

ANALISA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN *CONTROLLED MODULUS COLUMNS (CMC)* PADA KONSTRUKSI TIMBUNAN JALAN

Zakwan Gusnadi¹⁾, Iman Handiman²⁾, dan Fitriana Sarifah³⁾

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Siliwangi

e-mail: zakwangusnadi@unsil.ac.id

Abstrak

Tanah lunak pada konstruksi timbunan jalan sering kali menimbulkan permasalahan pada proses konstruksi maupun saat jalan telah beroperasi. Karakteristik tanah lunak yang memiliki kekuatan yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi menyebabkan permasalahan daya dukung dan penurunan. Daya dukung yang rendah mengakibatkan timbunan yang dapat ditahan oleh tanah dasar terbatas serta permasalahan stabilitas. Sedangkan penurunan yang besar dapat mengakibatkan kerusakan pada struktur perkerasan jalan. Metode perbaikan tanah dengan menggunakan *Controlled Modulus Columns (CMC)* merupakan salah satu alternatif yang dapat menyelesaikan permasalahan tersebut. Metode CMC dikombinasikan dengan *Load Transfer Platform (LTP)* yang berfungsi untuk meratakan beban sebelum didistribusikan pada CMC dan tanah disekitarnya. Pada penelitian tanah lunak setebal 16 m diperbaiki menggunakan CMC diameter 42 cm dengan panjang 25 m yang dikombinasikan dengan LTP 1 m. Timbunan rencana diatas tanah lunak mencapai 13 m dan diperkuat dengan geotekstil *woven T100* yang dipasang per 1 m pada tubuh timbunan. Analisa dilakukan dengan metode elemen hingga 2 dimensi menggunakan program Plaxis. Hasil tinjauan tanpa perkuatan menunjukan terjadi keruntuhan pada timbunan dengan ketinggian 6 m. Total penurunan yang terjadi mencapai 290 cm. Dengan menggunakan perbaikan tanah CMC faktor keamanan stabilitas dapat meningkat sebesar 1.54. Total penurunan yang terjadi dapat direduksi menjadi 110 cm atau berkurang sekitar 62%.

Kata Kunci : *Controlled Modulus Columns*, Elemen Hingga, Penurunan, Stabilitas, Tanah Lunak.

Abstract

*Soft soil often causes problems during road embankment construction and when the road is already in operation. This is mainly due to its low strength and high compressibility which normally leads to issues in the bearing capacity and settlement. A low bearing capacity usually limits the embankment that can be held by the subgrade and also creates stability problems. Meanwhile, a large decrease can cause damage to the road pavement structure and one of the alternative solutions to these problems is the improvement of the soil using *Controlled Modulus Columns (CMC)*. The combination of this method with the *Load Transfer Platform (LTP)* ensures loads are even out before being distributed to the CMC and the surrounding soil. Therefore, this study repaired 16 m thick soft soil using CMC with a diameter of 42 cm and a length of 25 m combined with an LTP of 1 m. The design embankment was on soft soil up to 13 m and reinforced with T100 woven geotextile which was installed per 1 m on the embankment body. The analysis was conducted using the 2-dimensional finite element method through the Plaxis program and the results of the unreinforced review showed that the embankment with a height of 6 m collapsed and was reduced by 290 cm. It was also discovered that the stability safety factor can be increased by 1.54 using CMC soil improvement to reduce the total decrease by 110 cm or approximately 62%.*

Keywords: *Controlled Modulus Columns, Finite Element, Settlement, Soft Soil, Stability.*

I. PENDAHULUAN

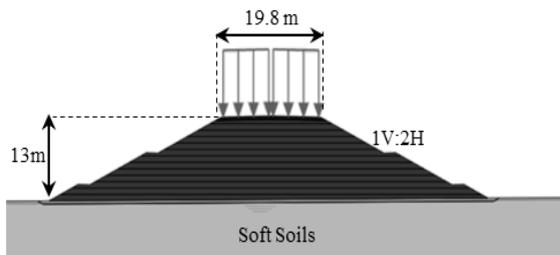
Metode perbaikan tanah modern telah dikembangkan sejak tahun 1920-an[1]. Sebagai contoh penggunaan vertical sand drains untuk percepatan proses konsolidasi tanah lunak yang diusulkan pertama kali pada tahun 1952 dan dipatenkan pada tahun 1926 oleh Daniel D. Moran di Amerika Serikat. Metode perbaikan dengan percepatan konsolidasi pada konstruksi timbunan membutuhkan waktu tunggu untuk mencapai derajat konsolidasi yang ditetapkan sebelum dapat dilaksanakan pekerjaan perkerasan. *Controlled Modulus Columns* (CMC) adalah salah satu metode perbaikan pada tanah lunak yang dapat meniadakan waktu tunggu tersebut. Sebagai salah satu tipe pondasi dalam dengan kategori diantara *Rigid Deep Foundations* (RDF) dan *Deformable Deep Foundation* (DDF) CMC memberikan perkuatan pada tanah lunak dan menyebabkan peningkatan daya dukung dan pengurangan kompresibilitas[2][3]. Sebaran beban timbunan yang terjadi pada sistem CMC didistribusikan pada lapisan tanah lunak melalui *Load Transfer Platform* (LTP) dan kolom inklusi itu sendiri[3].

Penelitian ini bertujuan menganalisis sistem perbaikan tanah lunak menggunakan CMC dan pengaruhnya terhadap penurunan serta stabilitas akibat konstruksi timbunan jalan.

II. BAHAN DAN METODE/METODOLOGI

Deskripsi Penelitian

Konstruksi yang ditinjau merupakan timbunan jalan diatas tanah lunak dengan tinggi 13 m, lebar 19.8 m dan kemiringan lereng timbunan 27° seperti yang terlihat pada Gambar 1.

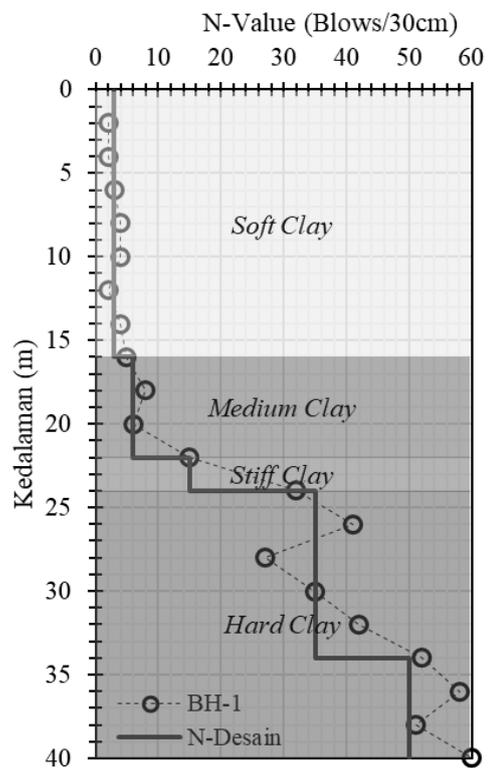


Gambar 1. Geometri Lereng Timbunan

Kondisi Tanah Dasar dan Parameter Tanah

Tanah dasar pada lokasi penelitian merupakan lapisan tanah lempung. Gambar 2 menunjukkan hasil interpretasi data pemboran dan pengujian N_{SPT} . Pada permukaan hingga kedalaman 22 m merupakan tanah mudah mampat dengan konsistensi *soft to medium*. Lapisan tanah lempung dengan konsistensi *stiff to hard* baru ditemukan pada kedalaman 22 – 40 m. Berdasarkan pemantauan pada lubang bor muka air tanah pada lokasi penelitian dekat dengan permukaan ± 0.2 m dari elevasi tanah asli.

Pelapisan Tanah



Gambar 2. Pelapisan Tanah Hasil Interpretasi Uji Bor dan N_{SPT}

Parameter tanah ditentukan sesuai pelapisan tanah yang telah dibagi menjadi 5 lapisan berdasarkan jenis dan kekuatan tanah. Kuat geser tak terdrainase ditentukan berdasarkan korelasi terhadap nilai N_{SPT} dengan besaran nilai $C_U = 5 \times N_{SPT}$ [4]. Tanah dengan kompresibilitas tinggi memiliki nilai indeks kompresi berkisar antara 0.15 – 0.75[5] dan permeabilitas tanah lempung berkisar antara

$10^{-10} - 10^{-12}$ m/sec[4]. Parameter kuat geser tanah terdrainase ditentukan berdasarkan nilai tipikalnya[6].

Tabel 1. Tipikal Parameter Kuat Geser c' dan ϕ' (After AS 4678-2022)

Soil Group	Typical Soils in Group	Soil Parameters	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Poor	Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silts	0 - 5	17 - 25
Average	Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silts; compacted clay fills	0 - 10	26 - 32
Good	Gravelly sands, compacted sands, controlled crushed sandstone and graveled fills, dense well graded sands	0 - 5	32 - 37
Very Good	Weak weathered rock, controlled fills of road base, gravel and recycled concrete	0 - 25	36 - 43

Tabel 2. Parameter tanah Desain

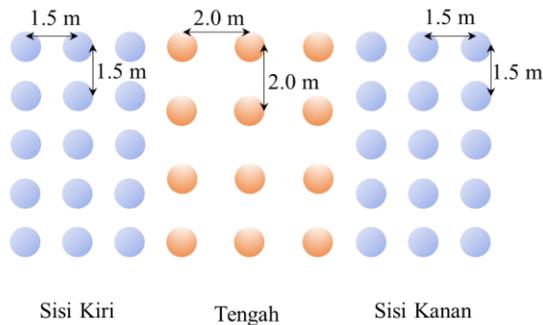
Jenis Tanah	Konsistensi	Kedalaman (m)	N_{Desain}	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	e_0	c_c	$c_s = c_c/10$	k (m/sec)	γ_n (kN/m ³)
Clay	Soft	0 - 16	3	15	5.0	25	2	0.30	0.030	1.0E-09	14
Clay	Medium	16 - 22	6	30	5.0	26	1.5	0.10	0.010	1.0E-09	15
Clay	Stiff	22 - 24	15	75	8.0	30	1	0.04	0.004	1.0E-09	17
Clay	Hard	24 - 34	35	175	10.0	35	1	0.03	0.003	1.0E-09	18
Clay	Hard	34 - 40	50	250	10.0	35	1	0.03	0.003	1.0E-09	18

Load Transfer Platform (LTP)

LTP merupakan lapisan *gravel* atau granular yang dihampar dan diperkuat dengan geogrid yang berfungsi untuk mendistribusikan beban pada CMC dan tanah diantaranya agar beda penurunan yang terjadi tidak signifikan. Kebutuhan tebal LTP tergantung dengan beban yang akan diaplikasikan dan minimal 2/3 dari jarak bersih antar CMC[7]. Dalam penelitian ini tebal platform yang digunakan 1m dan diperkuat dengan geogrid kuat tarik 200 kN/m yang dipasang per 20 cm.

Controlled Modulus Columns (CMC)

CMC yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter 42 cm, panjang 25 m, modulus 6600 Mpa, dan jarak antar CMC diambil 1.5 m pada sisi kiri dan kanan masing-masing 19 baris serta 2 m pada bagian tengah 11 baris. Tipikal jarak antar CMC seperti yang terlihat pada gambar 3.

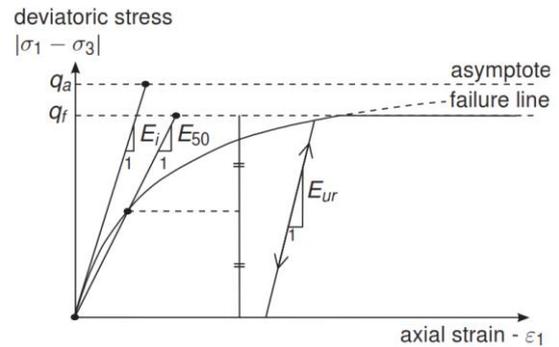


Gambar 3. Tipikal Jarak CMC

Pemodelan dengan Elemen Hingga 2 Dimensi

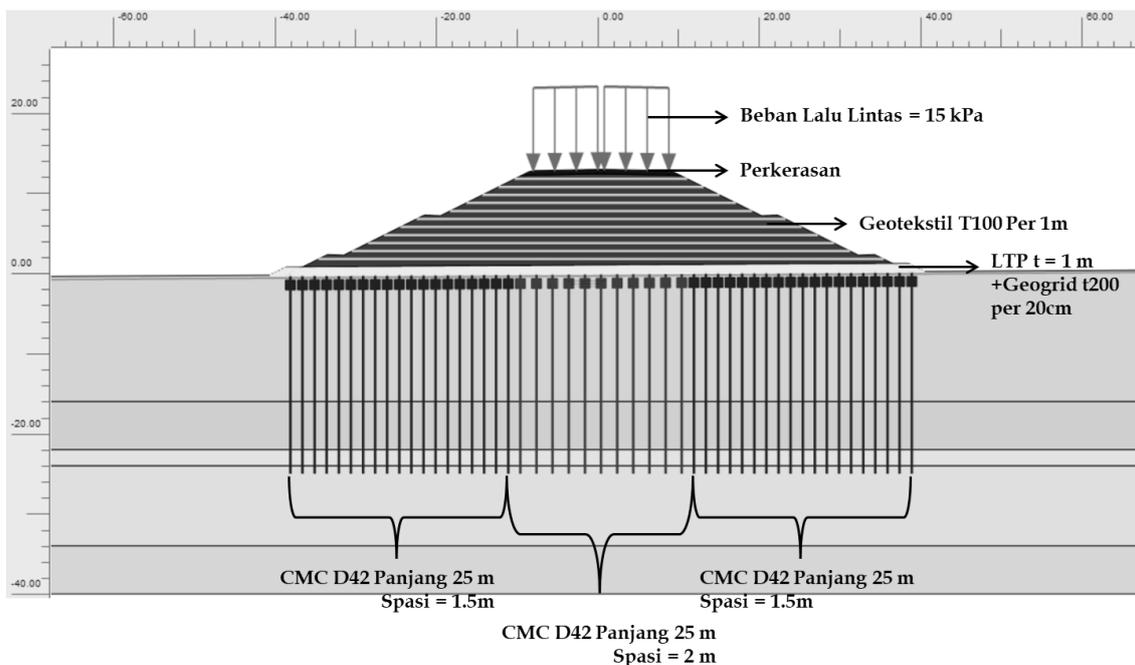
Pemodelan dilakukan dengan program bantu Plaxis 2D. CMC dimodelkan dengan material *Embedded Beam*. Lapisan tanah dasar dimodelkan sebagai klaster tanah dengan model konstitutif tanah *hardening soil*. Model *hardening soil* merupakan salah satu model lanjutan untuk mensimulasikan perilaku tanah[8]. Batas tegangan yang digunakan dalam model ini masih menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-coloumb yang di definisikan dengan sudut geser dan kohesi tanah. Namun,

kekakuan tanah didefinisikan secara lebih mendetail dengan tiga input kekakuan yang berbeda yaitu kekakuan triaksial pada 50% tegangan (E_{50}), kekakuan triaksial pada kondisi *unloading* dan *reloading* (E_{ur}), dan kekakuan pembebanan oedometer (E_{oed}).



Gambar 4. Kurva Tegangan-Regangan Model Hardening Soil

Tahapan konstruksi yang dimodelkan dimulai dengan instalasi CMC, kemudian dilanjutkan dengan pemasangan LTP. Setelah LTP terpasang dilanjutkan dengan proses penimbunan. Geometri pemodelan perbaikan tanah dengan CMC seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Geometri Pemodelan pada Program Plaxis 2D

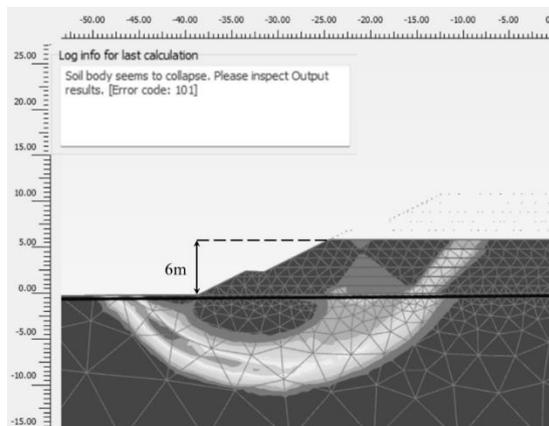
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbaikan tanah dengan CMC ditinjau berdasarkan komparasi terhadap kondisi tanpa penanganan untuk melihat pengaruh dari penggunaan CMC.

Stabilitas

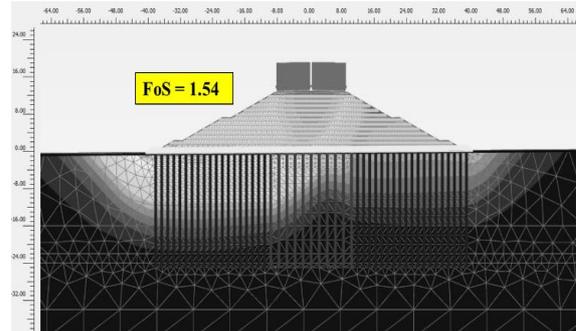
Kondisi tanpa penanganan berarti beban akibat timbunan sepenuhnya diterima oleh tanah dasar yang berarti tinggi timbunan yang dapat dicapai tergantung pada kekuatan tanah dasar. Dalam program Plaxis nilai faktor keamanan diperoleh dengan metode reduksi nilai sudut geser (ϕ') atau kohesi (c') yang dirumuskan dengan persamaan:

$$FoS = \frac{\tan(\phi'_{input})}{\tan(\phi'_{reduksi})} = \frac{c'_{input}}{c'_{reduksi}} \tag{1}$$



Gambar 6. Bidang Keruntuhan Lereng Kondisi Tanpa Perbaikan

Gambar 6 menunjukkan hasil analisa timbunan tanpa perbaikan. Dimana terjadi keruntuhan pada 6 m timbunan. Keruntuhan terjadi pada lapisan tanah lunak dengan tipe keruntuhan *deep sliding*. Hal ini mengindikasikan tahanan tanah dasar lebih kecil dari beban yang bekerja.



Gambar 7. Bidang Keruntuhan Lereng dengan Perbaikan CMC

Gambar 7 menunjukkan hasil analisa timbunan tanpa perbaikan. Dengan perbaikan CMC faktor keamanan yang dihasilkan adalah sebesar 1.54. Jika dibandingkan terhadap kondisi tanpa perbaikan stabilitas dengan perbaikan jauh meningkat. Hal ini mengindikasikan beban timbunan sebagian besar ditransfer pada CMC sehingga kapasitas dukung yang bekerja adalah kapasitas dari CMC itu sendiri.

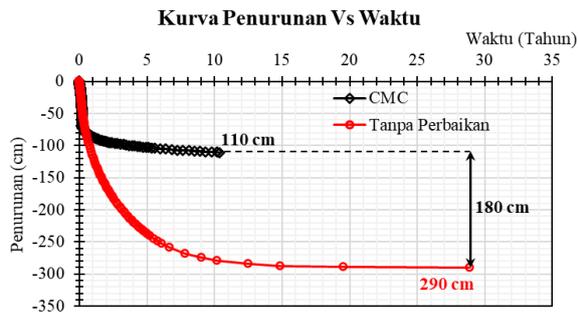
Penurunan

Pembebanan timbunan pada tanah lempung lunak umumnya menghasilkan penurunan yang besar dan dalam waktu yang sangat lama. Secara teoritis besar dan waktu penurunan yang terjadi dirumuskan dengan persamaan:

$$S = \frac{c_c H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_{v0}} \tag{2}$$

$$t = \frac{T_v d^2}{c_v} \tag{3}$$

dimana S = penurunan, c_c = index kompresi, H = tebal lapisan tanah, e_0 = angka pori awal, σ'_{v0} = tegangan vertikal efektif, dan $\Delta\sigma$ = beban pada elevasi tinjauan. Kemudian t = waktu, T_v = faktor waktu pada arah vertikal, d = jarak tempuh aliran terjauh, dan c_v = koefisien konsolidasi.



Gambar 8. Kurva Penurunan Terhadap Waktu

Berdasarkan hasil analisis diketahui penurunan total yang terjadi tanpa dilakukan perbaikan sebesar 290 cm. Gambar 8 menunjukkan perbandingan antara timbunan tanpa perbaikan dan dengan perbaikan CMC. Dengan perbaikan CMC penurunan total dapat direduksi menjadi 110 cm. Besar selisih penurunan yang terjadi adalah 180 cm. Dengan demikian penggunaan CMC pada tanah lunak dapat mereduksi penurunan hingga 62%.

Tabel 3. Komparasi Hasil Analisa

Analisa	Factor of Safety (FoS)	Penurunan (cm)
Tanpa Perbaikan	Collapse pada 6m timbunan	290
CMC	1.54	110

Dengan demikian perbaikan tanah lunak menggunakan *Controlled Modulus Columns* (CMC) dapat meningkatkan stabilitas timbunan serta mereduksi total penurunan yang terjadi akibat beban timbunan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Timbunan tinggi pada tanah lunak memiliki resiko kelongsoran dan permasalahan penurunan yang tinggi. Berdasarkan hasil analisis diperkirakan timbunan akan mengalami

kelongsoran pada 6m timbunan dengan total penurunan sebesar 290 cm. Dengan melakukan perbaikan menggunakan CMC dapat meningkatkan stabilitas lereng timbunan dan mereduksi total penurunan. Faktor keamanan diperkirakan sebesar 1.54 dan total penurunan sebesar 110 cm. Hal ini dimungkinkan karena transfer beban timbunan tidak langsung diterima oleh tanah dasar melainkan ditahan oleh LTP dan diteruskan sebagian besar ke kolom-kolom CMC sehingga meningkatkan kekuatan dan mereduksi penurunan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Han, *Principles and Practices of Ground Improvement*. New jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [2] F. Masse, M. Carey, and I. Ingram, "Controlled Modulus Columns (CMC): Application to the support of Mechanically Stabilized Earth," 2011.
- [3] N. Thayalan and T. W. Eom, "Design Aspects of Control Modulus Columns in Ground Improvement Design," in *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, 2015, pp. 383–386.
- [4] B. G. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis, 2007.
- [5] M. Carter and S. P. Bentley, *Soil Properties and their Correlations*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] J. Ameratunga, N. Sivakugan, and B. M. Das, *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. 2016. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13410>
- [7] B. Simon, *ASIRI National Project: Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements*. Presses des Ponts, 2012.
- [8] R. B. J. Brinkgreve, L. M. Zampich, and N. R. Manoj, *PLAXIS Material Models*. Netherlands, 2019.