

# DESAIN DAN ANALISIS TIMBUNAN UNTUK KEPERLUAN REKLAMASI MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

**Maria Theresia Simanjorang<sup>1</sup>, dan Hendriyawan<sup>2</sup>**

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung, 40123

<sup>1</sup>[maria.theresia11@gmail.com](mailto:maria.theresia11@gmail.com) dan <sup>2</sup>[hendriyawan@ocean.itb.ac.id](mailto:hendriyawan@ocean.itb.ac.id)

## PENDAHULUAN

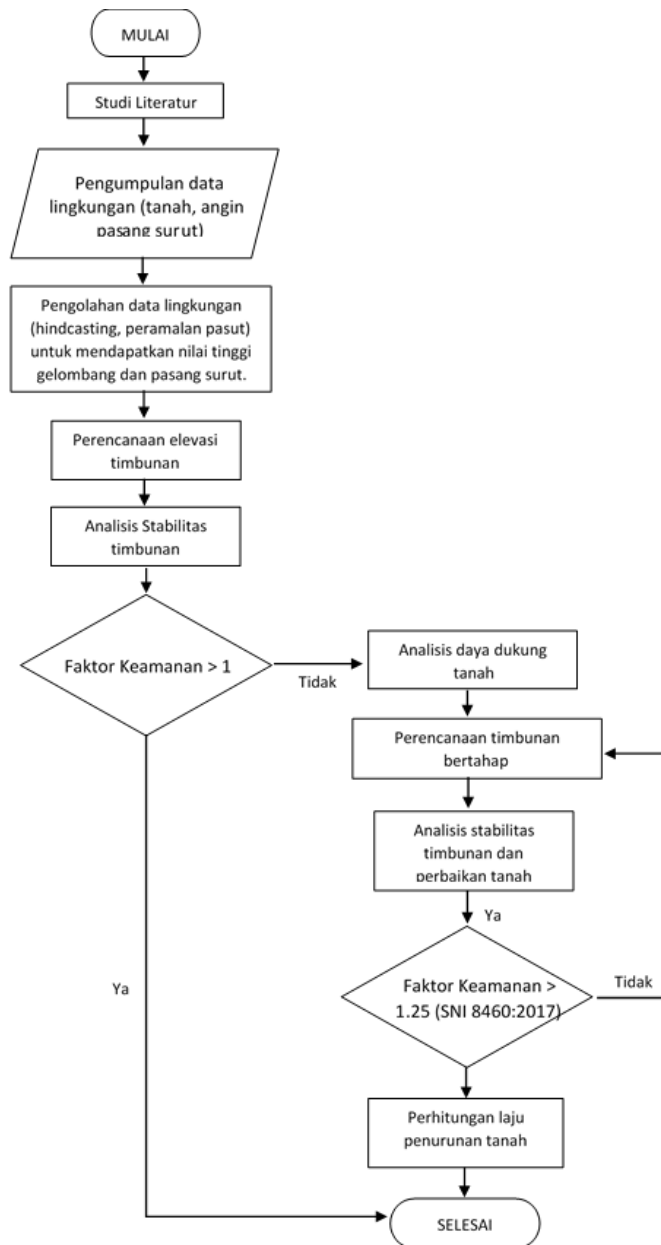
Reklamasi merupakan kegiatan yang dilakukan untuk meningkatkan manfaat sumber daya lahan ditinjau dari sudut lingkungan dan sosial ekonomi dengan cara pengurugan, pengeringan lahan, atau drainase. Proses ini menjadikan lahan layak guna sehingga lahan dapat dimanfaatkan sebagai kawasan pemukiman, industri, hingga objek wisata. Studi ini dilakukan untuk menentukan desain elevasi timbunan reklamasi, melakukan analisis stabilitas timbunan, serta melakukan perhitungan laju penurunan tanah akibat timbunan di daerah perairan Semarang, Jawa Tengah, Indonesia, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta Pulau Jawa (Google Earth)

## TEORI DAN METODOLOGI

Metodologi Tugas Akhir ini dijelaskan dalam bagan alir pada Gambar 2 dengan standar perencanaan timbunan sesuai dengan SNI 8460:2007.



Gambar 2 Alur Metodologi Studi

Data-data lingkungan yang digunakan berupa data tanah yang didapatkan dari data sekunder penelitian, data angin yang didapatkan dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), dan data pasang surut yang didapatkan dari Dinas Hidro-Oseanografi TNI Angkatan Laut (Dishidros). Untuk mendapatkan

nilai ketinggian gelombang, data angin diolah dengan metode *hindcasting* sesuai dengan standar *Shore Protection Manual* tahun 1984.

## HASIL DAN ANALISIS

Penentuan elevasi timbunan didasarkan pada parameter-parameter berikut, yaitu tinggi gelombang signifikan, tunggang pasang surut di lokasi studi, serta nilai freeboard. Dalam penentuan elevasi pasang surut, akan diambil referensi dari *Lowest Water Spring* (LWS). Adapun nilai-nilai parameter tersebut adalah sebagai berikut.

1. Nilai elevasi pasang tertinggi (HWS) di lokasi tinjauan tersebut yaitu 111.8 cm atau 1.118 m diukur dari LWS
2. Nilai kenaikan muka air sebesar 0.525 untuk jangka waktu 50 tahun
3. Nilai *storm surge* sebesar 0.2 m
4. Nilai *run up* sebesar 1.20 m
5. Freeboard diambil sebesar 2.1 m

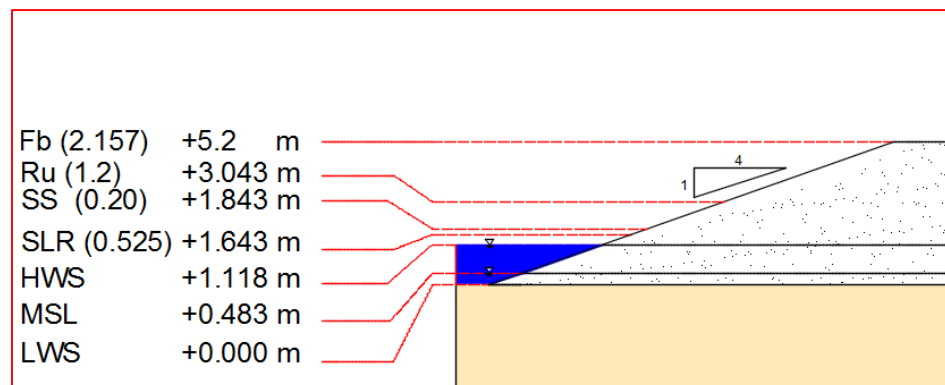
Adapun perhitungan nilai nilai elevasi timbunan yang direncanakan berdasarkan parameter-parameter di atas adalah sebagai berikut.

$$Elevasi = 1.118 \text{ m} + 0.525 + 0.23 + 1.2 + 2.1$$

$$Elevasi = 5.143 \text{ m}$$

Maka diambil nilai elevasi timbunan sebesar 5.2 m di atas permukaan laut.

Adapun sketsa elevasi timbunan dengan kemiringan lereng 1:4 ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3 Sketsa Elevasi Timbunan.

Untuk analisis stabilitas timbunan, dibutuhkan data katakteristik lapisan tanah pada daerah timbunan. Data lapisan tanah yang digunakan yaitu data pada titik BHL-1 dan BHL-2, seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

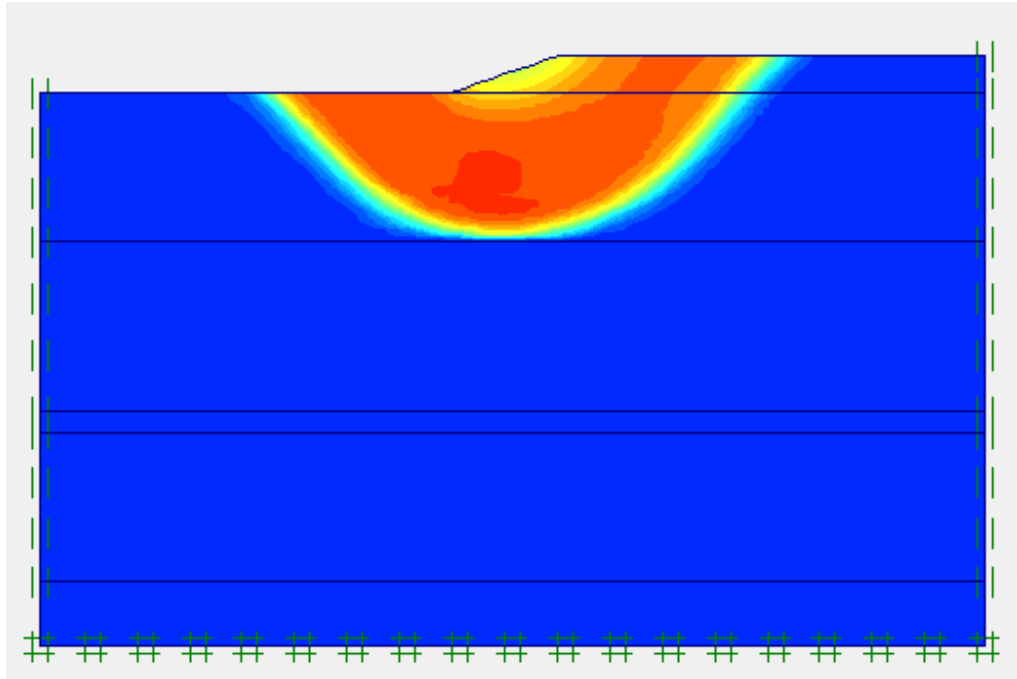
Tabel 1 Parameter Tanah pada Titik BHL-1

| BHL-1 |              |                                 |                                     |        |                           |                         |               |
|-------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Tebal | Lapisan      | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\Phi$ | Cref (kN/m <sup>2</sup> ) | Es (kN/m <sup>2</sup> ) | Poisson Ratio |
| 21    | silt         | 10.85                           | 16.47                               | 0      | 5.42                      | 2488.36                 | 0.35          |
| 24    | silty clay 1 | 11.69                           | 17.04                               | 0      | 116.13                    | 39752.88                | 0.3           |
| 3     | silty sand   | 11.73                           | 17.08                               | 0      | 155.38                    | 55803.34                | 0.3           |
| 21    | silty clay 2 | 11.87                           | 17.21                               | 0      | 145.41                    | 50430.07                | 0.3           |
| 10    | sandy clay   | 11.94                           | 17.30                               | 0      | 128.11                    | 51852.77                | 0.3           |

Tabel 2 Parameter Tanah pada Titik BHL-2

| BHL-2 |              |                                 |                                     |        |                           |                         |               |
|-------|--------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| Tebal | Lapisan      | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\Phi$ | Cref (kN/m <sup>2</sup> ) | Es (kN/m <sup>2</sup> ) | Poisson Ratio |
| 21    | silt         | 11.01                           | 16.55                               | 0      | 5.13                      | 2351.54                 | 0.35          |
| 9     | silty clay 1 | 11.69                           | 17.02                               | 0      | 94.73                     | 34794.68                | 0.3           |
| 12    | silty clay 2 | 11.88                           | 17.15                               | 0      | 185.19                    | 67471.28                | 0.3           |
| 18    | silty clay 3 | 11.80                           | 17.16                               | 0      | 157.68                    | 51711.06                | 0.3           |
| 12    | silty clay 4 | 11.82                           | 17.19                               | 0      | 109.46                    | 42921.60                | 0.3           |
| 7     | silty clay 5 | 11.92                           | 17.29                               | 0      | 146.27                    | 50057.14                | 0.3           |

Analisis stabilitas timbunan dilakukan dengan menggunakan aplikasi PLAXIS, dimana pemodelan timbunan untuk mengetahui deformasi tanah tergolong dalam proses *plastic analysis* dengan *staged construction*. Untuk mengetahui faktor keamanan, dilakukan proses *phi-c reduction*. Dari hasil pemodelan, didapatkan nilai faktor keamanan yang diperoleh untuk lapisan tanah BHL-1 adalah 0.367 dan untuk lapisan tanah BHL-2 sebesar 0.347. Dari nilai faktor keamanan tersebut dapat disimpulkan bahwa timbunan tidak stabil dan terjadi keruntuhan, sehingga diperlukan timbunan bertahap dan penggunaan PVD untuk mempercepat konsolidasi. Desain timbunan bertahap akan menggunakan salah satu parameter saja, yaitu parameter tanah BHL-2 karena hasil pemodelan dengan parameter tanah BHL-2 menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih kecil. Pola keruntuhan pada titik BHL-2 ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Pola Keruntuhan Timbunan pada Titik BHL-2

Desain timbunan bertahap dilakukan dengan menghitung tinggi kritis timbunan. Besar tinggi kritis didapatkan dari persamaan daya dukung tanah. Tegangan efektif yang bekerja di atas tanah tidak boleh melebihi kuat daya dukung ijin.

$$(\gamma_{timbunan} \times H_{cr}) \leq q_{all}$$

Keterangan:

$\gamma'$  = berat volume efektif tanah ( $\gamma_{sat} - \gamma_w$ )

$d$  = kedalaman perairan

$\gamma_{timbunan}$  = berat jenis timbunan

$q_{all}$  = besar daya dukung ijin tanah

$H_{cr}$  = tinggi kritis timbunan

Adapun perhitungan tinggi kritis timbunan pertama adalah sebagai berikut.

$$(18 \times H_{cr}) \leq 21.09$$

$$H_{cr} \leq 1.17$$

Maka maksimal tinggi timbunan adalah 1.17 m, tidak melebihi dari tinggi elevasi rencana yaitu sebesar 5.2 m. Timbunan dilakukan secara bertahap dengan tahap timbunan pertama yang direncanakan tidak memiliki selisih yang besar dengan

tinggi kritis timbunan. Tahapan timbunan direncanakan hingga mencapai elevasi rencana +5.2 m LWS. Setelah selesai menentukan tahapan timbunan rencana kemudian akan dilakukan pembebanan preloading bertahap sebesar 0.3 m hingga ketinggian bertambah sebesar 0.9 m. Tinggi timbunan bertahap dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3 Tinggi Timbunan Bertahap

| Tahap        | Tinggi Timbunan (m) | Elevasi (m) |
|--------------|---------------------|-------------|
| Timbunan 1   | 1.0                 | 1           |
| Timbunan 2   | 0.7                 | 1.7         |
| Timbunan 3   | 0.5                 | 2.2         |
| Timbunan 4   | 0.5                 | 2.7         |
| Timbunan 5   | 0.5                 | 3.2         |
| Timbunan 6   | 0.5                 | 3.7         |
| Timbunan 7   | 0.5                 | 4.2         |
| Timbunan 8   | 0.5                 | 4.7         |
| Timbunan 9   | 0.5                 | 5.2         |
| Preloading 1 | 0.3                 | 5.5         |
| Preloading 2 | 0.3                 | 5.8         |
| Preloading 3 | 0.3                 | 6.1         |

Timbunan akan memberikan kenaikan tegangan pada tanah dasar, sehingga terjadi kenaikan daya dukung tanah pada setiap tahapnya. Kenaikan daya dukung tanah dasar baru dapat dihitung berdasarkan perubahan tegangan akibat penambahan timbunan bertahap. Kenaikan daya dukung tanah dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta\sigma'_1 = (\gamma_{timbunan} \times H_1)$$

Dimana,

$\gamma_{timbunan}$  = berat jenis timbunan

$H_1$  = tinggi timbunan pertama

$\Delta\sigma'_1$  = beban yang bekerja pada timbunan pertama

Maka, didapatkan nilai beban yang bekerja pada timbunan pertama sebagai berikut.

$$\Delta\sigma'_1 = 18 \times 1$$

$$\Delta\sigma'_1 = 18 \text{ kN/m}^2$$

Untuk menentukan nilai kenaikan kuat geser yang terjadi pada tanah, digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta c_1 = 0.22 \times \Delta\sigma'_1$$

$$\Delta c_1 = 0.22 \times 18 = 3.96 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Setelah diketahui kenaikan nilai kohesi tanah, maka dihitung besar daya dukung tanah yang baru. Berikut perhitungan besar daya dukung tanah tersebut:

$$q_{u(1)} = (C + \Delta c_1) \times N_c$$

$$q_{u(1)} = (5 + 3.96) \times 5.14$$

$$q_{u(1)} = 46.72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Adapun tabel perhitungan kenaikan daya dukung tanah adalah sebagai berikut.

Tabel 4 Perhitungan kenaikan daya dukung tanah

| Tahap        | C     | qu     | H   | $\Delta\sigma'$ | $\Delta\sigma$ | qu(1)  |
|--------------|-------|--------|-----|-----------------|----------------|--------|
| Timbunan 1   | 5.13  | 21.09  | 1   | 18.0            | 3.96           | 46.72  |
| Timbunan 2   | 9.09  | 46.72  | 0.7 | 12.6            | 2.77           | 60.97  |
| Timbunan 3   | 11.86 | 60.97  | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 71.15  |
| Timbunan 4   | 13.84 | 71.15  | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 81.33  |
| Timbunan 5   | 15.82 | 81.33  | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 91.50  |
| Timbunan 6   | 17.80 | 91.50  | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 101.68 |
| Timbunan 7   | 19.78 | 101.68 | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 111.86 |
| Timbunan 8   | 21.76 | 111.86 | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 122.03 |
| Timbunan 9   | 23.74 | 122.03 | 0.5 | 9.0             | 1.98           | 132.21 |
| Preloading 1 | 25.72 | 132.21 | 0.3 | 5.4             | 1.19           | 138.32 |
| Preloading 2 | 26.91 | 138.32 | 0.3 | 5.4             | 1.19           | 144.42 |
| Preloading 3 | 28.10 | 144.42 | 0.3 | 5.4             | 1.19           | 150.53 |

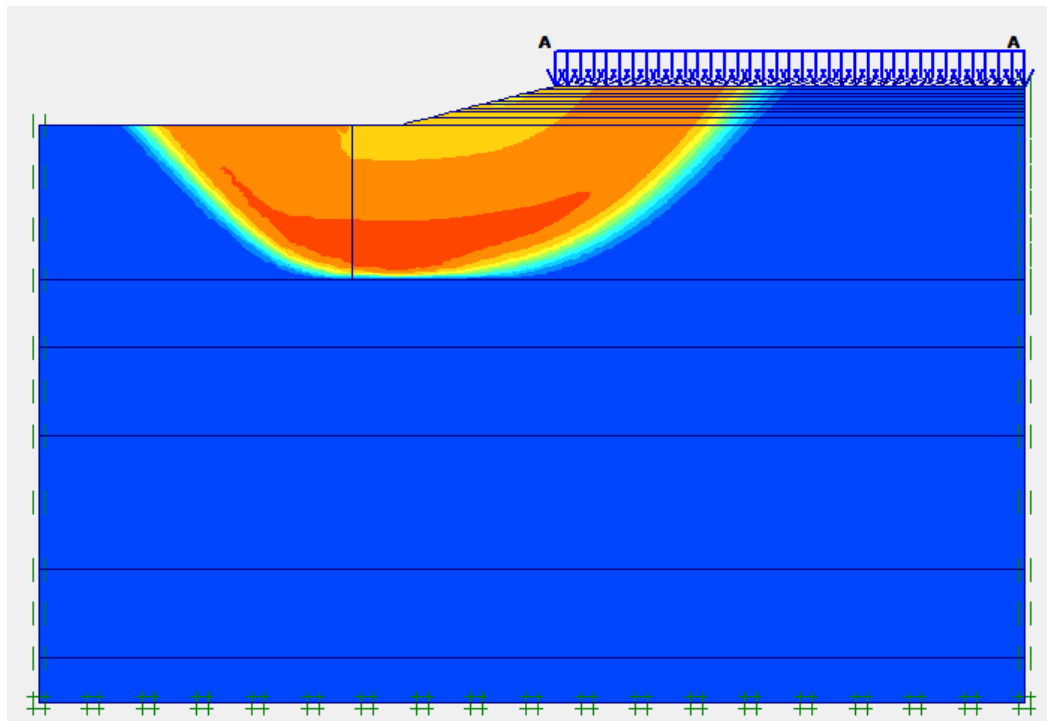
Setelah menentukan ketinggian masing-masing tahapan timbunan, dilakukan kembali pemodelan timbunan. Setelah melakukan pemodelan stabilitas timbunan,

dilakukan pengecekan nilai angka keamanan atau *safety factor* pada setiap tahapan timbunan. Desain akan sesuai dengan rencana ketika nilai  $SF \geq 1.25$ . Nilai angka keamanan untuk setiap tahapan timbunan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Angka Keamanan Timbunan

| Tahap        | H (m) | Elevasi (m) | SF    |
|--------------|-------|-------------|-------|
| Timbunan 1   | 1.0   | +1.0 LWS    | 1.681 |
| Timbunan 2   | 0.7   | +1.7 LWS    | 1.509 |
| Timbunan 3   | 0.5   | +2.2 LWS    | 1.429 |
| Timbunan 4   | 0.5   | +2.7 LWS    | 1.335 |
| Timbunan 5   | 0.5   | +3.2 LWS    | 1.269 |
| Timbunan 6   | 0.5   | +3.7 LWS    | 1.223 |
| Timbunan 7   | 0.5   | +4.2 LWS    | 1.192 |
| Timbunan 8   | 0.5   | +4.7 LWS    | 1.174 |
| Timbunan 9   | 0.5   | +5.2 LWS    | 1.161 |
| Preloading 1 | 0.3   | +5.5 LWS    | 1.186 |
| Preloading 2 | 0.3   | +5.8 LWS    | 1.180 |
| Preloading 3 | 0.3   | +6.1 LWS    | 1.176 |
| Operasional  |       | +5.2 LWS    | 1.263 |

Adapun pola keruntuhan pada tahap operasional ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Pola Keruntuhan Tahap Operasional

Perhitungan penurunan tanah dilakukan dengan melakukan penjumlahan penurunan elastis dan konsolidasi primer yang terjadi. Berikut merupakan rekapitulasi penurunan tanah akibat penurunan elastis dan konsolidasi primer.

Tabel 6 Total Penurunan Tanah

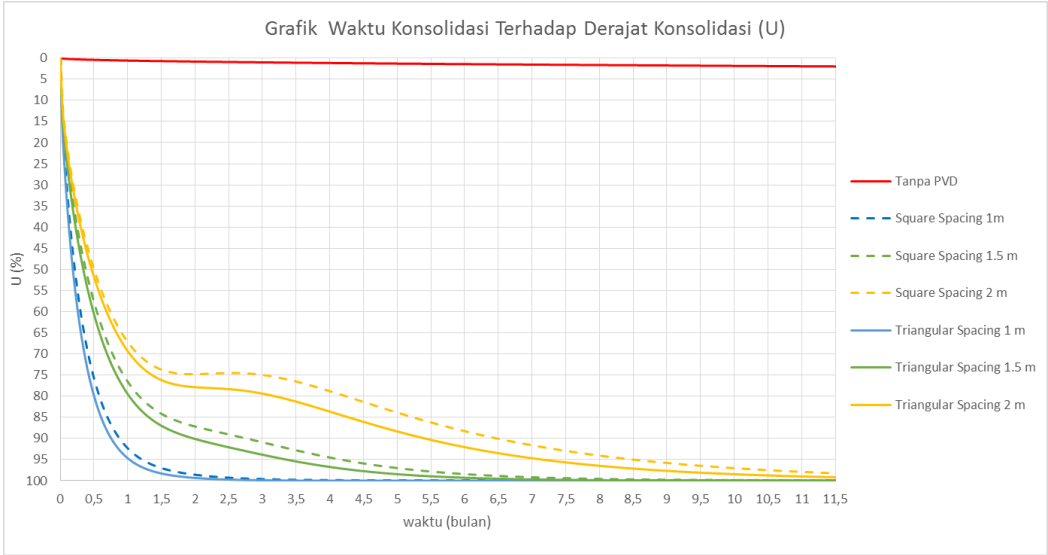
| Tahap                 | H (m) | Elevasi (m) | Penurunan Elastis (m) | Konsolidasi Primer (m) |
|-----------------------|-------|-------------|-----------------------|------------------------|
| Timbunan 1            | 1.0   | +1.0 LWS    | 0.0601                | 0.63                   |
| Timbunan 2            | 0.7   | +1.7 LWS    | 0.0278                | 0.40                   |
| Timbunan 3            | 0.5   | +2.2 LWS    | 0.0171                | 0.27                   |
| Timbunan 4            | 0.5   | +2.7 LWS    | 0.0164                | 0.25                   |
| Timbunan 5            | 0.5   | +3.2 LWS    | 0.0157                | 0.23                   |
| Timbunan 6            | 0.5   | +3.7 LWS    | 0.0149                | 0.22                   |
| Timbunan 7            | 0.5   | +4.2 LWS    | 0.0144                | 0.20                   |
| Timbunan 8            | 0.5   | +4.7 LWS    | 0.0126                | 0.19                   |
| Timbunan 9            | 0.5   | +5.2 LWS    | 0.0129                | 0.18                   |
| Preloading 1          | 0.3   | +5.5 LWS    | 0.0067                | 0.11                   |
| Preloading 2          | 0.3   | +5.8 LWS    | 0.0065                | 0.10                   |
| Preloading 3          | 0.3   | +6.1 LWS    | 0.0065                | 0.10                   |
| Total Penurunan Tanah |       |             | 0.2162                | 2.88                   |
|                       |       |             | 3.01 m                |                        |

Setelah itu, dilakukan perhitungan laju konsolidasi tanpa dan dengan PVD. Perhitungan laju konsolidasi PVD dengan tipe *square spacing* dan *triangular spacing* akan dilakukan dengan menggunakan jarak 1 m, 1.5 m, dan 2 m. PVD yang digunakan adalah PVD dengan tipe *Alidrain S* dengan lebar sebesar 100 mm dan tebal 4 mm. Perbandingan penurunan tanah tanpa PVD dan dengan PVD dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Perbandingan Laju Konsolidasi tanpa PVD dan dengan PVD

| t(bulan) | Tanpa PVD | Square Spacing |       |       | Triangular Spacing |       |       |
|----------|-----------|----------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
|          |           | 1m             | 1.5 m | 2 m   | 1 m                | 1.5 m | 2 m   |
| 0.2      | 0.26      | 48.54          | 35.52 | 28.06 | 51.97              | 37.15 | 31.88 |
| 0.4      | 0.37      | 69.33          | 51.85 | 40.79 | 73.28              | 54.24 | 46.25 |
| 0.6      | 0.45      | 81.23          | 63.08 | 50.18 | 84.74              | 65.80 | 56.46 |
| 0.8      | 0.52      | 88.26          | 71.05 | 57.43 | 91.09              | 73.86 | 63.93 |
| 1.0      | 0.58      | 92.45          | 76.68 | 63.03 | 94.65              | 79.47 | 69.29 |
| 1.2      | 0.64      | 94.98          | 80.58 | 67.26 | 96.68              | 83.33 | 72.99 |
| 1.4      | 0.69      | 96.54          | 83.23 | 70.34 | 97.87              | 85.98 | 75.36 |
| 1.6      | 0.74      | 97.54          | 85.03 | 72.44 | 98.58              | 87.80 | 76.76 |
| 1.8      | 0.78      | 98.20          | 86.28 | 73.76 | 99.03              | 89.10 | 77.50 |
| 2.0      | 0.82      | 98.66          | 87.22 | 74.49 | 99.33              | 90.10 | 77.85 |
| 2.2      | 0.86      | 99.00          | 88.00 | 74.79 | 99.53              | 90.94 | 78.03 |
| 2.4      | 0.90      | 99.25          | 88.73 | 74.83 | 99.67              | 91.70 | 78.20 |
| 2.6      | 0.94      | 99.44          | 89.46 | 74.73 | 99.77              | 92.43 | 78.45 |
| 2.8      | 0.97      | 99.58          | 90.20 | 74.61 | 99.84              | 93.14 | 78.84 |
| 3.0      | 1.01      | 99.69          | 90.96 | 74.54 | 99.89              | 93.83 | 79.38 |
| 3.2      | 1.04      | 99.78          | 91.72 | 74.57 | 99.93              | 94.50 | 80.05 |
| 3.4      | 1.07      | 99.84          | 92.48 | 74.72 | 99.95              | 95.13 | 80.85 |
| 3.6      | 1.10      | 99.88          | 93.21 | 75.01 | 99.97              | 95.71 | 81.73 |
| 3.8      | 1.13      | 99.92          | 93.90 | 75.42 | 99.98              | 96.24 | 82.66 |
| 4.0      | 1.16      | 99.94          | 94.55 | 75.95 | 99.98              | 96.73 | 83.63 |

Adapun visualisasi perbandingan laju konsolidasi tanpa PVD dan dengan PVD dengan masing-masing konfigurasi pada Gambar 6 dan Gambar 7 berikut.



Gambar 6 Grafik Waktu Konsolidasi Terhadap Laju Konsolidasi



Gambar 7 Grafik Penurunan Tanah Terhadap Laju Konsolidasi

Adapun rangkuman nilai laju konsolidasi tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90% adalah sebagai berikut.

Tabel 8 Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%

| Konfigurasi                     | Waktu (hari) | Waktu (bulan) |
|---------------------------------|--------------|---------------|
| Tanpa PVD                       | 62163        | 2072.1        |
| <i>Square Spacing 1 m</i>       | 52           | 1.7           |
| <i>Square Spacing 1.5 m</i>     | 168          | 5.6           |
| <i>Square Spacing 2 m</i>       | 333          | 11.1          |
| <i>Triangular Spacing 1 m</i>   | 43           | 1.4           |
| <i>Triangular Spacing 1.5 m</i> | 141          | 4.7           |
| <i>Triangular Spacing 2 m</i>   | 282          | 9.4           |

Maka, jenis konfigurasi PVD yang paling efektif untuk mempercepat konsolidasi adalah *Triangular Spacing* dengan jarak 1 m yaitu sekitar 43 hari atau 1.4 bulan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Timbunan pada lokasi penelitian dilakukan menggunakan nilai elevasi akhir rencana sebesar +5.2 m LWS dengan 9 tahap penimbunan dan 3 tahap *preloading* dan didapatkan nilai faktor keamanan sebesar 1.26 pada tahap operasional. Timbunan yang diberikan menyebabkan penurunan terhadap lapisan tanah di bawah timbunan. Besar penurunan tanah yang terjadi akibat pelaksanaan reklamasi timbunan adalah sebesar 3.01 meter.

Waktu yang dibutuhkan agar tanah terkonsolidasi hingga 98% adalah 170.31 tahun (62163 hari). Dengan bantuan PVD, konsolidasi akan terjadi dalam waktu yang lebih singkat. Penggunaan konfigurasi PVD *triangular spacing* 1 m dapat mempercepat waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 98% ( $U=98\%$ ) dari sebesar 170.31 tahun (62163 hari) menjadi 43 hari. Data lingkungan yang digunakan sebaiknya menggunakan sumber yang lebih banyak lagi agar hasil pengujian yang didapatkan lebih akurat dan mendekati kondisi asli di lapangan. Penelitian ini dapat ditambahkan perhitungan biaya konstruksi untuk mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk konstruksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ameratunga, J., & Das, B. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. India: Springer.
- Bowles, J. E. (1979). *Physical and Geotechnical Properties of Soil*. Tokyo: McGraw-Hill.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M., & Shoban, K. (2010). *Advanced Soil Mechanics*. Stamford: Cengage Learning.
- Desain dan Konstruksi Pita Drain Vertikal Prefabrikasi*. (2004). Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.
- Engineering, U. A. (1984). *Shore Protection Manual*. Vicksburg, Missisipi: Department of the Army.
- Kumar, R. (2016). *Estimation of Engineering Properties of Soils from Field SPT Using Random Number Generation*. Indian National Academy of Engineering.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. T. (1969). *Soils Mechanics*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Persyaratan Perancangan Geoteknik*. (2017). Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons. Inc.