

Analisis Pengaruh Kuat Tarik Geosintetik Pada Perkuatan Tanah Lunak Metode *Geosynthetic Encased Stone Columns (GESC)*

Julita Hayati¹, Syahidus Syuhada², Calvin Shahroni³

^{1,2,3}Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten
Lampung Selatan, Lampung 35365

Program Studi Teknik Sipil, FTIK ITERA, Lampung

e-mail: *julita.hayati@si.itera.ac.id, syahidus.syuhada@si.itera.ac.id, calvinshahroni2@gmail.com

Abstract

Infrastructure development on soft soil has the potential to experience excessive settlement and failure of bearing capacity because soft soil has low load-bearing capacity and high compressibility. In the Indrapura-Kisaran STA 112+550 Toll Road Development Project, there is soft soil and high embankment work, so soil reinforcement is needed to overcome these problems. This research aimed to determine the effect of geosynthetic tensile strength on Geosynthetic Encased Stone Columns (GESC) reinforcement of soft soil using finite element methods and analytical methods. Settlement and bearing capacity were studied with varying geosynthetic tensile strengths of 150 kN/m, 200 kN/m, 300 kN/m, and 400 kN/m. GESC reinforcement can increase soil bearing capacity by 75% to 84%. And reduce settlement by 86% using the analytical method and 61.8% using the numerical method. The installation of GESC on soft soil layers is effective in increasing bearing capacity and reducing settlement significantly. In general, the magnitude of the bearing capacity and reduction in settlement due to reinforcement with geosynthetic-encased stone columns is influenced by the tensile strength of the geosynthetic, distance, and installation pattern.

Keywords: bearing capacity, GESC, settlement, soil improvement

Abstrak

Pembangunan infrastruktur di atas tanah lunak berpotensi mengalami penurunan berlebih dan kegagalan daya dukung karena tanah lunak memiliki kemampuan memikul beban rendah dan kompresibilitas tinggi. Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura-Kisaran STA 112+550 terdapat tanah lunak dan pekerjaan timbunan tinggi sehingga perlu adanya perkuatan tanah untuk mengatasi permasalahan tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kuat tarik geosintetik pada Geosynthetic Encased Stone Columns (GESC) dalam memperkuat tanah lunak dengan bantuan metode elemen hingga dan metode analitik. Penurunan dan daya dukung diteliti dengan kuat tarik geosintetik bervariasi sebesar 150 kN/m, 200 kN/m, 300 kN/m dan 400 kN/m. Perkuatan GESC dapat meningkatkan daya dukung tanah sebesar 75% hingga 84%. Serta mereduksi penurunan hingga 86% pada metode analitik dan 61,8% dengan menggunakan metode numerik. Pemasangan GESC pada lapisan tanah lunak efektif untuk meningkatkan daya dukung dan mereduksi penurunan secara signifikan. Secara umum besarnya daya dukung dan reduksi penurunan akibat perkuatan dengan Geosynthetic Encased Stone Columns dipengaruhi oleh kuat tarik geosintetik, jarak, dan pola pemasangan.

Kata kunci: GESC, kuat tarik, penurunan, daya dukung

1. Pendahuluan

Guna mendorong pertumbuhan ekonomi nasional dan tercapainya konektivitas antar wilayah di Indonesia, pemerintah telah menargetkan pembangunan infrastruktur transportasi. Pembangunan infrastruktur ini dapat menjadi faktor pendukung dalam melakukan distribusi barang dan jasa, mobilisasi dan aksesibilitas antar wilayah serta peningkatan kualitas dan kesejahteraan dalam pemerataan ekonomi di Indonesia. Kondisi tanah merupakan bagian terpenting dalam melakukan pembangunan infrastruktur karena tanah merupakan bagian dasar yang akan menerima beban akibat adanya bangunan infrastruktur. Infrastruktur yang dikonstruksi dengan kondisi tanah lunak akan berpotensi mengalami penurunan berlebih hingga kegagalan daya dukung karena memiliki daya dukung yang rendah sehingga diperlukan upaya perkuatan tanah untuk mengatasi permasalahan tersebut.

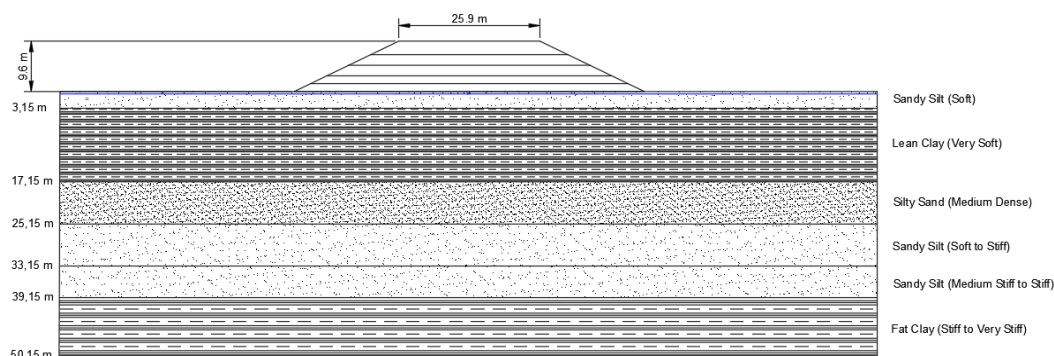
Kondisi tanah pada proyek pembangunan Jalan Tol Indrapura – Kisaran, Sumatera Utara, di ketahui tanah lunak pada beberapa lokasi memiliki kedalaman lebih 17 – 20 meter, dengan nilai kuat geser *undrained* 2 – 9,1 kPa. Dengan kedalaman tanah tersebut, salah satu metode perbaikan tanah dalam yang dapat diterapkan adalah metode perbaikan tanah menggunakan *Stone Columns*. Dalam menggunakan metode perbaikan tanah ini kuat geser tanah perlu dipertimbangkan. Hal tersebut agar *Stone Columns* yang digunakan dapat bekerja dengan maksimal. Sebagai pedoman umum, kuat geser minimum (S_u) yang disyaratkan dalam perbaikan tanah lempung lunak menggunakan metode *Stone Columns* yaitu 15 kPa. Oleh karena itu, penggunaan selubung geosintetik dalam penggunaan *Stone Columns* dapat menjadi solusi sebagai penahan beban dan mengurangi dan/atau mencegah *kegagalan bulging* pada kolom. Metode tersebut kemudian dikenal dengan metode *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC).

Secara umum perkuatan daya dukung tanah dengan menggunakan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jarak antar kolom GESC, pola pemasangan, diameter dan kuat tarik selubung geosintetik. Berdasarkan penelitian (Hanif, 2020) dan (Nugroho, 2018) yang menganalisis perkuatan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) sebagai perkuatan stabilitas timbunan dengan menggunakan geosintetik dengan spesifikasi UW-250, diameter 1 m dan jarak pemasangan 2 m. Kemudian pada penelitian (Widiartha, 2015) tentang perencanaan perkuatan tanah dengan menggunakan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dengan kekakuan tarik (J) 2000 kN/m dan 3500 kN/m dan diameter kolom 0,8 m. Pada (Han, 2015) untuk diameter kolom dengan selubung geosintetik berkisar 0,7 sampai 0,9 m. Oleh karena itu, berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan pada penelitian ini akan dianalisis bagaimana pengaruh kuat tarik selubung geosintetik terhadap besarnya daya dukung, penurunan tanah dan stabilitas lereng timbunan. Adapun spesifikasi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan geosintetik *Ringtrac* dengan kuat tarik 150 kN/m, 200 kN/m, 300 kN/m dan 400 kN/m.

2. Metode Penelitian

2.1 Pengumpulan Data

Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai kondisi tanah tanpa perbaikan dan dengan adanya perbaikan menggunakan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dengan memvariasikan kuat tarik 150, 200, 300 dan 400 kN/m². Analisis yang dilakukan seperti daya dukung, penurunan dan faktor keamanan stabilitas lereng. Analisis perbaikan tanah pada kondisi tanah lunak berada di Proyek Pembangunan Jalan Tol Indrapura – Kisaran, Provinsi Sumatera Utara STA 112 + 550. Berdasarkan data penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium pada BH 5 diperoleh pelapisan tanah (Gambar 1) dan interpretasi parameter tanah (Tabel 1). posisi muka air tanah berada di kedalaman 0,47 m di bawah permukaan tanah, sedangkan elevasi rencana tinggi timbunan yaitu sebesar 8 m dan tebal perkerasan 0,55 m. Material tanah timbunan dan *stone column* ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Stratifikasi Tanah

Tabel 1. Data Parameter Tanah Dasar

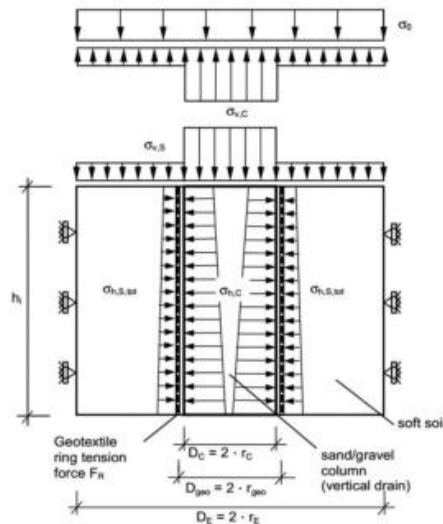
Parameter	Satuan	Nilai					
Kondisi		<i>Undrained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Drained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Undrained</i>	<i>Undrained</i>
Model		SS	SS	MC	SS	SS	SS
Jenis Tanah		<i>Sandy silt</i>	<i>Lean clay</i>	<i>Silty sand</i>	<i>Sandy silt</i>	<i>Sandy silt</i>	<i>Fat clay</i>
Angka Pori	e	2,09	2,16	2,16	0,89	0,73	0,94
Berat isi Jenuh	γ_{sat} (kN/m ³)	14,27	14,17	13,82	16,89	18,72	17,64
Berat Isi	γ_{unsat} (kN/m ³)	7,73	7,49	7,35	12,42	14,87	12,86
Kohesi	c' (kPa)	0,64	1,8	1,43	0,62	1,33	5,9
Sudut Gesek	Φ' (°)	25	34,19	26,44	30	38,39	32
Angka Poisson	ν	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5
E	(kN/m ²)	1300	1000	16765	3900	4500	11000
Permeabilitas horizontal	Kh (cm/sec)	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,24 \times 10^{-7}$	$1,59 \times 10^{-7}$	$2,16 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$
Permeabilitas vertikal	Kv (cm/sec)	$4,4 \times 10^{-7}$	$4,24 \times 10^{-7}$	$1,59 \times 10^{-7}$	$2,16 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$
Indeks Kompresi	Cc	0,6	1,11	-	0,54	0,44	0,39
Indeks Rekompresi	Cr	0,038	0,073	-	0,047	0,029	0,121

Tabel 2. Data Parameter Tanah Timbunan dan Stone Column

Parameter	Satuan	Timbunan	Stone column
Kondisi		<i>Drained</i>	<i>Drained</i>
Model		MC	MC
Material tanah		Timbunan	Stone column
Berat isi jenuh	γ_{sat} (kN/m ³)	17,51	19
Berat isi	γ_{unsat} (kN/m ³)	17,26	19
Kohesi	c' (kpa)	13	-
Sudut geser	ϕ (°)	37,8	45
Angka poisson	ν	0,3	0,2
E	(kN/m ²)	14000	70000
Permeabilitas horizontal	kh (m/hari)	0,000864	10
Permeabilitas vertikal	kv (m/hari)	0,000864	10

2.2 Metode Analitik

Dalam metode analitik, metode yang umum digunakan dalam merencanakan perkuatan dengan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dikembangkan oleh (Raithel & Kempfert, 2000) yang kemudian dikenal dengan metode R&K. Metode tersebut menggunakan konsep unit sel dengan diameter ekuivalen yang meliputi satu kolom GESC dan daerah pengaruhnya (Han, 2015) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model Unit Cell

Sumber: Geosynthetic Encased Columns for Soft Soil Improvement (2018)

2.2.1 Area Replacement Ratio (a_s)

Area replacement ratio merupakan perbandingan antara luas penampang *Stone Column* dengan luas tanah di sekitarnya. Berikut merupakan persamaan yang digunakan.

$$a_s = \frac{A_c}{A_e} = C \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \quad (1)$$

dimana,

A_c = luas melintang *Stone Column*

A_e = luasan satu *unit cell*

d_c = diameter *Stone Column*

s = spasi antar *Stone Column*

C = konstanta (pola segitiga $C = 0,907$ dan pola segi persegi $C = 0,785$)

2.2.2 Tekanan Lateral Kolom dan Tanah

Pada GESC, kolom menerima perkuatan dari geosintetik yang menyelubunginya sehingga terdapat tambahan tegangan pengekanan pada kolom yang. Tegangan *overburden* pada kolom ($\sigma_{z0,c}$) dan tanah ($\sigma_{z0,s}$), serta tambahan tegangan akibat beban timbunan menghasilkan tegangan horizontal (radial) pada kolom ($\sigma_{r,c}$) dan tanah di sekitarnya ($\sigma_{r,s}$). Metode R&K mengasumsikan tanah dalam kondisi diam sebelum beban bekerja dan kolom berada pada kondisi tekanan tanah aktif. Berikut merupakan persamaan untuk mencari tegangan horizontal tersebut.

$$\sigma_{r,c} = \Delta \sigma_c \cdot K_{ac} + \sigma'_{z0,c} \cdot K_{ac} \quad (2)$$

$$\sigma_{r,s} = \Delta \sigma_s \cdot K_{os} + \sigma'_{z0,s} \cdot K_{os} \quad (3)$$

Lapisan geosintetik diasumsikan sebagai material linear elastik dengan modulus kekakuan tarik (J). Untuk menghitung modulus kekakuan (J) dapat menggunakan persamaan berikut.

$$J = \frac{T_{all}}{\varepsilon} \quad (4)$$

Pada GESC tegangan yang bekerja pada kolom ($\sigma_{r,c}$) berasal dari tegangan lateral yang di akibatkan oleh tanah disekitarnya ($\sigma_{r,s}$) dan tegangan lateral yang disediakan oleh geosintetik ($\sigma_{r,g}$). Dengan kondisi ini, selisih tegangan lateral kolom terhadap tegangan lateral penahannya yaitu tanah dan geosintetik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta\sigma_r = \sigma_{r,c} - (\sigma_{r,s} + \sigma_{r,g}) \quad (5)$$

dimana,

T_{all} = Kuat tarik ijin geosintetik

ε = elongasi (%) (umumnya 5%)

$\sigma_{r,g}$ = tegangan lateral oleh geosintetik

2.2.3 Daya Dukung GESC

Selain pengekanan akibat tanah di sekitarnya, daya dukung GESC juga mempertimbangkan pengekanan yang diberikan oleh selubung geosintetik untuk daya dukung *ultimate* kolom individual ($q_{ult,c}$) karena kemungkinan keruntuhan atau penggelembungan (*expansion*) lateral yang terjadi pada panjang kolom empat kali diameter. Metode ini memperhitungkan daya dukung kolom GESC pada kondisi tanah *undrained* (Murugesan & Rajagopal, 2010). Berikut merupakan persamaan daya dukung *ultimate* $q_{ult,c}$.

$$q_{ult,c} = (\sigma_{r0} + 4C_u + \sigma_{r,g}) K_p \quad (6)$$

Setelah daya dukung *ultimate* $q_{ult,c}$ masing – masing kolom diketahui maka daya dukung *ultimate* (q_{ult}) pondasi komposit dapat dihitung menggunakan persamaan berikut, dengan mengasumsikan daya dukung *ultimate* tanah sekitar GESC $5C_u$ menurut (Barksdale, 1987).

$$q_{ult} = q_{ult,c} \times a_s + q_{ult,s} (1 - a_s) \quad (7)$$

dimana,

σ_{r0} = tegangan total horizontal tanah

C_u = kuat geser *undrained*

K_p = koefisien pasif GESC

$q_{ult,s}$ = daya dukung *ultimate* tanah sekitar GESC ($5 \times C_u$)

2.2.4 Penurunan Tanah

Akibat adanya perbedaan tegangan radial pada kolom dan tanah, mengakibatkan ekspansi pada kolom. Pada metode analitik, penurunan pada kolom dan tanah diasumsikan memiliki penurunan yang sama. Metode ini memperhitungkan penurunan GESC pada kondisi tanah *drained* dengan asumsi kolom batu tidak mengalami pemampatan dan tidak terdapat penurunan diujung kolom (Raithel & Kempfert, 2000). Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam menghitung penurunan GESC.

$$\Delta r_c = \left(\frac{\sigma_{rc} - \sigma_{rs} + \frac{(r_g - r_c) J}{r_g^2}}{\frac{a_s E^*}{(1 - a_s) r_c} + \frac{J}{r_g^2}} \right) \quad (8)$$

$$S_{sl} = \left[\frac{\Delta \sigma_s}{D_s} - \frac{2}{E^*} \left(\frac{V_s}{1 - V_s} \right) \Delta \sigma_r \right] h \quad (9)$$

$$S_{cl} = \left[1 - \frac{rc^2}{(rc + \Delta rc)^2} \right] h \quad (10)$$

dimana,

Δr_c = Bulging

S_{sl} = penurunan tanah

S_{cl} = penurunan kolom

E^* = modulus ekuivalen tanah

h = kedalaman pemasangan GESC/kedalaman tanah lunak

2.3 Metode Elemen Hingga

Keadaan lapangan dapat dimodelkan dengan *plane strain* dan *axisimetry*. Pada pemodelan *plane strain* dimensi pada kolom dimodifikasi karena adanya perbedaan kondisi lapangan dan permodelan. Oleh karena itu untuk menganalisa menggunakan pemodelan *plane strain* digunakan reduksi besar diameter tanah yang di perbaiki karena adanya perbedaan dengan pemodelan *Axisimetry*. Dalam *Journal of Geo Engineering, Vol. 12, No 4, pp. 139 – 140, December 2017* dan (Tan, Tjahyono, & Oo, 2008) menyebutkan bahwa kolom granular disimulasikan dengan dinding regangan bidang ekuivalen dimana setengah kolom di tentukan sebagai berikut.

$$b_c = B \frac{r_c^2}{R^2} \quad (11)$$

$$R = \frac{de}{2} \quad (12)$$

$$B = \frac{R}{1,05} \quad (13)$$

Dimana :

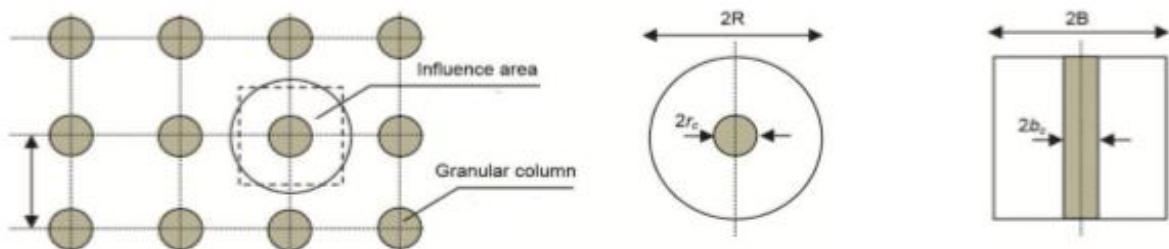
b_c = besaran kolom yang digunakan dalam pemodelan *plane strain*

r_c = jari – jari kolom

B = setengah dari daerah pengaruh luasan *plane strain*

R = jari – jari luasan. (1,05 untuk pola segitiga, 1,13 untuk pola segiempat)

Hubungan R dan B dapat dilihat melalui Gambar 3.



Gambar 2. Hubungan Pemodelan Axisimetry dan Plane Strain

Sumber : Journal Of Geo Engineering (2017)

Metode *Geosynthetic Encased Stone Column* (GESC) dalam pemodelan *plane strain*, geosintetik tidak dapat dimodelkan secara langsung. Efek geosintetik tersebut perlu diekuivalenkan kedalam sudut gesek (ϕ'_{sub}) dalam dari material GESC yang digunakan. Adapun untuk menghitung (ϕ'_{sub}) dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\sin \phi'_{sub} = \frac{\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{\sigma_{rg}}{\sigma_{rc}} - 1}{\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} - \frac{\sigma_{rg}}{\sigma_{rc}} + 1} \quad (14)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perencanaan Timbunan Bertahap

Umumnya pelaksanaan timbunan dengan tinggi relatif besar dilakukan secara bertahap agar tidak terjadi kegagalan atau keruntuhan. Dalam melakukan timbunan bertahap, dimaksudkan agar nilai kohesi tanah dasar meningkat di setiap tahap timbunan yang dilakukan atau yang di sebut *gain strength*, sehingga perlu dilakukan perhitungan daya dukung awal untuk mengetahui tinggi kritis (H_{cr}) timbunan yang dapat dilakukan. Berikut merupakan perhitungan untuk menghitung daya dukung tanah dasar.

$$q_{ult} = c \times N_c$$

$$q_{ult} = 6,4 \text{ kN/m}^2 \times 5,14$$

$$q_{ult} = 32,90 \text{ kN/m}^2$$

Besarnya beban timbunan yang diterima tanah merupakan penjumlahan beban timbunan, beban perkerasan dan beban lalu lintas. Adapun besarnya beban tersebut sebesar 165,696 kN/m² atau setara dengan 9,6 meter tinggi timbunan. Berdasarkan perhitungan di atas di ketahui bahwa daya dukung tanah lebih kecil dibandingkan dengan beban yang bekerja, sehingga tidak dapat dilakukan penimbunan satu tahap karena akan menyebabkan keruntuhan saat konstruksi timbunan berlangsung. Oleh karena itu, penimbunan perlu dilakukan secara bertahap. Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan yang telah dilakukan (Tabel 3).

Tabel 3. Data Parameter Tanah Timbunan dan Stone Column

Tahap	S_u (kN/m ²)	H_{cr} (m)	$H_{timbunan}$ (m)	$\Delta\sigma$ (kN/m ²)	ΔS_u (kN/m ²)	S_u akibat timbunan	q_{ult} akhir (kN/m ²)
1	6,40	1,50	1,5	25,89	6,99	13,39	68,83
2	13,39	3,00	1,5	25,89	6,99	20,38	104,76
3	20,38	5,00	2,0	34,52	9,32	29,70	152,66
4	29,70	7,00	2,0	34,52	9,32	39,02	200,57
5	39,02	9,60	2,6	44,876	12,12	51,14	262,85

3.2 Penurunan Tanpa Perkuatan

Besarnya penurunan yang dihitung dalam analisis ini terdiri dari penurunan konsolidasi (S_c), penurunan elastik/segera (S_e) dan penurunan total yaitu penjumlahan antara penurunan konsolidasi dan penurunan elastik/segera. 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 4 dan Tabel 5. Penurunan total setiap tahap penimbunan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 4. Rekapitulasi Penurunan Konsolidasi

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	C_c	C_s	S_{c1} (m)	S_{c2} (m)	S_{c3} (m)	S_{c4} (m)	S_{c5} (m)
0-3,15	Sandy silt	0,6	0,038	0,022	0,036	0,155	0,254	0,315
3,15-17,15	Lean clay	1,11	0,073	0,061	0,103	0,144	0,184	0,210
25,15-33,15	Sandy silt	0,54	0,047	0,011	0,020	0,032	0,044	0,053
33,15-39,15	Sandy silt	0,44	0,029	0,004	0,007	0,011	0,015	0,019
39,15-50,15	Fat clay	0,39	0,121	0,015	0,030	0,049	0,070	0,088
Total				0,112	0,196	0,391	0,567	0,684

Tabel 5. Rekapitulasi Penurunan Elastik

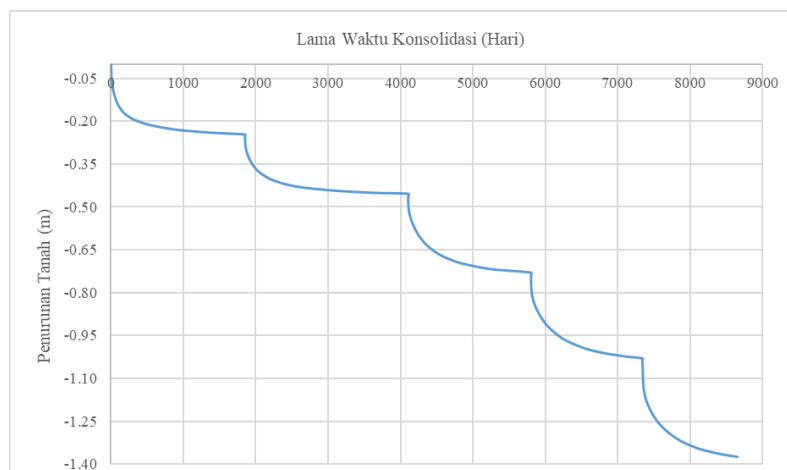
Kedalaman (m)	Jenis Tanah	E (kN/m ²)	S_{e1} (m)	S_{e2} (m)	S_{e3} (m)	S_{e4} (m)	S_{e5} (m)
0-3,15	Sandy silt	1300	0,041	0,081	0,135	0,203	0,260
3,15-17,15	Lean clay	1000	0,045	0,090	0,150	0,225	0,288

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	E (kN/m ²)	Se ₁ (m)	Se ₂ (m)	Se ₃ (m)	Se ₄ (m)	Se ₅ (m)
17,15-25,15	Silty sand	16765	0,004	0,008	0,014	0,020	0,026
25,15-33,15	Sandy silt	3900	0,012	0,023	0,039	0,058	0,074
33,15-39,15	Sandy silt	4500	0,009	0,018	0,030	0,045	0,058
39,15-50,15	Fat clay	11000	0,002	0,005	0,008	0,011	0,015
Total			0,112	0,225	0,375	0,562	0,720

Tabel 6. Rekapitulasi Penurunan Total

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	S _{T1} (m)	S _{T2} (m)	S _{T3} (m)	S _{T4} (m)	S _{T5} (m)
0-3,15	Sandy silt	0,063	0,118	0,290	0,457	0,575
3,15-17,15	Lean clay	0,106	0,193	0,294	0,408	0,497
17,15-25,15	Silty sand	0,004	0,008	0,014	0,020	0,026
25,15-33,15	Sandy silt	0,022	0,043	0,070	0,102	0,127
33,15-39,15	Sandy silt	0,013	0,025	0,041	0,060	0,076
39,15-50,15	Fat clay	0,018	0,035	0,056	0,082	0,102
Total		0,225	0,421	0,765	1,129	1,404

Besarnya penurunan total yang didapatkan dengan metode analitik sebesar 1,404 meter. Sedangkan dalam metode elemen hingga didapatkan besarnya penurunan akibat beban timbunan sebesar 1,416 meter, yang dapat dilihat pada Gambar 5.

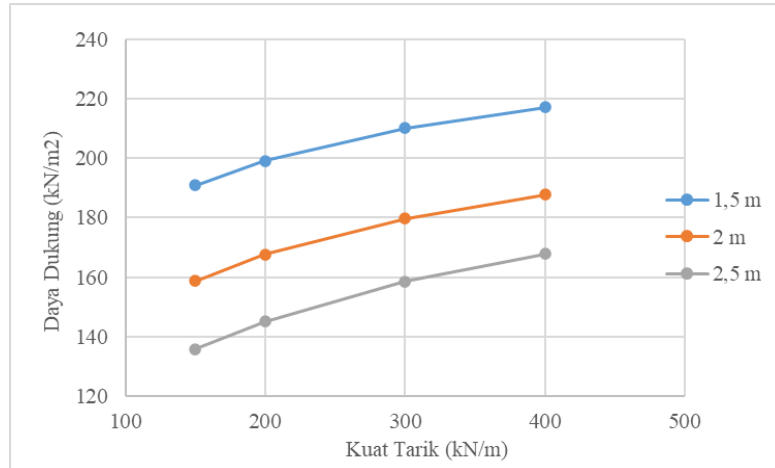
**Gambar 5. Grafik Penurunan Vs Waktu Konsolidasi Tanah Tanpa Perkuatan**

3.3 Daya Dukung GESC

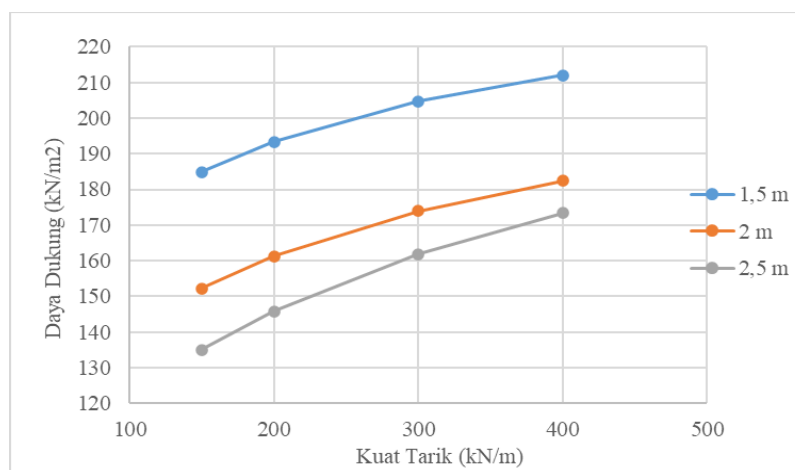
Besarnya daya dukung tanah yang diperkuat GESC dipengaruhi oleh beberapa faktor. Secara umum faktor yang memengaruhi daya dukung tanah yang diperkuat GESC yaitu kuat tarik selubung geosintetik, diameter, jarak dan pola pemasangan. Berikut merupakan hasil daya dukung variasi kuat tarik yang dihasilkan dari perkuatan dengan GESC dengan diameter 0,8 meter pola segitiga (Gambar 6) dan pola segiempat (Gambar 7).

Salah satu faktor yang memengaruhi daya dukung tersebut seperti kuat tarik dari selubung geosintetik. Efek kuat tarik sebagai selubung dapat memberikan kekakuan tarik (J) pada GESC. Besarnya kuat tarik geosintetik berbanding lurus terhadap kekakuan tariknya (J), dengan besaran kekakuan tarik berdasarkan variasi yang digunakan didapatkan sebesar 2272,727 kN/m, 3030,303 kN/m, 4545,455 kN/m, dan 6060,606 kN/m. Kekakuan tarik tersebut akan memengaruhi regangan pada kolom (Δr_c), tegangan lateral geosintetik ($\sigma_{r,g}$), dan distribusi tegangan yang terjadi pada kolom dan tanah sekitarnya.

Regangan pada kolom (Δr_c) terjadi akibat adanya tegangan lateral yang bekerja pada kolom. Dengan adanya kekakuan tarik dari geosintetik, mengakibatkan kolom menjadi lebih kaku, sehingga regangan kolom yang terjadi juga akan semakin kecil. Regangan pada kolom dapat memengaruhi daya dukung, dimana besarnya regangan kolom berbanding terbalik terhadap daya dukung tanah yang terjadi.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Kuat Tarik Terhadap Daya Dukung Pola Segitiga



Gambar 7. Grafik Pengaruh Kuat Tarik Terhadap Daya Dukung Pola Segiempat

Selain berpengaruh terhadap regangan kolom, kekakuan tarik juga berpengaruh terhadap besarnya tegangan lateral pada geosintetik ($\sigma_{r,g}$). Tegangan lateral geosintetik berpengaruh terhadap besarnya daya dukung kolom, dimana semakin besar tegangan lateral geosintetik yang didapatkan, maka daya dukung kolom akan semakin besar.

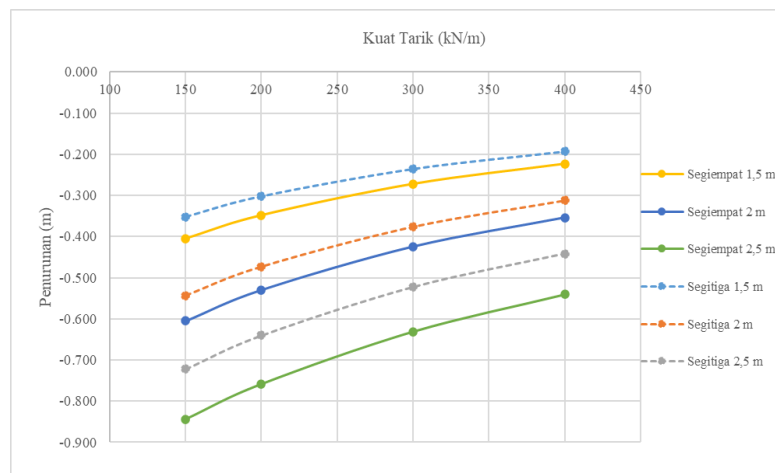
3.4 Penurunan Tanah Diperkuat GESK

Selain berpengaruh terhadap daya dukung, besarnya kuat tarik juga berpengaruh terhadap penurunan tanah. Berikut merupakan hasil penurunan tanah yang diperkuat menggunakan GESK dengan metode analitik (Gambar 8) dan elemen hingga (Gambar 9) dengan variasi kuat tarik.

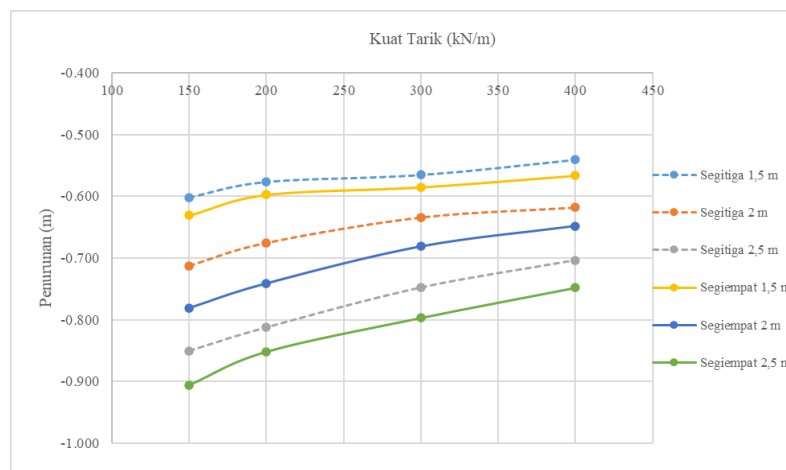
Reduksi penurunan juga dipengaruhi oleh regangan yang terjadi (*bulging*) pada GESK (Δr_c), dimana semakin besar regangan yang terjadi pada kolom GESK, maka reduksi penurunan yang terjadi juga akan semakin kecil. Besarnya kekakuan tarik geosintetik berbanding terbalik terhadap regangan pada

kolom GESC. Oleh karena itu, peningkatan kuat tarik geosintetik juga akan meningkatkan reduksi penurunan pada tanah yang diperkuat.

Dalam metode elemen hingga efek kuat tarik geosintetik sebagai selubung GESC diekuivalenkan menjadi sudut gesek material *Stone Column* (ϕ'_{sub}). Sehingga dalam pemodelan GESC dengan metode tersebut tidak menggunakan sudut gesek asli dari material *Stone Column* dan geosintetik tidak dimodelkan secara langsung. Hal tersebut berbeda dibandingkan dengan metode analitik yang memperhitungkan perilaku linear elastik dari selubung geosintetik. Besarnya sudut gesek ekuivalen dipengaruhi oleh sudut gesek asli *Stone Column*, tegangan lateral geosintetik, dan tegangan lateral kolom. Semakin besar kuat tarik yang digunakan, maka sudut gesek ekuivalen yang dihasilkan semakin besar.



Gambar 8. Grafik Penurunan Vs Kuat Tarik Metode Analitik



Gambar 9. Grafik Penurunan Vs Kuat Tarik Metode Elemen Hingga

Berdasarkan kedua metode yang digunakan dalam menganalisis reduksi penurunan yang terjadi, dapat disimpulkan bahwa efek kuat tarik pada geosintetik sebagai selubung *stone column* (GESC) dapat mereduksi penurunan yang terjadi.

3.5 Faktor Keamanan Stabilitas Timbunan

Berikut merupakan faktor keamanan yang didapatkan dengan menggunakan elemen hingga akibat variasi kuat tarik yang digunakan. Faktor keamanan setelah adanya perkuatan GESC dapat meningkat seiring peningkatan kuat tarik geosintetik sebagai selubung GESC.

Tabel 7. Rekapitulasi Faktor Keamanan Stabilitas Timbunan

Jarak Pemasangan (m)	T_{ult} (kN/m)	SF Pola Segitiga	SF Pola Segiempat
1,5	150	1,620	1,637
	200	1,644	1,660
	300	1,753	1,711
	400	1,828	1,780
2	150	1,609	1,631
	200	1,628	1,637
	300	1,667	1,688
	400	1,714	1,721
2,5	150	1,607	1,596
	200	1,625	1,629
	300	1,641	1,631
	400	1,676	1,699

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dengan menggunakan variasi kuat tarik geosintetik sebagai selubung GESC. Tanah dasar pada penelitian ini merupakan tanah lanau dan lempung yang memiliki muka air tanah 0,47 m dengan konsistensi tanah sangat lunak dengan kedalaman hingga 17,15 m. Besar daya dukung tanah sebesar 32,9 kN/m² dan penurunan yang terjadi akibat beban timbunan sebesar 1,404 m. Penggunaan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) sebagai perkuatan tanah dalam penelitian ini dapat meningkatkan daya dukung sebesar 310 hingga 560% untuk seluruh variasi pola, jarak dan kuat tarik geosintetik yang digunakan. Persentase kenaikan daya dukung akibat kuat tarik sebesar 25 – 32% dari kuat tarik 150 kN/m ke 200 kN/m, 33 – 48 persen dari kuat tarik 200 kN/m ke 300 kN/m, serta 21 – 34 persen dari kuat tarik 300 kN/m ke 400 kN/m. Perkuatan tanah dengan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dapat mereduksi penurunan tanah mencapai 86% menggunakan metode analitik dan 61,8% dengan menggunakan metode numerik. Pengaruh kuat tarik geosintetik sebagai selubung GESC dapat meningkatkan daya dukung dan mereduksi penurunan tanah. Variasi kuat tarik yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 150 kN/m, 200 kN/m, 300 kN/m dan 400 kN/m. Semakin besar kuat tarik yang digunakan, maka daya dukung yang dihasilkan semakin besar dan mengurangi penurunan pada tanah. Kuat tarik pada geosintetik dapat memberikan kekakuan tambahan pada kolom, sehingga akan memengaruhi juga distribusi tegangan yang bekerja pada tanah dan kolom. Besarnya kuat tarik berbanding lurus terhadap besarnya tegangan yang terdistribusi pada kolom. Oleh karena itu regangan kolom ($\Delta\epsilon$) yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Pada perkuatan tanah tanpa *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC), didapatkan faktor keamanan stabilitas lereng 1,453. Sedangkan setelah menggunakan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) dapat meningkatkan faktor keamanan stabilitas timbunan. Faktor keamanan timbunan tersebut bervariasi berdasarkan pola pemasangan, jarak dan kuat tarik yang digunakan. Adapun faktor keamanan yang didapatkan dengan adanya perkuatan *Geosynthetic Encased Stone Columns* (GESC) sebesar 1,596 hingga 1,828.

Daftar Pustaka

- Almaida, M., Hosseinpour, I., & Riccio, M. (2017). Verification Of A Plane Strain Model For the Analysis Of Encased Granular Columns. *Journal Of Geo Engineering*, Vol 12, No 4, 137 - 145.

- Almaida, M., Riccio, M., Hosseinpour, I., & Alexiew, D. (2018, April 30). Geosynthetic Encased Columns for Soft Soil Improvement. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1. Retrieved from <https://istasazeh-co.com/wp-content/uploads/2022/05/Geosynthetic-Encased-Columns-for-Soft-Soil-Improvement.pdf>
- Barksdale, R. (1987). State of the Art for Design and Construction of Sand Compaction Piles. *Technical Report REMR-GT-4, Georgia Institute of Technology, prepared for Department of the Army, US Army Corps of Engineers.*
- Han, J. (2015). *Principles And Practice Of Ground Improvement*. Canada: John Wiley and Sons, Inc.
- Hanif, A. A. (2020, Januari). *Perencanaan Timbunan Dan Perbaikan Tanah Dengan Menggunakan Metode Preloading Dan Geotextile Encased Stone Column Pada Tanah Organik Di Jalan Tol Trans Sumatera Pematang Panggang - Kayu Agung*. Retrieved from Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Murugesan, S., & Rajagopal, K. (2010). Studies on the Behavior of Single and Group of Geosynthetic Encased Stone Columns. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 129-139.
- Nugroho, M. F. (2018). Perencanaan Perbaikan Tanah Dasar dan Perkuatan Stabilitas Timbunan Jalan Tol Terbanggi Besar – Pematang Panggang STA 46+900 s.d STA 51+100.
- Raithel, M., & Kempfert, H. (2000). Calculations models for dam foundations with geotextile coated sand columns. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, 347-352.
- Tan, S., Tjahyono, S., & Oo, K. (2008). Simplified Plane Strain Modeling of Stone Column Reinforced Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 185-194.
- Widiartha, I. W. (2015). Alternatif Penggunaan Pondasi Dalam dan Pemasangan Perkuatan Pada Tanah Gambut Pada Runway Bandar Udara Puruk Cahu Kalinantan Tengah.