

ANALISIS PERCEPATAN KONSOLIDASI TANAH LUNAK DENGAN METODE PRELOADING MENGGUNAKAN SOFTWARE GEOSTUDIO 2018 R2

Bambang Setiawan, Galuh Chrismaningwang, Dicky Adi Denaldi,

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126. Telp. 0271-634524.

Email: bambangsetiawan@staff.uns.ac.id

Abstract

Highways are one of the transportation infrastructures frequently used in Indonesia. Due to the road's construction on unstable soil, it is currently in a vulnerable state of failure. Since areas with good soil characteristics are limited, sometimes structures need to be built on problematic soils. Therefore, it is necessary to improve the quality of the problematic soil to reduce the potential threat of road damage caused by the problematic subgrade. One of the attempts is using preloading for soil improvement. This research focuses on how to overcome soft soil consolidation with the preloading method using GeoStudio software. The analysis's outcomes, which were examined by software, will be compared to calculations before improvement. SIGMA/W and SLOPE/W analyses provided by GeoStudio were performed by using two different types of embankments, i.e., embankment A with a slope of 1 V:1,5 H and embankment B with a slope of 1 V:2 H. The results show that the soil settlement due to embankment using the conventional method is 1,70 meters for embankment A and 1,69 meters for embankment B. While the calculation using software resulted in a settlement of 1,39 meters for embankment A and 1,39 meters for embankment B.

Keywords: GeoStudio, preloading, soft soils improvement.

Abstrak

Prasarana transportasi yang sering digunakan di Indonesia salah satunya adalah jalan. Konstruksi jalan yang dilaksanakan di atas tanah yang labil menyebabkan kondisi jalan rentan terhadap kerusakan. Terbatasnya jumlah lahan dengan jenis tanah yang sesuai menyebabkan konstruksi dilakukan di lahan bermasalah. Pembangunan di lahan dengan tanah bermasalah perlu dilakukan perbaikan dalam upaya meningkatkan kualitas tanah yang bermasalah guna mengurangi potensi kerusakan jalan akibat tanah dasar yang bermasalah. Upaya yang dilakukan untuk analisis perbaikan tanah salah satunya adalah perhitungan dibantu dengan *software*. Penelitian ini berfokus tentang bagaimana mengatasi konsolidasi tanah lunak menggunakan metode *preloading* dan mendesainnya menggunakan *software* GeoStudio. Hasil analisis yang dibantu dengan *software* akan dibandingkan dengan perhitungan sebelum perbaikan dilakukan. Analisis SIGMA/W dan SLOPE/W menggunakan GeoStudio akan dilakukan dengan menggunakan dua jenis timbunan yang kemiringannya yang berbeda, yakni timbunan A dengan kemiringan lereng 1 V:1,5 H dan timbunan B dengan kemiringan lereng 1 V:2 H. Hasil dan temuan pada penelitian ini adalah perhitungan penurunan tanah akibat timbunan dengan metode konvensional menghasilkan penurunan tanah sebesar 1,70 meter untuk timbunan A dan 1,69 meter untuk timbunan B, sedangkan perhitungan dengan menggunakan *software* menghasilkan penurunan 1,39 meter untuk timbunan A dan 1,30 meter untuk timbunan B.

Kata Kunci: GeoStudio, perbaikan tanah lunak, prapembebanan.

PENDAHULUAN

Tanah lunak merupakan jenis tanah bermasalah yang dapat dengan mudah dijumpai di Indonesia. Karakteristik tanah ini antara lain memiliki nilai kompresibilitas atau kembang susut yang tinggi serta daya dukung yang rendah (Das, 2012; Ameratunga, 2016). Tanah jenis ini dapat menyebabkan suatu konstruksi mengalami ketidakstabilan akibat penurunan yang besar dan dalam waktu yang lama (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2002). Kondisi tanah yang tidak stabil ini bukan berarti tidak dapat digunakan sebagai tanah dasar. Melalui perhitungan serta analisis, tanah jenis ini dapat ditingkatkan daya dukungnya. Upaya perbaikan tanah lunak tersebut salah satunya adalah menggunakan metode prapembebanan atau *preloading*. Pelaksanaan metode *preloading* adalah dengan memberikan beban berupa timbunan yang nilainya sebesar beban konstruksi yang akan bekerja. Beberapa penelitian telah dilakukan dan menunjukkan bahwa metode *preloading* efektif dalam mempercepat waktu konsolidasi, baik dilakukan sendiri (Filippo dkk., 2016; Mridakh, 2019) atau dikombinasikan dengan Prefabricated Vertical Drains (Zhang, dkk., 2018; Indrarnatna dkk., 2016; Cascone dan Biondi, 2013; Wang dkk., 2018).

Perhitungan dan perencanaan perbaikan tanah yang dahulu menggunakan metode konvensional saat ini sudah dibantu dengan bantuan *software*. Beragam *software* dikembangkan guna mempermudah serta mempersingkat waktu perhitungan yang diperlukan dalam perencanaan metode perbaikan tanah. GeoStudio merupakan salah satu *software* yang memiliki fasilitas untuk menganalisis permasalahan terkait dengan bidang geoteknik. Fitur analisis

permasalahan yang disediakan pengembang dalam *software* ini beragam. Fitur yang digunakan antara lain adalah analisis deformasi yang dibantu dengan menggunakan SIGMA/W serta analisis lereng menggunakan SLOPE/W. Program ini juga telah banyak digunakan untuk meneliti kasus-kasus timbunan pada tanah lunak (Pardoyo, 2021; Pardouie dan Pardouie, 2022; Atapattu, dkk., 2022).

Penelitian ini dilaksanakan dengan melakukan analisis tanah lunak yang dimodelkan secara 2D pada GeoStudio SIGMA/W dan SLOPE/W agar nantinya dapat diketahui dimensi timbunan yang digunakan pada metode *preloading* dan waktu optimal yang diperlukan untuk proses tersebut. Keunggulan dari penggunaan dua produk dari GeoStudio tersebut adalah adanya integrasi antar analisis sehingga apabila dilakukan perubahan pada model, proses yang diperlukan akan lebih mudah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran pada insinyur teknik, terlebih pada bidang geoteknik, terkait penggunaan aplikasi GeoStudio dalam analisis permasalahan tanah lunak sehingga ke depannya, permasalahan pada tanah lunak dapat diatasi.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode perhitungan numerik yang dikombinasikan dengan analisis menggunakan bantuan *software* GeoStudio 2018 R2. GeoStudio adalah sebuah *software* yang dikembangkan oleh GEOSLOPE International, yang digunakan untuk menganalisis perilaku tanah menggunakan analisis numerik. *Software* ini mencakup beberapa produk yang digunakan dalam perhitungan pada bidang *geotechnical* seperti SLOPE/W, SIGMA/W, TEMP/W, SEEP/W, AIR/W, CTRAN/W dan QUAKE/W (Krahn, 2013).

Timbunan serta lapisan tanah, yang kemudian disebut Model 2 Dimensi (2D), dimodelkan dengan bantuan *software* AutoCAD 2019. Lapisan tanah dibuat berdasarkan hasil pengujian yang didapatkan melalui data pengujian *boring log* dan Uji SPT yang dilakukan pada Tanjung Selor, Kalimantan Utara. Data tersebut kemudian disederhanakan dan dimodelkan menjadi 4 lapis tanah lunak. Hasil pemodelan yang telah dibuat kemudian dimodelkan ke *software* GeoStudio. Model yang dianalisis akan dibedakan menjadi dua, yakni timbunan A yang memiliki lereng 1 V:1,5 H dan timbunan B yang memiliki lereng 1 V:2 H.

Langkah selanjutnya adalah menentukan beban lalu lintas yang akan bekerja pada ruas jalan yang direncanakan. Perhitungan beban lalu lintas ditentukan berdasarkan fungsi dan sistem jaringan jalan yang diasumsikan berdasarkan Tabel 1 (Departemen Pekerjaan Umum, 2009) berikut.

Tabel 1. Data beban *traffic* untuk analisis

Fungsi	Sistem Jaringan	Lalu Lintas Harian Rata-rata	Beban lalu lintas (kN/m ²)
Primer	Arteri	Semua	15
	Kolektor	>10.000	15
		<10.000	12
Sekunder	Arteri	>20.000	15
		<20.000	12
	Kolektor	>6.000	12
		<6.000	10
	Lokal	>500	10
		<500	10

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2009

Nilai parameter SIGMA/W dengan model material berupa *linear-elastic (with pore water pressure change)* dan parameter SLOPE/W dengan model material berupa *Mohr-Coulomb*. Material ini digunakan karena perhitungan yang sangat cepat dan model stabilitas yang dihasilkan idealnya tepat (Józsa, 2011). Parameter pada model jenis ini tergolong mudah untuk didapatkan dari pengujian terhadap sampel tanah. Material kemudian didefinisikan sesuai dengan data yang telah diperoleh dari data sekunder berupa data pengujian sampel tak terganggu dan korelasi N-SPT terhadap parameter tanah.

Tanah dasar yang akan menerima beban harus dihitung kapasitas daya dukungnya sehingga nantinya tidak mengalami keruntuhan. Perhitungan kapasitas daya dukung tanah dilakukan dengan menggunakan persamaan ini (Das, 2012)

$$q_u = c.N_c + q.N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \dots\dots\dots [1]$$

keterangan:

- q_u = kapasitas daya dukung tanah (kN/m²)
- c = kohesi (kg/cm²)
- q = berat tanah di atas tanah lunak (kN/m²)
- γ = berat jenis tanah dasar (kN/m³)
- B = lebar timbunan (m)
- N_c, N_q, N_γ = faktor daya dukung *Terzaghi*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model 2D dibuat menggunakan *software* Autodesk AutoCAD 2019 dengan dimensi seperti ditampilkan pada Gambar 1, dan kemudian diimport pada *software* GeoStudio 2018 R2. Material yang telah ditentukan nilainya kemudian diinput dan diassign pada Model 2D. Model tersebut kemudian diberikan material sesuai dengan lapisannya. Nilai parameter yang digunakan sebagai input pada tiap jenis material ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai berikut

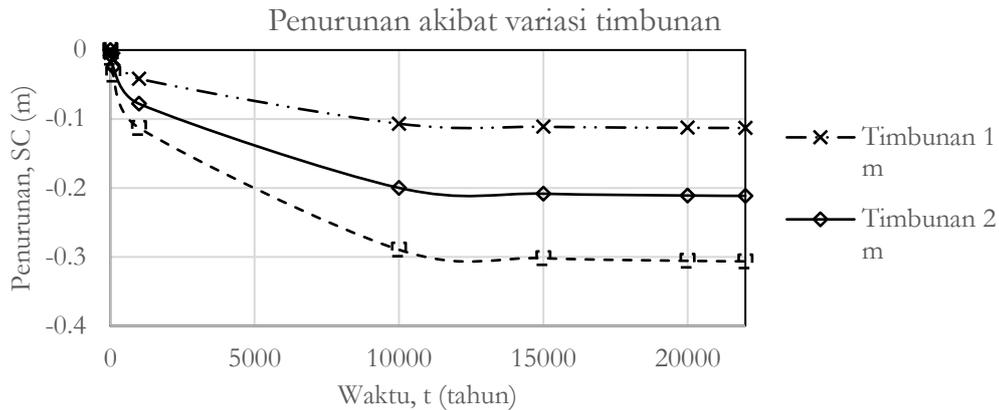


Gambar 1. Model 2D pada GeoStudio 2018 R2

Gambar 1 merupakan interpretasi pembagian lapisan tanah lunak yang dianalisis. Analisis dilakukan pada tanah yang memiliki nilai N-SPT < 10 sehingga diperoleh tanah lunak sedalam 26 meter. Pembagian lapisan tanah lunak dilakukan sesuai dengan data tanah tak terganggu (*undisturbed*) pada data sekunder pada tiap lapis kedalaman.

Beban Timbunan yang digunakan ($\Delta\sigma$)

Beban timbunan yang digunakan pada analisis *software* diperoleh dari perhitungan beban lalu lintas dan beban perkerasan yang diekivalenkan untuk mempermudah dalam proses perhitungan dan setelah proses *preloading* selesai dilakukan, tanah akan dibongkar setebal lapis perkerasan. Beban akibat timbunan *preloading* muncul akibat adanya elevasi timbunan. Elevasi timbunan yang digunakan diperoleh melalui proses *trial* hingga penurunan yang terjadi mencapai elevasi rencana.



Gambar 2. Grafik penurunan akibat variasi timbunan tiap satuan waktu

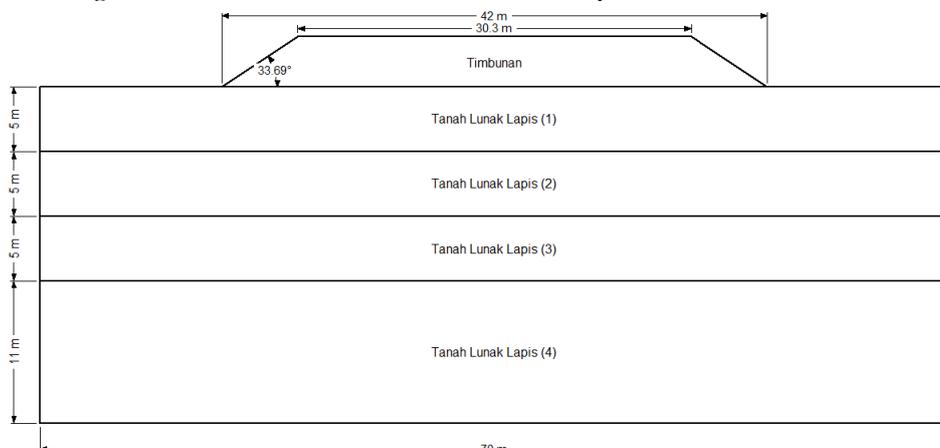
Gambar 2 merupakan grafik hasil perhitungan penurunan akibat variasi tinggi timbunan *preloading* awal. Tinggi timbunan awal ditentukan berdasarkan elevasi akhir yang paling mendekati elevasi rencana

Tabel 2. Detail lapis perkerasan

Lapis Perkerasan	Tebal (m)	γ (kN/m ³)	q_p (kN/m ²)
Perkerasan kaku	0,3	22	6,6
Lean concrete	0,15	20	3
Base A	0,15	20	3
q_p total (kN/m ²)			12,6

Tabel 2 merupakan perhitungan beban akibat lapis perkerasan. Spesifikasi perkerasan yang akan digunakan pada konstruksi jalan sesuai dengan kelas jalan yang telah ditentukan. Tebal tersebut disesuaikan berdasarkan asumsi berdasarkan topik serupa pada penelitian terdahulu.

Beban lalu lintas yang digunakan diambil sesuai dengan Tabel 1 dengan asumsi jalan yang direncanakan adalah jalan arteri dengan beban lalu lintas sebesar 15 kN/m². Kedua jenis beban ini kemudian diekuivalenkan dengan timbunan dengan berat volume tanah timbunan 19,78 kN/m³ sehingga didapat tebal timbunan akibat beban *traffic* dan tebal timbunan akibat beban perkerasan adalah masing-masing 0,76 m dan 0,64 m. Keseluruhan beban tersebut kemudian ditambahkan dengan elevasi rencana timbunan *preloading* sehingga tinggi keseluruhan timbunan adalah 3,90 m. Timbunan dengan elevasi tersebut kemudian ditambahkan pada Model 2D.



Gambar 3. Timbunan yang telah ditambahkan pada Model 2D

Gambar 3 merupakan model timbunan dan tanah lunak yang sudah dibuat menggunakan AutoCAD 2019. Timbunan yang ditambahkan pada Model 2D dibedakan menjadi dua jenis, yaitu Model 2D dengan kemiringan

lereng timbunan 1 V:1,5 H dan Model 2D dengan kemiringan lereng timbunan 1 V:2 H. Perhitungan menggunakan dua jenis kemiringan timbunan dilakukan guna menentukan timbunan mana yang memunculkan penurunan dan faktor aman yang lebih tinggi sehingga biaya pelaksanaan bisa lebih optimal.

Nilai parameter dari material tanah lunak dan timbunan kemudian didefinisikan sesuai dengan data yang telah diperoleh dari pengujian serta asumsi dari penelitian pendahulu. Detail nilai parameter yang digunakan pada tanah dasar dan timbunan ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 3. Parameter tanah timbunan

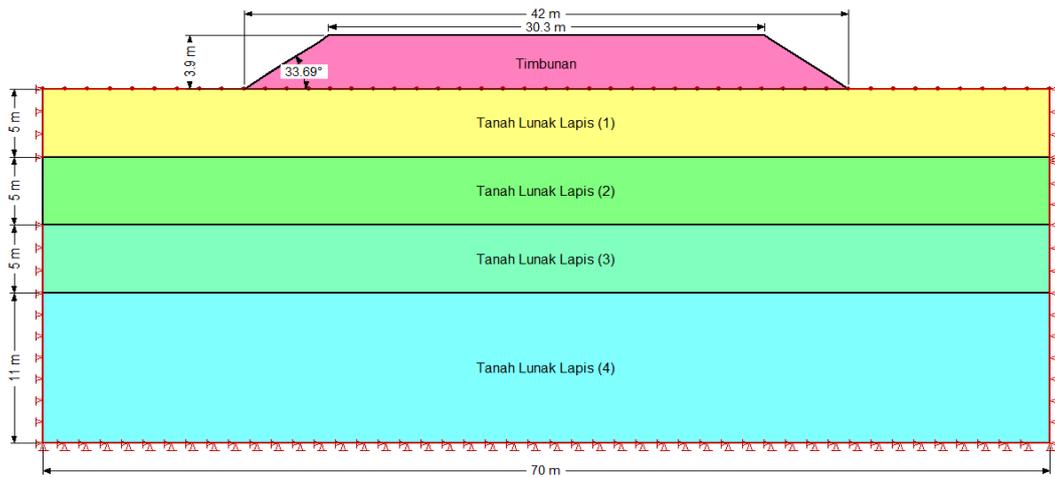
Parameter		Satuan	Nilai
Berat jenis	γ	kN/m ³	19,78
Kohesi	c	kN/m ²	0
Sudut geser dalam	Φ	°	40
Modulus elastisitas	E	kN/m ²	20.000
Angka <i>poisson</i>	ν	-	0,49
Koefisien permeabilitas vertikal	k_x	m/hari	0,086
Koefisien Permeabilitas Horizontal	k_y	m/hari	0,173

Tabel 3 merupakan parameter dari tanah timbunan yang jenisnya diasumsikan berupa tanah granuler dan nilainya diasumsikan berdasarkan penelitian terdahulu.

Tabel 4. Parameter *input* lapisan tanah dasar

Parameter		Satuan	Lapis			
			1	2	3	4
Berat volume basah	γ_b	kN/m ³	12,48	12,54	12,55	12,37
Berat volume kering	γ_d	kN/m ³	8,44	8,44	8,63	8,73
Berat volume jenuh	γ_{sat}	kN/m ³	15,08	15,27	15,21	15,29
Permeabilitas horizontal	k_x	m/hari	$9,29 \times 10^{-10}$	$7,29 \times 10^{-10}$	$6,94 \times 10^{-10}$	$6,01 \times 10^{-10}$
Angka <i>poisson</i>	ν	-	0,465	0,458	0,452	0,457
Modulus elastisitas	E	kPa	1053,24	1392,52	2836,57	3414,57
Kohesi	c	kN/m ²	8,34	6,08	4,61	10,79
Model material	-	-	<i>Linear elastic</i>	<i>Linear elastic</i>	<i>Linear elastic</i>	<i>Linear elastic</i>
Sudut gesek dalam	Φ	°	4,56	6,02	7,24	6,22

Nilai parameter di atas diperoleh melalui perhitungan konvensional yang sebelumnya dilakukan serta diperoleh melalui proses korelasi dengan nilai N-SPT atau nilai q_v . Nilai pada Tabel 4 kemudian didefinisikan dan diassign/diberikan sesuai dengan lapisannya. Gambar 2 merupakan hasil penambahan material pada Model 2D dengan GeoStudio SIGMA/W dan SLOPE/W.



Gambar 4. Model 2D yang telah ditambahkan timbunan dan diberikan material

Langkah analisis dilanjutkan dengan mendefinisikan proses penimbunan bertahap. Pelaksanaan penimbunan dilaksanakan dengan mempertimbangkan kapasitas maksimum dari tanah lunak sebelum terjadinya keruntuhan. Timbunan yang beratnya melebihi kapasitas dukung tanah dasar lunak di bawahnya memerlukan metode pekerjaan bertahap yang nantinya akan dilaksanakan secara bertahap. Perhitungan kapasitas daya dukung tanah dasar dihitung sesuai dengan Persamaan [1] dengan suku ke 2 dan 3 nilainya 0, karena timbunan berada pada permukaan tanah dasar.

$$q_u = 5,7 \times 10,23 = 58,30 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{ijin} = \frac{58,30}{2} = 29,15 \text{ kN/m}^2$$

$$H_{ijin} = \frac{29,15}{19,78} = 1,47 \text{ m}$$

Daya dukung yang diizinkan pada lokasi adalah sebesar 29,15 kN/m² dan mampu menahan timbunan dengan berat jenis 19,78 setinggi 1,47 m, akan tetapi pelaksanaan penimbunan di lapangan maksimal 0,3 m sehingga penambahan tanah timbunan di setiap tahap adalah 0,3 m. Pembagian tahap serta penambahan timbunan setiap tahap disajikan pada Tabel 5 di bawah ini.

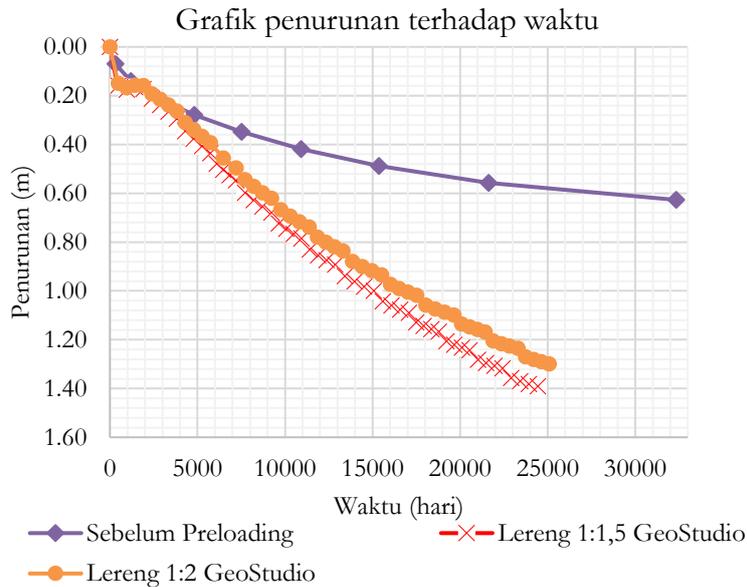
Tabel 5. Ketinggian tiap tahap penimbunan

Tahapan timbunan	Ketinggian timbunan (m)	Tahapan timbunan	Ketinggian timbunan (m)
1	0,30	8	0,30
2	0,30	9	0,30
3	0,30	10	0,30
4	0,30	11	0,30
5	0,30	12	0,30
6	0,30	13	0,30
7	0,30	Total	3,9

Tabel 5 merupakan pembagian tahap penimbunan dimana tinggi timbunan tiap tahap besarnya > 1,47 m.

Penurunan Lapis Tanah Dasar Lunak

Model 2D yang telah didefinisikan seluruhnya kemudian *dirunning*. Proses tersebut berjalan apabila tidak terdapat kesalahan *input* pada Model 2D. *Output* yang diperoleh setelah proses *running* dijalankan adalah perubahan bentuk dari model yang telah didefinisikan sebelumnya.



Gambar 5. Penurunan yang terjadi pada tanah lunak sebelum dan sesudah perbaikan

Gambar 5 membuktikan bahwa dengan menggunakan metode pra pembebanan, proses konsolidasi yang terjadi pada tanah lunak dapat dipercepat. Metode pra pembebanan menghasilkan penurunan yang lebih besar serta membutuhkan waktu yang lebih singkat, akan tetapi waktu konsolidasi yang terjadi masih tergolong lama, sehingga metode pra pembebanan ini perlu dikombinasikan dengan metode perbaikan lain contohnya seperti metode *prefabricated vertical drains (PVD)*.

Angka Aman Timbunan

Analisis dan perhitungan angka aman timbunan dilakukan dengan bantuan *software* GeoStudio SLOPE/W dirangkum dalam tabel berikut ini.

Tabel 6. Hasil perhitungan angka aman pada tiap tahap penimbunan

Tahap timbunan ke-	Slope 1 V:1,5 H (A)		Slope 1 V:2 H (B)	
	Penurunan (m)	Angka aman	Penurunan (m)	Angka aman
1	0,17	5,234	0,16	5,409
2	0,29	4,012	0,26	3,563
3	0,44	3,028	0,39	2,967
4	0,55	2,729	0,50	2,636
5	0,68	2,278	0,62	2,218
6	0,79	1,908	0,74	1,921
7	0,89	1,724	0,84	1,739
8	1,00	1,739	0,93	1,672
9	1,09	1,701	1,02	1,566
10	1,17	1,353	1,10	1,490
11	1,24	1,351	1,17	1,433
12	1,32	1,352	1,24	1,396
13	1,39	1,302	1,30	1,378

Tabel 6 merupakan angka aman yang muncul pada lereng timbunan. Angka aman pada tiap tahap penimbunan dihitung dengan tujuan untuk menentukan apakah proses penimbunan yang dilakukan pada tiap tahap aman dari risiko kegagalan timbunan seperti kelongsoran timbunan yang dapat menimbulkan kerusakan pada badan jalan.

Besarnya angka aman yang diperoleh untuk dua jenis timbunan pada tiap tahap menunjukkan nilai angka aman lebih besar dari nilai yang disyaratkan pada Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik, No 003/BM/2009 yakni Angka Aman $\geq 1,3$.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perhitungan penurunan tanah lunak menggunakan GeoStudio 2018 R2 menghasilkan penurunan yang cukup signifikan dibandingkan dengan sebelum diberikan perbaikan. Penurunan maksimal timbunan A sebesar 1,39 meter dengan waktu yang diperlukan selama 66,90 tahun, lebih cepat 21,67 tahun; sedangkan timbunan B menghasilkan penurunan maksimal sebesar 1,30 meter dan waktu yang diperlukan selama 68,71 tahun, lebih cepat 19,86 tahun. Penurunan pada elevasi timbunan terjadi karena adanya pemampatan pada lapis tanah lunak di bawahnya. Pemampatan tersebut muncul akibat hilangnya air pori dari tanah akibat penambahan beban berupa timbunan. Waktu yang dibutuhkan tanah lunak untuk mencapai derajat konsolidasi maksimum menjadi lebih cepat dibandingkan sebelum perbaikan diberikan, sehingga metode percepatan konsolidasi menggunakan timbunan *preloading* dapat digunakan dalam pelaksanaan konstruksi jalan.

Nilai angka aman yang muncul pada tiap tahapan penimbunan menunjukkan apakah proses penimbunan yang akan dilaksanakan aman atau tidak. Nilai tersebut menjadi pertimbangan terkait penambahan perkuatan tanah sebelum penimbunan tahap selanjutnya. Dua jenis timbunan yang digunakan menunjukkan bahwa tiap tahap penimbunan aman dikarenakan angka aman yang muncul melebihi angka aman yang telah disyaratkan, yakni $\geq 1,3$.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada seluruh dosen, mahasiswa, dan laboran di Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- Ameratunga, Jay, Sivakungan, Nagaratnam, dan Das, Braja M., 2016. *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*, Springer, India.
- Atapattu, S., Chao, K.C. and Soralump, S., 2022. Influence of vacuum preloading to nearby non-treated area for Bangkok soft Influence of vacuum preloading to nearby non-treated area for Bangkok soft clay. In: Rahman and Jaksa, eds., *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney, Australia: Australian Geomechanics Society.
- Cascone, E. and Biondi, G., 2013. A case study on soil settlements induced by preloading and vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, [online] 38, pp.51–67. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2013.05.002>>.
- Das, Braja M., 2012. *Principles of Foundation Engineering 8th Edition*, Cengage Learning, Stamford.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2009. *Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik, No 003/BM/2009*. Jakarta, Indonesia.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2002. *Panduan Geoteknik 1*. Edisi Pertama, Jakarta
- Filippo, G. Di, Bandini, V., Cascone, E. and Biondi, G., 2016. Measurements and predictions of settlements induced by preloading and vertical drains on a heterogeneous soil deposit. *MEASUREMENT*. [online] Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.068>>.
- Indraratna, B., Kan, M.E., Potts, D., Rujikiatkamjorn, C. and Sloan, S.W., 2016. Analytical solution and numerical simulation of vacuum consolidation by vertical drains beneath circular embankments. *Computers and Geotechnics*, [online] 80, pp.83–96. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.06.008>>.
- Józsa, Vendel. 2011. *Effects of rarely analyzed soil parameters for FEM analysis of embedded retaining structures*. Geotechnical Departmen, Budapest University of Technology and Economics, Hungary.
- Krahn, J., 2013. *An Engineering Methodology Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W*. GEO-SLOPE International Ltd.
- Pardsouie, M.M. and Pardsouie, M.H., 2022. The effect of PVDs the length on lateral displacement of embankments. 18(June), pp.655–658.
- Wang, J., Fang, Z., Cai, Y., Chai, J., Wang, P. and Geng, X., 2018. Preloading using fill surcharge and prefabricated vertical drains for an airport. *Geotextiles and Geomembranes*, [online] 46(5), pp.575–585. Available at: <<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.04.013>>.
- Zhang, Z., Ye, G. and Xu, Y., 2018. Comparative analysis on performance of vertical drain improved clay deposit under vacuum or surcharge loading. *Geotextiles and Geomembranes*, [online] 46(2), pp.146–154. Available at:

<<https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2017.11.002>>.

- Mridakh, A.H., Lahlou, F., Ejjaouani, H., Mridekh, A. and Labied, H., 2019. Soil improvement of alluvial deposits under high-speed railway embankment: field case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, pp.3589-3603.
- Pardoyo, B., Sadono, K.W., Atmanto, I.D., Dhaksa, A.T.S.B. and Wideasari, N.P., 2021. Evaluation of Bund Stability using Geostudio Software with Ground Improvement Method using Sand-Key at Reclamation Work on Soft Soil. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 26(2), pp.166-178.