

ANALISIS PENGARUH PEMASANGAN CONTROLLED MODULUS COLUMN (CMC) PADA DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN TANAH LUNAK

*Julita Hayati¹, Alexander Alfredo², Arif Rahman Hakim Sitepu³, Syahidus Syuhada⁴
^{1,2,3,4}Fakultas Teknologi Infratraktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan
*Email: julita.hayati@si.itera.ac.id

Received: 31 Oktober 2025 ; Revised: 7 November 2025 ; Accepted: 11 November 2025

ABSTRACT

The construction of a structure on soft soil has the potential for structural failure. This phenomenon occurs because the low bearing capacity of soft soil is accompanied by high compressibility, resulting in large settlements and low stability. This problem needs to be solved by soil improvement. In the Indrapura–Kisaran STA 112 + 500 Toll Road Construction Project, soil will be filled more than the ground's bearing capacity. Therefore, a soil improvement method using a Controlled Modulus Column (CMC) is necessary. The analysis method used in this study uses analytical methods and the finite element method (FEM). The analysis was performed by comparing the bearing capacity and settlement in conditions without improvement (preloading) and with improvement using CMC. The installation of CMC with a spacing of 1 meter, a diameter of 0.42 meters, an LTP thickness of 1 meter, and a concrete quality of 16.41 MPa showed an increase in soil bearing capacity of 30%. The rise in ground bearing capacity also affected soil compressibility, resulting in a reduction of up to 68% in soil settlement. Therefore, installing CMC on soft soil effectively increases bearing capacity and reduces settlement. Ground stability is improved, with the safety factor rising to 2.11.

Keyword: bearing capacity, Controlled Modulus Column (CMC), settlement, soft soil, soil improvement

ABSTRAK

Pembangunan suatu konstruksi pada tanah dasar dengan konsistensi yang lunak memiliki potensi kegagalan struktur yang besar. Hal ini terjadi karena daya dukung yang rendah pada tanah lunak disertai dengan kompresibilitas yang tinggi sehingga dapat menyebabkan terjadinya penurunan yang besar dan stabilitas tanah yang rendah. Permasalahan tersebut perlu diatasi dengan melakukan perbaikan tanah. Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura – Kisaran STA 112+500 akan dilakukan penimbunan tanah yang menyebabkan melampauinya kapasitas daya dukung tanah dasar. Oleh sebab itu perlu dilakukan metode perbaikan tanah dengan menggunakan *Controlled Modulus Column* (CMC). Metode analisis yang digunakan dalam penelitian kali ini menggunakan metode analitik dan finite element method (FEM). Analisis dilakukan dengan membandingkan daya dukung dan penurunan pada kondisi tanpa perbaikan (preloading) dan dengan perbaikan menggunakan *Controlled Modulus Column* (CMC). Pemasangan *Controlled Modulus Column* (CMC) dengan spasi 1 meter, diameter 0,42 meter, tebal LTP 1 meter dan mutu beton 16,41 Mpa menunjukkan adanya peningkatan daya dukung tanah 30%. Meningkatnya daya dukung tanah dasar juga mempengaruhi kompresibilitas tanah dimana penurunan tanah dasar mengalami reduksi hingga 68%. Oleh karena itu pemasangan *Controlled Modulus Column* (CMC) pada tanah lunak efektif untuk meningkatkan daya dukung dan mereduksi penurunan. Stabilitas tanah dasar mengalami peningkatan dimana faktor keamanan meningkat menjadi sebesar 2,11.

Kata kunci: *Controlled Modulus Column* (CMC), daya dukung tanah, penurunan, perbaikan tanah, tanah lunak

1. PENDAHULUAN

Tanah digunakan sebagai material konstruksi dan sebagai pondasi untuk mendukung hampir semua struktur. Hal ini menjadikan tanah sebagai komponen yang sangat diperlukan dalam industri konstruksi. Oleh karena itu, sangat penting dalam desain rekayasa geoteknik[1]. Tanah merupakan material yang secara signifikan memengaruhi stabilitas struktur bangunan, perkerasan jalan raya, terowongan, dan bendungan. Namun, tidak semua tanah dapat digunakan secara langsung dalam konstruksi. Beberapa tanah memiliki daya dukung yang rendah, menunjukkan deformasi atau penurunan yang signifikan, dan memiliki kadar air yang tinggi, yang mempengaruhi konsistensi tanah [2].

Tanah lunak merupakan salah satu jenis tanah dengan daya dukung yang rendah, dan ketika dibebani dapat mengalami penurunan yang besar. Tanah lunak menimbulkan masalah serius pada proyek konstruksi karena sifat kompresibilitasnya yang tinggi dan kuat gesernya yang rendah, sehingga menyebabkan penurunan berlebihan dan ketidakstabilan struktural [3]. Struktur yang dibangun di atas tanah lunak dapat mengalami ketidakstabilan, seperti keruntuhan. Ketidakstabilan ini dapat terjadi sebelum struktur dibangun, atau bahkan setelah struktur selesai dibangun seperti jalan, akibat perubahan lingkungan atau pengaruh alam, sehingga struktur tersebut rentan mengalami kerusakan. Jika kondisi ini tidak diperbaiki maka diperlukan perbaikan berkelanjutan dengan biaya besar [4].

Kondisi tersebut dapat diperbaiki dengan melakukan perbaikan tanah. Perbaikan tanah yang dipilih berdasarkan permasalahan yang terjadi pada tanah lunak. Untuk permasalahan daya dukung rendah, penggunaan inklusi kaku dapat meningkatkan kekakuan secara signifikan dan cepat jika dibandingkan dengan metode konsolidasi. Penggunaan inklusi kaku juga terbukti efektif mereduksi penurunan pada tanah lunak. Inklusi kaku merupakan teknik perbaikan tanah yang memiliki keunggulan signifikan dibandingkan pondasi dalam, karena dapat memberikan kontrol penurunan yang dibutuhkan dan mempertahankan dukungan pondasi dangkal pada struktur. Inklusi kaku dikenal dengan berbagai nama seperti *Controlled Modulus Columns* (CMC), *pile supported earth platforms*, kolom grouting jet, atau perkuatan kolom tanah, yang merupakan elemen vertikal yang diinklusi ke dalam lapisan tanah dengan daya dukung rendah dan/atau kompresibilitas tinggi, hingga ke lapisan yang kuat. Karena kekakuannya yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di sekitarnya, inklusi kaku ini menopang sebagian beban yang bekerja di permukaan tanah. Oleh karena itu, beban yang ditanggung oleh tanah lunak dapat dikurangi hingga mencapai tingkat daya dukung dan penurunan tanah yang dapat diterima. Beberapa penelitian telah menyelidiki pengaruh inklusi kaku untuk memperbaiki tanah lunak [5].

Selain efektif untuk memperbaiki tanah, inklusi kaku atau *Controlled Modulus Column* (CMC) cocok digunakan pada berbagai jenis tanah seperti pasir lepas, tanah lunak, lanau, tanah organik, dan tanah gambut, dengan kedalaman yang biasanya digunakan antara 10 – 20 meter. [6] CMC dapat dipasang dengan cepat dengan kontrol waktu yang cepat tanpa ada kerusakan, getaran, keruntuhan lubang dan biaya mobilisasi yang relatif murah. Proses Pengerjaan CMC memiliki waktu yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan *Stone Column* Berdasarkan (Rizal, 2018), waktu pemasangan 600 – 1400 tiang CMC adalah 10 jam pengerjaan. Waktu yang cepat menjadi salah satu kelebihan metode ini. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh pemasangan CMC terhadap daya dukung dan penurunan tanah lunak pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura - Kisaran STA 112+500 dimana terdapat lapisan lempung lunak hingga kedalaman 17-meter dan timbunan setinggi 8 meter. Penelitian ini bertujuan mengukur dan menganalisis tingkat pengaruh CMC terhadap kenaikan daya dukung dan reduksi penurunan tanah.

2. METODE

Pengumpulan Data

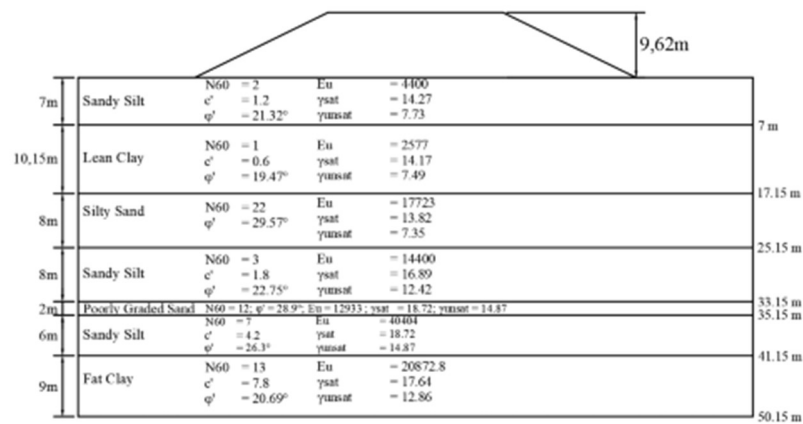
Penelitian ini dilakukan pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura – Kisaran STA 112+500. Lokasi Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura – Kisaran berada pada koordinat 3.122301° Lintang Utara dan 99.467708° Bujur Timur. Data sekunder yang digunakan berupa data penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis kondisi tanah tanpa perbaikan dan dengan adanya perbaikan menggunakan *Controlled Modulus Column* (CMC) dengan dimensi CMC ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi *Controlled Modulus Column* (CMC)

Parameter	Simbol	Ukuran	Satuan
Diameter	d	0,42	m
Jarak (CTC)	De	1	m
Luas tiang	Ap	0,318	m ²
Keliling	Up	1,319	m
Panjang	L	17	m
Telal LTP	h	1	m

Analisis yang dilakukan seperti daya dukung, penurunan dan faktor keamanan stabilitas lereng timbunan. Analisis dilakukan berdasarkan data penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium pada BH 5 diperoleh pelapisan tanah (Gambar 1) dan interpretasi data tanah. Interpretasi data tanah dilakukan untuk menentukan parameter tanah desain yang digunakan dalam analisis dikarenakan adanya keterbatasan pada data yang tersedia sehingga memerlukan adanya korelasi empiris. Korelasi juga dapat digunakan untuk membandingkan nilai-nilai yang ditentukan dari uji laboratorium dan in situ [7].

Berdasarkan data tanah, posisi muka air tanah berada di kedalaman 0,47 m di bawah permukaan tanah sehingga memiliki potensi konsolidasi pada lapisan tanah lempung. Elevasi tanah eksisting berada dibawah elevasi rencana sehingga terdapat penimbunan sebesar 8,03 m. Untuk mengakomodir beban kenadaraan dan tebal perkerasan maka timbunan ekuivalen diberikan setinggi 1,59 m. Material tanah timbunan ditunjukkan pada Tabel 2.



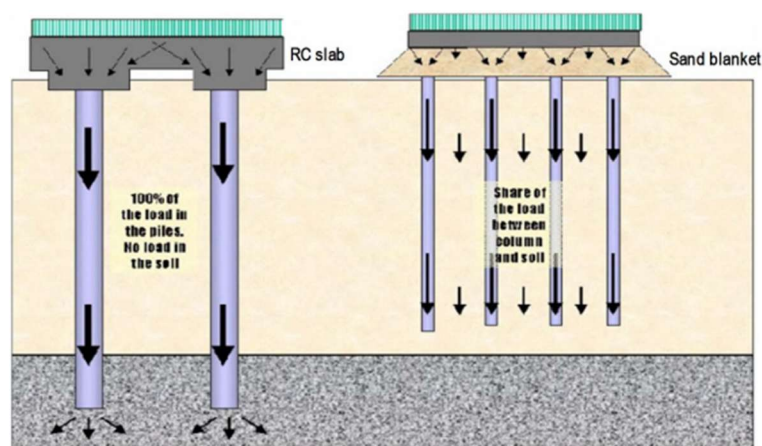
Gambar 1. Stratifikasi Tanah dan Parameter Tanah Dasar STA 112+500

Tabel 2. Data Parameter Tanah Timbunan

Parameter	Satuan	Timbunan
Kondisi		Drained
Model		MC
Material tanah		Timbunan
Berat isi jenuh	γ_{sat} (kN/m³)	17,51
Berat isi	γ_{unsat} (kN/m³)	17,26
Kohesi	c' (kpa)	13
Sudut geser	ϕ (°)	35
Angka poisson	ν	0,3
E	(kN/m²)	14000
Permeabilitas horizontal	kh (m/hari)	0,000864
Permeabilitas vertikal	kv (m/hari)	0,000864

Metode Analisis

Controlled modulus column (CMC) merupakan perbaikan tanah untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan tanah pada elemen struktur untuk memperkuat tanah dibawah fondasi bangunan. Secara mekanisme transfer beban, CMC berbeda dengan tiang pancang. [8] menunjukkan bahwa pada CMC terdapat lapisan Load Transfer Beban (LTP) yang berfungsi menyalurkan beban diatasnya ke permukaan CMC dan tanah disekitar CMC sedangkan pada tiang pancang beban sepenuhnya tersalurkan pada tiang. Hal ini menyebabkan terjadi penurunan pada tanah disekitar CMC dan membuat friksi negatif pada sepanjang selimut tiang CMC (Gambar 2).



Gambar 2. Mekanisme transfer beban antara tiang pancang dan CMC [8]

1. Daya Dukung *Controlled Modulus Column* (CMC)

Inklusi kaku (CMC) menerapkan konsep dengan asumsi stabilitas kolom dihasilkan tanpa adanya tahanan lateral dari tanah disekitarnya [9]. Berdasarkan [10], daya dukung CMC dipengaruhi oleh daya dukung tiang

tunggal dan daya dukung tanah yang berada diantara CMC serta jarak antar CMC. Daya dukung tiang tunggal diperhitungkan dengan persamaan berikut

$$R_a = \left(U_p \sum_{i=1}^n \alpha \times c_u \right) + (9 \times c_u \times A_p) \quad (1)$$

dimana R_a = daya dukung vertikal tiang tunggal (kN), U_p = keliling tiang (m), α = faktor adhesi, c_u = kohesi undrained (kN/m²), A_p = luas tiang (m²).

Daya dukung tanah asli diperhitungkan dengan persamaan berikut:

$$q_u = c \times N_c \quad (2)$$

dimana $q_u = f_{sk}$ = daya dukung tanah asli (kN/m²), c = kohesi tanah (kN/m²), N_c = faktor daya dukung.

Jarak pemasangan CMC akan mempengaruhi besarnya area pengganti tanah. Area penggantian tanah dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

$$m = \frac{\pi r^2}{d e^2} \quad (3)$$

dimana m = area penggantian tanah (%), r = jari-jari tiang (m), d = jarak antar tiang (m).

Daya dukung tanah dengan perkuatan CMC dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

$$f_{spk} = m \times \frac{R_a}{A_p} + \beta (1 - m) f_{sk} \quad (4)$$

dimana f_{spk} = daya dukung tiang CMC (kN), β = koefisien reduksi antara kapasitas daya dukung dengan tiang (0,85).

Tabel 3. Nilai C_{max} dan koefisien K_1

Kondisi	Metode Pelaksanaan	C_{max} (MPa)	K_1
1	Inklusi yang dibor dengan ekstraksi tanah	35	1,3
2	Inklusi yang dibor menggunakan auger berongga dengan ekstraksi tanah	30	1,4
3	Inklusi gerudi menggunakan auger berongga dengan perpindahan tanah	35	1,3
4	Inklusi baik yang digerakkan oleh getaran atau dilemparkan di tempatnya	35	1,3
5	Penggabungan pengikat dengan tanah (kolom tanah yang dirawat, nat jet, dll.)	(*)	(**)

Sumber: ASIRI National Project, 2012

Tabel 4. Koefisien K_2

Kondisi	Metode Pelaksanaan	K_2
1	Rasio Diameter CMC terhadap Panjang CMC Kurang dari 1/20	1,05
2	CMC yang dimensi terkecilnya kurang dari 0,60 m	1,3 - (d/2)
3	Gabungan dari dua kondisi diatas	1,35 - (d/2)

Sumber: ASIRI National Project, 2012

Proses pemasangan CMC melibatkan penetrasi auger ke dalam tanah dengan torsi dan dorongan yang diberikan oleh rig pengeboran, diikuti dengan injeksi *grout* melalui batang berongga sambil mengangkat alat tersebut. *Grout* yang digunakan merupakan beton dengan mutu minimum yang diatur pada [9] sebagai berikut:

$$f_{cd} = \text{Min} \left(\alpha_{cc} K_3 \frac{f_{ck}^*}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \frac{C_{max}}{\gamma_c} \right) \quad (5)$$

$$f_{ck}^* = (C_{max}; f_{ck}) \frac{1}{K_1 K_2} \quad (6)$$

dimana $\alpha_{cc} = 1$ (diperkuat dengan tulangan baja), 0,8 (tidak diperkuat dengan tulangan baja), γ_c = koefisien parsial dengan nilai sama dengan 1,5, f_{ck}^* = nilai kuat tekan beton karakteristik pada CMC, C_{max} = mutu maksimal CMC berdasarkan metode pelaksanaan (Tabel 3), d = diameter CMC (m), K_1 = koefisien berdasarkan metode pelaksanaan (Tabel 3), K_2 = koefisien berdasarkan diameter CMC (Tabel 4), K_3 = koefisien berdasarkan Tabel 5.

Tabel 5. Koefisien K_3

K_3	Tanpa tes	Dengan uji refleksi atau impedansi (a)	Dengan tes kualitas	Dengan daya dukung beban	Dengan uji kontrol yang diperkuat
Domain 1 (CMC digunakan untuk stabilitas)	-	0,75	-	1,2	1,4
Domain 2 (CMC tidak digunakan untuk stabilitas)	0,65	0,85	1,4	1,5	1,7

Sumber: ASIRI National Project, 2012

2. Penurunan Tanah

Penurunan tanah lunak yang diperkuat dengan CMC lebih rendah dari tanah lunak tanpa perkuatan. Hal ini disebabkan karena kolom menopang beban lebih besar dari tanah dengan rata-rata rasio *stress concentration* dari kolom dan tanah sekitar 5 pada *rigid plate* dan 2 pada *flexible plate* [11]. Penurunan tanah setelah dilakukan perbaikan tanah dengan *Controlled Modulus Column* (CMC) dapat diperhitungkan menggunakan persamaan dari [12] sebagai berikut:

$$S = \psi_{sp} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_o}{\xi E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_i) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{P_o}{\xi E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_i) \right] \quad (7)$$

$$\xi = \frac{f_{spk}}{f_{sk}} \quad (8)$$

$$E_{spi} = \xi \times E_{si} \quad (9)$$

dimana S = penurunan tanah yang diperkuat dengan CMC, ψ_{sp} = koefisien perkiraan penurunan aktual berkisar antara 0,2 – 1,0, n_1 = jumlah lapisan tanah disekitar tiang, n_2 = jumlah lapisan tanah di kedalaman perkiraan terjadinya penurunan aktual, P_o = tekanan overburden ujung bawah tiang (kN/m^2), ξ = koefisien peningkatan modulus kompresibilitas tanah lapisan komposit, E_{spi} = modulus kompresibilitas tanah komposit dari lapisan tanah i (kN/m^2), E_{si} = modulus kompresibilitas dari lapisan tanah i (kN/m^2), z_i = selisih kedalaman antara permukaan bawah tiang dan lapisan tanah i (m), z_{i-1} = selisih kedalaman antara permukaan bawah tiang dan lapisan tanah $(i-1)$, $\bar{\alpha}_i$ = rata-rata koefisien tegangan tambahan antara permukaan bawah tiang dan permukaan bawah lapisan tanah i , $\bar{\alpha}_{i-1}$ = rata-rata koefisien tegangan tambahan antara permukaan bawah tiang dan permukaan bawah lapisan tanah $(i-1)$.

Berdasarkan [10], koefisien perkiraan penurunan aktual ditentukan berdasarkan nilai modulus kompresibilitas tanah (\bar{E}_s) disepanjang kolom tertanam (Tabel 6). Tegangan yang bekerja pada permukaan tanah akan terdistribusi pada lapisan tanah dibawah permukaan. Besar tegangan dilapisan tanah akan dipengaruhi oleh kedalaman dan koefisien tegangan tambahan [10]. Ekuivalensi modulus kompresibilitas dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

$$\bar{E}_s = \frac{\sum A_i}{\sum \frac{A_i}{E_{spi}}} \quad (10)$$

dimana \bar{E}_s = ekuivalensi modulus kompresibilitas dengan deformasi (kN/m^2),

Tabel 6. Koefisien perkiraan penurunan aktual

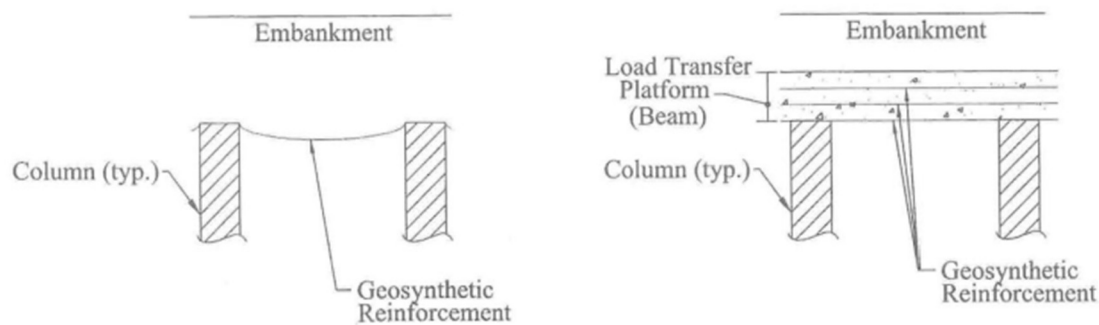
E_s (MPa)	2,5	4,0	7,0	15,0	20
ψ_{sp}	1,1	1,0	0,7	0,4	0,2

Sumber: ASIRI National Project, 2012

3. Load Transfer Platform (LTP)

Load Transfer Platform terdiri dari lapisan granular yang dihamparkan dan dapat diperkuat dengan geogrid yang berfungsi untuk mendistribusikan beban pada CMC dan tanah diantaranya agar beda penurunan yang terjadi tidak signifikan [13]. LTP dapat berupa lapisan granular yang padat, lapisan tanah yang diperkuat dengan hydraulic binder, lapisan tanah yang diperkuat dengan geosintetik [9]. Lapisan granular padat memiliki modulus kekakuan yang tinggi sedangkan tanah yang distabilisasi perlu memperhatikan kekakuan yang dihasilkan untuk menghindari terjadinya retak pada LTP. Penggunaan LTP dapat membuat jarak antar kolom (CMC) menjadi lebih besar namun penggunaan LTP tidak disarankan jika kolom terlalu rapat [14].

LTP memiliki 2 metode desain yaitu *catenary* atau *beam* dengan mekanisme transfer beban yang berbeda (Gambar 3). Terdapat 3 metode untuk mendesain LTP menggunakan metode desain *catenary* yaitu British Standar (BS 8006), Metode Swedish dan Metode German dengan menerapkan asumsi bahwa *soil arch* terbentuk pada timbunan, perkuatan mengalami pergerakan selama dibebani dan digunakan satu lapis perkuatan berupa geosintetik. Untuk metode desain *beam* dapat digunakan Metode Collin yang beberapa asumsi yaitu perkuatan yang digunakan minimal 3 lapis, jarak antara lapis perkuatan berkisar antara 20 – 45 cm, tebal LTP $\geq 1,5$ kali dari jarak sisi ke sisi antar kolom, dan *soil arch* sepenuhnya terbentuk pada lapisan LTP. Metode desain *catenary* umumnya membutuhkan perkuatan dengan kekuatan lebih dibandingkan dengan perkuatan pada metode desain *beam* untuk kondisi desain yang sama. Selain itu, pada metode desain *beam* memungkinkan jarak antar kolom yang lebih besar dari metode desain *catenary*.



Gambar 3. Mekanisme transfer beban a) metode catenary b) metode beam [15]

Berdasarkan Metode Swedish, tinggi soil arching dipengaruhi oleh jarak bersih kolom (jarak sisi ke sisi kolom) yang dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

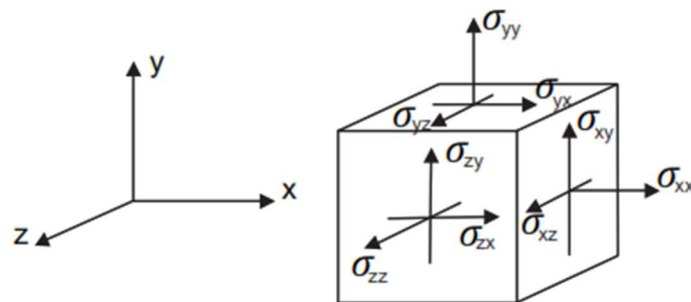
$$h = \frac{(s - d)}{2 \tan 15^\circ} \quad (11)$$

Dimana h = tinggi soil arching (m), s = jarak tengah ke tengah kolom (m), d = diameter kolom (m).

Tebal LTP harus mampu mengakomodir *soil arching* yang terbentuk untuk memaksimalkan distribusi beban antara kolom dan tanah. Selain jarak, tebal LTP dipengaruhi oleh kuat geser material yang digunakan. Untuk material granular harus berupa timbunan pilihan dengan sudut gesek efektif $\geq 35^\circ$ [14]. Ketebalan LTP umumnya berkisar antara 40 hingga 80 cm [9]. [16] melakukan eksperimen *centrifuges* sehingga diketahui tebal kritis LTP adalah 2/3 dari jarak bersih kolom.

Metode Elemen Hingga

Ada dua cara untuk memodelkan keadaan lapangan: *plane strain* dan *axisimetry*. Dalam analisis *plane strain*, gaya terhitung yang dihasilkan dari perpindahan yang ditentukan merupakan gaya per satuan panjang dalam arah keluar bidang yaitu arah z (Gambar 4) sedangkan dalam analisis *axisimetry*, gaya terhitung (Gaya-X, Gaya-Y) adalah gaya yang bekerja pada batas lingkaran yang membentuk sudut 1 radian. Dalam analisis *axisimetry* luaran yang dihasilkan disajikan per satuan lebar dan bukan per radian sedangkan dalam analisis *plane strain*, σ_{zz} adalah tegangan keluar bidang. Dalam analisis *axisimetry*, x merupakan koordinat radial, y merupakan koordinat aksial, dan z merupakan arah tangensial. Dalam hal ini, σ_{xx} merupakan tegangan radial dan σ_{zz} merupakan tegangan melingkar [17].



Gambar 4. Koordinat sistem dan indikasi komponene tegangan positif [17]

Dalam penelitian ini digunakan analisis *plane strain* dalam permodelan elemen hingga. CMC dimodelkan dengan *embeded beam row*. Model ini dipilih karena *embeded beam row* dapat memodelkan kekakuan aksial kolom dan kekakuan lentur kolom sehingga memungkinkan luaran gaya dalam pada kolom. Jarak antar tiang juga dapat dimodelkan sehingga dapat hasil permodelan dapat mengakomodir area yang tidak dipasang kolom. Kolom didesain sebagai kolom beton dengan berat volum 24 kN/m^3 dan terpasang sepanjang lapisan tanah lunak.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kondisi Tanah Asli

Berdasarkan Gambar 1, lapisan tanah lunak dengan konsistensi sangat lunak terdapat pada kedalaman 0 hingga 17 m. Dengan kondisi tingginya elevasi tanah rencana menyebabkan dibutuhkan penimbunan sebesar 8,03 m sehingga tanah dasar harus memiliki daya dukung yang cukup untuk menahan beban timbunan. Selain itu, untuk mengakomodir beban kenadaraan dan tebal perkerasan yang berada diatas tanah timbunan maka timbunan

ekuivalen diberikan setinggi 1,59 m. Total tinggi timbunan sebesar 9,62 m maka beban yang perlu ditopang oleh tanah sebesar 166,05 kN/m². Dengan daya dukung tanah asli yaitu sebesar 61,68 kN/m², maka tanah dasar tidak mampu menopang beban yang bekerja di atasnya. Daya dukung tanah yang tersedia hanya mampu untuk menahan timbunan setinggi 2,5 m.

Tabel 7. Rekapitulasi timbunan bertahap

Tahap ke-	Hcr (m)	H Timbunan ke- (m)	$\Delta\sigma_z$ (kN/m ²)	ΔS_u (kN/m ²)	S_u (kN/m ²)	qult (kN/m ²)
Tahap 1	2,5	2,5	43,15	11,65	23,65	121,56
Tahap 2	5	2,5	43,15	11,65	35,30	181,45
Tahap 3	8	3	51,78	13,98	49,28	253,31
Tahap 4	9,62	1,62	27,96	7,55	56,83	292,11

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, perlu dilakukan penimbunan bertahap untuk meningkatkan daya dukung dan kuat geser tanah agar mampu menopang beban yang bekerja di atasnya. Namun proses ini memerlukan waktu yang lama karena kenaikan kuat geser dihasilkan dari proses konsolidasi primer akibat beban yang diterapkan. Beban yang diberikan menyebabkan adanya kenaikan tegangan pada tanah yang memicu terjadinya proses konsolidasi. Dengan asumsi proses konsolidasi mencapai 90%. Kenaikan kuat geser tanah berkisar antara 20% hingga 30% dari 90% tegangan yang diberikan pada tanah [18]. Untuk mencapai timbunan rencana diperlukan 4 tahapan penimbunan. Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan yang telah dilakukan (Tabel 7).

Tabel 8. Rekapitulasi penurunan konsolidasi

Kedalaman (m)	Sc1 (m)	Sc2 (m)	Sc3 (m)	Sc4 (m)
0-3	0,039	0,165	0,273	0,316
3-7	0,025	0,040	0,051	0,056
7-17,15	0,058	0,099	0,138	0,283
25,15-33,15	0,015	0,028	0,041	0,048
35,15-41,15	0,006	0,012	0,019	0,022
41,15-50,15	0,006	0,057	0,121	0,154
Total	0,15	0,401	0,643	0,879

Selain daya dukung yang rendah, tanah lunak umumnya memiliki kompresibilitas yang tinggi sehingga memiliki potensi pemampatan/penurunan yang besar. Besarnya penurunan total yang dihasilkan dalam analisis ini terdiri dari penurunan konsolidasi (Sc) dan penurunan elastik/segera (Se). Untuk menganalisis besarnya penurunan dalam penelitian ini menggunakan metode analitik dan metode elemen hingga. Rekapitulasi penurunan konsolidasi dan penurunan elastik timbunan bertahap ditunjukkan pada Tabel 8 dan Tabel 9. Penurunan total setiap tahap penimbunan ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 9. Rekapitulasi penurunan elastik/segera

Kedalaman (m)	Sc1 (m)	Sc2 (m)	Sc3 (m)	Sc4 (m)
0-3	0,001	0,002	0,002	0,003
3-7	0,001	0,003	0,005	0,005
7-17,15	0,012	0,025	0,039	0,047
17,15-25,15	0,004	0,008	0,013	0,016
25,15-33,15	0,002	0,004	0,007	0,008
33,15-35,15	0,008	0,015	0,024	0,029
35,15-41,15	0,000	0,000	0,000	0,000
41,15-50,15	0,000	0,003	0,005	0,006
Total	0,028	0,060	0,096	0,115

Tabel 10. Rekapitulasi penurunan total

Kedalaman (m)	Sc1 (m)	Sc2 (m)	Sc3 (m)	Sc4 (m)
0-3	0,040	0,167	0,275	0,319
3-7	0,027	0,042	0,056	0,062
7-17,15	0,070	0,124	0,177	0,330
17,15-25,15	0,004	0,008	0,013	0,016
25,15-33,15	0,017	0,032	0,048	0,056
33,15-35,15	0,008	0,015	0,024	0,029
35,15-41,15	0,007	0,013	0,019	0,022
41,15-50,15	0,006	0,060	0,126	0,160
Total	0,178	0,461	0,739	0,994

Besarnya penurunan total yang didapatkan dengan metode analitik sebesar 0,994 meter. Sedangkan dalam metode elemen hingga didapatkan besarnya penurunan akibat beban timbunan sebesar 0,830 meter. Terdapat perbedaan antara perhitungan analitik dan elemen hingga yang dapat disebabkan karena perhitungan analitik pada jenis tanah lempung (*clay*) memperhitungkan nilai modulus elastisitas tanah, sedangkan pada elemen hingga tidak memperhitungkan hal tersebut. Pada tanah pasir (*sand*) pada perhitungan menggunakan elemen hingga untuk menghitung penurunan elastik menggunakan modulus elastisitas, sedangkan pada perhitungan manual menggunakan nilai SPT. Namun secara umum akibat beban yang diberikan terjadi penurunan yang besar sehingga perlu adanya perbaikan tanah untuk mereduksi penurunan dan meningkatkan daya dukung tanah asli.

Analisis Daya Dukung dengan Perkuatan CMC

Penggunaan CMC dapat mereduksi waktu pelaksanaan karena penambahan kolom beton pada tanah lunak mampu meningkatkan daya dukung tanah. Selain itu, tidak perlu waktu tunggu untuk mendisipasi tegangan air pori berlebih. CMC lebih ekonomis dibandingkan penggantian tanah khususnya pada kondisi muka air tanah dekat dengan permukaan [14]. Berdasarkan [9], CMC harus memiliki mutu minimum yang dipengaruhi oleh metode pemasangan, rasio diameter terhadap panjang CMC dan fungsi CMC. Dengan panjang dan diameter CMC pada penelitian ini dihasilkan mutu beton minimum sebesar 16,41 Mpa dengan modulus elastisitas sebesar 14988,54 Mpa.

Tabel 11. Rekapitulasi daya dukung pada kedalaman pemasangan CMC

Kedalaman (m)	Q _{tip} (kPa)	Q _{skin} (kPa)	R _a (kPa)	f _{sk} (kPa)	f _{spk} (kPa)
0-3	14,96	38,93	41,66	61,68	81,52
3-7	14,96	62,29	103,95	61,68	143,81
7-17,15	7,48	80,31	182,90	30,84	202,83

Besarnya daya dukung tanah yang diperkuat CMC dipengaruhi oleh beberapa faktor. Secara umum faktor yang memengaruhi daya dukung tanah yang diperkuat CMC yaitu diameter, jarak, kedalaman tiang dan kekuatan tanah. Tabel 11 merupakan hasil daya dukung dengan perkuatan CMC. Daya dukung dengan perkuatan meningkat sekitar minimum 30% dari daya dukung tanah asli. Peningkatan daya dukung mencapai lebih dari 500% pada kedalaman CMC yang lebih dalam dikarenakan kenaikan daya dukung kolom yang signifikan akibat pertambahan panjang CMC.

Analisis Penurunan Tanah dengan Perkuatan CMC

Penurunan tanah dengan *Controlled Modulus Column* (CMC) dapat dipengaruhi oleh koefisien peningkatan modulus kompresibilitas tanah saat adanya tiang CMC. Koefisien peningkatan modulus didasari oleh rasio antara daya dukung dengan perkuatan CMC dan daya dukung tanah asli. Kenaikan daya dukung tanah dengan perkuatan CMC menyebabkan adanya peningkatan modulus elastisitas tanah sehingga mempengaruhi besarnya penurunan tanah. Penurunan tanah pada lapisan tanah yang diperkuat dengan CMC menggunakan modulus elastisitas ekuivalen sebesar 7,55 Mpa sehingga besar koefisien perkiraan penurunan aktual sebesar 0,58. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan CMC menyebabkan penurunan yang terjadi mengalami reduksi >40% dari kondisi tanpa adanya perkuatan. Selain dipengaruhi oleh modulus elastisitas, koefisien tegangan tambahan mempengaruhi besarnya tegangan tambahan yang bekerja pada lapisan lunak. Maksimum koefisien tegangan berdasarkan [10] sebesar 0,25 dan semakin dalam koefisien akan mengalami reduksi. Besarnya penurunan akibat penimbunan setinggi 9,62 m ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Rekapitulasi penurunan dengan perkuatan CMC

Kedalaman (m)	S ₁ (m)	S ₂ (m)	S _t (m)
0,5	0,00357	0,00000	0,00206
3	0,01783	0,00000	0,01029
7	0,04820	0,03096	0,04569
17	0,04156	0,02445	0,03810
Total			0,0961

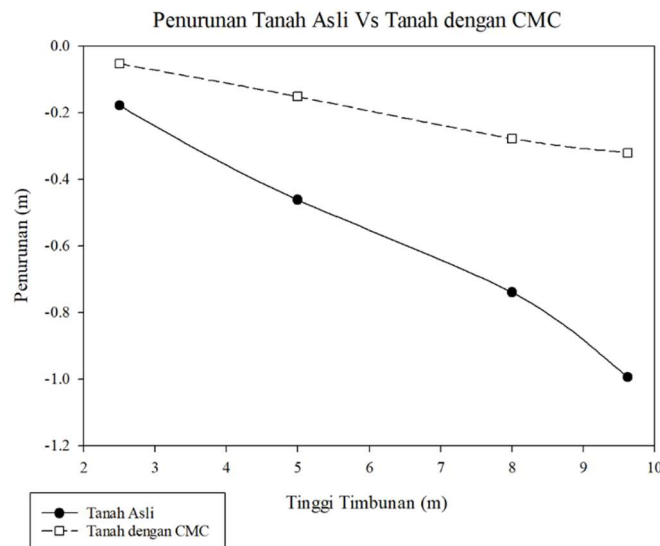
Total penurunan tanah disepanjang tiang dengan menggunakan CMC yaitu 0,0961 meter. Berdasarkan kondisi tanah di lapanga terdapat lapisan yang berpotensi mengalami konsolidasi pada kedalaman dibawah pemasangan CMC sehingga penurunan total ada penurunan yang terjadi disepanjang CMC dan di bawah CMC. Berikut merupakan hasil rekapitulasi penurunan konsolidasi tanah dibawah CMC berdasarkan hasil penurunan konsolidasi tanah asli. Penurunan yang dihasilkan dengan adanya perkuatan CMC sebesar 0,3196 m berdasarkan perhitungan dengan metode analitik.

Tabel 13. Rekapitulasi penurunan dengan perkuatan CMC

Kedalaman (m)	H (m)	OCR	S _c (m)
17,15-25,15	8	1,96	0,0000
25,15-33,15	8	0,66	0,0475
33,15-35,15	2	0,66	0,0000
35,15-41,15	6	0,72	0,0219
41,15-50,15	9	1,21	0,1540
Total			0,0961

Pada analisis menggunakan metode elemen hingga, penurunan total yang dihasilkan akibat pemasangan CMC sebesar 0,256 m. Terdapat perbedaan antara perhitungan analitik dan dengan menggunakan metode elemen hingga yaitu dikarenakan pada metode analitik penurunan kolom dan tanah dianggap seragam sedangkan pada metode elemen hingga penurunan tanah dan kolom berbeda. Selain itu perhitungan analitik penurunan tanah dipengaruhi oleh modulus kompresibilitas tanah komposit. Rendahnya modulus komposit menyebabkan nilai koefisien perkiraan penurunan ψ_{sp} yang dihasilkan cukup besar.

Jika dibandingkan dengan penurunan tanpa perkuatan CMC, pemasangan CMC mampu mereduksi penurunan sebesar 68% (Gambar 5). Hal ini dikarenakan 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 [13]. Pada perkuatan CMC, distribusi beban lebih banyak ditransfer pada kolom daripada tanah sehingga penurunan yang terjadi pada tanah menjadi berkurang [19].

**Gambar 5.** Perbandingan penurunan tanah asli dan tanah dengan perkuatan CMC

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, tanah dasar merupakan tanah dengan daya dukung rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Secara daya dukung, tanah tidak mampu untuk menahan beban timbunan sehingga memerlukan penimbunan bertahap untuk meningkatkan daya dukung tanah melalui proses konsolidasi. Namun proses ini memerlukan waktu yang lama dan penurunan yang dihasilkan tidak memenuhi persyaratan penurunan pada jalan. Oleh karena itu pemasangan CMC diperlukan untuk meningkatkan daya dukung dan mereduksi penurunan tanah. Pemasangan CMC dengan diameter 0,42 m dan jarak 1 m pada lapisan tanah lunak sedalam 17 m efektif untuk menaikkan daya dukung sebesar 30% hingga 500%. CMC juga efektif dalam mereduksi penurunan tanah sebesar 68% karena beban timbunan tidak sepenuhnya didistribusikan pada tanah namun lebih besar terdistribusi pada CMC. Hal ini menyebabkan penurunan yang dihasilkan lebih rendah dari kondisi tanpa perkuatan dimana kolom memiliki kekakuan lebih tinggi sehingga penurunan yang dihasilkan lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. A. Mir and S. H. Reddy, "Mechanical Behaviour of Nano-material (Al₂O₃) Stabilized Soft Soil," *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 34, no. 3, pp. 636–643, Mar. 2021, doi: 10.5829/ije.2021.34.03c.07.

- [2] M. H. Zulkafli, M. N. Noorasyikin, and L. F. Roslan, "Stabilization of soft soil with rice husk and coconut fibre," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1347/1/012058.
- [3] L. B. Fasugba and G. M. Ayininuola, "Characterization of Soft Soil Properties and Settlement Behavior," Jul. 31, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-7029464/v1.
- [4] Y. Zaika, A. Rachmansyah, and Harimurti, "Geotechnical behaviour of soft soil in East Java, Indonesia," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 615, no. 1, p. 012043, Oct. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/615/1/012043.
- [5] F. Bouabdallah, K. Goudjil, and M. Salah, "The Effect of Rigid Inclusions on the Dynamic Response of Highway Embankment," 2023. [Online]. Available: www.etasr.com
- [6] J. Han, *Principles and Practices of Ground Improvement*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [7] J. Ameratunga, N. Sivakugan, and B. M. Das, "Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13410>
- [8] K. Yee, R. A. Setiawan, and O. Bechet, "Controlled Modulus Columns (CMC): A New Trend in Ground Improvement and Potential Applications to Indonesian Soils," in *ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels*, Belgium, 2012, pp. 287–300.
- [9] ASIRI National Project, *Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements*, 1st ed. French: Presses des Ponts, 2012.
- [10] S. R. Housing, *Ministry of Construction of the People's Republic of China*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [11] L. Miao, F. Wang, Y. Zhang, and C. Zhang, "Experimental Study on Controlled Modulus Column Methods," in *Proceedings of the Us-China Workshop on Ground Improvement Techno*, Lincoln: University of Nebraska, 2009, pp. 112–119.
- [12] S. R. Housing, *National Standart of The People's Republic Of China GB 50007-2011 Code for Design of Building Foundation*. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [13] Z. Gusnadi, I. Handiman, and dan Fitriana Sarifah, "Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil ANALISA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN CONTROLLED MODULUS COLUMNS (CMC) PADA KONSTRUKSI TIMBUNAN JALAN".
- [14] NYSDOT, *Geotechnical Design Manual Chapter 14 Ground Improvement Technology*. 2013.
- [15] V. Elias, J. Welsh, J. Warren, R. Lukas, J. G. Collin, and R. R. Berg, *Ground Improvement Methods*, vol. I and II. US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, 2006.
- [16] G. Baudouin, L. Thorel, and G. Raut, *Physical Modelling in Geotechnics, Two Volume Set*, 1st ed. CRC Press, 2010.
- [17] Plaxis, "Plaxis 2D 2024.2 Reference Manual 2D," 2024.
- [18] C. C. Ladd, *Settlement Analysis for Cohesive Soils*. Research Report R71-2, Soils Publication 272: Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1971.