

DESAIN REKLAMASI PADA TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA: STUDI KASUS BELAWAN, SUMATERA UTARA

Yoseph Silalahi¹ dan Dr. Ir. Hendriyawan, M.T.²

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

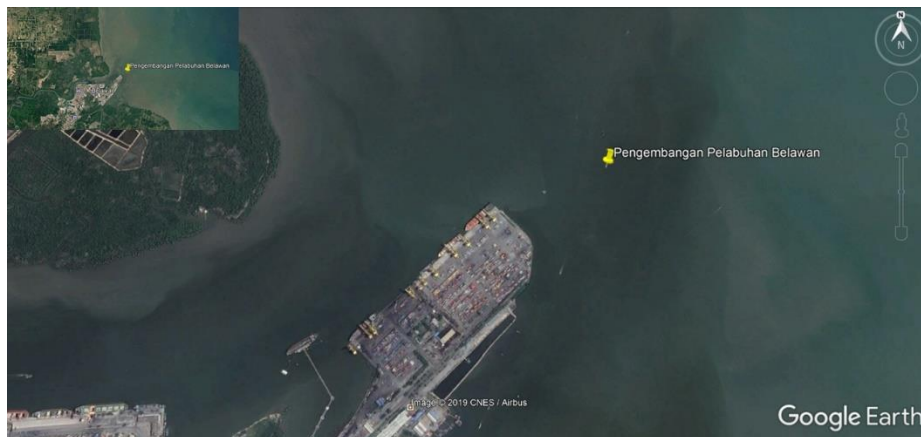
¹yosephvs@students.itb.ac.id dan ²hendriyawan@ocean.itb.ac.id

I. PENDAHULUAN

Pada studi ini, dipilih perairan Pelabuhan Petikemas Belawan Internasional (BICT) di Sumatera Utara sebagai lokasi perencanaan reklamasi lapangan penumpukan petikemas sebagai bagian dari kawasan pengembangan pelabuhan.

Pelabuhan Belawan merupakan pelabuhan terbesar di Sumatera yang berada di wilayah kerja PT Pelabuhan Indonesia I (Pelindo I) Persero. Pelabuhan Belawan berlokasi di pesisir Belawan, sebelah timur laut Pantai Sumatera. Lokasi Pelabuhan Belawan sangat strategis karena hanya berjarak tempuh 13,5 km dari jalur pelayaran internasional Selat Malaka. Selain itu, Pelabuhan Belawan terlindung dari laut lepas karena berada di daratan semenanjung yang merupakan muara pertemuan dua sungai, yaitu Sungai Belawan dan Sungai Deli. Lokasi yang strategis ini menjadikan Pelabuhan Belawan sebagai salah satu pelabuhan di Indonesia yang mempunyai fungsi layanan logistik yang kuat di wilayah barat Indonesia.

Melihat Pelabuhan Petikemas Belawan Internasional yang beroperasi sebagai salah satu pelabuhan petikemas terbesar di Sumatera, maka kapasitas pelabuhan perlu terus dikembangkan. Reklamasi timbunan dipilih sebagai alternatif pengembangan lapangan penumpukan petikemas. Pada lokasi studi akan direncanakan konstruksi reklamasi timbunan tepatnya pada daerah perairan Belawan yang memiliki konsistensi tanah lunak. Lokasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Lokasi Perencanaan Reklamasi Pada Perairan Belawan, Sumatera Utara

Dalam studi ini akan dilakukan analisis perlakuan timbunan tanah untuk jenis tanah lempung dan pasir lepas pada daerah Belawan. Studi mencakup analisis penurunan tanah atau *settlement* dan metode perbaikan tanah serta perkerasan tanah dan laju waktu konsolidasi tanah.

II. TEORI DAN METODOLOGI

2.1. Penentuan Elevasi Rencana Timbunan

Perhitungan elevasi puncak reklamasi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Elevasi Puncak} = \text{HHWL} + (0,5 * H) + \text{SLR} + \text{SS} + \text{Ru}$$

(Pers. 1)

Keterangan:

HHWL	= highest high water level (m)
H	= tinggi gelombang rencana
SLR	= <i>sea level rise</i> / kenaikan muka air laut (m)
SS	= <i>storm surge</i> (m)
Ru	= <i>run-up</i> sebagai batas izin <i>overtopping</i> gelombang (m)

Parameter data lingkungan laut yang digunakan dalam bagian ini adalah sebagai berikut: Data pasang surut diolah dengan menggunakan program ERGTIDE, ERGRAM, dan ERGELV sehingga didapatkan hasil akhir berupa elevasi penting pasang surut. Data kenaikan muka air laut dapat diakses dari literatur scenario kenaikan muka air laut global yang dipublikasikan oleh lembaga iklim. Data angin melalui teori *hindcasting* diolah untuk mendapatkan data peramalan gelombang. Setelah didapatkan peramalan gelombang, selanjutnya data gelombang tersebut diolah lagi dengan analisis harga ekstrim, kemudian dari hasil analisis harga ekstrim dilakukan analisis dari transformasi gelombang. Data tersebut juga digunakan untuk mendapatkan nilai *run-up* dan *storm surge*.

2.2. Teori Stabilitas Lereng

Timbunan tanah akan membentuk lereng, yaitu suatu permukaan tanah yang memiliki sudut dengan keadaan horizontal dari tanah normalnya. Lereng timbunan yang tidak stabil akan mengalami keruntuhan bila berat yang bekerja pada tanah lebih besar dibandingkan dengan daya dukung yang bekerja pada bidang area yang mengalami keruntuhan.

Metode Terzaghi 1-Dimensional digunakan secara umum untuk menghitung daya dukung tanah dimana apabila beban yang diterima oleh tanah sama dengan nilai q_u , maka akan terjadi kegagalan daya dukung tanah. Berikut merupakan rumus dari perhitungan *ultimate bearing capacity*:

$$q_u = C N_c + D_f \gamma N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma$$

(Pers. 2)

Dimana:

q_u = *ultimate bearing capacity*

C = kohesi tanah

D_f = kedalaman pondasi

B = lebar pondasi

γ = berat jenis tanah

N_c, N_q, N_γ = faktor daya dukung tanah, dipengaruhi oleh sudut geser tanah

Besarnya beban dibagi dengan faktor keamanan (*safety factor*) untuk mendapat tegangan yang dipakai dalam perencanaan pondasi. Faktor keamanan merupakan rasio dari tegangan yang diperbolehkan dengan tegangan yang terjadi. Nilai yang diperoleh disebut dengan daya dukung izin tanah.

$$SF = \frac{q_u}{q_{allowed}}$$

(Pers. 3)

Dimana:

SF = *safety factor*

$q_{allowed}$ = daya dukung izin tanah (kN/m²)

q_u = tegangan yang bekerja pada tanah (kN/m²)

Analisis kestabilan lereng menggunakan metode elemen hingga atau *Finite Element Method* (FEM). Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ) secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan. Nilai faktor keamanan, kemudian dihitung sebagai berikut:

$$SF = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{reduced}}$$

(Pers. 4)

Dimana:

c_{reduced} = nilai c pada saat tanah mengalami keruntuhan

$\tan \phi_{\text{reduced}}$ = nilai $\tan \phi$ pada saat tanah mengalami keruntuhan

2.3. Pengolahan Data Tanah

Data tanah yang diperoleh yaitu berupa *boring log* dan hasil uji laboratorium yang telah mengandung sebagian parameter fisik tanah yang diperlukan. Untuk melakukan verifikasi dan mencari parameter fisik tanah yang tidak terdapat pada hasil uji laboratorium, digunakan korelasi empiris yaitu menghubungkan nilai N-SPT dan tipe tanah dengan parameter fisik tanah yang dibutuhkan sesuai dengan literatur yang ada. Parameter utama tanah seperti N-SPT, kohesi, berat jenis, dan sudut geser tanah kemudian menjadi acuan korelasi untuk mendapatkan parameter data tanah lainnya.

2.4. Penurunan Tanah

Penurunan dapat diklasifikasikan menjadi 3 tahap yakni penurunan segera, penurunan konsolidasi primer, dan penurunan konsolidasi sekunder. Persamaan penurunan tanah dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$S_t = S_e + S_c + S_s$$

(Pers. 5)

Keterangan:

S_t = penurunan konsolidasi total

S_e = penurunan konsolidasi segera

S_c = penurunan konsolidasi primer

S_s = penurunan konsolidasi sekunder

Penurunan elastis dipengaruhi oleh lebar urugan, parameter elastisitas (*poisson's ratio* dan Bentuk persamaan untuk perhitungan penurunan segera adalah sebagai berikut:

$$S_e = \Delta \sigma B \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_p$$

(Pers. 6)

Keterangan:

$\Delta \sigma$ = tekanan yang dibebankan pada tanah

B = lebar urugan

μ_s = *poisson's ratio*, yaitu konstanta elastisitas material tanah

E_s = modulus elastisitas tanah

I_p = faktor pengaruh nondimensional

Konsolidasi Primer adalah proses penurunan tanah akibat penurunan volume lapisan tanah yang berlangsung selama periode keluar air yang terdapat pada pori-pori tanah. Besar konsolidasi primer pada tanah terkonsolidasi normal dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$S_c = \frac{C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right)}{1 + e_0} H_c$$

(Pers. 7)

Keterangan:

S_c = penurunan konsolidasi primer

e_0 = angka pori, yaitu rasio volume total dari volume pori (air dan udara) dengan volume tanah

H_c = tebal lapisan tanah yang ditinjau

$\Delta\sigma'$ = perubahan tegangan efektif

σ'_0 = rata – rata tegangan efektif vertikal pada tanah

C_c = indeks pemampatan (compression index), dipengaruhi rasio LL (*liquid limit*, yaitu kadar air yang dapat diterima tanah sampai batas jenuh cair, dalam persen)

Konsep konsolidasi sekunder adalah penurunan pada tanah sebagai akibat dari penyesuaian partikel tanah. Konsolidasi sekunder tidak selalu dipertimbangkan dalam desain stabilitas tanah. Untuk lempung anorganik yang terlalu terkonsolidasi, nilai pemampatan sekunder akan sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

2.5. Drainase Vertikal

Prinsip kerja dari drainase vertikal adalah mengganti jalur drainase pada tanah agar akses keluar air menjadi lebih mudah. Tanpa adanya drainase vertikal, maka air akan bergerak ke arah vertikal saja. Sementara itu dengan adanya drainase vertikal, aliran air selain bergerak ke arah vertikal, juga bergerak ke arah horizontal sepanjang area radial jalur drainase. Drainase vertikal tidak mempengaruhi besar penurunan konsolidasi akhir, hanya laju penurunannya saja yang mengalami percepatan.

Penggunaan drainase vertikal biasanya dikombinasikan dengan beban *preload* dan *surchage* (beban berlebih sementara) berupa timbunan tanah yang bertujuan untuk memberikan beban tambahan pada tanah sehingga kandungan air dapat termobilisasi dengan mudah.

Untuk mengurangi panjang lintasan pengaliran, antar drainase biasanya diberi jarak dengan pola berbentuk persegi atau segitiga. Perhitungan jarak antar drainase vertikal ini didasarkan

pada jari – jari pengaruh drainase vertikal (R) dan bentuk pola pemasangan drainase vertikal, yaitu:

- Untuk pola pemasangan drainase vertikal bujur sangkar, $R = 0.564 S$
- Untuk pola pemasangan drainase vertikal segitiga sama sisi, $R = 0.525 S$

Derajat konsolidasi pada tanah yang memiliki drainase vertikal dapat dihitung dengan menghitung rata-rata dari derajat konsolidasi pada arah vertikal dan arah horizontal. Derajat konsolidasi rata rata dapat dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$(1 - U_{vh}) = (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (\text{Pers. 8})$$

Nilai U_{vh} ditentukan dengan dua variabel derajat konsolidasi, yaitu U_v dan U_h .

1. Derajat Konsolidasi Arah Vertikal

$$U_v = \frac{\left(\frac{4 T_v}{\pi}\right)^{0.5}}{\left(1 + \left(\frac{4 T_v}{\pi}\right)^{2.8}\right)^{1.79}} \quad (\text{Pers. 9})$$

2. Time Factor untuk Derajat Konsolidasi Arah Horizontal

Berikut merupakan rumus menghitung nilai *time factor* horizontal (T_h):

$$T_h = \frac{C_h t}{(2R)^2} \quad (\text{Pers. 10})$$

Dimana :

C_h = koefisien aliran arah horizontal

3. Derajat Konsolidasi Arah Horizontal

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8 T_h}{\mu}\right) \quad (\text{Pers. 11})$$

Dimana :

T_h = waktu penurunan yang diinginkan

R = radius yang terpengaruhi *vertical drain*

2.6. Tinggi Pelaksanaan, Tinggi Kritis, dan Timbunan Bertahap

Tinggi timbunan pelaksanaan ($H_{\text{pelaksanaan}}$) merupakan tinggi dimana tanah ditimbun saat pelaksanaan untuk mencapai tinggi timbunan rencana (H_{rencana}) sesuai dengan waktu yang direncanakan. Besarnya tinggi timbunan pelaksanaan tergantung dari besarnya penurunan tanah yang terjadi pada tanah dasar.

Tinggi kritis adalah tinggi dimana stabilitas timbunan mencapai batas *safety factor* atau timbunan tepat saat akan mengalami kegagalan. Apabila telah melampaui tinggi maksimum yang sanggup diterimanya, maka akan menyebabkan deformasi keruntuhan dari tanah tersebut. Penentuan tinggi kritis timbunan adalah sebagai berikut:

$$\gamma_{total} H_1 + \gamma' H_2 \leq \frac{q_u}{SF} \quad (\text{Pers. 12})$$

Adapun acuan nilai faktor keamanan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Mengacu pada SNI-8460:2017 bagian 7.5.5, kriteria faktor keamanan yang disarankan untuk kestabilan lereng timbunan tanah berada pada rentang 1.25 (rendah) hingga 1.5 (tinggi).
2. Pada West Virginia Legislature tahun 2012 dalam West Virginia Code, Chapter 22: Environmental Resources, Quarry Reclamation Act, Section 21 Land Reclamation Requirements, nilai faktor keamanan yang dianjurkan untuk kemiringan timbunan area reklamasi di darat sebesar 1.3.

Dengan demikian, nilai faktor keamanan yang dipakai adalah sebesar 1.3.

Apabila tinggi kritis timbunan tidak melebihi elevasi rencana, maka langkah yang harus dilakukan adalah mengurangi elevasi timbunan dan membaginya kedalam beberapa tahapan. Setiap penambahan beban timbunan yang dilakukan akan memberikan kenaikan tegangan pada tanah dasar, sehingga terjadi kenaikan nilai c . Kenaikan daya dukung tanah dasar baru dapat dihitung berdasarkan perubahan tegangan akibat penambahan timbunan bertahap.

$$q_u \text{ baru} = 5.14 (c + \Delta c) = 5.14 (c + 0.22 \cdot \Delta \sigma') \quad (\text{Pers. 13})$$

Setiap tahap ditimbun lalu dipantau perubahan stabilitas tanah dasarnya. Proses penahapan timbunan mempertimbangkan tinggi timbunan kritis (H_{cr}) untuk mencegah terjadinya kelongsoran.

III. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Hasil Analisis Tanah

Berdasarkan data pengujian di lapangan diketahui bahwa tanah pada pembangunan kawasan Pelabuhan Belawan memiliki konsistensi tanah yang dominan sangat lunak dengan titik bor terluak BH-2 memiliki $N\text{-SPT} < 10$ (**Tabel 3. 1**). Data parameter tanah pada titik bor BH-2 ini kemudian digunakan sebagai acuan data tanah dalam penelitian Tugas Akhir.

Tabel 3. 1 Parameter Tanah Pada Titik BH-2

	N-SPT	Jenis Tanah	Berat Jenis			Poisson's Ratio (ν)	Modulus Young	k_v	k_h	Cc
--	-------	-------------	-------------	--	--	---------------------------	---------------	-------	-------	----

Tebal Lapisan (m)			(kN/m ³)		Sudut Geser (φ)	Kohesi (c) (kN/m ²)		(Es) (kN/m ²)			
			Γ _t	γ _{sat}							
2	0	silty sand	13	14	20	5	0.2	15000	4	11,2	1,1
14,5	0	clay	13	13	25	5	0.15	10000	1x10 ⁻⁷	2,8 x10 ⁻⁷	1,1
2	3	silty sand	15	18	25	0	0.3	40000	4	11,2	1,1
2	8	organic silt	16	18	5	45	0.3	2500	1x10 ⁻⁷	2,8 x10 ⁻⁷	1,1
9	3	silty clay	16	17	3	30	0.15	2000	1x10 ⁻⁷	2,8 x10 ⁻⁷	1,1
2	5	Clay	16	17	25	9	0.2	30000	1x10 ⁻⁷	2,8 x10 ⁻⁷	0,7

3.2. Tinggi Elevasi Rencana

Perhitungan elevasi puncak reklamasi mengacu pada parameter yaitu tinggi gelombang signifikan, tunggang pasang surut di lokasi studi, nilai *storm surge*, SLR, dan *run-up*:

- Nilai tunggang pasang diukur dari LWS adalah sebesar 171.8 cm;
- Tinggi gelombang rencana hasil transformasi dalam periode ulang 50 tahun sebesar 2.34 m;
- Besarnya kenaikan muka air laut dalam 50 tahun diambil sebesar 0.4 m;
- Nilai *storm surge* sebesar 0.15 m; dan
- Nilai *run-up* gelombang sebesar 0.904 m.

Nilai tinggi elevasi Puncak:

$$\begin{aligned}
 &= \text{HHWL} + (0,5 * H) + \text{SLR} + \text{SS} + \text{Ru} \\
 &= 1.7181 \text{ m} + (0.5 * 2.34) \text{ m} + 0.4 \text{ m} + 0.15 \text{ m} + 0.904 \text{ m} \\
 &\approx 4.1 \text{ m dari LWS}
 \end{aligned}$$

Elevasi akhir yang direncanakan adalah sebesar +4.1 m LWS. Elevasi ini lebih tinggi daripada elevasi perencanaan yang ada saat ini, yaitu +3.5 m LWS. Dengan demikian, elevasi hasil perhitungan sebesar +4.1m LWS dipilih sebagai acuan data elevasi dalam studi ini. Elevasi dasar laut diambil sebesar -0.9m LWS, sehingga nilai tinggi timbunan rencana hasil perhitungan menjadi sebesar 5 meter.

3.3. Data Timbunan

Material timbunan reklamasi direncanakan akan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= 17 \text{ kN/m}^2 \\
 c &= 5 \text{ kN/m}^2 \\
 \phi &= 30^\circ
 \end{aligned}$$

Setelah melakukan penghitungan korelasi dengan menggunakan rumus empiris dari subbab 3.7 diatas, maka disusunlah tabel parameter tanah timbunan. Tabel parameter data tanah pada timbunan dapat dilihat pada **Tabel 3. 2**.

Tabel 3. 2 Parameter Tanah Timbunan

Tebal Lap. (m)	Jenis Tanah	Berat Jenis (γ) (kN/m ³)	Sudut Geser (ϕ)	Kohesi (c) (kN/m ²)	Poisson's Ratio (ν)	Modulus Young (Es) (kN/m ²)
5	Sand	17	30	5	0,35	27500

3.4. Beban Rencana Timbunan

Beban rencana yang bekerja pada tanah adalah sebagai berikut:

1. Beban operasional rata-rata satu peti kemas 20-ft = 10 kN/m²;
2. Rencana penumpukan maksimum = 4 tumpuk

Dengan asumsi beban maksimum yang diterima adalah dari penumpukan peti kemas, maka timbunan tersebut akan menerima beban operasional maksimum sebesar:

Beban operasional maksimum, $q = 10 \times 4 \text{ kN/m}^2 = 40 \text{ kN/m}^2$

Beban rencana kemudian diubah menjadi tinggi timbunan *preloading* berikut:

$$H_{\text{preloading}} = \frac{q_{\text{surchage}}}{\gamma} = \frac{40}{17} = 2.3 \text{ m.}$$

3.5. Perencanaan Timbunan

- Tinggi Kritis Timbunan Awal

Parameter data tanah yang digunakan pada perhitungan ini mengacu pada titik sondir tanah BH-2. Perhitungan tinggi kritis timbunan secara manual adalah sebagai berikut:

Nilai C yang diambil merupakan nilai dari kekohesifan pada lapisan dasar:

$$= 5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_u = 5.14 C = 25.7 \text{ kN/m}^2$$

Sehingga besarnya nilai tegangan izin adalah:

$$\begin{aligned} \sigma &\leq q_{all} \\ \gamma_{\text{total}} H_1 + \gamma' H_2 &\leq \frac{q_u}{SF} \\ 17 H_1 + (17 - 10)(0.9) &\leq \frac{25.7}{1.3} \\ 17 H_1 + 7 (0.9) &\leq 19.7 \\ H_1 &\leq 0.78 \text{ m} \approx +0.8 \text{ m LWS atau 1.7 meter} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan manual didapatkan H_{cr} adalah setinggi 1.7 m (+0.8 m LWS) tidak melebihi elevasi puncak rencana (+4.1 m LWS). Hasil perhitungan ini dapat dijadikan sebagai acuan minimal pengujian tinggi kritis untuk timbunan sebenarnya.

Beban *preload* petikemas direncanakan sebesar 40 kN/m². Beban ini setara dengan penambahan timbunan *preload* dengan ketinggian total sebesar 2.3 meter. Beban *preloading* ditambahkan setelah tinggi timbunan selesai dikonstruksi, lalu setelah mengalami derajat konsolidasi 90% beban *preload* akan dibongkar.

- Perencanaan Timbunan Bertahap

Timbunan dilakukan secara bertahap dengan tahap timbunan awal yang direncanakan adalah sebesar +1.1 m LWS. Tahapan timbunan selanjutnya direncanakan sebesar 0.5 m hingga mencapai elevasi rencana +4.1 m LWS. Setelah selesai memodelkan timbunan rencana kemudian akan dilakukan pembebanan *preloading* bertahap sebesar 0.4 m hingga ketinggian bertambah 2.3 meter. Perencanaan timbunan bertahap dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3. 3 Perencanaan Timbunan Bertahap

Tahap	Tinggi Timbunan	Elevasi Rencana
1	2 m	+1.1 m LWS
2	0.5 m	+1.6 m LWS
3	0.5 m	+2.1 m LWS
4	0.5 m	+2.6 m LWS
5	0.5 m	+3.1 m LWS
6	0.5 m	+3.6 m LWS
7	0.5 m	+4.1 m LWS
8	Preloading 1	+4.5 m LWS
9	Preloading 2	+4.9 m LWS
10	Preloading 3	+5.3 m LWS
11	Preloading 4	+5.7 m LWS
12	Preloading 5	+6.1 m LWS
13	Preloading 6	+6.4 m LWS

- Perhitungan Kenaikan Daya Dukung Tanah Dasar

Setiap timbunan yang dilakukan akan memberikan kenaikan tegangan pada tanah dasar, sehingga terjadi kenaikan daya dukung (c). Kenaikan daya dukung tanah dasar baru dapat dihitung berdasarkan perubahan tegangan akibat penambahan timbunan bertahap. Berikut merupakan contoh perhitungan kenaikan daya dukung tanah akibat kenaikan tegangan oleh timbunan tahap 1 setinggi 2 meter:

$$c \text{ awal} = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_u = 5.14 c = 25.7 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta \sigma' = 0.9(17 - 10) + 1.1(17) = 25 \text{ kN/m}^2$$

kenaikan dari kuat dukung geser tanah Δc menjadi:

$$\Delta c = 0.22 \cdot \Delta \sigma' = 5.5 \text{ kN/m}^2$$

$$c \text{ baru} = c + \Delta c = 5 + 5.5 = 10.5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_u = 5.14 (c + \Delta c) = 53.97 \text{ kN/m}^2$$

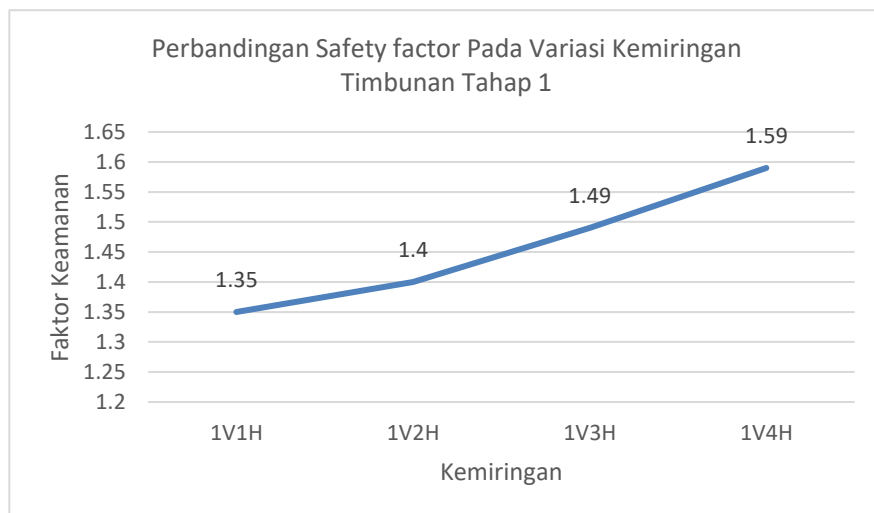
Hasil perhitungan kenaikan daya dukung tanah pada setiap timbunan dapat dilihat pada **Tabel 3. 4**.

Tabel 3. 4 Perhitungan Kenaikan Daya Dukung Tanah Dasar

Tahap	H (m)	c (kN/m ²)	q _u (kN/m ²)	Δσ (kN/m ²)	Δc = 0.22Δσ (kN/m ²)	c baru = c+Δc (kN/m ²)	q _u baru (kN/m ²)
Timbunan 1	2	5	25,70	25	5,5	10,5	53,97
Timbunan 2	0,5	10,5	53,97	8,5	1,87	12,37	63,58
Timbunan 3	0,5	12,37	63,58	8,5	1,87	14,24	73,19
Timbunan 4	0,5	14,24	73,19	8,5	1,87	16,11	82,81
Timbunan 5	0,5	16,11	82,81	8,5	1,87	17,98	92,42
Timbunan 6	0,5	17,98	92,42	8,5	1,87	19,85	102,03
Timbunan 7	0,5	19,85	102,03	8,5	1,87	21,72	111,64
Preloading 1	0,4	21,72	111,64	6,8	1,496	23,22	119,33
Preloading 2	0,4	23,22	119,33	6,8	1,496	24,71	127,02
Preloading 3	0,4	24,71	127,02	6,8	1,496	26,21	134,71
Preloading 4	0,4	26,21	134,71	6,8	1,496	27,70	142,40
Preloading 5	0,4	27,70	142,40	6,8	1,496	29,20	150,09
Preloading 6	0,3	29,20	150,09	5,1	1,122	30,32	155,86

3.6.Perhitungan Kestabilan Lereng

Pada timbunan awal tahap 1 setinggi 2 meter dilakukan pengujian stabilitas lereng timbunan dengan variasi kemiringan 1V4H, 1V3H, 1V2H, dan 1V1H. Rekapitulasi perbandingan nilai *safety factor* pada setiap variasi kemiringan untuk timbunan awal tahap 1 setinggi 2 meter ditunjukkan pada **Gambar 3. 1**.



Gambar 3. 1 Grafik perbandingan Safety factor Pada Variasi Kemiringan Timbunan

Hasil peninjauan nilai *safety factor* yang dihasilkan memenuhi persyaratan minimum sebesar 1.3 untuk semua pengujian. Selain itu, semakin landai nilai kemiringan timbunan, maka terjadi

pula kenaikan nilai faktor keamanan sehingga konstruksi semakin memenuhi kriteria keamanan.

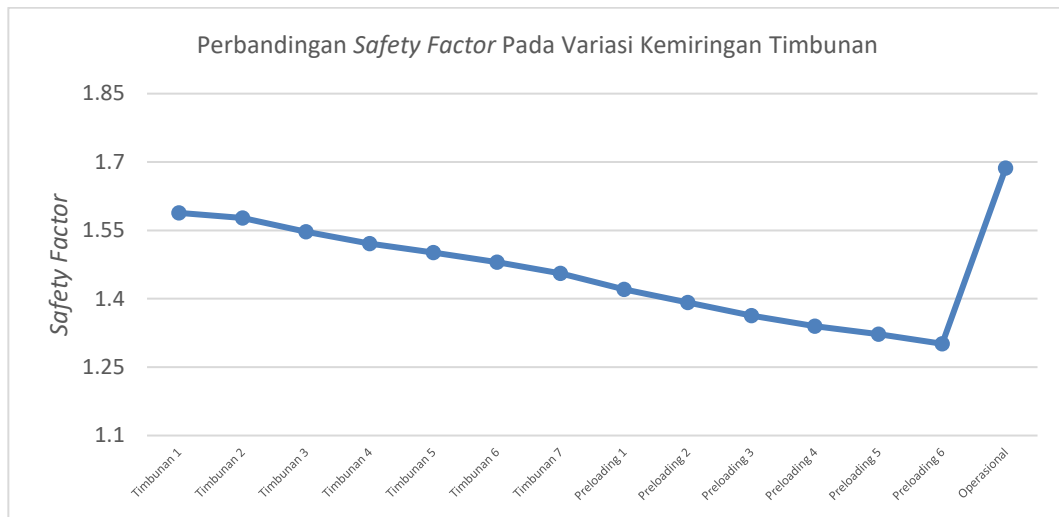
Setelah itu dilakukan pengujian stabilitas lereng timbunan untuk timbunan tahap selanjutnya hingga elevasi rencana. Konstruksi Untuk rekapitulasi nilai *safety factor* pada setiap tahapan timbunan dan timbunan *preloading* ditunjukkan pada **Tabel 3. 5**. Tanda bintang menandakan tidak dilakukannya pengujian.

Tabel 3. 5 Rekapitulasi Nilai Safety Factor Setiap Timbunan

No.	Tahap	H (m)	Elevasi	Safety Factor	
				Kemiringan 1V4H	Kemiringan 1V3H
1	Timbunan 1	2 m	+1.1 m LWS	1.5881	1.4858
2	Timbunan 2	0.5 m	+1.6 m LWS	1.5770	1.4029
3	Timbunan 3	0.5 m	+2.1 m LWS	1.5468	1.3519
4	Timbunan 4	0.5 m	+2.6 m LWS	1.5213	1.3200
5	Timbunan 5	0.5 m	+3.1 m LWS	1.5015	1.3024
6	Timbunan 6	0.5 m	+3.6 m LWS	1.4804	1.3009
7	Timbunan 7	0.5 m	+4.1 m LWS	1.4557	Tidak Aman
8	Preloading 1	0.4 m	+4.5 m LWS	1.4203	*
9	Preloading 2	0.4 m	+4.9 m LWS	1.3921	*
10	Preloading 3	0.4 m	+5.3 m LWS	1.3632	*
11	Preloading 4	0.4 m	+5.7 m LWS	1.3400	*
12	Preloading 5	0.4 m	+6.1 m LWS	1.3221	*
13	Preloading 6	0.3 m	+6.4 m LWS	1.3013	*
14	Operasional	-	+4,1 m LWS	1.6870	*

Pada pengujian stabilitas lereng timbunan, konstruksi dengan kemiringan 1V4H berhasil hingga elevasi rencana dengan memenuhi persyaratan minimum sebesar 1.3. Sementara itu, pada kemiringan IV3H tahapan elevasi +4.1m LWS (timbunan 7) timbunan kurang aman untuk dilakukan dikarenakan tidak memenhi persyaratan dengan nilai SF=1.29. Pengecekan stabilitas tidak lagi dilakukan pada kemiringan yang lebih curam yaitu 1V2H dan 1V1H. Dengan demikian, timbunan yang memenuhi adalah dengan kemiringan 1V4H.

Grafik perubahan nilai *safety factor* pada timbunan 1V4H dapat dilihat pada **Gambar 3. 2**.



Gambar 3.2 Grafik perbandingan Safety factor Pada Variasi Ketinggian Timbunan

Dapat terlihat adanya penurunan nilai *safety factor* setiap penambahan tahapan konstruksi hingga mencapai timbunan *preloading* 6. Pada tahap pembongkaran *preloading*, nilai SF daya dukung baru terhadap beban operasional yang diberikan sebesar 1.68; naik dari saat sebelum dilakukan *preloading* sebesar 1.45.

3.7. Penurunan Tanah

Berikut rekapitulasi penurunan tanah yang terjadi akibat penurunan segera dan konsolidasi primer dilihat pada **Tabel 3.6**.

Tabel 3.6 Rekapitulasi Penurunan Tanah Pada Timbunan

Tahap	Tinggi	El. Rencana	Penurunan Elastis (m)	Konsolidasi Primer (m)
Timbunan 1	2 m	+1.1 m LWS	0.002	0.92
Timbunan 2	0.5 m	+1.6 m LWS	0.003	0.23
Timbunan 3	0.5 m	+2.1 m LWS	0.004	0.21
Timbunan 4	0.5 m	+2.6 m LWS	0.005	0.19
Timbunan 5	0.5 m	+3.1 m LWS	0.006	0.17
Timbunan 6	0.5 m	+3.6 m LWS	0.008	0.16
Timbunan 7	0.5 m	+4.1 m LWS	0.010	0.07
Preloading 1	0.4 m	+4.5 m LWS	0.011	0.11
Preloading 2	0.4 m	+4.9 m LWS	0.013	0.11
Preloading 3	0.4 m	+5.3 m LWS	0.016	0.10
Preloading 4	0.4 m	+5.7 m LWS	0.019	0.10
Preloading 5	0.4 m	+6.1 m LWS	0.022	0.09
Preloading 6	0.3 m	+6.4 m LWS	0.028	0.09

Tahap	Tinggi	El. Rencana	Penurunan Elastis (m)	Konsolidasi Primer (m)
Total Konsolidasi Primer			0.156	2.61
Total Penurunan Tanah				2.77

Dapat dilihat bahwa total penurunan tanah yang terjadi adalah sebesar 2.77 meter.

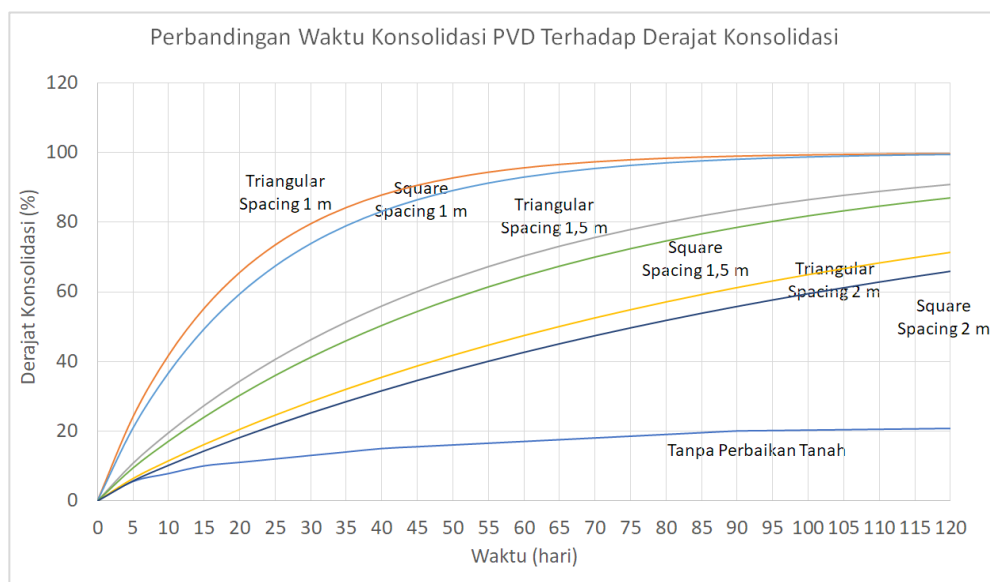
Tinggi timbunan pelaksanaan ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{rencana}} + H_{\text{preloading}} &= 5 \text{ m} + 2.3 \text{ m} \\
 S_{\text{total}} &= 2.77 \text{ meter} + \\
 \hline
 H_{\text{pelaksanaan}} &= 10.07 \text{ meter}
 \end{aligned}$$

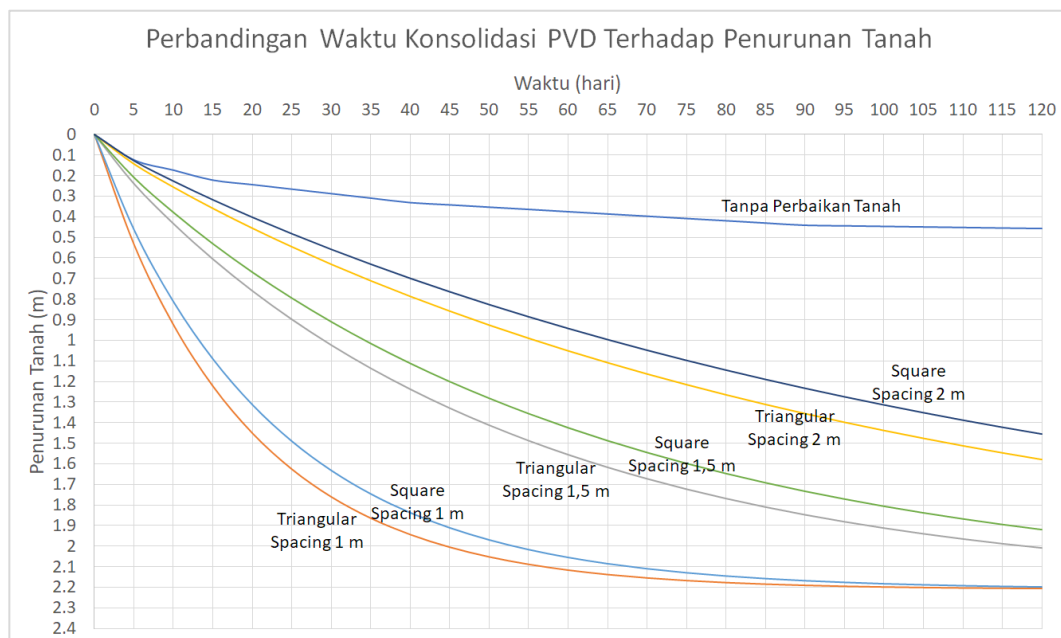
Dengan demikian, tinggi timbunan pelaksanaan yang dibutuhkan adalah sebesar 10.07 meter.

3.8. Perencanaan PVD

Berikut merupakan grafik perbandingan laju waktu konsolidasi antara tanpa perlakuan perbaikan tanah, dengan *square spacing* PVD, dan *triangular spacing* PVD, terhadap waktu, disajikan pada **Gambar 3. 3** dan **Gambar 3. 4** berikut:



Gambar 3. 3 Grafik perbandingan Waktu Konsolidasi PVD Terhadap Derajat Konsolidasi



Gambar 3.4 Grafik perbandingan Waktu Konsolidasi PVD Terhadap Penurunan Tanah

Gambar 3.3 dan **Gambar 3.4** menunjukkan perbaikan tanah dengan menggunakan PVD meningkatkan penurunan tanah lebih baik dibandingkan tanpa menggunakan PVD. Laju waktu konsolidasi pada konfigurasi PVD yang sama juga akan semakin meningkat seiring semakin rapatnya jarak antar titik PVD. Selain itu, konfigurasi pemasangan dengan *triangular spacing* mempercepat laju waktu konsolidasi lebih baik dibandingkan dengan pola *square spacing*. Dengan demikian, pola konfigurasi PVD *triangular spacing* 1 m dipilih sebagai metode perbaikan tanah untuk mempercepat waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% ($U=90\%$) dari sebesar 14971 hari (43.76 tahun) menjadi 42 hari.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

1. Reklamasi timbunan pada lokasi penelitian dengan elevasi akhir rencana sebesar +4.1 m LWS. Pada timbunan juga akan diberikan beban preloading setinggi 2.3 meter. Timbunan berhasil dikonstruksi dengan dengan stabil apabila dilakukan dengan 7 tahap penimbunan dan 6 tahap *preloading* dengan kemiringan timbunan 1V4H. Nilai *safety factor* pada setiap tahapan timbunan dan timbunan preloading ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Safety Factor

No.	Tahap	H (m)	Elevasi	Safety Factor
1	Timbunan 1	2 m	+1.1 m LWS	1.5881
2	Timbunan 2	0.5 m	+1.6 m LWS	1.5770
3	Timbunan 3	0.5 m	+2.1 m LWS	1.5468
4	Timbunan 4	0.5 m	+2.6 m LWS	1.5213
5	Timbunan 5	0.5 m	+3.1 m LWS	1.5015
6	Timbunan 6	0.5 m	+3.6 m LWS	1.4804
7	Timbunan 7	0.5 m	+4.1 m LWS	1.4557
8	Preloading 1	0.4 m	+4.5 m LWS	1.4203
9	Preloading 2	0.4 m	+4.9 m LWS	1.3921
10	Preloading 3	0.4 m	+5.3 m LWS	1.3632
11	Preloading 4	0.4 m	+5.7 m LWS	1.3400
12	Preloading 5	0.4 m	+6.1 m LWS	1.3221
13	Preloading 6	0.3 m	+6.4 m LWS	1.3013
14	Operasional	-	+4,1 m LWS	1.6870

2. Besar penurunan tanah yang terjadi akibat pelaksanaan reklamasi timbunan adalah sebesar 2.77 meter. Dengan demikian, maka tinggi timbunan pelaksanaan yang dibutuhkan adalah sebesar 10.07 meter.
3. Penggunaan konfigurasi PVD *triangular spacing* 1 m sebagai metode perbaikan tanah dapat mempercepat waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% ($U=90\%$) dari sebesar 14971 hari (43.76 tahun) menjadi 42 hari.

4.2. Saran

Berdasarkan simpulan diatas, maka dapat disarankan hal-hal berikut:

1. Dalam pengerjaannya karya tulis ini tidak mempertimbangkan kebutuhan anggaran biaya konstruksi. Dengan demikian, penelitian ini dapat ditambahkan pertimbangan anggaran biaya untuk mengetahui biaya konstruksi yang dibutuhkan.
2. Data hasil pengujian dapat dicari lebih banyak lagi untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih akurat dan mendekati kondisi asli di lapangan.

REFERENSI

- Arora. 2004. Soil Mechanics And Foundation Engineering. Standard Publisher. Delhi.
- Bowles, Joseph E. 1991. Sifat-Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah). Erlangga. Jakarta.
- Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore Protection Manual Volume II. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Craig, R.F. 2004. Craig's Soil Mechanics 7th Edition. New York: Spon Press.
- Das, B.M. 2006. Principles of Geotechnical Engineering 5th Edition. Toronto: Thomson Canada Limited.
- Das, B.M. 2011. Principles of Foundation Engineering 7th Edition. Cengage Learning: Stamford.
- Dean, R.G. dan R.A. Dalrymple. 2002. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dean, Robert G. 1984. Water Wave Mechanics For Engineers And Scientist. Singapore: World Scientific.
- Direktorat Jenderal Pesisir dan Pulau – Pulau Kecil. 2004. Pedoman Reklamasi di Wilayah Pesisir. Jakarta: Departemen Kelautan dan Perikanan
- PT. Pelabuhan Indonesia I (Persero). 2012. Ringkasan Eksekutif Amdal Kawasan Pengembangan Pelabuhan Belawan. Annual Report.
- Republik Indonesia. 2007. Undang-undang Nomor 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil. Jakarta.
- Standar dan Paten Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2017. Persyaratan Perencanaan Geoteknik : SNI-8460:2017. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- Sumarno, Z.F. 2003. Hubungan Antara Tingkat Kepadatan Tanah dengan Tingkat Konsolidasi Tanah pada Tanah Latosol Dermaga. Bogor: Skripsi Jurusan Teknik Sipil, Institut Pertanian Bogor.
- Terzaghi, K., dan Peck, R. 1943. Soil Mechanic. John Willey & Sons, New York.
- Triatmodjo, B. 2009. Perencanaan Pelabuhan. Yogyakarta: Beta Offset.