

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

Enita Suardi¹, Liliwarti², Merley Misriani³, Ibnu Iqbal⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang, Kampus Limau Manis Kota Padang, Indonesia

Corresponding Author : 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

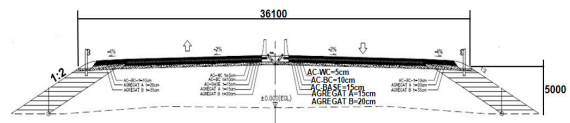
meters. The time it takes to achieve a 90% compression degree is 2,149 years. From the results of this study, the research continued by using prefabricated vertical drain (PVD) so that the base soil compression time is shorter.

Keywords: preloading, soil improvement, settlement, embankment, time of consolidation

1. Pendahuluan

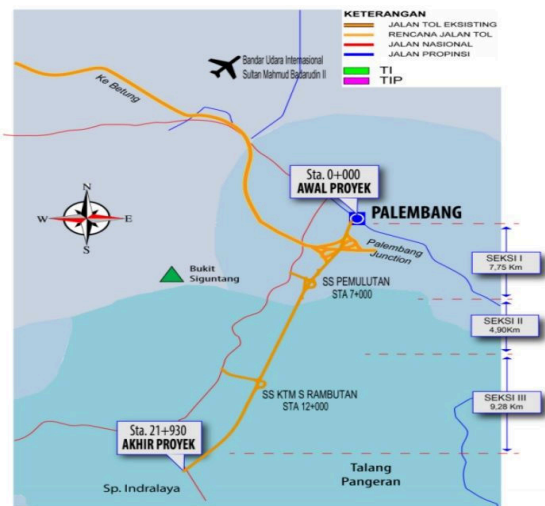
Pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera merupakan langkah nyata dalam program pemerintah dalam meningkatkan perekonomian dan kemajuan suatu wilayah. Salah satu Pembangunan Jalan tol Trans Sumatera yaitu Jalan Tol Palembang-Indralaya (Palindra) yang terletak di antara Kotamadya Palembang dan Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan. Perencanaan Panjang Tol Palindra mencapai 2,2 km yang dibagi dalam tiga seksi. Seksi pertama adalah Palembang – Pamulutan dengan panjang tol 7,10 km, seksi kedua adalah Pamulutan – KTM Rambutan dengan panjang tol 5,70 km dan seksi ketiga adalah KTM Rambutan – Indralaya dengan panjang tol 9,30 km.

muka air tanah tinggi. Potongan melintang dari jalan tersebut terlihat pada Gambar 2.

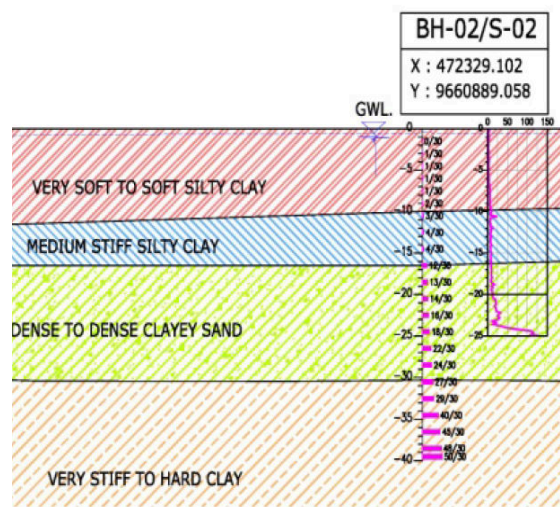


Gambar 2. Potongan melintang jalan (Sumber : Data Sekunder)

Kondisi tanah dasar jalan tol Palembang-Indralaya merupakan tanah yang 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. Sehingga pada masa layan jalan tidak akan terjadi *differential settlement*. Kondisi lapisan tanah dapat dilihat dari hasil Boring Log pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 1. Ruas Tol Palembang – Indralaya (Sumber : Dok. BPJT Kementerian PUPR)



Gambar 3. Profil lapisan tanah Bore Hole 2 (Sumber : Data Sekunder)

Perencanaan trase jalan Tol Palindra melewati daerah rawa dengan kondisi elevasi

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/m²), 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 μ 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/m²), P_c' adalah tegangan prakonsolidasi efektif (t/m²) dan Δp 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 (Δp)

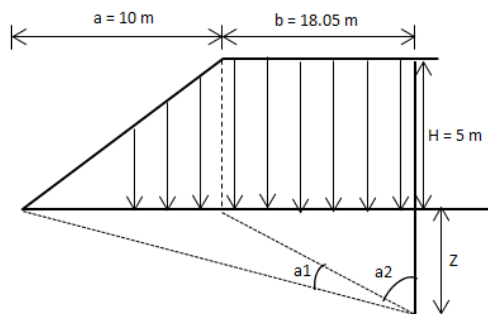
Untuk menghitung besaran Δp yang terjadi dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

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

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

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

dimana q adalah tegangan vertical efektif di permukaan tanah akibat beban (t/m²) 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 γ_{sat} digunakan persamaan sebagai berikut :

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

dimana γ_{sat} adalah berat volume tanah yang jenuh air (gr/cm³), G_s adalah berat jenis, e adalah angka pori dan γ_w adalah berat volume air = 1 gr/cm³.

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 (m²/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 $U_v > 60\%$

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

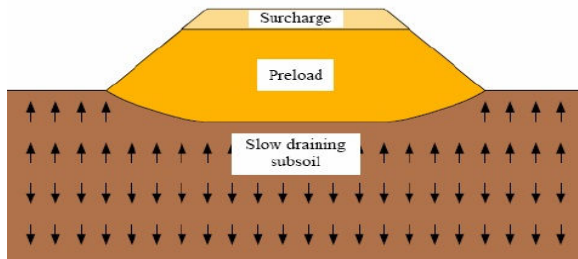
dimana:

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

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

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 :

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

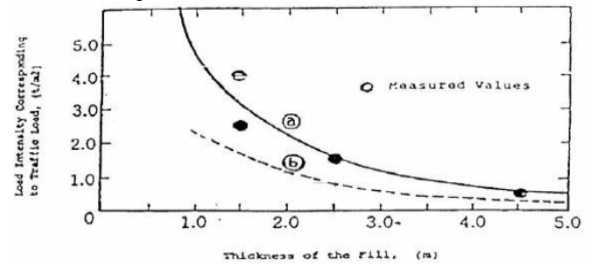
2.3.2 Beban yang bekerja diatas tanah dasar

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^2 , sedangkan tinggi timbunan 4 meter beban lalu lintasnya adalah 0,8 t/m^2 . Dan tinggi timbunan melebihi 5 meter maka beban lalu lintas adalah 0,6 t/m^2 .

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 (μ), Modulus Elastis (E) dan Modulus Oedeometrik (E'). Parameter yang diperlukan untuk menghitung penurunan konsolidasi yaitu tebal lapisan lempung (H), tambahan tegangan akibat beban (Δp), *compression index* (C_c), *recompression index* (C_r), angka pori awal (e_0), tekanan overburden (p_0) dan tekanan prakonsolidasi (p_c').

4. Analisis dan Pembahasan

Data Tanah Dasar

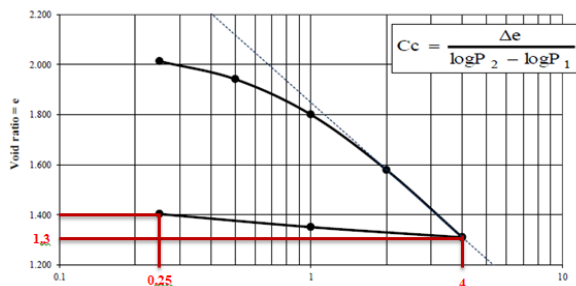
Data tanah yang digunakan diperoleh dari data hasil pengujian lapangan Bore Hole (BH-02/S-02), N-SPT dan hasil uji laboratorium hingga kedalaman 16,95 m. Profil tanah sesuai

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)

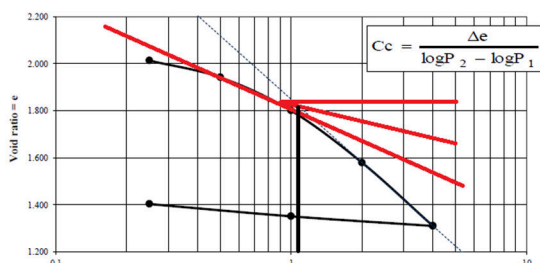
(Sumber: Hasil Analisa, 2020)

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/cm². 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	γ_{sat} (gr/cm ³)	Cc	Cr	pc’ (kg/cm ²)
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 ³
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_{initial})

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_{timbunan}) dilakukan dengan mengasumsikan tinggi timbunan (H_{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_{asumsi} (m)	γ timb (t/m^3)	q_{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	γ	$H_{\text{surcharge}}$
		n (t/m^2)	timb (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	γ	$H_{\text{surcharge}}$
		(t/m^2)	timb (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

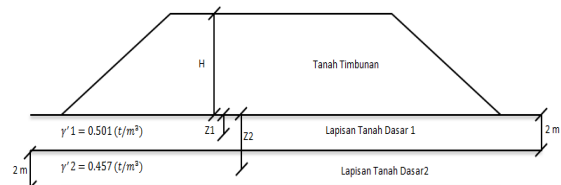
Tabel 6. Tinggi Timbunan Surcharge ($H_{\text{surcharge}}$) Untuk 5-9 meter

No	Beban	Tegangan	γ	$H_{\text{surcharge}}$
		(t/m^2)	timb (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	γ_{sat}	γ_w	γ'	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 (Δp)

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 m, b = 18,05 m, z = 1 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 (Δp) dengan menggunakan rumus persamaan (6) :

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

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

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

Tabel 8. Distribusi Tegangan tanah untuk q = 5,5 t/m²

Tinjau	Faktor I					Δp t/m ²
	a m	b m	z m	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 t/m², E = 4000, h = 2 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 $Si = 0.00129 m$.

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

$$po'1 = 0.501 t/m^2$$

$$\Delta p1 = 9.743797 t/m^2$$

$$e_0 = 2.123 \quad H_1 = 2 m$$

$$Cr = 0.08 \quad pc' = 11.81 t/m^2$$

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

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

$$Sc1 = 0.067149 m$$

Lapisan kedua

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

$$e_0 = 2.244 \quad H_2 = 2 m$$

$$Cr = 0.08 \quad pc' = 9.842 t/m^2$$

$$Cc = 0.83$$

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

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

$$Sc2 = 0.043525 m$$

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	ΔP	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	2.44	9.5900	1.459	9.842	0.021	0.0435
3	0.83	0.08	2.44	9.4357	2.373	9.842	0.031	0.0525
4	0.83	0.08	2.44	9.2806	3.287	9.842	0.041	0.0623
5	0.48	0.04	1.676	9.1244	4.328	9.349	0.052	0.0617
6	0.48	0.04	1.676	8.9672	5.496	9.349	0.052	0.0714
7	0.65	0.06	1.913	8.8089	6.616	11.81	0.060	0.0569
8	0.3	0.08	1.238	8.5738	7.9426	11.81	0.108	0.0638
Total Penurunan								0.5172

Sumber: Hasil Analisa, 2020

Tinggi Timbunan Awal ($H_{initial}$)

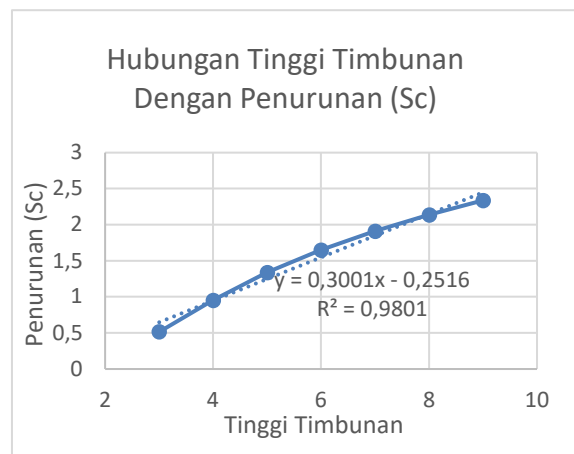
Nilai penurunan total akibat beban timbunan ($q_{timbunan}$) yang divariasikan dengan tinggi pemisalan (H_{pem}) diperoleh, untuk variasi beban timbunan lainnya direkap dalam Tabel 10.

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

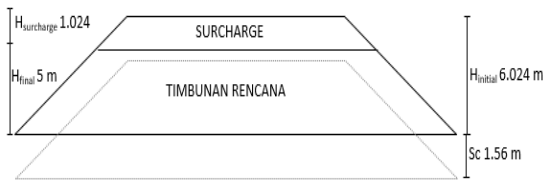
untuk mencapai tinggi timbunan rencana (H_{final}):

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

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

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

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.

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

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

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

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

$U = 90\%$ 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.