

## ANALISIS PENURUNAN BANGUNAN REVETMENT DENGAN PERKUATAN STRUKTUR CERUCUK MATRAS BAMBU PADA TANAH LUNAK DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN INSTRUMENTASI LAPANGAN

Umar Alfaruqi Abdurrahman<sup>1\*</sup>, Wiwik Rahayu<sup>2</sup>, Fathiyah Hakim Sagitaningrum<sup>3</sup>, Putera Agung Maha Agung<sup>4</sup>

<sup>1\*,2,3</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia  
Jl. Prof. Dr. Ir. R Roosseno Depok, 16425, Indonesia

<sup>4</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Jakarta  
Jl. Prof. Dr. G.A. Siwabessy Depok, 16425, Indonesia  
Alamat E-mail : umaralfaruqi73@gmail.com

### Info Artikel

### Abstrak

#### Sejarah Artikel:

Diterima: Juni 2024  
Disetujui: Juli 2024  
Dipublikasikan: Des 2024

#### Keywords:

*Soft soil, bamboo mattress pile, soil reinforcement, finite element method, instrumentation*

Tanah lunak merupakan salah satu jenis tanah yang sering kali menimbulkan permasalahan geoteknik karena sifat tanah lunak yang memiliki daya dukung yang rendah, gaya geser yang rendah, kemampatan besar, dan tingkat penurunan yang tinggi. Salah satu alternatif untuk meningkatkan daya dukung tanah lunak adalah dengan memanfaatkan material bambu sebagai cerucuk dan matras pada pondasi struktur bangunan. Material bambu memiliki keunggulan yaitu jumlah yang melimpah, murah, umur panen singkat, ramah lingkungan, gaya apung yang dapat dioptimalkan. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan penurunan tanah antara metode elemen hingga dengan pengamatan instrumentasi lapangan pada suatu bangunan dermaga di tepi sungai Kapuas, Pontianak yang memanfaatkan cerucuk matras bambu sebagai perkuatan struktur pondasinya. Deposit tanah pada lokasi tersebut didominasi oleh tanah lunak hingga ketebalan 28 m dengan muka air tanah yang dangkal. Analisis stabilitas dan penurunan dilakukan menggunakan metode elemen hingga. Konstruksi struktur revetment dibuat secara bertahap mengikuti hasil observasi alat instrumentasi lapangan. Pada analisis numerik, lapisan tanah dimodelkan sebagai Mohr-Coulomb. Cerucuk bambu dimodelkan sebagai elastic-plastic spring. Matras bambu dimodelkan elastic beams. Dari hasil observasi instrumentasi dan analisis numerik didapatkan bahwa bangunan revetment dengan struktur cerucuk matras bambu memberikan kestabilan dari kelongsoran dan kegagalan daya dukung. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan bambu sebagai struktur cerucuk dan matras untuk perkuatan tanah lunak dapat dilakukan dan mampu memberikan tambahan daya dukung untuk tanah lunak.

**Kata Kunci:** Tanah lunak, cerucuk matras bambu, perkuatan tanah, metode elemen hingga, instrumentasi.

#### Abstract

*Soft soil is one type of soil that often causes geotechnical problems because of its low bearing capacity, low shear strength, high compressibility, and high rate of settlement. An alternative method to increase the bearing capacity of soft soil is by utilizing bamboo materials as piles and mattress in the foundation of a building*

*structure. Bamboo material is chosen because of its advantages such as abundance, affordability, short harvesting period, environmental friendly, and buoyancy optimization. In this study, a comparison of settlement was conducted between finite element method and field instrumentation observations on a wharf structure along the Kapuas River in Pontianak, which utilizes bamboo mattress piles as soil reinforcement. The soil deposit at the site is predominantly soft soil up to 28 m for the thickness with shallow groundwater levels. Stability and settlement analyses were performed using finite element method. The construction of the revetment structure was done gradually following observations from instrumentation. In the numerical analysis, the soil layers were modeled as Mohr-Coulomb materials. Bamboo piles were modeled as elastic-plastic springs, while bamboo mattress were modeled as elastic beams. From the instrumentation observations and numerical analysis, it was found that the revetment structure with bamboo pile and mattress provided stability against sliding and failure of bearing capacity. Thus, it can be concluded that the use of bamboo as piles and mattresses for reinforcing soft soil can be carried out and provides additional support for soft soil.*

© 2024

Universitas Abdurrah

✉ Alamat korespondensi:

Jl. Prof. Dr. Ir. R. Roosseno, Depok, 16425, Indonesia

E-mail: umaralfaruqi73@gmail.com

ISSN 2527-7073

## PENDAHULUAN

Indonesia sebagai salah satu negara kepulauan memiliki sebaran tanah lunak seluas 20 juta hektar atau 10 persen dari luas total dataran. Tanah lunak memiliki daya dukung yang rendah, gaya geser yang rendah, kemampatan besar, dan tingkat penurunan yang tinggi sehingga perlu dilakukan perencanaan konstruksi yang baik apabila ingin membangun konstruksi di atasnya [1]



**Gambar 1** Citra Satelit Lokasi Penelitian (Kiri), Foto Lokasi Penelitian (Kanan)

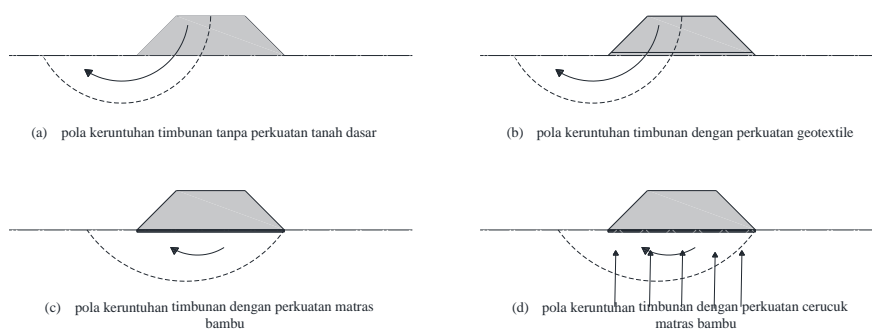
Suatu bangunan revetment yang berlokasi di tepi sungai Kapuas (Gambar 1), Pontianak, Kalimantan Barat akan dibangun di atas tanah lunak. Ketebalan deposit tanah lunak pada lokasi tersebut memiliki ketebalan hingga 28 m dengan muka air tanah yang dangkal. Salah satu alternatif material untuk perkuatan bangunan revetment tersebut adalah penggunaan cerucuk dan matras bambu. Beberapa keunggulan dari pemanfaatan bambu sebagai pendukung fondasi

diantaranya karena jumlah yang melimpah, murah, ringan dan gaya apung yang dapat dioptimalkan. Menurut Sattar [2] bambu memiliki umur panen yang relatif singkat yaitu tiga hingga empat tahun untuk mencapai kekuatan sepenuhnya. Penggunaan bambu yang ramah lingkungan juga didukung oleh Gravami [3] di mana energi yang dibutuhkan untuk memproduksi bambu 50 kali lebih kecil dibandingkan produksi baja. Dua penelitian tersebut membuktikan bahwa bambu termasuk material yang ramah lingkungan untuk digunakan sebagai alternatif perkuatan tanah. Berdasarkan penelitian Irsyam [4], pemanfaatan perkuatan cerucuk matras bambu pada konstruksi timbunan di atas tanah lunak memiliki stabilitas yang baik terhadap keruntuhan dari segi keruntuhan lereng dan kegagalan daya dukung. Penelitian yang sama juga menunjukkan tanah yang diberikan perkuatan cerucuk matras bambu dapat mendistribusikan penurunan yang lebih merata sepanjang timbunan.

Berdasarkan kasus di atas, penelitian ini akan melakukan perbandingan penurunan yang terjadi di lapangan berdasarkan hasil instrumentasi settlement plate dengan penurunan dari hasil analisis metode elemen hingga. Penelitian ini penting karena belum banyak penelitian sejenis yang dilakukan dalam skala lapangan sehingga diharapkan bisa menjadi referensi untuk pemanfaatan cerucuk matras bambu pada tanah lunak.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Penurunan Tanah Pada Tanah Lunak



**Gambar 2** Pola Keruntuhan Timbunan Dengan Berbagai Jenis Perlakuan Terhadap Tanah Dasar [4]

Pemberian beban di atas permukaan tanah menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan [5]. Secara umum pemampatan tanah dibagi menjadi 3 tahap yaitu pemampatan awal (penurunan elastis), konsolidasi primer, dan konsolidasi sekunder. Pada tanah lunak, penurunan tanah elastis yang terjadi sangat besar dikarenakan parameter modulus elastisitas tanah lunak sangat kecil. Untuk penurunan konsolidasi pada tanah lunak, penurunan yang terjadi relatif kecil dan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk air di dalam tanah terdisipasi. Sehingga untuk mengkonsolidasi tanah lunak secara cepat diperlukan perlakuan-

perlakuan tambahan agar air dari dalam tanah dapat terdisipasi secara cepat dengan metode *pre-loading*, pemasangan *prevebricated vertical drain*, dan lain sebagainya. Berdasarkan Irsyam [4] mekanisme keruntuhan timbunan di atas tanah lunak dengan berbagai perlakuan terhadap tanah dasar ditunjukkan pada Gambar 2. Struktur revetment pada penelitian ini selain berfungsi sebagai tepian dermaga dan *break water*, berfungsi juga sebagai beban *pre-loading* pada lapisan tanah lunak dibawahnya untuk mempercepat waktu konsolidasi.

### Daya Dukung Cerucuk Matras Bambu

Dalam perhitungan metode elemen hingga, menurut penelitian oleh Widodo [6] Cerucuk bambu dimodelkan sebagai pegas dan matras dimodelkan sebagai *beam/plate*. Cerucuk menahan gaya ultimit sesuai kapasitas dukung tanah lunak yang bekerja pada tiang dengan persamaan (1) berikut:

$$P_{ult} = A_s \cdot \alpha \cdot \bar{C} + A_{cerucuk} \cdot 9 \cdot C_u \quad (1)$$

Dimana  $A_s$  = luas selimut bambu;  $\alpha$  = faktor adhesi;  $\bar{C}$  = kohesi selimut tiang;  $A_{cerucuk}$  = luas permukaan bambu;  $C_u$  = kohesi ujung tiang. Kapasitas daya dukung maksimum tanah yang di transfer ke cerucuk dinyatakan dengan persamaan (2) berikut:

$$F_{max} = \frac{P_{ult}}{FS} \quad (2)$$

Dimana  $FS$  = faktor keamanan.  $F_{max}$  diasumsikan termobilisasi jika deformasi tanah ( $\delta$ ) sebesar 0,1d, di mana d adalah diameter total cerucuk bambu. Konstanta pegas ( $k$ ) didapat dengan persamaan (3) berikut:

$$k = \frac{F_{max}}{\delta} \quad (3)$$

Kekakuan normal (EA) cerucuk bambu didapat dengan persamaan (4) berikut:

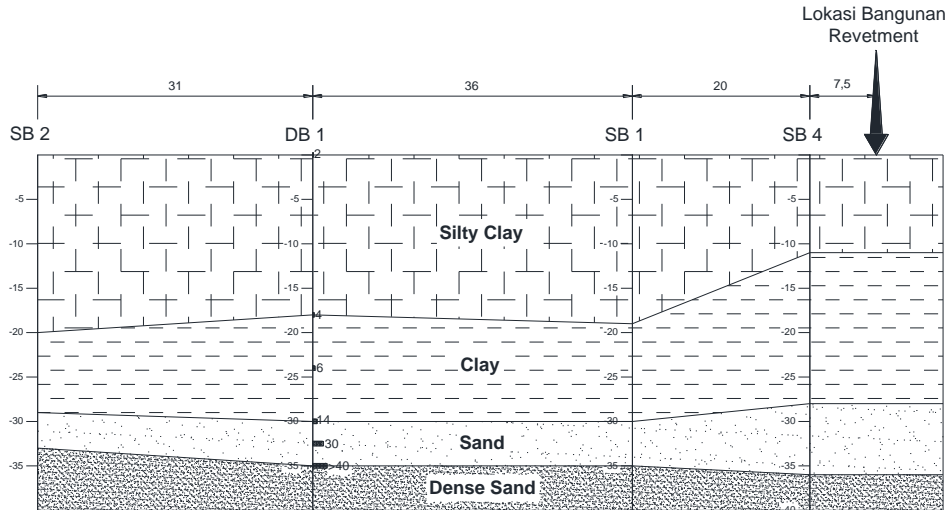
$$EA_{cerucuk} = k \cdot L \quad (4)$$

Dimana  $L$  = panjang cerucuk bambu. Kekakuan normal (EA) dan kekakuan lentur (EI) matras didapat dengan menentukan nilai modulus elastisitas (E) bambu, luas penampang matras ( $A_{matras}$ ) didapat dari total kumulatif luas bambu dalam 1 m matras, Inersia matras ( $I_{matras}$ ) didapat dari inersia matras bambu yang efektif pada satu arah.

## METODE

### Kondisi Tanah dan Pengujian Lapangan

Pada lokasi penelitian dilakukan pengujian lapangan berupa sondir, SPT, dan tes laboratorium. Dari hasil pengujian, didapatkan bahwa ketebalan lapisan lempung dengan konsistensi sangat lunak hingga lunak dengan ketebalan hingga 28 m. Lokasi penelitian berada di tepi sungai Kapuas sehingga muka air tanah berada pada kedalaman 2 m. Stratigrafi tanah pada lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3** Stratigrafi Tanah Pada Lokasi Penelitian [7]

Perhitungan dengan metode elemen hingga di penelitian ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan metode analisis Mohr-Coulomb. Lapisan *sub-surface* tanah dimodelkan sebagai *elastis-plastis solid material* menggunakan metode keruntuhan Mohr-coulomb, timbunan revetment dimodelkan sebagai *solid material* menggunakan metode keruntuhan Mohr-coulomb, cerucuk bambu dimodelkan sebagai pegas elastis-plastis, dan matras bambu dimodelkan sebagai beam elastis linier. Analisis penurunan menggunakan modulus elastisitas dari tanah pada kondisi *drained* dan *undrained*. Untuk model disipasi tegangan air pori dan Faktor keamanan, analisis pada penelitian ini menggunakan *phi-c reduction method*.

Berdasarkan hasil data lapangan dan data laboratorium, properti tanah dan cerucuk matras yang akan dimasukkan ke dalam analisis metode elemen hingga pada penelitian ini ditunjukkan berturut-turut pada Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1.** Properti Tanah Pada Lokasi Penelitian

Depth (m)	Jenis Tanah	Model Material	Perilaku Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
0-13,5	Silty Clay	MC	Undrained	16	225	0,2	5-8	2,47
13,5-28	Clay	MC	Undrained	18	272	0,2	8-10	1,15
28-36	Sand	MC	Drained	18	34.500	0,25	4-6	20

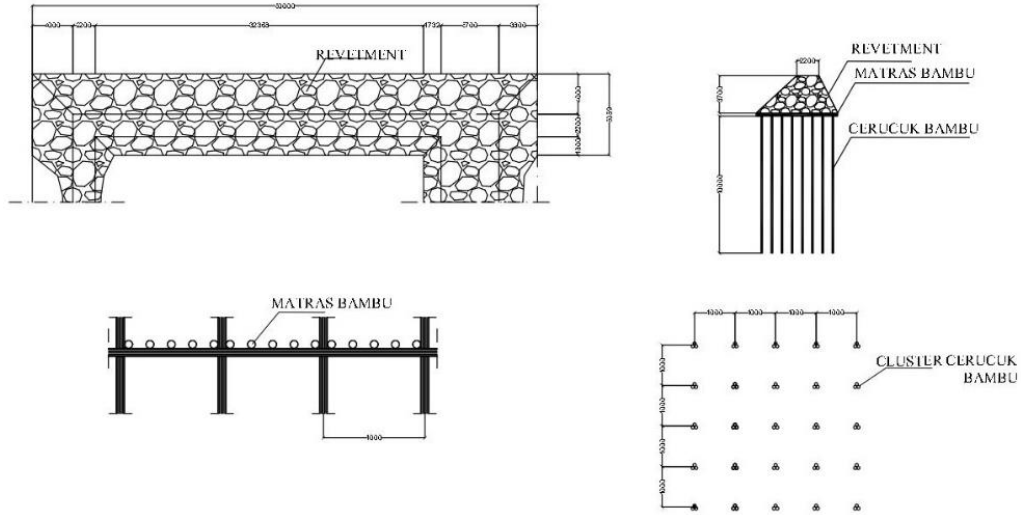
**Tabel 2.** Properti Cerucuk Dan Matras Bambu

Material	Perilaku Material	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> )	w (kN)	$\nu$
Matras	Elastic	254.170	452,43	0,101	0,15
Cerucuk	Elastic-plastic	8.540			

### Konstruksi Revetment dan Alat Instrumentasi

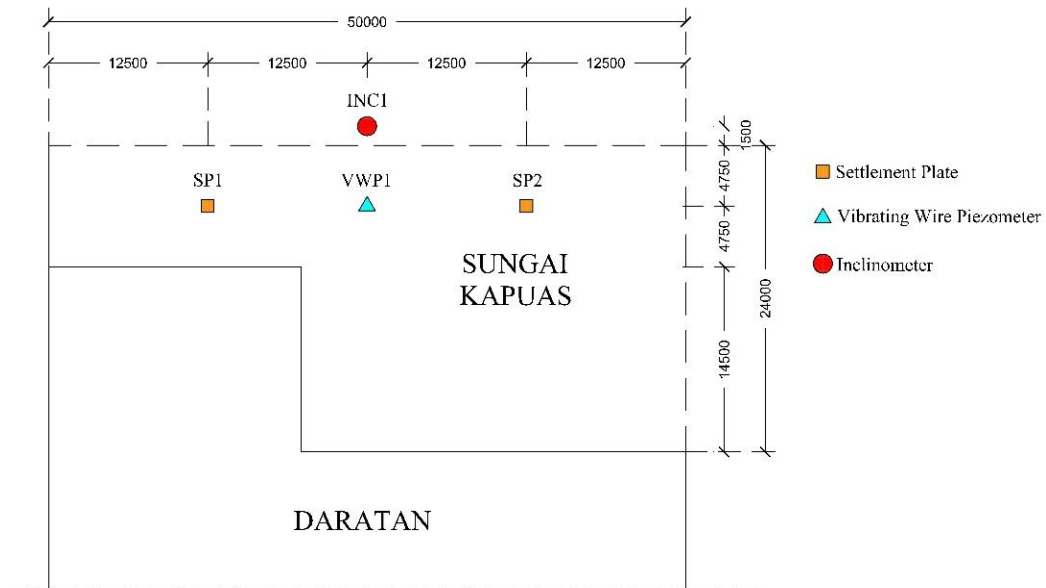
Bangunan revetment yang berada di lokasi penelitian memiliki lebar 7 m, panjang 50 m dan ketinggian 2,6 - 3,7 m seperti pada Gambar 4. Struktur bangunan revetment pada penelitian ini menggunakan 3 batang cerucuk bambu per kluster dengan kedalaman 10 jarak antar kluster 1 m

dan dua lapis matras diletakkan saling tegak lurus dengan lapisan paling atas matras berupa geotextile yang berfungsi sebagai pemisah antara material timbunan dengan matras. Diameter bambu yang digunakan berkisar antara 6 sampai dengan 10 cm.



**Gambar 4** Detail Bangunan Revetment [9]

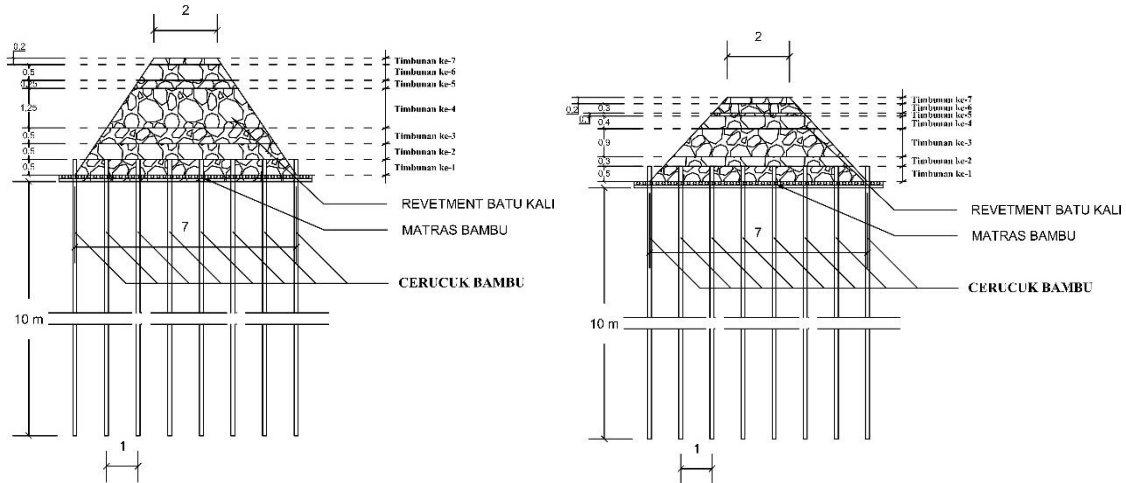
Pada bangunan revetment, dilakukan pengamatan penurunan tanah pada dasar bangunan revetment menggunakan instrumentasi berupa settlement plate. Lokasi penempatan alat instrumentasi pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5** Lokasi Alat Istrumentasi [8]

Untuk membantu tahapan analisis metode elemen hingga, perlu diketahui tahapan pelaksanaan konstruksi revetment yang dilakukan di lapangan. Tahapan pelaksanaan konstruksi revetment dimulai dari perakitan cerucuk dan matras bambu. Kemudian, cerucuk bambu ditancapkan ke dalam tanah hingga kedalaman 10 m. Kemudian, di atas cerucuk bambu tersebut

dipasang matras bambu yang terdiri dari 2 lapis. Setelah cerucuk dan matras bambu sudah terpasang dengan baik, dilakukan timbunan material untuk bangunan revetment secara bertahap mengikuti hasil dari bacaan instrumentasi terhadap keamanan pergerakan tanah di bawahnya. Ilustrasi pelaksanaan tiap tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 6. Tahapan pelaksanaan konstruksi ditunjukkan pada Tabel 3.



**Gambar 6** Ilustrasi Konstruksi Bangunan Revetment Dengan Struktur Cerucuk Matras Bambu

**Tabel 3.** Tahapan pelaksanaan konstruksi

Timbunan ke-	Settlement Plate 01		Settlement Plate 02	
	Hari ke-	Ketinggian Timbunan (m)	Hari ke-	Ketinggian Timbunan (m)
1	1	0,5	5	0,5
2	2	1	14	0,8
3	3	1,5	15	1,7
4	5	2,75	16	2,1
5	7	3	17	2,2
6	23	3,5	19	2,5
7	61	3,7	49	2,7

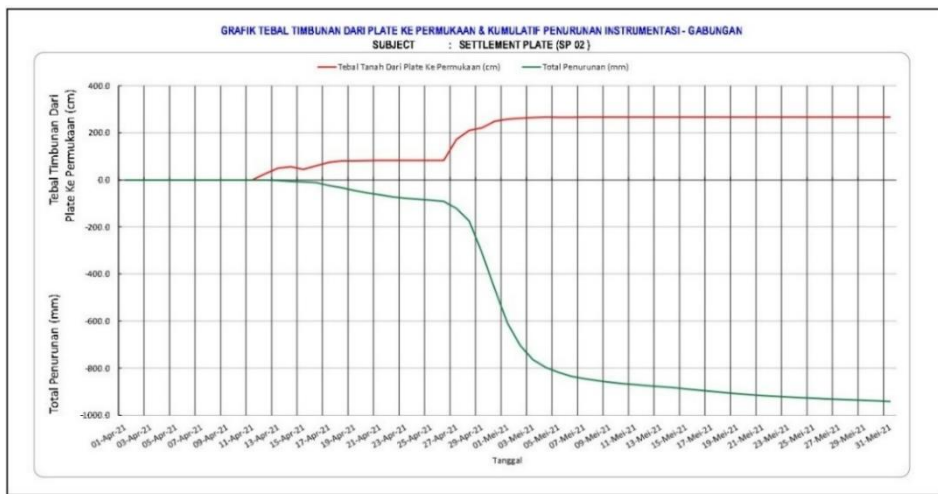
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengamatan Instrumentasi Lapangan

Pengamatan alat instrumentasi dilakukan selama 61 hari mulai dari tanggal 31-03-2021 sampai dengan 01-06-2021 pada settlement plate 01 dan 49 hari mulai dari tanggal 11-04-2021 sampai dengan 31-05-2021 pada settlement plate 02. Dari pengamatan penurunan dan pergerakan tanah lateral diketahui bahwa selama masa konstruksi revetment, tidak ada pergerakan tanah yang menyebabkan keruntuhan tanah. Pada ketinggian akhir timbunan bangunan revetment ketinggian timbunan 3,7 m pada settlement plate 1 dan 2,7 m pada settlement plate 2, didapatkan bahwa total penurunan yang terjadi adalah 731 mm di hari ke-61 pada Settlement plate 1 dan 941 mm di hari ke-49 pada Settlement Plate 2. Grafik penurunan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 7



(a) Pengamatan Settlement Plate 1 (SP 01)



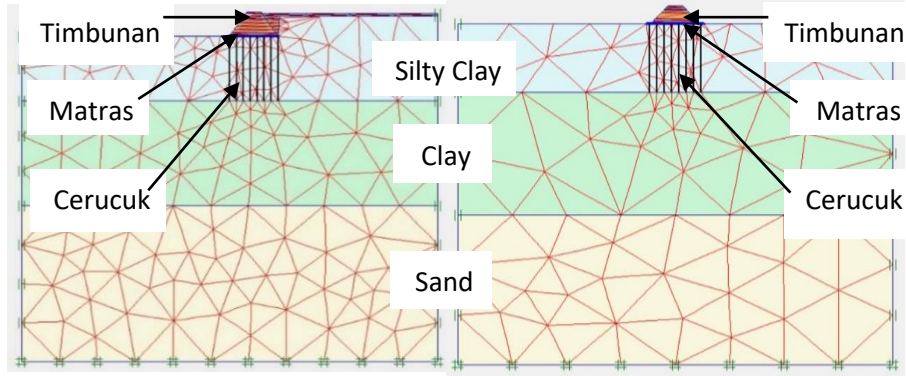
(b) Pengamatan Settlement Plate 2 (SP 02)

**Gambar 7** Pengamatan Settlement Plate [9]

### Analisis Stabilitas dan Penurunan dengan Metode Numerik

Model geometri analisis elemen hingga yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8. Ketinggian akhir timbunan pada settlement plate 01 dan settlement plate 02 berturut-turut adalah 3,7 m dan 2,6 m. Dari hasil analisis penurunan tanah, diketahui bahwa penurunan akhir pada lokasi settlement plate 01 adalah 883 mm dan dengan faktor keamanan sebesar 1,1 pada lokasi settlement plate 1 dan penurunan akhir 931 mm dengan faktor keamanan sebesar 1,47 pada lokasi settlement plate 2. Grafik penurunan tanah terhadap waktu dengan metode elemen hingga Mohr-Coulomb ditunjukkan pada Gambar 9 sedangkan hasil analisis deformasi dengan metode elemen hingga ditunjukkan pada Gambar 10.

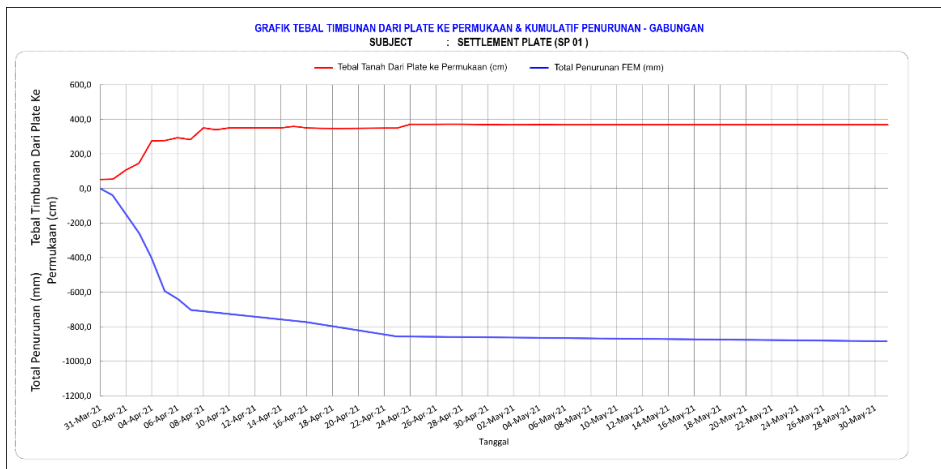




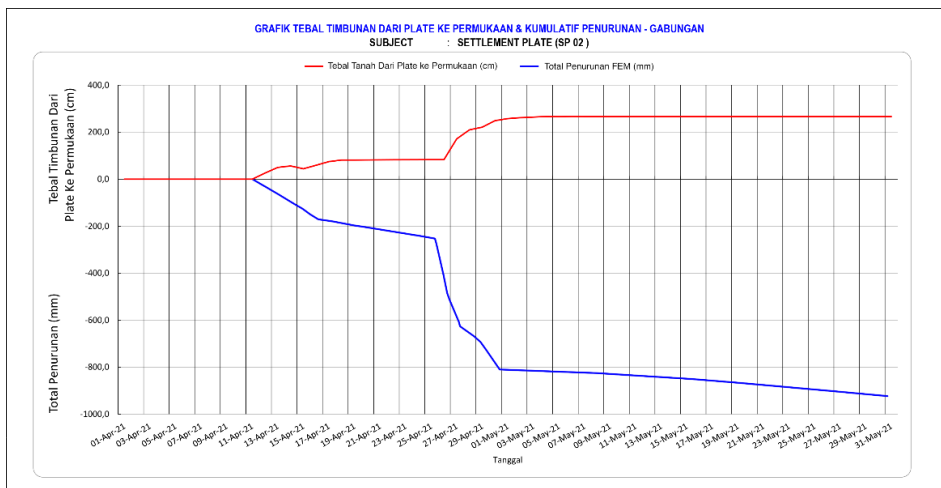
(a) Permodelan Geometri SP 01

(b) Permodelan Geometri SP 02

**Gambar 8** Permodelan Elemen Hingga Timbunan Cerucuk Matras Bambu

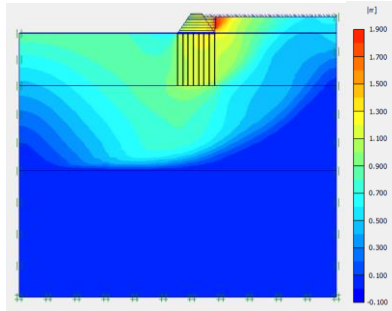


(a) Prediksi Penurunan Metode Elemen Hingga Geometri Settlement Plate 1 (SP 01)

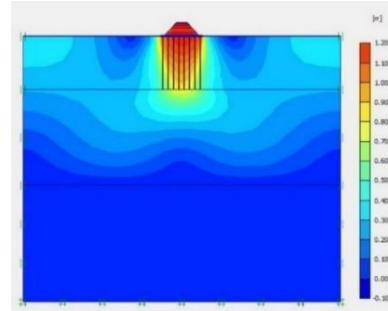


(b) Prediksi Penurunan Metode Elemen Hingga Geometri Settlement Plate 2 (SP 02)

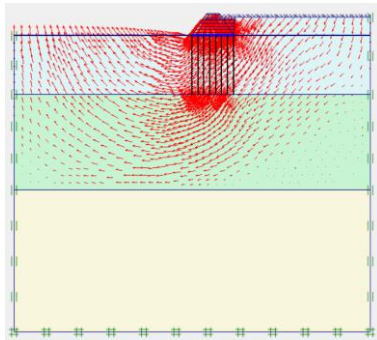
**Gambar 9** Prediksi Laju Penurunan Tanah Terhadap Waktu Menggunakan Metode Elemen Hingga



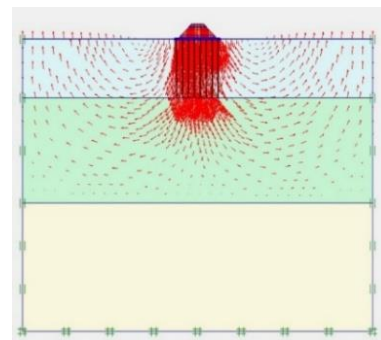
(a) Total Displacement (Shading) SP 01



(b) Total Displacement (Shading) SP 02

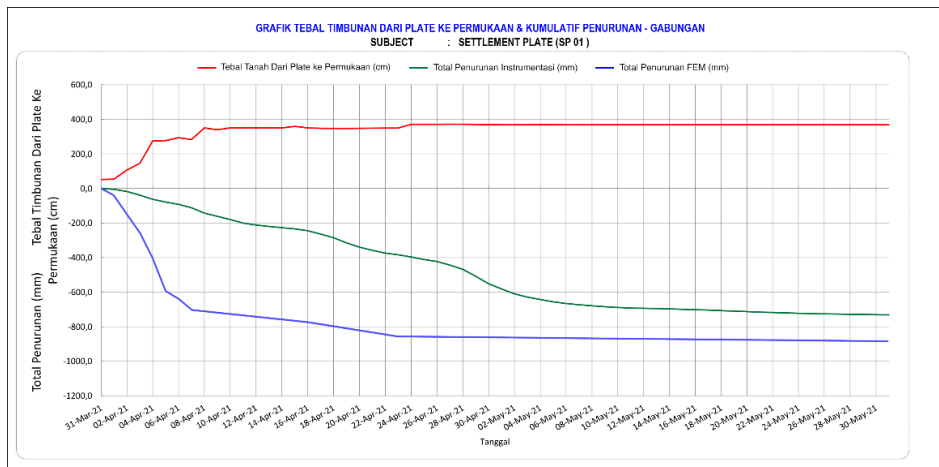


(a) Total Displacement (Arrow) SP 01



(b) Total Displacement (Arrow) SP 02

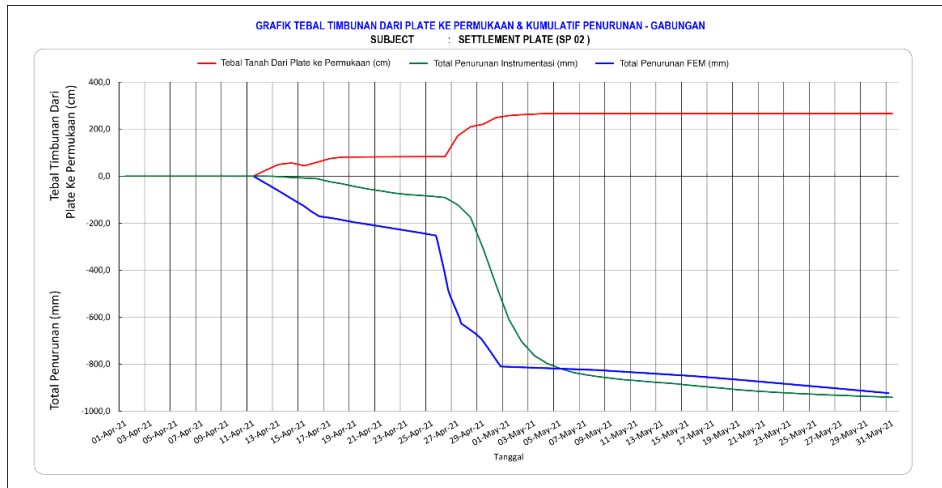
**Gambar 10** Total Displacement Metode Elemen Hingga Pada Tahap Timbunan Akhir Perbandingan Hasil Instrumentasi dengan Hasil Analisis Numerik



**Gambar 11** Perbandingan Penurunan Hasil Instrumentasi dengan Metode Elemen Hingga Geometri SP 01

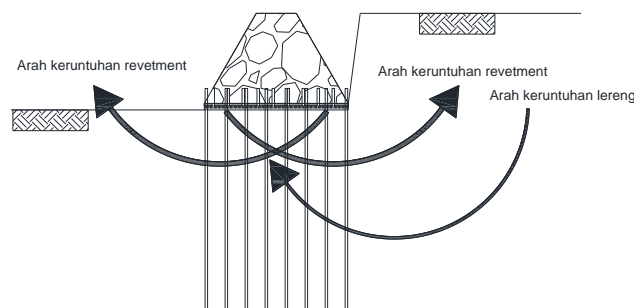
Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga, dapat dilakukan perbandingan hasil penurunan yang terjadi pada setiap tahapan konstruksi revetment dengan hasil instrumentasi settlement plate (Gambar 11 dan Gambar 12). Berdasarkan perbandingan di Gambar 11 dan Gambar 12, diketahui bahwa pada lokasi settlement plate 01 dan settlement plate 02, penurunan yang terjadi pada tahap awal pembebanan timbunan terlihat lebih besar pada hasil analisis metode elemen hingga dibandingkan dengan hasil penurunan settlement plate di lapangan. Namun, pada

pembebanan tahap akhir, besar penurunan pada hasil analisis metode elemen hingga dan hasil instrumentasi cukup berdekatan. Pada lokasi settlement plate 01, penurunan dari analisis metode elemen hingga adalah 883 mm dan hasil instrumentasi adalah 731 mm. Sedangkan pada lokasi settlement plate 02, penurunan dari analisis metode elemen hingga adalah 931 mm dan hasil instrumentasi adalah 941 mm.



**Gambar 12** Perbandingan Penurunan Hasil Instrumentasi dengan Metode Elemen Hingga Geometri SP 02

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan prediksi penurunan tahap awal yang sangat jauh dengan hasil instrumentasi lapangan. Perbedaan ini terlihat lebih besar pada Settlement Plate 01, dimana pada akhir tahap konstruksi, penurunan hasil analisis metode elemen hingga dan instrumentasi memiliki perbedaan sebesar 150 mm. Dari Gambar 11 dapat diamati bahwa penurunan yang terjadi di lapangan terjadi sedikit demi sedikit dan tidak dipengaruhi oleh penambahan ketinggian timbunan. Perbedaan dari awal konstruksi ini terjadi dikarenakan posisi settlement plate 01 berada di tepi lereng pada sisi timur laut. Berdasarkan lokasi settlement plate tersebut, kemungkinan pergerakan tanah yang terdeteksi pada settlement plate diakibatkan oleh dua hal, yaitu akibat timbunan revetment dan lereng seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.



**Gambar 13** Perkiraan Pola Keruntuhan Timbunan Pada Settlement Plate 1

## SIMPULAN

Dari hasil perbandingan besarnya penurunan antara metode elemen hingga dan instrumentasi lapangan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Formasi struktur cerucuk matras bambu yang digunakan pada penelitian dapat memikul beban bangunan revetment yang bekerja hingga ketinggian 3,7 m;
2. Stabilitas lereng timbunan cukup stabil dengan angka keamanan lebih dari 1,1 berdasarkan hasil analisis numerik dan pengamatan visual timbunan yang berdiri kokoh di lapangan;
3. Struktur cerucuk matras bambu dapat digunakan sebagai salah satu alternatif perkuatan pada tanah lunak untuk struktur revetment

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. S. F. D. W. W. G. Hasibuan and W. P. Solli, "Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia," Kemenerian ESDM, Bandung, 2019.
- [2] M. A. Sattar, "Traditional Bamboo Housing in Asia: Present Status and Future Prospects," in *Proceeding of the 5th International Bamboo Workshop and the 4th International Bamboc Congress*, Ubud, Bali, Indonesia, 1995.
- [3] K. Ghavami, "Bamboo as reinforcement in structural concrete elements," *Cement & Concrete Composites*, p. 637–649, 2005.
- [4] M. Irsyam and S. Krisnanto, "Pengujian Skala Penuh dan Analisis Perkuatan Cerucuk Matras Bambu Untuk Timbunan Badan Jalan Di Atas Tanah Lunak Di Lokasi Tambak Oso Surabaya," *Forum Teknik Sipil*, vol. No. XVIII, pp. 667-681, 2008.
- [5] B. M. Das, *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) jilid 1*, Jakarta: Erlangga, 1995.
- [6] B. Widodo, P. A. Rochim, I. Masyhur and V. Widodoanindyawati, "Influence of Bamboo Pile Clusters in The Pile Mattress Bamboo Construction Systems as Reinforcement of Soft Subgrade That Support Embankment Load," in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019.
- [7] PT Tarumanegara BumiYasa, "Laporan Penyelidikan Tanah Pabrik PT. XYZ," Jakarta, 2014.
- [8] PT Generasi Berkat Usaha, "Gambar Desain Proyek Terminal Untuk Kepentingan Sendiri (TUKS)," 2020.
- [9] PT Teknindo Geosistem Unggul, PT Generasi Berkat Usaha, PT Rezeki Perkasa Sejahtera Lestari, "Laporan Pekerjaan Pengadaan, Pemasangan, dan Monitoring Instrumen Geoteknik Proyek Terminal Untuk Kepentingan Sendiri," Surabaya, 2021.
- [10] R. A. Hudaya and R. Swanandhia, *Analisis Daya Dukung Tanah Menggunakan Matras Bambu Terhadap Beban Struktur Atas Pada Proyek Jalan Tol Semarang-Demak Seksi I*. Semarang: Universitas Islam Sultan Agung, 2022.