

## Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode *Preloading* pada Jalan Tol Palembang – Indralaya STA 1+670

Enita Suardi<sup>1</sup>, Liliwarti<sup>2</sup>, Merley Misriani<sup>3</sup>, Ibnu Iqbal<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang, Kampus Limau Manis Kota Padang, Indonesia

Corresponding Author : [merley@pnp.ac.id](mailto:merley@pnp.ac.id)

Diterima redaksi: 29 September 2021 | Selesai revisi: 1 Oktober 2021 | Diterbitkan online: 4 November 2021

### ABSTRAK

Pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera merupakan langkah nyata program pemerintah dalam meningkatkan perekonomian dan kemajuan suatu wilayah. Salah satu Pembangunan Jalan tol Trans Sumatera yaitu Jalan Tol Palembang-Indralaya (Palindra) yang terletak di antara Kotamadya Palembang dan Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan. Kondisi tanah dasar jalan tol tersebut sangat lunak dengan nilai N-SPT <10 dan kedalaman tanah lunak mencapai 16,95 m. Daya dukung tanah dasar tersebut rendah dan permeabilitas sangat kecil sehingga diperlukan perbaikan tanah dasar dengan metode preloading agar daya dukung tanah dasar meningkat dan pada masa layan jalan tidak akan terjadi differential settlement. Metodologi penelitian diawali dengan pengumpulan data sekunder yaitu *layout* lokasi, data pengujian lapangan Boring Log dan N-SPT juga data hasil pengujian laboratorium. Selanjutnya merencanakan tinggi timbunan dimana timbunan tersebut sebagai beban *preloading*. Dilanjutkan dengan menentukan besarnya penurunan tanah dasar dengan menghitung penurunan segera dan penurunan konsolidasi dan diakhiri menghitung waktu penurunannya. Hasil yang diperoleh, penurunan tanah dasar nya mencapai 1,556 meter dengan tinggi rencana timbunan (beban *preloading*) 5 meter. Waktu yang di dibutuhkan untuk mencapai derajat pemampatan 90% adalah 2,149 tahun. Dari hasil penelitian ini, penurunan cukup besar namun waktu yang dibutuhkan belum sesuai dengan harapan sehingga penelitian dilanjutkan dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) agar waktu pemampatan tanah dasar nya semakin singkat.

**Kata kunci:** preloading, perbaikan tanah, penurunan, timbunan, waktu konsolidasi

### ABSTRACT

*The construction of the Trans Sumatra Toll Road is a concrete step by the government's program in improving the economy and progress of a region. One of the construction Trans Sumatra toll road is Palembang-Indralaya Toll Road (Palindra) which place between Kotamadya Palembang and Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan. The condition of ground the toll road is soft clay with N-SPT value < 10 and soft soil depth reaches 16.95 m. Bearing capacity of the base soil is low and the permeability is so small that the repair of the base soil with the preloading method is needed so that the bearing capacity of the base soil increases and the time of road service will not occur differential settlement. This research method begins with the collection of secondary data, namely location layout, Boring Log field testing data and N-SPT as well as laboratory test results data. In addition to planning the height of the embankment where that embankment as a preloading load. Continue by determining the settlement of the base soil by calculating the immediate settlement and consolidation settlement and ending calculating the time of the settlement. The results obtained, the settlement in basic soil reached 1,556 meters with a height embankment (preloading load) of 5*



Pada penelitian ini hanya meninjau perbaikan tanah dasar lempung lunak dengan metode *preloading* agar dapat menambah referensi alternatif desain perbaikan tanah untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar dan mempercepat proses konsolidasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi pada tanah dasar lempung lunak dan mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% pada tanah tersebut dengan metode *preloading*.

**2. Tinjauan Pustaka**

Secara teknis pada pekerjaan konstruksi, tanah lempung memiliki sifat yang kurang menguntungkan karena memiliki pemampatan yang besar dalam waktu yang lama. Oleh karena itu perlu dilakukan perbaikan tanah dengan metode *preloading* agar terjadi pemampatan yang besar dengan waktu yang cepat. *Preloading* dilakukan dengan memberi beban berupa tanah timbunan untuk mengeluarkan air maupun udara dari dalam tanah.

Tanah lunak adalah tanah yang memiliki stabilitas rendah sehingga jika diberi beban akan mengalami penurunan yang besar. Cara yang dapat dilakukan untuk memperbaiki tanah lunak tersebut adalah dengan *preloading*. Pembebanan awal (*preloading*) akan menyebabkan tanah memampat dan stabil dalam menerima beban[1].

Dikarenakan kondisi kedalaman tanah lunak yang cukup dalam, perbaikan tanah dasar perlu dilakukan untuk meningkatkan elevasi muka tanah juga mampu menaikkan daya dukung tanah tersebut. Salah satu metode yang digunakan sebagai perbaikan adalah *Preloading*[2].

Perencanaan timbunan dengan *preloading* merupakan hal penting dalam menentukan keberhasilan penggunaan metode perbaikan tanah. Perbaikan dilakukan dengan meletakkan beban timbunan pada tanah dasar sesuai dengan beban perkerasan dan beban lalu lintas yang direncanakan[3].

Lama waktu konsolidasi tanpa percepatan atau waktu konsolidasi alami pada Proyek Pembangunan Kompleks Pendidikan Islam Al Azhar 57 Jambi untuk mencapai konsolidasi 90% yaitu 115,1 tahun[4].

Analisis penurunan total lapisan tanah dasar dengan metode konvensional menghasilkan penurunan total sebesar 0.2793 m selama masa layanan timbunan 10 tahun yang berarti metode konstruksi *preloading* memenuhi syarat minimum ketinggian timbunan dengan elevasi dari tanah dasar +2.22 m > +1.8 m[5].

**2.1 Penurunan**

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami penurunan. Penurunan tersebut salah satunya disebabkan oleh keluarnya air atau udara dari dalam pori.

1. Penurunan segera (*immediate settlement*) yaitu terjadi seketika saat beban diletakan di atas tanah. Untuk menghitung penurunan segera dapat di gunakan rumus dari (Giroud,1973) sebagai berikut :

$$S_i = q \sum i \left( \frac{h}{E'} \right) \tag{1}$$

dimana  $S_i$  adalah penurunan segera (m),  $q$  adalah tegangan permukaan (t/m<sup>2</sup>),  $h$  adalah tebal lapisan tanah  $i$  (m),  $E'$  adalah modulus oedometrik (m) dan  $i$  adalah titik tinjau (m).

$$E' = \left( \frac{E}{1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}} \right) \tag{2}$$

dimana  $E$  adalah Modulus Elastis dan  $\mu$  adalah poisson ratio

2. Penurunan konsolidasi ( $S_c$ )  
Berdasarkan teori Terzaghi dalam [6] untuk perhitungan penurunan konsolidasi pada tanah lempung adalah:

- 2.1 Untuk tanah terkonsolidasi normal (*Normally Consolidated Soil*)

$$S_{ci} = \left[ \frac{C_c}{1+e_0} \text{LOG} \frac{p'_{o+\Delta p}}{p'_o} \right] \times H_i \tag{3}$$

- 2.2 Untuk tanah terkonsolidasi lebih (*Over Consolidated Soil*)

Jika  $p'_o + \Delta p < P'c$  maka:

$$S_{ci} = \left[ \frac{C_r}{1 + e_0} \text{LOG} \frac{p'_{o+\Delta p}}{p'_o} \right] \times H_1 \tag{4}$$

Jika  $p'0 + \Delta p > P'c$  maka:

$$S_{ci} = \left[ \frac{c_r}{1+e_0} \text{LOG} \frac{p'c}{p'o} + \frac{c_c}{1+e_0} \text{LOG} \frac{p'o+\Delta p}{p'c} \right] \times H_i \quad (5)$$

dimana  $S_{ci}$  adalah penurunan konsolidasi pada lapisan tanah ke  $i$  yang ditinjau (m),  $H_i$  adalah tebal lapisan tanah ke  $i$  (m),  $e_0$  adalah angka pori awal dari lapisan tanah ke  $i$ ,  $C_c$  adalah indeks kompresi dari lapisan ke  $i$ ,  $C_r$  adalah indeks pemampatan Kembali dari lapisan ke  $i$ ,  $P_o'$  adalah tegangan overburden efektif (t/m<sup>2</sup>),  $P_c'$  adalah tegangan prakonsolidasi efektif (t/m<sup>2</sup>) dan  $\Delta p$  adalah tambahan tegangan vertical pada lapisan yang ditinjau akibat beban timbunan (m).

Parameter untuk perhitungan *consolidation settlement* menurut [7] :

1. Tebal lapisan compressible (H)

Tebal lapisan yang masih bisa mengalami proses konsolidasi primer yaitu yang memiliki nilai N-SPT < 10. Sedangkan untuk tanah dengan N-SPT > 10 dianggap sudah tidak mengalami proses konsolidasi primer sehingga tidak perlu diperhitungkan sebagai bagian dari tebal lapisan compressible (H)

2. Distribusi tegangan tanah ( $\Delta p$ )

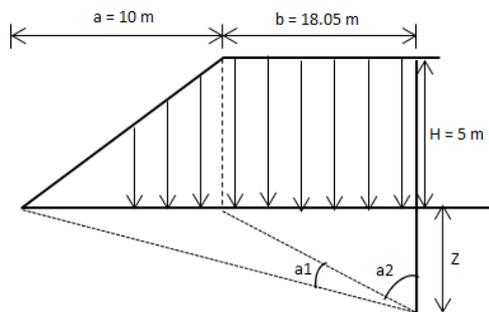
Untuk menghitung besaran  $\Delta p$  yang terjadi dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta p1 = \frac{q}{\pi} \left[ \left( \frac{b+a}{a} \right) (a_1 + a_2) - \frac{b}{a} (a_2) \right] \times 2 \quad (6)$$

$$a1 = \text{TAN}^{-1} \left( \frac{b+a}{z} \right) - \text{TAN}^{-1} \left( \frac{b}{z} \right) \quad (7)$$

$$a2 = \text{TAN}^{-1} \left( \frac{b}{z} \right) \quad (8)$$

dimana  $q$  adalah tegangan vertical efektif di permukaan tanah akibat beban (t/m<sup>2</sup>) dan simbol lainnya dapat diperoleh dari gambar 4.



Gambar 4. Embankment Loading  
(Sumber : Data Primer)

3. Compression Index (Cc) dan Swelling Index (Cr)

Nilai  $C_c$  dan  $C_r$  diperoleh dari hasil tes laboratorium (*consolidation test*). Dapat dilihat pada grafik *consolidation*.

4. Angka Pori awal ( $e_0$ )

Diperoleh dari hasil tes laboratorium (*Volumetric* dan *Gravimetric*)

5. Tekanan Overburden efektif (*Overburden pressure effective,  $p_o'$* )

Merupakan tegangan vertical efektif dari tanah asli.

Untuk mencari  $\gamma_{sat}$  digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s+e) \times \gamma_w}{1+e} \quad (9)$$

dimana  $\gamma_{sat}$  adalah berat volume tanah yang jenuh air (gr/cm<sup>3</sup>),  $G_s$  adalah berat jenis,  $e$  adalah angka pori dan  $\gamma_w$  adalah berat volume air = 1 gr/cm<sup>3</sup>.

### 2.2 Waktu Konsolidasi

Menurut Terzaghi dalam [6], lama waktu konsolidasi ( $t$ ) dapat dihitung dengan persamaan:

$$t = \frac{T_v(H_{dr})^2}{C_v} \quad (10)$$

dimana  $T_v$  adalah factor waktu tergantung derajat konsolidasi  $U$ ,  $H_{dr}$  adalah panjang aliran yang harus ditempuh air pori tergantung arah aliran (m),  $C_v$  adalah koefisien konsolidasi untuk aliran air pori arah vertical (m<sup>2</sup>/th) dan  $t$  adalah lama waktu untuk menyelesaikan konsolidasi (tahun).

Untuk menentukan derajat konsolidasi akibat aliran air pori secara vertikal, digunakan persamaan berikut [8]:

Untuk  $U_v$  antara 0 s/d 60%

$$\bar{U}_v = \left( \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \right) \quad (11)$$

Untuk  $U_v > 60\%$

$$\bar{U}_v = (100 - 10^a)\% \quad (12)$$

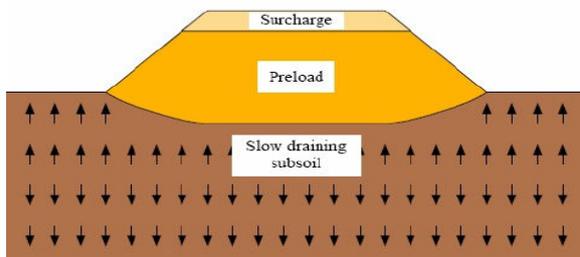
dimana:

$$a = \frac{1,781 - T_v}{0,933} \quad (13)$$

$$T_v = \frac{t \times C_v}{H_{dr}^2} \quad (14)$$

### 2.3 Metode Preloading

Untuk terjadinya penurunan pada tanah dasar maka dilakukan pemberian beban berupa timbunan tanah (surcharge) atau disebut dengan *preloading*. Fungsinya sebagai beban untuk mempercepat penurunan, mengisi ruang yang diakibatkan oleh pemampatan dan meningkatkan daya dukung tanah di bawahnya. *Preloading* yang paling sederhana adalah dengan menggunakan tanah timbunan (*embankment*) [9]. Ketika beban timbunan diletakkan diatas lapisan tanah lunak, tekanan air pori mengalir perlahan sangat lambat arah vertical dan menurun bertahap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dibawah ini[10] :



Gambar 5. *Preloading*  
(Sumber : M.Bilal, A.Thalib, 2016)

### 2.3.1 Tinggi Timbunan Awal ( $H_{initial}$ )

Tinggi timbunan awal ( $H_{initial}$ ) pada saat pelaksanaan tidak sama dengan tinggi timbunan rencana ( $H_{final}$ ) [9]. Untuk menentukan tinggi timbunan rencana, memperhatikan besarnya pemampatan yang terjadi pada tanah asli. Untuk mencari besarnya tinggi timbunan awal ( $H_{initial}$ ) memakai rumus sebagai berikut :

$$H_{initial} = H_{final} + H_{surcharge} \quad (15)$$

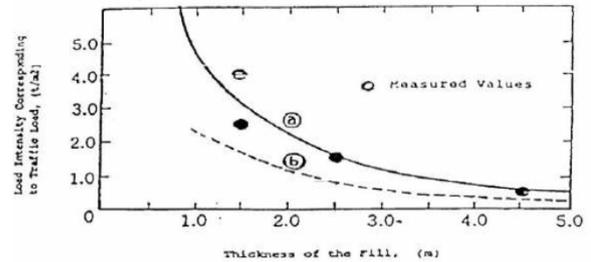
### 2.3.2 Beban yang bekerja diatas tanah dasar

Beban yang bekerja diatas tanah dasar yaitu beban tanah timbunan, beban perkerasan (*surcharge*) dan beban lalu lintas. Ketiga beban tersebut dijumlahkan yang nantinya akan dimodelkan dalam bentuk tanah timbunan dengan jumlah berat beban yang sama. Beban perkerasan diperhitungkan untuk penurunan tanah dasar dengan memakai persamaan :

$$Q_{per} = G_s \times H_{per} \quad (16)$$

dimana  $Q_{per}$  adalah beban perkerasan ( $t/m^2$ ),  $G_s$  adalah berat jenis dan  $H_{per}$  adalah tebal perkerasan (m).

Untuk beban lalu lintas menggunakan grafik hubungan tinggi timbunan dan beban lalu lintas pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Hubungan Antara Tinggi Timbunan dan Beban Lalu Lintas

Berdasarkan grafik Gambar 6, jika tinggi timbunan 3 meter maka beban lalu lintas adalah 1,2 t/m<sup>2</sup>, sedangkan tinggi timbunan 4 meter beban lalu lintasnya adalah 0,8 t/m<sup>2</sup>. Dan tinggi timbunan melebihi 5 meter maka beban lalu lintas adalah 0,6 t/m<sup>2</sup>.

## 3. Metodologi Penelitian

Tahapan penelitian ini diawali dengan pengumpulan data sekunder. Data yang diperlukan yaitu *layout* lokasi, data pengujian lapangan Boring Log dan N-SPT juga data hasil pengujian laboratorium. Selajutnya merencanakan tinggi timbunan dimana timbunan tersebut sebagai beban *preloading*. Dilanjutkan dengan menentukan besarnya penurunan tanah dasar dan waktu penurunan. Penurunan tanah dasar dilakukan dengan menghitung penurunan segera dan penurunan konsolidasi.

Parameter yang diperlukan untuk menghitung penurunan segera antara lain Poisson Ratio ( $\mu$ ), Modulus Elastis (E) dan Modulus Oedeometrik (E'). Parameter yang diperlukan untuk menghitung penurunan konsolidasi yaitu tebal lapisan lempung (H), tambahan tegangan akibat beban ( $\Delta p$ ), *compression index* (Cc), *recompression index* (Cr), angka pori awal ( $e_0$ ), tekanan overburden ( $p_0$ ) dan tekanan prakonsolidasi ( $p_c'$ ).

## 4. Analisis dan Pembahasan

### Data Tanah Dasar

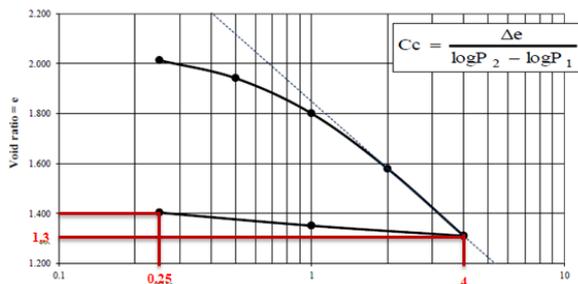
Data tanah yang digunakan diperoleh dari data hasil pengujian lapangan Bore Hole (BH-02/S-02), N-SPT dan hasil uji laboratorium hingga kedalaman 16,95 m. Profil tanah sesuai

Gambar 3. Dengan menggunakan rumus persamaan (9) diperoleh berat isi jenuh tanah di BH-2 pada kedalaman 2 m.

$$\gamma_{sat} = \frac{(2,554 + 2,101) \times 1}{1 + 2,101} = 1,501 \text{ gr/cm}^3$$

Untuk kedalaman lainnya terlampir pada Tabel 1 berikut.

Dari grafik konsolidasi BH-2 dapat ditentukan nilai *compression index* (Cc) dan *recompression index* (Cr).



**Gambar 7.** Grafik konsolidasi BH-2 dalam penentuan nilai indeks pemampatan (Cc) dan indeks pemampatan kembali (Cr)

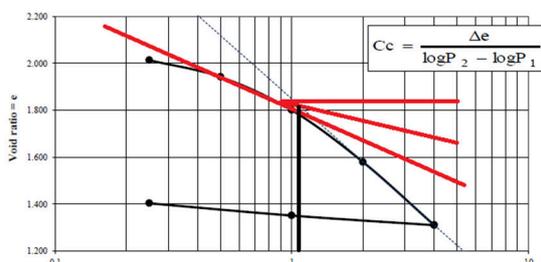
(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

Untuk mencari indeks pemampatan (Cc) dan indeks pemampatan kembali (Cr) diperoleh dari Gambar 7.

$$C_r = \frac{(1,4 - 1,3)}{\log 4 - \log 0,25} = 0,08$$

Hasil perhitungan Cc dan Cr terlampir pada Tabel 1.

Dari hasil uji konsolidasi juga diperoleh nilai tekanan prakonsolidasi (pc’).



**Gambar 8.** Grafik penentuan nilai pra konsolidasi (pc’)

(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

Dari grafik penentuan nilai pra konsolidasi (pc’) pada Gambar 8 di dapatkan nilai pc’ pada lapisan tanah lunak 1-1.5 meter yaitu 1,2 kg/cm<sup>2</sup>. Perhitungan dilanjutkan hingga lapisan tanah lunak yang ke-16.95 m, seluruh hasil perhitungan nilai pc’ dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Perhitungan Data Tanah Dasar

| Kedalaman | $\gamma_{sat}$<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Cc   | Cr   | pc’<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|---|------|------|------------------------------|
| 0-2       | 1,501                                   | 0,89 | 0,08 | 1,2                          |
| 2-4       | 1,457                                   | 0,83 | 0,08 | 1,0                          |
| 4-6       | 1,457                                   | 0,83 | 0,08 | 1,0                          |
| 6-8       | 1,457                                   | 0,83 | 0,08 | 1,0                          |
| 8-10      | 1,584                                   | 0,48 | 0,04 | 0,95                         |
| 10-12     | 1,584                                   | 0,48 | 0,04 | 0,95                         |
| 12-14     | 1,536                                   | 0,65 | 0,06 | 1,2                          |
| 14-16,95  | 1,536                                   | 0,65 | 0,06 | 1,2                          |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

### Tanah Timbunan dan Perkerasan

Material timbunan jalan berasal dari quarry di dekat proyek jalan tol Palembang-Indralaya dan material perkerasan jalan diperoleh dari Asfalt mixing plant yang berlokasi di Pamulutan dan Musi 2 Palembang. Properties tanah timbunan  $c = 0$ ,  $\phi = 30^\circ$   $\gamma_{sat} = 1,85 \text{ t/m}^3$ . Tinggi timbunan rencana 5 m, lebar atas timbunan 36,1 m dan kemiringan timbunan 1:2. Potongan melintang jalan dapat dilihat pada Gambar 2.

**Tabel 2.** Data-data perkerasan jalan

| No | Jenis perkerasan | Tebal | Berat jenis      |
|----|------------------|-------|------------------|
|    |                  | m     | t/m <sup>3</sup> |
| 1  | AC-WC            | 0.05  | 2.2              |
| 2  | AC-BC            | 0.1   | 2.2              |
| 3  | AC-Base          | 0.15  | 2                |
| 4  | Agregat A        | 0.15  | 1.9              |
| 5  | Agregat B        | 0.2   | 1.9              |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

### Tinggi Timbunan Awal (H<sub>initial</sub>)

Sebelum merencanakan tinggi timbunan awal, hitung beban-beban ( $q$ ) yang akan diterima oleh tanah dasar yaitu beban akibat timbunan dan beban perkerasan (*surcharge*). Beban akibat timbunan ( $q_{\text{timbunan}}$ ) dilakukan dengan mengasumsikan tinggi timbunan ( $H_{\text{asumsi}}$ ) terlihat pada Tabel 3. Untuk beban perkerasan (*surcharge*) dan beban lalu lintas terlihat pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 yang kemudian akan dikonversikan ke tanah timbunan sehingga menghasilkan tinggi timbunan *surcharge* ( $H_{\text{surcharge}}$ )

**Tabel 3.** Asumsi Beban Timbunan

| No | $H_{\text{asumsi}}$<br>(m) | $\gamma$ timb<br>( $t/m^3$ ) | $q_{\text{timbunan}}$ ( $t/m^2$ ) |
|----|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
|    | a                          | b                            | a x b                             |
| 1  | 3                          | 1.85                         | 5.55                              |
| 2  | 4                          | 1.85                         | 7.4                               |
| 3  | 5                          | 1.85                         | 9.25                              |
| 4  | 6                          | 1.85                         | 11.1                              |
| 5  | 7                          | 1.85                         | 12.95                             |
| 6  | 8                          | 1.85                         | 14.8                              |
| 7  | 9                          | 1.85                         | 16.65                             |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Tabel 4.** Tinggi Timbunan *Surcharge* ( $H_{\text{surcharge}}$ ) Untuk 3 meter

| No    | Beban       | Tegangan      | $\gamma$            | $H_{\text{surcharge}}$ |
|-------|-------------|---------------|---------------------|------------------------|
|       |             | n ( $t/m^2$ ) | timb<br>( $t/m^3$ ) | (m)                    |
|       |             | b             | c                   | c/b                    |
| 1     | Perkerasan  | 1.295         | 1.85                | 0.7                    |
| 2     | Lalu lintas | 1.2           |                     | 0.649                  |
| Total |             |               |                     | 1.349                  |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Tabel 5.** Tinggi Timbunan *Surcharge* ( $H_{\text{surcharge}}$ ) Untuk 4 meter

| No    | Beban      | Tegangan    | $\gamma$            | $H_{\text{surcharge}}$ |
|-------|------------|-------------|---------------------|------------------------|
|       |            | ( $t/m^2$ ) | timb<br>( $t/m^3$ ) | (m)                    |
|       |            | b           | c                   | c/b                    |
| 1     | Perkerasan | 1.295       | 1.85                | 0.7                    |
| 2     | Lalulintas | 0.8         |                     | 0.432                  |
| Total |            |             |                     | 1.132                  |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

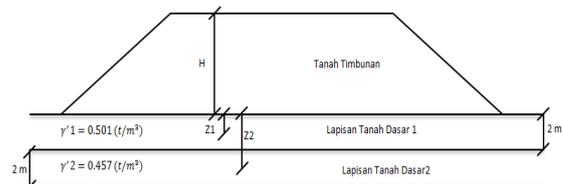
**Tabel 6.** Tinggi Timbunan *Surcharge* ( $H_{\text{surcharge}}$ ) Untuk 5-9 meter

| No    | Beban      | Tegangan    | $\gamma$            | $H_{\text{surcharge}}$ |
|-------|------------|-------------|---------------------|------------------------|
|       |            | ( $t/m^2$ ) | timb<br>( $t/m^3$ ) | (m)                    |
|       |            | b           | c                   | c/b                    |
| 1     | Perkerasan | 1.295       | 1.85                | 0.7                    |
| 2     | Lalulintas | 0.6         |                     | 0.324                  |
| Total |            |             |                     | 1.024                  |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Tegangan *overburden* efektif ( $p_o'$ )**

Agar mendapatkan perhitungan yang akurat, tegangan *overburden* efektif dihitung tiap 2 meter lapisan tanah lunak. Letak titik tinjau tegangan *overburden* berada ditengah lapisan tanah dasar dan jarak dari titik tinjau tegangan ke permukaan tanah dasar disebut z.



**Gambar 9.** Sketsa perhitungan tegangan *overburden* ( $p_o'$ )

(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

**Tabel 7.** Perhitungan Tegangan *Overbudden* efektif

| Titik Tinjau | H   | z    | $\gamma_{\text{sat}}$ | $\gamma_w$  | $\gamma'$   | $p_o'$      |
|--------------|-----|------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
|              | (m) | (m)  | ( $t/m^3$ )           | ( $t/m^3$ ) | ( $t/m^3$ ) | ( $t/m^2$ ) |
|              | B   | D    | E                     | F=D-E       |             |             |
| 1            | 2   | 1    | 1.501                 | 1           | 0.501       | 0.501       |
| 2            | 2   | 1    | 1.457                 | 1           | 0.457       | 1.459       |
| 3            | 2   | 1    | 1.457                 | 1           | 0.457       | 2.373       |
| 4            | 2   | 1    | 1.457                 | 1           | 0.457       | 3.287       |
| 5            | 2   | 1    | 1.584                 | 1           | 0.584       | 4.328       |
| 6            | 2   | 1    | 1.584                 | 1           | 0.584       | 5.496       |
| 7            | 2   | 1    | 1.536                 | 1           | 0.536       | 6.616       |
| 8            | 2.9 | 1.47 | 1.536                 | 1           | 0.536       | 7.942       |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Tambahan tegangan akibat beban timbunan ( $\Delta p$ )**

Penambahan tegangan berasal dari beban timbunan, dalam perhitungan ini beban timbunan yang dipakai adalah  $q = 5,5 t/m^2$ .

Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 4 dan menggunakan rumus persamaan (7) dan (8).

Lapisan pertama

$a = 10 \text{ m}$ ,  $b = 18,05 \text{ m}$ ,  $z = 1 \text{ m}$

$$a1 = \tan^{-1}\left(\frac{18.05 + 10}{1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{18.05}{1}\right) = 0.01971$$

$$a2 = \tan^{-1}\left(\frac{18.05}{1}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{18.05}{1}\right) = 1.5154$$

Maka didapatkan nilai distribusi tegangan ( $\Delta p$ ) dengan menggunakan rumus persamaan (6) :

$$\Delta p1 = \frac{q}{\pi} \left[ \left( \frac{18.05 + 10}{10} \right) (1.460433 + 0.39172) - \frac{18.05}{10} (1.460443) \right] \times 2$$

$$\Delta p1 = 9.597635 \text{ t/m}^2.$$

Untuk lapisan selanjutnya hingga kedalaman 16,95 m terlampir di Tabel 8.

**Tabel 8.** Distribusi Tegangan tanah untuk  $q = 5,5 \text{ t/m}^2$

| Tinjau | Faktor I |       |     |        |        | $\Delta p$<br>t/m <sup>2</sup> |
|--------|----------|-------|-----|--------|--------|--------------------------------|
|        | a        | b     | z   | a1     | a2     |                                |
| 1      | 10       | 18.05 | 1   | 0.0197 | 1.5154 | 9.743797                       |
| 2      | 10       | 18.05 | 2   | 0.0391 | 1.4604 | 9.590096                       |
| 3      | 10       | 18.05 | 3   | 0.0581 | 1.4060 | 9.435782                       |
| 4      | 10       | 18.05 | 4   | 0.0764 | 1.3527 | 9.280621                       |
| 5      | 10       | 18.05 | 5   | 0.0938 | 1.3005 | 9.124456                       |
| 6      | 10       | 18.05 | 6   | 0.1101 | 1.2498 | 8.967223                       |
| 7      | 10       | 18.05 | 7   | 0.1253 | 1.2008 | 8.808952                       |
| 8      | 10       | 18.05 | 8.4 | 0.1455 | 1.1318 | 8.573886                       |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Penurunan Segera**

Untuk menghitung penurunan segera digunakan persamaan (1) dan untuk menghitung nilai  $E'$  menggunakan persamaan

(2). Data tanah yang digunakan pada lapisan pertama.

$q = 5.55 \text{ t/m}^2$ ,  $E = 4000$ ,  $h = 2 \text{ m}$ ,  $\mu = 0.4$

$$E' = \left( \frac{4000}{1 - \frac{2 \times 0.4^2}{1 - 0.4}} \right) = 8571.429$$

$$Si = q \sum i \left( \frac{h}{E'} \right) = 5.55 \times 1 \left( \frac{2}{8571.429} \right)$$

Maka, nilai penurunan segera pada lapis pertama adalah  $Si = 0.00129 \text{ m}$ .

Untuk hasil perhitungan lapisan berikutnya hingga kedalaman 16,95 m terlampir pada Tabel 9.

**Penurunan Konsolidasi (Sc)**

Untuk menghitung penurunan konsolidasi harus mempertimbangkan lempung *normally consolidated* atau *over consolidated*.

Lapisan pertama

$$po'1 = 0.501 \text{ t/m}^2$$

$$\Delta p1 = 9.743797 \text{ t/m}^2$$

$$e_0 = 2.123$$

$$H_1 = 2 \text{ m}$$

$$Cr = 0.08$$

$$pc' = 11.81 \text{ t/m}^2$$

Untuk lapisan pertama sifat tanah *over consolidated* dengan  $Po' + \Delta p \leq Pc'$  maka memakai persamaan (4):

$$Sc1 = \left[ \frac{0.08}{1 + 2.123} \text{ LOG} \frac{0.501 + 9.743797}{0.501} \right] \times 2$$

$$Sc1 = 0.067149 \text{ m}$$

Lapisan kedua

$$po'2 = 1.459 \text{ t/m}^2, \Delta p2 = 9.59 \text{ t/m}^2$$

$$e_0 = 2.244$$

$$H_2 = 2 \text{ m}$$

$$Cr = 0.08$$

$$pc' = 9.842 \text{ t/m}^2$$

$$Cc = 0.83$$

Untuk lapisan kedua sifat tanah *over consolidated* dengan  $Po' + \Delta p > Pc'$  maka memakai persamaan (5):

$$Sc2 = \left[ \frac{0.08}{1 + 2.244} \text{ LOG} \frac{9.842}{1.459} + \frac{0.83}{1 + 2.244} \text{ LOG} \frac{1.459 + 9.590096}{9.842} \right] \times 2$$

$$Sc2 = 0.043525 \text{ m}$$

Perhitungan penurunan tanah dasar terus dilakukan hingga lapisan ke-16,95 m. Total penurunan dengan mengambil salah satu beban  $q = 5,5 \text{ t/m}^2$  dapat dilihat pada Tabel 9.

**Tabel 9.** Total Penurunan untuk beban  $q = 5,5 \text{ t/m}^2$

| Tinggi Timbunan | $C_c$ | $C_r$ | $e_0$ | $\Delta P$ | $Po'$  | $pc$  | $S_i$ | $S_c$  |
|-----------------|-------|-------|-------|------------|--------|-------|-------|--------|
|                 |       |       |       |            |        |       |       |        |
| 1               | 0.89  | 0.08  | 2.23  | 9.7437     | 0.501  | 11.81 | 0.013 | 0.0671 |
| 2               | 0.83  | 0.08  | 2.04  | 9.5900     | 1.459  | 9.842 | 0.021 | 0.0435 |
| 3               | 0.83  | 0.08  | 2.04  | 9.4357     | 2.373  | 9.842 | 0.031 | 0.0525 |
| 4               | 0.83  | 0.08  | 2.04  | 9.2806     | 3.287  | 9.842 | 0.041 | 0.0623 |
| 5               | 0.48  | 0.04  | 1.76  | 9.1244     | 4.328  | 9.349 | 0.052 | 0.0617 |
| 6               | 0.48  | 0.04  | 1.76  | 8.9672     | 5.496  | 9.349 | 0.052 | 0.0714 |
| 7               | 0.65  | 0.06  | 1.13  | 8.8089     | 6.616  | 11.81 | 0.060 | 0.0569 |
| 8               | 0.3   | 0.08  | 1.38  | 8.5738     | 7.9426 | 11.81 | 0.108 | 0.0638 |
| Total Penurunan |       |       |       |            |        |       |       | 0.5172 |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

**Tinggi Timbunan Awal ( $H_{initial}$ )**

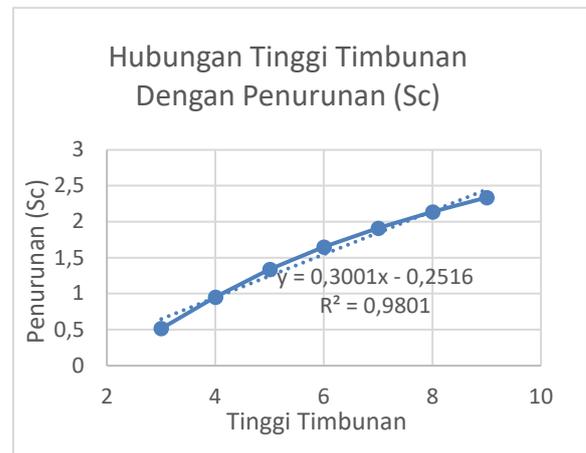
Nilai penurunan total akibat beban timbunan ( $q_{timbunan}$ ) yang divariasikan dengan tinggi pemisalan ( $H_{pem}$ ) diperoleh, untuk variasi beban timbunan lainnya direkap dalam Tabel 10.

**Tabel 10.** Rekapitulasi hasil perhitungan penurunan ( $S_c$ )

| No | $H_{pem}$ | $v_{timb}$  | $q_{timb}$  | Total penurunan (m) |
|----|-----------|-------------|-------------|---------------------|
|    | (m)       | ( $t/m^3$ ) | ( $t/m^2$ ) |                     |
|    | a         | b           | a x b       |                     |
| 1  | 3         | 1.85        | 5.55        | 0.51717267          |
| 2  | 4         | 1.85        | 7.4         | 0.9541249           |
| 3  | 5         | 1.85        | 9.25        | 1.33719487          |
| 4  | 6         | 1.85        | 11.1        | 1.64777931          |
| 5  | 7         | 1.85        | 12.95       | 1.90985962          |
| 6  | 8         | 1.85        | 14.8        | 2.13712671          |
| 7  | 9         | 1.85        | 16.65       | 2.33816096          |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

Berdasarkan rekapitulasi hasil perhitungan penurunan ( $S_c$ ) dari Tabel 10, maka hasil tersebut diplotkan dalam bentuk grafik untuk mendapatkan persamaan regresi yang digunakan untuk menghitung penurunan ( $S_c$ ) yang terjadi akibat tinggi timbunan awal ( $H_{initial}$ ).



**Gambar 10.** Grafik Hubungan Tinggi timbunan vs Penurunan ( $S_c$ )  
(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

Berdasarkan Gambar 10, hubungan tinggi timbunan dengan penurunan ( $S_c$ ) diperoleh dari persamaan regresi :

$$y = 0.3001x - 0.2516$$

$H_{rencana} = 5 \text{ m}$ ,

maka tinggi timbunan awal ( $H_{initial}$ ) :

$$H_{initial} = H_{final} + H_{surcharge}$$

$$H_{initial} = 5 \text{ m} + 1.024 \text{ m}$$

$$H_{initial} = 6.024 \text{ m}$$

Dengan menggunakan persamaan regresi, dicari nilai penurunan ( $y$ ) :

$$x = H_{initial} = 6.024 \text{ m}$$

$$y = 0.2875x - 0.2516$$

$$y = 0.3001(6.024) - 0.2516$$

$$y = 1.556 \text{ m}$$

Jadi, penurunan yang terjadi akibat tinggi timbunan awal ( $H_{initial}$ ) 6,024 m adalah sebesar 1.556 meter.

Selanjutnya dilakukan perhitungan tinggi timbunan yang akan di bongkar atau di tambah

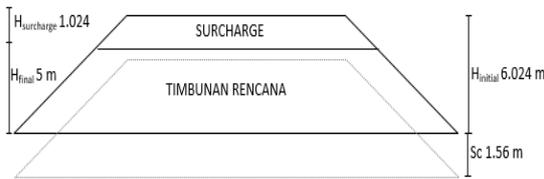
untuk mencapai tinggi timbunan rencana ( $H_{final}$ ):

$$H_{bongkar} = H_{initial} - H_{final} - Sc$$

$$H_{bongkar} = 6.024 \text{ m} - 5 \text{ m} - 1.556 \text{ m}$$

$$H_{bongkar} = -0.532 \text{ m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, maka dapat disimpulkan tinggi timbunan surcharge ( $H_{surcharge}$ ) tidak di lakukan pembokaran melainkan di tambah penimbunan untuk memenuhi tinggi timbunan rencana ( $H_{final}$ ) sebesar 5 meter, dapat dilihat pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Sketsa  $H_{bongkar}$   
(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

**Waktu Konsolidasi**

Penurunan yang terjadi akibat beban timbunan dan beban *surcharge* telah diperoleh. Maka waktu penurunan konsolidasi dapat dihitung menggunakan persamaan (10). Hal ini dilakukan untuk mengetahui perlu atau tidaknya perbaikan tanah dasar dalam mempercepat waktu pemampatan yang terjadi. Parameter tanah yang dibutuhkan adalah nilai  $C_v$  dimana nilai  $C_v$  diperoleh dari hasil pengujian konsolidasi dilaboratorium berikut terlampir pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Nilai  $C_v$

| Kedalaman (m) | ( $C_v$ ) $cm^2/sec$ |
|---------------|----------------------|
| 0-2           | 0.0242               |
| 2-4           | 0.0121               |
| 4-6           | 0.0121               |
| 6-8           | 0.0121               |
| 8-10          | 0.0226               |
| 10-12         | 0.0226               |
| 12-14         | 0.0186               |
| 14-16.95      | 0.00177              |

Sumber: Hasil Analisa, 2020

Karena setiap lapisan tanah memiliki nilai  $C_v$  yang berbeda-beda maka nilai  $C_v$  yang dipakai adalah nilai  $C_v$  gabungan.

$$Cv_{gab} = \frac{(\sum h)^2}{\left( \left( \frac{h_1}{\sqrt{Cv_1}} \right) + \left( \frac{h_2}{\sqrt{Cv_2}} \right) + \left( \frac{h_i}{\sqrt{Cv_i}} \right) \right)^2}$$

$$Cv_{gab} = \frac{(16.95)^2}{\left( \left( \frac{2}{\sqrt{0.0242}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0121}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0121}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0121}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0226}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0226}} \right) + \left( \frac{2}{\sqrt{0.0186}} \right) + \left( \frac{2.95}{\sqrt{0.00177}} \right) \right)^2}$$

$$Cv_{gab} = 0.008987469 \text{ cm}^2/sec$$

$$= 28.34288137 \text{ m}^2/year.$$

$U = 90\%$  maka  $T_v = 0,848$  dengan kondisi *double drainage*,  $H_{dr} = 1/2.H$  dengan menggunakan persamaan (10), maka:

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

$$t = \frac{0.848(1/2 \times 16.95)^2}{28.34288137}$$

$$t = 2,149 \text{ tahun}$$

Jadi, waktu pemampatan yang terjadi pada lapisan tanah lempung lunak sedalam 16,95 m adalah 2,149 tahun.

**5. Kesimpulan dan Saran**

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa besar penurunan tanah dasar pada jalan tol Palembang-Indralaya STA 1+670 dengan tinggi rencana timbunan (beban *preloading*) 5 meter adalah sebesar 1,556 meter. Waktu yang di butuhkan untuk mencapai derajat pemampatan 90% adalah 2,149 tahun.

Dari hasil penelitian ini, penelitian dilanjutkan dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) yang bertujuan mempercepat waktu penurunan tanah dasar lempung lunak tersebut.

Dan diperlukan pemasangan dan pengamatan instrumen geoteknik di lapangan untuk mengetahui kecocokan perhitungan penurunan dengan penurunan yang terjadi dilapangan.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] E. T. Utami, I. N. Hamdhan, and K. Suwitaatmadja, "Analisis Stabilitas pada Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. (Hal. 1-9)," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 3, pp. 1–9, 2019, doi: 10.26760/rekaracana.v5i3.1.
- [2] C. E. Putra *et al.*, "Analisis Alternatif Perbaikan Tanah Lunak dan Sangat Lunak pada Jalan Tol," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 3, no. 4, pp. 1137–1150, 2020.
- [3] W. P. Kuswanda, "Perbaikan Tanah Lempung Lunak Metoda Preloading pada Pembangunan Infrastruktur Transportasi di Pulau Kalimantan," *Pros. Semin. Nas. Geotek.*, pp. 188–207, 2016.
- [4] O. W. Wardhana, "Analisis Waktu Penurunan Konsolidasi Tanah Dengan Metode Preloading-Prefabricated Vertical Drains Pada Proyek Pembangunan Kompleks Pendidikan Islam Al Azhar 57 JAMBI," Universitas Jambi, 2021.
- [5] C. Matthew and C. A. Makarim, "Analisis Timbunan Di Atas Lapisan Tanah Gambut Dengan Metode Preloading Di Kalimantan Tengah," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 3, no. 2, p. 323, 2020, doi: 10.24912/jmts.v3i2.6976.
- [6] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 2*. Gadjah Mada University Press, 2010.
- [7] H. Wahyudi, *Daya Dukung Pondasi Dangkal*. Surabaya : ITS Press, 2012.
- [8] B. M. Das, *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Penerbit : Erlangga, Jakarta, 1993.
- [9] A. Zhafirah and D. Amalia, "Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang," *Potensi J. Sipil Politek.*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2019, doi: 10.35313/potensi.v21i1.1314.
- [10] M. Bilal and A. Talib, "A study on advances in ground improvement techniques," *Adv. Geotech. Eng.*, no. April, pp. 322–330, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.4865.4965.