



Desain Cerucuk Bambu Sebagai Perkuatan Timbunan Pada Tanah Lunak Untuk Konstruksi Bangunan Kantor

Friendly Hosang^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^afriendlyhosang021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva.sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Pembangunan infrastruktur pada tanah lunak, seperti di lokasi rencana pembangunan kantor di Desa Pentadu Timur, Kabupaten Boalemo, menghadapi kendala utama berupa daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas dua metode perkuatan timbunan—penimbunan bertahap dan Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE)—dengan memanfaatkan cerucuk bambu sebagai material lokal. Parameter tanah diperoleh melalui korelasi data uji sondir. Analisis dilakukan melalui perhitungan analitis mengacu pada BS 8006-1:2010, serta pemodelan numerik menggunakan Settle3D untuk penurunan, SLOPE/W untuk stabilitas lereng, dan PLAXIS 2D untuk validasi deformasi. Hasil analisis penimbunan bertahap setinggi 3 m menunjukkan derajat konsolidasi yang sangat rendah (8,20%) dengan total penurunan 393,19 mm (manual) dan 362,54 mm (Settle3D). Faktor keamanan lereng menurun signifikan dari 2,812 pada tahap pertama menjadi 1,516 pada tahap ketiga. Sebaliknya, penerapan sistem GRPE dengan cerucuk bambu (panjang 8 m, diameter ekuivalen 0,21 m, spasi 1,04 m) mampu meningkatkan stabilitas dan mereduksi penurunan secara signifikan. Analisis numerik menunjukkan faktor keamanan akhir sebesar 1,512, memenuhi kriteria $SF > 1,5$. Cerucuk bambu juga efektif mentransfer beban ke lapisan tanah yang lebih dalam sehingga membatasi deformasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa GRPE berbasis cerucuk bambu lebih unggul dibandingkan penimbunan bertahap konvensional, karena mampu mempercepat waktu konstruksi sekaligus menjaga stabilitas dan penurunan dalam batas yang diizinkan.

Kata kunci: tanah lunak, timbunan, Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE), cerucuk bambu

1. Pendahuluan

Pembangunan kantor di Desa Pentadu Timur, Kabupaten Boalemo, berada pada kondisi tanah lunak dengan muka air tanah yang tinggi, sehingga memerlukan strategi perkuatan timbunan yang tepat untuk menjamin stabilitas dan kinerja jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan dua metode perkuatan timbunan yang umum diterapkan pada kondisi tanah lunak, yaitu:

1. Metode penimbunan bertahap (conventional staged embankment) yang mengandalkan proses konsolidasi alami untuk meningkatkan kekuatan tanah dasar.
2. Metode Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE) yang memanfaatkan cerucuk bambu sebagai material lokal untuk mentransfer beban timbunan ke lapisan tanah yang lebih keras.

Analisis perbandingan kedua metode difokuskan pada tiga aspek utama, yaitu:

- daya dukung vertikal tanah,
- besaran penurunan (settlement), dan
- faktor keamanan lereng (slope stability).

Selain itu, penelitian juga mencakup perhitungan daya dukung aksial cerucuk bambu serta estimasi penurunan pada sistem GRPE. Seluruh analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method) dan divalidasi melalui pemodelan numerik PLAXIS 2D. Penelitian ini sepenuhnya didasarkan pada data sekunder lokasi, tanpa

mempertimbangkan penggunaan Prefabricated Vertical Drain (PVD) maupun analisis perbandingan biaya pekerjaan.

2. Landasan Teori

2.1 Penimbunan Bertahap

Penimbunan Bertahap (*Staged Construction*) merupakan metode perkuatan yang umum diterapkan pada tanah lunak untuk meningkatkan kapasitas dukung melalui proses konsolidasi bertahap. Prinsip dasar metode ini adalah memberikan beban timbunan secara berurutan dalam beberapa tahap sehingga tanah dasar memiliki waktu yang cukup untuk mengalami disipasi tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*). Disipasi tekanan air pori tersebut menyebabkan peningkatan tegangan efektif σ' pada tanah. Seiring meningkatnya tegangan efektif, kuat geser tak terdrainase (c_u) juga bertambah, sehingga tanah dasar memperoleh strength gain yang diperlukan untuk menahan beban tahap berikutnya dengan faktor keamanan yang tetap memenuhi persyaratan desain. Dengan demikian, metode penimbunan bertahap memungkinkan konstruksi timbunan di atas tanah lunak dilakukan secara aman tanpa memicu kegagalan geser maupun penurunan berlebih.

2.2 Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE) – Metode BS 8006:2010

Analisis desain pada sistem Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE) bertujuan untuk memastikan bahwa beban timbunan maupun beban tambahan (*surcharge*) dapat ditransfer secara efisien ke elemen tiang melalui mekanisme soil arching dan kontribusi perkuatan geosintetik. Mekanisme soil arching memungkinkan sebagian besar beban dialihkan dari tanah lunak di antara tiang menuju kepala tiang, sehingga mengurangi deformasi diferensial dan penurunan total.

Dalam sistem ini, geosintetik berperan penting melalui dua fungsi utama:

1. Menahan beban vertikal di antara tiang, yaitu dengan bekerja sebagai elemen tarik yang menyalurkan beban ke kepala tiang ketika tanah di antaranya mengalami deformasi;
2. Menahan gaya dorong horizontal dari timbunan, sehingga menjaga kestabilan lateral dan mencegah pergeseran massa tanah di atasnya.

Dengan demikian, integrasi antara soil arching dan perkuatan geosintetik menjadi kunci dalam memastikan kinerja struktural GRPE, terutama pada kondisi tanah lunak dengan daya dukung rendah.

1. Transfer Beban Vertikal Timbunan

Langkah awal mengasumsikan bahwa seluruh beban timbunan dan *surcharge* akan ditopang sepenuhnya oleh tiang pancang. Tanah lunak di sekitarnya dianggap tidak memberikan kontribusi daya dukung sama sekali. Dari asumsi ini, jarak maksimum antar tiang dapat ditentukan.

Rumus jarak maksimum tiang (s):

$$s = \sqrt{\frac{Q_{pall}}{\gamma_e H}} \quad (1)$$

Di mana:

Q_{pall} : Daya dukung izin tiang (kN).

H : Tinggi timbunan (m).

γ_e : Berat volume ekuivalen timbunan = $\gamma_{fill} + \frac{q}{H}$ (kN/m³).

Q : Beban *surcharge* (kN/m²).

2. Distribusi Beban Tidak Merata

Karena adanya perbedaan kekakuan yang signifikan antara tiang pancang (kaku) dan tanah lunak di sekitarnya (kompresibel), distribusi tegangan vertikal di dasar timbunan menjadi tidak seragam. Tegangan vertikal yang bekerja di atas kepala tiang (p_c') akan jauh lebih

besar daripada tegangan yang bekerja pada tanah di antara tiang (W_t).

3. Efeク Lengkung (Arching Effect)

Perbedaan tegangan ini menyebabkan redistribusi tegangan melalui mekanisme yang disebut efek lengkung (*arching effect*). Material timbunan akan membentuk sebuah "lengkungan" alami di antara kepala-kepala tiang, yang secara efektif mentransfer beban dari area di antara tiang ke atas tiang itu sendiri. Tingkat arching ini dipengaruhi oleh:

- Jarak antar tiang.
- Tinggi timbunan.
- Properti material timbunan.
- Kekakuan relatif antara tiang dan tanah lunak di sekitarnya.

4. Rasio Tegangan Vertikal

Untuk mengkuantifikasi efek *arching*, digunakan rasio tegangan vertikal, yaitu perbandingan antara tegangan pada kepala tiang (p_c') dengan tegangan vertikal efektif rata-rata di dasar timbunan (σ_v').

Rumus rasio tegangan vertikal yang dikemukakan oleh Marston adalah:

$$\frac{p_c'}{\sigma_v'} = \left(\frac{a_c d}{H} \right)^2 \quad (2)$$

Di mana:

σ_v' : Tegangan vertikal efektif di dasar timbunan = $\gamma_e H$ (kN/m²).

a_c : Koefisien lengkung.

d : Diameter *pile cap*.

5. Koefisien Lengkung (a_c)

Koefisien ini merupakan nilai empiris yang bergantung pada jenis tiang yang digunakan.

- Untuk tiang baja atau beton pada lapisan tanah keras:

$$a_c = 1,95 \frac{H}{d} - 0,18 \quad (3)$$

- Untuk tiang friksi (baja, beton) dan tiang kayu:

$$a_c = 1,70 \frac{H}{d} - 0,12 \quad (4)$$

- Untuk *stone column*, *lime piles*, dll:

$$a_c = 1,50 \frac{H}{d} - 0,07 \quad (5)$$

6. Beban Terdistribusi di Antara Tiang (W_t)

Beban ini adalah beban vertikal yang harus ditopang oleh geosintetik di antara tiang pancang.

Rumus beban terdistribusi:

$$w_t = \frac{s \gamma_e H}{s^2 - d^2} \left[s^2 - d^2 \frac{p_c'}{\sigma_v'} \right] \quad (6)$$

7. Beban Minimum yang Terdistribusi di Antara Tiang ($W_{t\min}$)

Menurut BS-8006-1:2010, beban terdistribusi minimum yang bekerja pada perkuatan dapat diasumsikan bergantung pada rasio cakupan area *pile cap* terhadap jarak tiang (a^2/s^2) dan tinggi relatif timbunan terhadap bentang bersih di antara tiang. Terlepas dari teori *arching*, tata letak tiang, dan geometri timbunan, perkuatan geosintetik harus dirancang untuk memikul setidaknya proporsi minimum praktis dari beban timbunan yang setara dengan 15%. Beban terdistribusi minimum yang dipikul oleh perkuatan di antara *pile cap* yang berdekatan dapat diasumsikan setara dengan:

$$w_{tmin} = s0.15(\gamma_e H) \quad (7)$$

8. Beban Tarik Geosintetik (P_{rp})

Beban ini adalah gaya tarik yang timbul pada geosintetik akibat menahan beban W_t . Perhitungan ini bersifat *indeterminate* karena melibatkan dua variabel yang tidak diketahui, yaitu gaya tarik (P_{rp}) dan regangan (ε).

Rumus beban tarik:

- Hubungan antara beban, bentang, dan regangan:

$$p_{rp} = \frac{w_t(s - d)}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon}} \quad (8)$$

- Hubungan antara gaya tarik dan modulus elastisitas geosintetik (E):

$$p_{rp} = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

9. Gaya Dorong Horizontal ke Arah Luar (P_{rl})

Selain menahan beban vertikal, geosintetik juga harus mampu menahan gaya dorong tanah horizontal dari timbunan, yang nilainya maksimum di tepi timbunan.

Rumus gaya dorong horizontal:

$$p_{rl} = p_{fill} = 0,5 \cdot k_a \cdot \gamma_e \cdot H^2 \quad (10)$$

dimana k_a adalah koefisien tekanan tanah aktif Rankine:

$$k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

Di mana:

ϕ : Sudut geser dalam untuk timbunan ($^\circ$).

10. Kebutuhan Kekuatan Tarik Total

Kebutuhan kekuatan tarik total berbeda untuk arah memanjang (*longitudinal*) dan melintang (*transversal*) timbunan.

- Arah memanjang (*longitudinal*):

Geosintetik hanya berfungsi menahan beban vertikal.

$$p_{r(design)} \geq p_{rp} \quad (12)$$

- Arah melintang (*transversal*):

Geosintetik harus menahan beban vertikal (P_{rp}) dan gaya dorong horizontal (P_{rl}).

$$p_{r(design)} \geq p_{rp} + p_{rl} \quad (13)$$

11. Kekuatan Desain Geosintetik (T_{all})

Kekuatan kerja yang dihitung ($P_{r(design)}$) adalah kekuatan yang dibutuhkan dalam kondisi jangka panjang di lapangan. Namun, spesifikasi material di katalog biasanya mencantumkan kekuatan putus jangka pendek (*ultimate tensile strength*, T_{ult}). Untuk mengubah kekuatan kerja menjadi kekuatan putus yang harus dimiliki material, perlu memperhitungkan beberapa faktor reduksi.

Kekuatan desain jangka panjang yang diizinkan (T_{all}) dihitung dari kekuatan putus (T_{ult}) dengan rumus:

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_{CBD} \times RF_{JOINT}} \quad (14)$$

dimana:

T_{all} : Kekuatan tarik izin jangka panjang (harus $\geq P_{r(design)}$) (kN/m).

T_{ult} : Kekuatan putus jangka pendek dari material (kN/m).

RF_{CR} : Faktor reduksi akibat rangkak (*creep*).

RF_{ID} : Faktor reduksi akibat kerusakan saat pemasangan (*installation damage*).

RF_{CBD} : Faktor reduksi akibat degradasi kimia dan biologi.

RF_{JOINT} : Faktor reduksi akibat sambungan.

Dimana untuk masing-masing nilai faktor reduksi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor reduksi untuk kekuatan desain geosintetik

Application	RF _{CR}	RF _{ID}	RF _{I_{CBD}}	RF _{JOINT}
Separation	1.5 - 2.5	1.1 - 2.5	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Cushioning	1.2 - 1.5	1.1 - 2.0	1.0 - 2.0	1.8 - 2.0
Unpaved roads	1.5 - 2.5	1.1 - 2.0	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Walls	2.0 - 4.0	1.1 - 2.0	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Embankments	2.0 - 3.5	1.1 - 2.0	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Bearing and foundations	2.0 - 4.0	1.1 - 2.0	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Slope stabilization	2.0 - 3.0	1.1 - 1.5	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Pavement overlays	1.0 - 2.0	1.1 - 1.5	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Railroads	1.0 - 1.5	1.5 - 3.0	1.5 - 2.0	1.8 - 2.0
Flexible forms	1.5 - 3.0	1.1 - 1.5	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0
Silt fences	1.5 - 2.5	1.1 - 1.5	1.0 - 1.5	1.8 - 2.0

(Sumber: Koerner, 2005)

3. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi komparatif berbasis studi kasus geoteknik yang memanfaatkan data sekunder hasil penyelidikan tanah pada lokasi rencana pembangunan kantor Desa Pentadu Timur, Kabupaten Boalemo. Data yang digunakan mencakup parameter fisik dan mekanik tanah lunak yang berpengaruh terhadap kinerja timbunan, yang selanjutnya diolah melalui dua pendekatan analitis utama.

1. Analisis Metode Penimbunan Bertahap

Pendekatan pertama berfokus pada evaluasi kinerja metode penimbunan bertahap (*staged construction*). Analisis meliputi:

- estimasi penurunan seketika (*immediate settlement*),
- perhitungan konsolidasi primer berdasarkan teori konsolidasi,
- penentuan daya dukung vertikal tanah dasar, dan
- evaluasi faktor keamanan (FK) terhadap potensi keruntuhan lereng maupun keruntuhan geser tanah dasar.

2. Analisis Metode GRPE dengan Cerucuk Bambu

Pendekatan kedua adalah analisis sistem *Geosynthetic Reinforced Piled Embankment* (GRPE) yang menggunakan cerucuk bambu sebagai elemen tiang. Perhitungan difokuskan pada:

- penentuan daya dukung aksial cerucuk bambu,
- estimasi penurunan total pada sistem GRPE, dan
- evaluasi mekanisme transfer beban dari timbunan ke cerucuk melalui kontribusi lapisan geosintetik.

Kedua pendekatan ini memungkinkan perbandingan yang komprehensif terhadap kinerja masing-masing metode perkuatan timbunan pada kondisi tanah lunak di lokasi studi.

Seluruh hasil perhitungan pada metode penimbunan bertahap maupun metode GRPE akan dianalisis lebih lanjut melalui evaluasi stabilitas lereng menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method) dengan bantuan perangkat lunak geoteknik. Selain itu, pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D dilakukan untuk memvalidasi hasil analisis manual, khususnya dalam membandingkan nilai faktor keamanan lereng dan estimasi penurunan yang dihasilkan oleh kedua alternatif perkuatan.

Analisis perbandingan akhir difokuskan pada tiga kriteria utama berikut:

1. Perbedaan nilai faktor keamanan (FK) lereng yang dicapai oleh metode penimbunan bertahap dan metode GRPE.

2. Perbedaan besaran total penurunan yang diprediksi pada masing-masing metode.
3. Efektivitas sistem GRPE dengan cerucuk bambu sebagai solusi perkuatan berbasis material lokal, tanpa mempertimbangkan aspek waktu konsolidasi (misalnya penggunaan PVD) maupun perbandingan biaya konstruksi.

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang komprehensif terhadap kinerja kedua metode perkuatan dalam konteks kondisi tanah lunak di lokasi studi.



Gambar 1. Lokasi Penelitian
(Sumber: Google Earth - 00°30'35.9028" N, 122°21'12.4560" E)

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Korelasi Data Sondir

Hasil korelasi data CPT menegaskan bahwa tanah dasar lokasi merupakan lempung lunak dengan kompresibilitas tinggi dan kuat geser rendah yang disajikan pada Tabel 2.

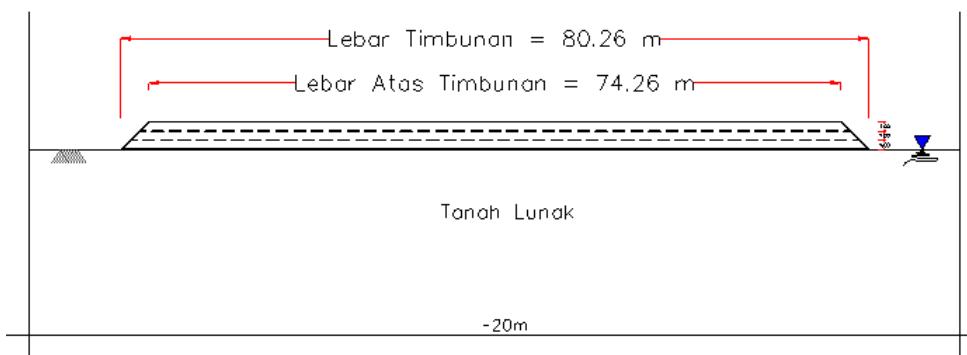
Tabel 2. Parameter Tanah berdasarkan Hasil Korelasi terhadap Hasil Uji CPT

Depth (m)	Soil Description	Soil Consistency y	Unit Weight of Soil γ	Internal Angle of Friction ϕ	Effective Cohesion c'	Undrained Cohesion c_u	Young Modulus E	Constrained Modulus M	Hydraulic Conductivity k
0 - 20	Clay - silty clay to clay	Firm	(kN/m ³)	(°)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(m/s)

0 - 20 Clay - silty clay
 to clay Firm 18.59 28.41 4.013 40.13 2971.41 4013.02 6.55⁻¹⁰

4.2 Perencanaan Timbunan Bertahap

Pembangunan direncanakan menggunakan timbunan dengan tinggi total 3 meter yang akan dilaksanakan melalui tiga tahap konstruksi. Setiap tahap penimbunan memiliki tinggi 1 meter dan dijadwalkan untuk diselesaikan dalam kurun waktu satu bulan. Pembagian tahapan ini bertujuan untuk memberikan waktu yang cukup bagi tanah dasar untuk mengalami dissipasi tekanan air pori dan peningkatan tegangan efektif, sehingga stabilitas timbunan tetap terjaga pada setiap fase konstruksi.



Gambar 2. Skema Timbunan Bertahap

4.2.1 Analisis Daya Dukung Timbunan Bertahap

Perhitungan daya dukung pada metode *staged embankment construction* merupakan bagian penting dalam analisis geoteknik, terutama pada proyek yang dibangun di atas tanah lunak. Metode ini dirancang untuk memastikan bahwa setiap tahap penimbunan memiliki stabilitas yang memadai, sekaligus memanfaatkan proses konsolidasi tanah untuk meningkatkan kuat geser tak terdrainase (Δc_u) secara bertahap.

Dengan memberikan beban timbunan secara bertahap, tekanan air pori berlebih memiliki waktu untuk berdisipasi, sehingga tegangan efektif meningkat dan tanah dasar memperoleh *strength gain* yang diperlukan untuk menopang beban tahap berikutnya. Pendekatan ini memungkinkan konstruksi timbunan dilakukan secara aman tanpa memicu keruntuhan geser maupun penurunan berlebih.

Rincian hasil perhitungan daya dukung untuk setiap tahap penimbunan disajikan pada Tabel 3, yang memuat evaluasi kapasitas dukung tanah dasar, perubahan kuat geser, serta faktor keamanan pada masing-masing tahap konstruksi.

Tabel 3. Perhitungan Daya Dukung Tanah Timbunan Bertahap

H (m)	c_u (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	P_{max} (kN/m ²)	FK_u	Ket ($FK_u > 1.5$)
1.0	40.13	206.27	23.00	8.97	...OK
2.2	40.61	208.73	46.95	4.39	...OK
3.2	40.71	209.26	67.71	3.05	...OK

4.2.2 Analisis Kestabilan Lereng Timbunan Bertahap

Analisis kestabilan lereng pada metode penimbunan bertahap merupakan tahapan penting dalam rekayasa geoteknik untuk memastikan bahwa timbunan tetap aman pada setiap fase konstruksi, khususnya ketika dibangun di atas tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai potensi terjadinya keruntuhan (*failure*) akibat peningkatan beban bertahap, serta memastikan bahwa faktor keamanan lereng tetap berada dalam batas yang dapat diterima selama proses pembangunan berlangsung.

Hasil analisis kestabilan lereng untuk setiap tahap penimbunan disajikan pada Tabel 4, yang memuat nilai faktor keamanan pada masing-masing fase serta perubahan stabilitas seiring bertambahnya tinggi timbunan.

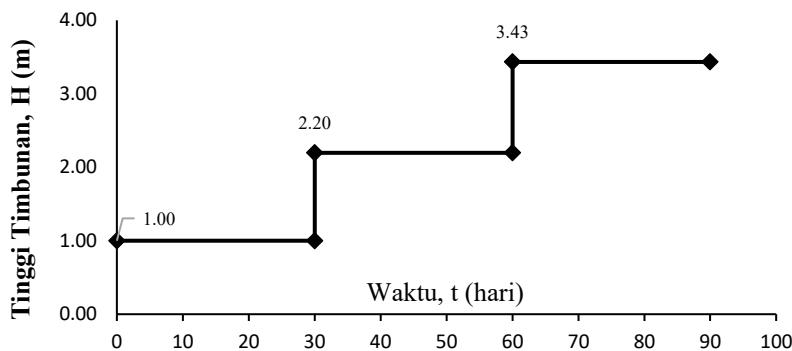
4.2.3 Analisis Penurunan Timbunan Bertahap

Analisis penurunan pada metode penimbunan bertahap merupakan bagian penting dalam rekayasa geoteknik untuk memprediksi besarnya penurunan (*settlement*) serta laju terjadinya penurunan tersebut selama proses konstruksi. Evaluasi ini diperlukan untuk memastikan bahwa timbunan tetap berada dalam batas deformasi yang dapat diterima, terutama ketika dibangun di atas tanah lunak yang memiliki kompresibilitas tinggi.

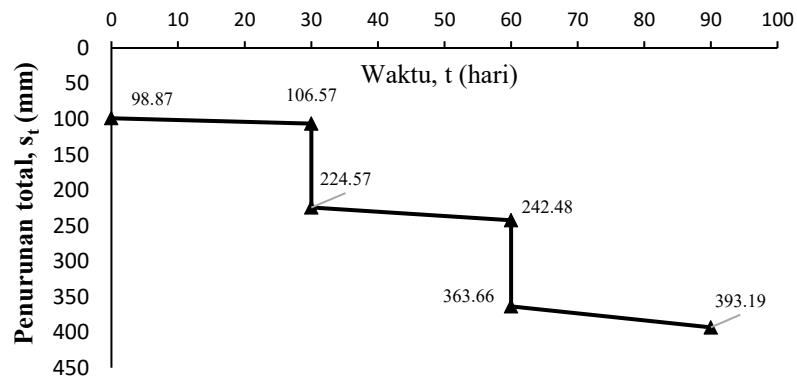
Melalui pendekatan penimbunan bertahap, penurunan dianalisis pada setiap fase penambahan beban, sehingga dapat diamati respons tanah terhadap disipasi tekanan air pori dan peningkatan tegangan efektif dari waktu ke waktu. Hasil analisis penurunan untuk masing-masing tahap konstruksi disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4, yang menggambarkan perkembangan penurunan total serta distribusi penurunan selama periode pembangunan.

Tabel 4. Faktor Keamanan (FK) Timbunan Bertahap

H (m)	Faktor Keamanan (FK)			Ket ($FK_{\text{statis}} > 1.5$)
	Morgenstern-Price (TSA)	Morgenstern-Price (ESA)	PLAXIS 2D	
1.0	15.731	2.566	2.812	...OK
2.0	12.215	1.801	1.875	...OK
3.0	10.949	1.518	1.516	...OK



Gambar 3. Kurva Hubungan antara Waktu dan Penambahan Tinggi Timbunan



Gambar 4. Kurva Hubungan antara Waktu dan Penurunan total

4.3 Perencanaan Piled Embankment

Hasil analisis penimbunan bertahap menunjukkan bahwa dalam periode konsolidasi selama 3 bulan, derajat konsolidasi yang dicapai hanya sebesar 8,20%, nilai yang jauh di bawah tingkat konsolidasi yang diperlukan untuk menghasilkan peningkatan kekuatan tanah yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada awal umur konstruksi, proses perbaikan tanah praktis belum terjadi, sehingga tanah dasar belum mampu memberikan peningkatan kuat geser yang memadai untuk mendukung tahapan timbunan berikutnya.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan waktu pelaksanaan serta potensi peningkatan biaya apabila metode penimbunan bertahap tetap dipaksakan, perencanaan kemudian diarahkan pada penerapan metode Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE) yang

dikombinasikan dengan cerucuk bambu sebagai elemen tiang. Metode ini dipilih karena mampu mengalihkan beban timbunan ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih kuat, sehingga tidak bergantung pada proses konsolidasi tanah lunak yang memerlukan waktu lama.

Perhitungan derajat konsolidasi menggunakan parameter $c_v = 8.4520 \text{ m}^2/\text{tahun}$ dan $H_{dr} = 20 \text{ m}$ disajikan pada Tabel 5, yang memberikan gambaran kuantitatif mengenai lambatnya proses konsolidasi pada kondisi tanah di lokasi studi.

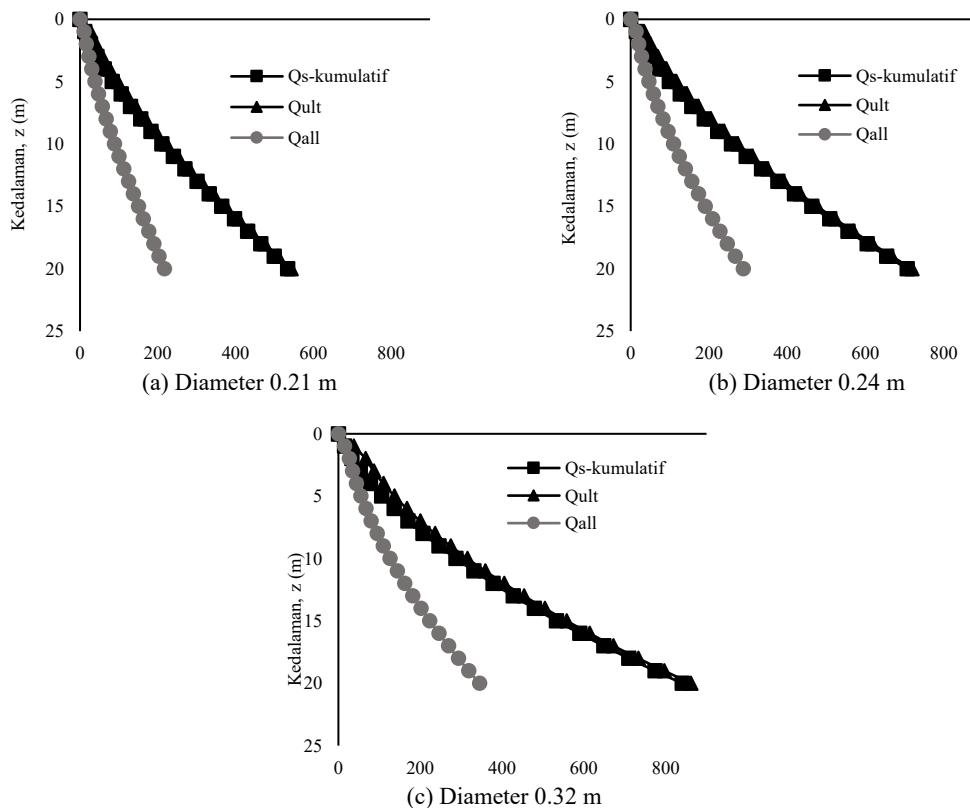
Tabel 5. Derajat Konsolidasi

Waktu		Tv	U
(bulan)	(tahun)		
1	0.0833	0.0018	4.73%
2	0.1667	0.0035	6.70%
3	0.25	0.0053	8.20%
111.5	9.29	0.1963	50.00%
481.6	40.13	0.8480	90.00%

4.3.1 Analisis Daya Dukung Aksial Cerucuk

Perhitungan daya dukung cerucuk merupakan langkah fundamental dalam perancangan *piled embankment*, karena hasilnya digunakan untuk menentukan jarak atau spasi maksimum antar cerucuk serta memastikan bahwa setiap cerucuk mampu menahan beban yang diterimanya. Evaluasi ini mencakup penentuan kapasitas ultimit cerucuk berdasarkan kontribusi tahanan ujung dan gesekan selimut, yang kemudian dibandingkan dengan beban kerja yang ditransfer melalui mekanisme *soil arching* dan perkuatan geosintetik.

Hasil perhitungan daya dukung ultimit untuk satu cerucuk ditampilkan pada Gambar 5, yang menggambarkan hubungan antara kapasitas dukung cerucuk dan parameter tanah yang memengaruhinya. Grafik tersebut menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi cerucuk yang optimal pada sistem GRPE, termasuk penetapan spasi cerucuk yang aman dan efisien.



Gambar 5. Kurva Hubungan Daya Dukung Cerucuk terhadap Kedalaman

4.3.2 Penentuan Kuat Tarik Geosintetik

Perhitungan kebutuhan kekuatan geosintetik merupakan tahap penting dalam desain sistem perkuatan, karena material geosintetik harus mampu menahan seluruh gaya tarik yang bekerja selama masa layanan struktur. Dalam proses ini, diperlukan evaluasi terhadap berbagai faktor reduksi yang dapat menurunkan kekuatan material seiring waktu, seperti degradasi kimia, kerusakan instalasi, *creep*, dan kondisi lingkungan.

Untuk menentukan kuat tarik izin (*allowable tensile strength*), perhitungan harus didasarkan pada nilai kuat tarik ultimit material yang digunakan. Dalam perencanaan ini, dipilih geosintetik Terragrid HSG Biaxial 1000/1000, yang memiliki kuat tarik ultimit sebesar 1000 kN/m. Nilai ini kemudian akan dikoreksi dengan faktor-faktor reduksi yang relevan untuk memperoleh kuat tarik izin yang memenuhi persyaratan desain dan memastikan kinerja jangka panjang sistem perkuatan.

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_{CBD} \times RF_{JOINT}}$$

$$T_{all} = \frac{1000}{2 \times 1.1 \times 1 \times 1.8}$$

$$T_{all} = 252.5253 \text{ kN/m}$$

Tabel 6. Penentuan Kuat Tarik Geosintetik untuk Panjang Tiang 8 m

Panjang Cerucuk (m)	Diameter Cerucuk (m)	spasi	P _{rp} (kN/m)	P _{rl} (kN/m)	P _{rp} + P _{rl} (kN/m)	T _{all} ≥ P _{rp}	T _{all} ≥ P _{rp} + P _{rl}
8	0.21	1.04	294.51	31.50	326.01	NOT OK	NOT OK
		1.00	271.39	31.50	302.89	NOT OK	NOT OK
		0.80	157.06	31.50	188.56	OK	OK
		0.60	71.58	31.50	103.08	OK	OK
		0.40	15.31	31.50	46.81	OK	OK
	0.24	1.14	293.27	31.50	324.77	NOT OK	NOT OK
		1.00	210.29	31.50	241.79	OK	OK
		0.80	113.78	31.50	145.28	OK	OK
		0.60	42.61	31.50	74.11	OK	OK
		0.40	3.46	31.50	34.96	OK	OK
	0.32	1.22	183.52	31.50	215.02	OK	OK
		1.00	85.62	31.50	117.12	OK	OK
		0.80	19.10	31.50	50.60	OK	OK
		0.60	6.68	31.50	38.18	OK	OK
		0.40	1.66	31.50	33.16	OK	OK

4.3.3 Analisis Penurunan Cerucuk

Analisis penurunan pada sistem Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE) dilakukan dengan mengasumsikan bahwa beban timbunan maupun beban tambahan (surcharge) dapat ditransfer secara efektif ke lapisan tanah yang lebih keras melalui elemen cerucuk bambu. Asumsi ini sejalan dengan prinsip dasar sistem GRPE, di mana cerucuk berfungsi sebagai elemen penyangga utama yang menerima beban vertikal melalui mekanisme soil arching dan dukungan tarik dari geosintetik.

Dalam perhitungan penurunan, beban dianggap bekerja pada kedalaman setara dengan dua pertiga panjang cerucuk (2/3 L). Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan zona pengaruh beban yang paling signifikan terhadap deformasi cerucuk dan tanah di sekitarnya, sehingga estimasi penurunan yang diperoleh lebih realistik terhadap kondisi lapangan.

Tabel 7. Perhitungan Penurunan Cerucuk dengan Kedalaman 8 m

Jenis Tanah	Elevasi		z	Elevasi	H	M	$\Delta\sigma$	m_v	s_c
	Atas	Bawah							
Clay - silty clay to clay	5,33	6	0,00	5,67	0,67	4013,02	63,00	0,00025	10,47
	6	7	1,00	6,67	1,00	4013,02	60,42	0,00025	15,06
	7	8	2,00	7,67	1,00	4013,02	58,01	0,00025	14,46
	8	9	3,00	8,67	1,00	4013,02	55,75	0,00025	13,89
	9	10	4,00	9,67	1,00	4013,02	53,62	0,00025	13,36
	10	11	5,00	10,67	1,00	4013,02	51,61	0,00025	12,86
	11	12	6,00	11,67	1,00	4013,02	49,73	0,00025	12,39
	12	13	7,00	12,67	1,00	4013,02	47,94	0,00025	11,95
	13	14	8,00	13,67	1,00	4013,02	46,26	0,00025	11,53
	14	15	9,00	14,67	1,00	4013,02	44,67	0,00025	11,13
Clay - silty clay to clay	15	16	10,00	15,67	1,00	4013,02	43,16	0,00025	10,75
	16	17	11,00	16,67	1,00	4013,02	41,73	0,00025	10,40
	17	18	12,00	17,67	1,00	4013,02	40,37	0,00025	10,06
	18	19	13,00	18,67	1,00	4013,02	39,08	0,00025	9,74
	19	20	14,00	19,67	1,00	4013,02	37,85	0,00025	9,43
	Σ						177,47		

4.3.4 Analisis Kestabilan Lereng dengan GRPE

Analisis kestabilan lereng dengan pendekatan numerik dilakukan untuk memvalidasi hasil perhitungan manual yang telah diperoleh sebelumnya, serta memastikan bahwa nilai faktor keamanan yang dihasilkan berada dalam batas yang dapat diterima secara geoteknik. Pemodelan numerik memberikan gambaran perilaku deformasi dan kondisi tegangan-regangan yang lebih realistik, sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk menilai konsistensi dan keandalan hasil analisis.

Dalam penelitian ini, perangkat lunak PLAXIS 2D digunakan untuk menghitung nilai faktor keamanan (safety factor, SF) melalui metode strength reduction. Hasil perhitungan SF dari pemodelan numerik tersebut disajikan pada tabel berikut, yang menjadi dasar untuk membandingkan kinerja metode penimbunan bertahap dan metode GRPE.

Tabel 8. Faktor Keamanan untuk masing-masing Tahap dengan GRPE berdasarkan Hasil PLAXIS 2D

Phase	FK
Tahap 1 (Tinggi Timbunan 1 m)	10,457
Tahap 2 (Tinggi Timbunan 2 m)	5,257
Tahap 3 (Tinggi Timbunan 3 m)	1,512
Tahap 3 + Beban (Tinggi Timbunan 3 m)	1,467

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data penyelidikan tanah (CPT), perhitungan analitis, serta simulasi numerik terhadap perencanaan timbunan di Desa Pentadu Timur, Kabupaten Boalemo, diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Kinerja Metode Penimbunan Bertahap (*Staged Construction*)

Metode penimbunan bertahap secara teknis masih memenuhi kriteria daya dukung vertikal dan stabilitas lereng, dengan nilai **FKu = 3,05** dan **SF = 1,516** pada Tahap 3. Namun, metode ini menunjukkan keterbatasan signifikan terkait deformasi dan waktu konsolidasi.

- Penurunan total yang diprediksi mencapai **362,54–393,19 mm** pada akhir periode

konstruksi 90 hari.

- Derajat konsolidasi yang dicapai hanya **8.20%**, menunjukkan bahwa proses perbaikan tanah praktis belum terjadi dalam jangka waktu tersebut.
- Rendahnya laju konsolidasi menegaskan bahwa metode preloading tanpa PVD tidak efektif untuk jadwal konstruksi yang cepat.
- Nilai SF yang mendekati batas minimum (1.5) juga menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap beban tambahan, sehingga berpotensi menimbulkan risiko stabilitas jangka panjang.

2. Kinerja Metode GRPE dengan Cerucuk Bambu

Metode **Geosynthetic Reinforced Piled Embankment (GRPE)** yang dikombinasikan dengan cerucuk bambu terbukti memberikan kinerja yang jauh lebih baik dibandingkan penimbunan bertahap.

- Cerucuk bambu memiliki kapasitas izin hingga **94.36 kN per tiang**, memungkinkan transfer beban timbunan 3 m dengan spasi maksimum **1 meter**.
- Penurunan total berkurang drastis menjadi hanya **177.47 mm**, kurang dari separuh penurunan pada metode konvensional.
- Analisis stabilitas lereng menunjukkan peningkatan signifikan, dengan nilai **SF pada Tahap 3 berkisar antara 5.257 hingga 10.457**, tergantung kondisi beban dan asumsi perhitungan.
- Nilai SF minimum **1.512** tetap memenuhi kriteria keamanan ($SF > 1.5$), sementara nilai SF yang lebih tinggi mencerminkan performa optimal sistem GRPE dalam menjaga stabilitas.

3. Kesimpulan Umum

Secara keseluruhan, sistem **GRPE dengan cerucuk bambu** merupakan alternatif perkuatan yang lebih unggul untuk kondisi tanah lunak di lokasi penelitian. Metode ini:

- mempercepat waktu konstruksi,
- mengurangi penurunan secara signifikan,
- meningkatkan stabilitas lereng secara substansial, dan
- meminimalkan risiko kelongsoran jangka panjang.

Dengan demikian, GRPE berbasis cerucuk bambu layak direkomendasikan sebagai solusi perkuatan utama untuk proyek timbunan di Desa Pentadu Timur.

Referensi

- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. <http://www.springer.com/series/13410>
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. SNI 8460:2017. www.bsn.go.id
- Bell, A., & Robinson, C. (2012). Single Pile. Dalam Burland J, Chapman T, Skinner H, & Brown M (Ed.), *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Vol. II: Geotechnical Design, Construction and Verification*: Vol. II. ICE Publishing.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications - A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons. Inc.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (Fifth Edition). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- British Standards Institution. (2010). *BS 8006-1:2010 Code of Practice for Strengthened/reinforced Soils and Other Fills*. British Standards Institution (BSI).
- Darwis, A., & Iswanto, A. H. (2018). Morphological characteristics of bambusa vulgaris and the distribution and shape of vascular bundles therein. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 46(4), 315–322. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.4.315>
- Darwis, A., Sumardi, I., Suhaya, Y., & Sunarya, S. (2018). Characteristic of vascular bundles and morphology of gigantochloa apus (J.A. and J.H. schultes) kurz culm. *Asian Journal of Plant Sciences*, 17(3), 129–133. <https://doi.org/10.3923/ajps.2018.129.133>
- Das, B. M. (2019). *Advanced Soil Mechanics; Fifth Edition*. CRC Press.
- Das, B. M., & Nagaratnam Sivakugan. (2019). *Principles of Foundation Engineering, Ninth Edition, SI Edition*.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga Direktorat Bina Teknik. (2009). *Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik*.
- Eekelen, S. J. M. van. (2015). *Basal Reinforced Piled Embankments Experiments, field studies and the development and validation of a new analytical design model*. CPI – Koninklijke Wörmann.
- Han, J. (2015). *Principles and Practices of Ground Improvement*. John Wiley & Sons.

- Hardiyatmo, H. (2002). *Mekanika Tanah I*. Gadjah Mada University Press.
- Irsyam, M., & Krisnanto, S. (2008). Pengujian Skala Penuh dan Analisis Perkuatan Cerucuk Matras Bambu untuk Timbunan Badan Jalan di Atas Tanah Lunak di Lokasi Tambak Oso, Surabaya. Dalam *Forum Teknik Sipil No. XVIII/1-Januari*.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with Geosynthetics* (Fifth Edition). Pearson Prentice Hall.
- Ladd, C. C. (1991). Stability Evaluation During Staged Construction. *J. Geotech. Engrg.*, 117(4), 540–615.
- Mustafa, A. A., Derise, M. R., Yong, W. T. L., & Rodrigues, K. F. (2021). A concise review of *dendrocalamus asper* and related bamboos: Germplasm conservation, propagation and molecular biology. Dalam *Plants* (Vol. 10, Nomor 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/plants10091897>
- Osterberg, J. O. (1957). Introduction. Dalam *Symposium on Vane Shear Testing of Soils* (hlm. 1–7). ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. <https://doi.org/10.1520/STP45005S>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering*. www.greggdrilling.com
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2010). *Guide to Cone Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering* (2nd ed.). Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Sariani, A., Indriyanto, & Asmarahman, C. (2023). Ayu Sariani. *CELEBICA*, 4(No. 1), 102–111.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3 ed.). John & Wiley Sons. Inc.
- Universitas Gorontalo. (2023). *LAPORAN PENGUJIAN PENETRASI LAPANGAN DENGAN ALAT SONDIR*.
- Widodo, B., Pratikso, Rochim, A., Irsyam, M., & Widoanindyawati, V. (2019). Influence of Bamboo Pile Clusters in The Pile Mattress Bamboo Construction Systems as Reinforcement of Soft Subgrade that Support Embankment Load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012055>