan	Biaya PVD	Total Biaya Awal
3	Penuh	34	Rp8,278,826,849.28	Rp3,100,544,150.63	Rp11,379,370,999.91
	2/3 Kedalaman	23	Rp7,379,501,163.84	Rp2,067,029,433.75	Rp9,446,530,597.59
4	Penuh	35	Rp10,335,248,478.36	Rp3,892,145,496.28	Rp14,227,393,974.64
	2/3 Kedalaman	23	Rp9,142,798,495.90	Rp2,594,763,664.18	Rp11,737,562,160.08
	1/3 Kedalaman	12	Rp8,166,374,306.06	Rp1,297,381,832.09	Rp9,463,756,138.16
	Tanpa PVD	0	Rp1,869,613,200.00	Rp0.00	Rp1,869,613,200.00
5	Penuh	39	Rp21,993,172,306.56	Rp8,298,515,226.68	Rp30,291,687,533.24
	2/3 Kedalaman	26	Rp19,786,892,448.96	Rp5,532,343,484.46	Rp25,319,235,933.42
	1/3 Kedalaman	13	Rp17,530,907,284.80	Rp2,766,171,742.23	Rp20,297,079,027.03
	Tanpa PVD	0	Rp3,577,392,000.00	Rp0.00	Rp3,577,392,000.00

Berdasarkan rekapitulasi-rekapitulasi tersebut maka dapat diketahui bahwa perencanaan paling ekonomis adalah dengan alternatif PVD 2/3 kedalaman di zona 3 dengan biaya awal sebesar Rp 9.446.530.597,00; alternatif tanpa PVD di zona 4 dengan biaya awal Rp 1.869.613.200,00; dan alternatif tanpa PVD di zona 5 dengan biaya awal Rp 3.577.392.000,00.

Walaupun dengan alternatif tanpa PVD mengakibatkan waktu *overlay* yang lebih cepat, namun biaya yang dikeluarkan tidak sebesar dibandingkan dengan biaya menggunakan alternatif PVD di zona 4 dan zona 5. Alternatif tanpa PVD juga aman digunakan karena lapangan penumpukan telah mengalami perkuatan di lereng dengan turap.

Tabel 8.
Rekapitulasi Waktu *Overlay* pada Setiap Alternatif PVD di Setiap Zona

	Kedalaman PVD (m)	Sisa Pemampatan (m)	Overlay 30 cm pertama (tahun ke-)	Overlay 30 cm kedua (tahun ke-)	Overlay 30 cm ketiga (tahun ke-)	Overlay 30 cm keempat (tahun ke-)	Overlay 30 cm kelima (tahun ke-)
BH.3	34	0.00					
	23	0.82	6	26	66		
	35	0.00					
BH.4	23	0.89	5	22	67		
	12	1.62	5	20	45	85	182
	0	2.26	5	19	42	75	121
BH.5	39	0.00					
	26	0.86	6	25	72		
	13	1.75	5	20	44	81	150
	0	3.13	3	13	29	52	80
BH.3	34	0.00					
	23	0.82					
	35	0.00					
BH.4	23	0.89					
	12	1.62					
	0	2.26	190	341			
BH.5	39	0.00					
	26	0.86					
	13	1.75	237				

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil perencanaan yang dilakukan dalam penelitian ini, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu:

1. Ketebalan lapisan tanah lunak pada lokasi proyek adalah bervariasi yaitu 34.0 meter sampai dengan 39.0 meter.
2. Kedalaman PVD dan tinggi timbunan yang memberikan hasil perencanaan paling optimum dan ekonomis adalah:
 - Zona-3, kedalaman PVD 2/3 H (H=ketebalan lapisan tanah lunak) dan tinggi timbunan 6.70 meter;
 - Zona-4 dan Zona-5, tidak perlu dipasang PVD dan tinggi timbunan 1.40 meter.
3. Jenis perkuatan lereng yang digunakan adalah turap beton *Corrugated Type W-600 A1000* dengan *section modulus* 25530 cm³. Turap dipasang pada kedalaman yang berbeda yaitu 18.0 meter dan 22.0 meter, masing-masing di Zona-1 dan Zona-2. Turap di Zona-2 diperkuat dengan anker dimana jarak antar anker adalah 2.0 meter; anker ditarik dengan *rod* baja yang dikaitkan dengan blok anker dengan ukuran lebar 2.0 m dan tinggi 1,5 m yang diletakkan 18.0 meter dibelakang turap.
4. Total biaya pembangunan yang dibutuhkan pada Zona-1 dan Zona-2 adalah sebesar Rp 843.106.053,00; total biaya yang dibutuhkan pada Zona-3 adalah sebesar Rp 9.446.530.597,00; Zona-4 sebesar Rp 1.869.613.200,00; dan Zona-5 sebesar Rp 3.577.392.000,00.

B. Saran

Setelah dilakukan analisis dari hasil perencanaan yang telah dilakukan, beberapa hal perlu diperhatikan yaitu:

1. Konstruksi penahan tanah pada lereng yang menghadap ke sungai sangat diperlukan untuk melindungi lereng dari gerusan sungai.
2. Pemasangan anker yang berjarak 2.0 m dan lebar masing-masing blok anker yang juga 2.0 m, maka blok anker dapat direncanakan sebagai balok menerus.
3. Perencanaan perkuatan lereng timbunan dengan jenis konstruksi lain seperti *soldier pile* atau *retaining wall* dikombinasi dengan tiang pancang perlu dipertimbangkan sebagai alternative perencanaan untuk menghindari pemasangan turap yang terlalu dalam.

DAFTAR PUSTAKA

[1]. Winner, Dofran. 2017. Perbaikan Tanah Dasar Menggunakan *Pre-Fabricated Vertical Drain* dengan Variasi Kedalaman dan Perkuatan Lereng dengan Turap. Studi Kasus : Lapangan Penumpukan Peti

Kemas, Pelabuhan Trisakti, Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (Belum dipublikasikan)

[2]. Das, Braja M. 1988. *Mekanika Tanah: Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik* jilid 2. Diterjemahkan oleh Noor Endah dan Indrasurya B.M. Surabaya: Erlangga.

[3]. Mochtar, Noor Endah. 2012. *Modul Ajar Metode Perbaikan Tanah*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.

[4]. Das, Braja M. 1990. *Principles of Foundation Engineering*. Boston: PWS-KENT