

STUDI SISTEM PERKUATAN KOLOM BATUAN PADA TANAH GAMBUS

Aazokhi Waruwu^{1*}, Jack Widjajakusuma¹, Brian Denzel Polii¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pelita Harapan
Jl. M.H. Thamrin Boulevard No.1100, Kecamatan Kelapa Dua,
Kabupaten Tangerang, Banten 15811.

*Email: aazokhi.waruwu@uph.edu

Abstrak

Jenis tanah gambut tergolong sebagai tanah bermasalah apabila digunakan sebagai tanah dasar konstruksi. Tanah sebagai tanah dasar konstruksi jalan perlu memenuhi kriteria tertentu agar dapat menerima beban konstruksi tanpa mengalami penurunan berlebih yang dapat mengakibatkan kerusakan pada konstruksi jalan. Penurunan berlebih ini dapat terjadi pada tanah dengan daya dukung dan CBR rendah seperti tanah gambut. Upaya perbaikan dengan sistem perkuatan diperlukan pada tanah gambut bila berfungsi sebagai tanah dasar konstruksi jalan. Penelitian ini dilakukan melalui studi penggunaan sistem perkuatan kolom batuan dengan kombinasi anyaman bambu sebagai perkuatan tanah gambut. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan pengaruh perkuatan kolom batuan dan anyaman bambu terhadap peningkatan yang signifikan pada nilai CBR tanah. Penelitian dilakukan pada tanah gambut tanpa perkuatan dan dengan perkuatan masing-masing anyaman bambu, kolom batuan tanpa anyaman bambu, dan kombinasi kolom batuan dengan anyaman bambu. Pengujian CBR dilakukan pada benda uji untuk mendapatkan nilai CBR tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah gambut memiliki nilai CBR yang sangat rendah dan digolongkan sebagai tanah sangat lunak. Sistem perkuatan memberikan dampak dalam peningkatan nilai CBR. Peningkatan yang terjadi tergantung dari skema perkuatan yang digunakan. Perkuatan dari kombinasi kolom batuan dengan anyaman bambu yang dipasang secara horizontal di permukaan memberikan pengaruh yang signifikan pada nilai CBR yang didapatkan. Nilai CBR tanah yang diberi perkuatan kombinasi kolom batuan dengan anyaman bambu didapatkan sebesar 5,25% dan memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk konstruksi jalan. Peningkatan nilai CBR didapatkan sebesar 13,81 kali dari CBR tanah gambut tanpa penggunaan sistem perkuatan.

Kata kunci: Gambut, CBR, Anyaman Bambu, Kolom Batuan

1. PENDAHULUAN

Tanah gambut berasal dari sisa tumbuh-tumbuhan yang telah lapuk dan terfragmentasi di bawah muka air tanah. Tanah ini dikategorikan sebagai salah satu jenis tanah yang sering bermasalah bila digunakan sebagai tanah dasar konstruksi, karena kandungan air, pemampatan, penurunan yang cukup tinggi, sebaliknya kuat geser dan daya dukungnya sangat rendah dalam mendukung beban konstruksi (Waruwu, 2021). Tanah gambut tidak baik langsung digunakan sebagai tanah dasar suatu konstruksi (Waruwu, Maulana, et al., 2017). Tanah ini memerlukan upaya perbaikan sebelum digunakan sebagai tanah dasar konstruksi. Perbaikan tanah gambut dapat berupa pemasangan sistem perkuatan pada arah vertikal maupun arah horizontal.

Tanah gambut dapat digolongkan sebagai tanah sangat lunak, karena memiliki nilai kuat geser tak terdrainase lebih kecil dari 12,5 kPa (Waruwu et al., 2020). Tanah seperti ini lebih cocok diperbaiki dengan sistem perkuatan pada arah vertikal dibandingkan metode stabilisasi tanah di permukaan. Sistem perkuatan dapat meningkatkan daya dukung tanah, sehingga stabilitas tanah dasar tetap terjaga ketika beban bekerja di atasnya. Tanah gambut yang diperkuat pada arah horizontal memerlukan setidaknya 3 (tiga) lapis perkuatan grid bambu untuk menghasilkan kinerja yang baik (Waruwu, et al., 2017).

Perkuatan tiang dapat mengurangi penurunan tanah gambut sampai 85% dengan panjang tiang 0,7 kali tebal tanah gambut (Waruwu, Hardiyatmo, et al., 2017). Sedangkan penggunaan tiga lapis grid bambu dalam arah horizontal hanya dapat mereduksi penurunan sebesar 64% (Waruwu, Maulana, et al., 2017). Oleh karena itu perkuatan yang digunakan pada penelitian ini adalah perkuatan arah vertikal berupa kolom batuan dan horizontal berupa anyaman bambu.

Kolom batuan memberikan pendekatan yang cukup efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak (Salam et al., 2022). Namun, dapat mengalami cembungan ke arah horizontal apabila

tidak diperkuat di samping, cembungan ini terjadi mulai dari permukaan sampai sepanjang 2-3 kali diameter tiang (Salam et al., 2022). Cembungan ini dapat diatasi dengan penggunaan tiang beton di tengah kolom batuan, namun membutuhkan biaya yang signifikan, sehingga sistem perkuatan kurang ekonomis.

Penelitian lain menggunakan material geosintetik yang membungkus kolom batuan dengan panjang bervariasi mulai dari setengah sampai sepanjang kolom batuan, sehingga dapat terhindar dari deformasi ke arah horizontal (Ehsaniyamchi & Ghazavi, 2019). Namun, ada ketergantungan pada penggunaan bahan sintesis seperti geosintetik. Material alam dari bahan bambu telah diteliti dan memberikan hasil yang baik untuk digunakan sebagai perkuatan tanah pada arah horizontal dan vertikal. Kuat tarik bambu dapat lebih tinggi daripada material geosintetik (Hegde & Sitharam, 2015). Bambu dalam bentuk grid yang dipasang horizontal pada tanah gambut menunjukkan peningkatan daya dukung dan reduksi penurunan (Waruwu, Maulana, et al., 2017). Akan tetapi perkuatan bambu pada arah horizontal perlu diperkuat dengan tiang-tiang (Waruwu, 2021). Bambu sebagai tiang yang dipasang dalam tanah gambut juga terlihat memberikan kontribusi dalam mengurangi penurunan dan meningkat kuat dukung tanah (Maulana et al., 2019). Hasil review yang dilakukan sebelumnya dinyatakan bahwa selain karena tanah gambut selalu terendam air, penggunaan material bambu cocok digunakan sebagai perkuatan tanah gambut karena berdampak pada reduksi deformasi dan penurunan (Talib et al., 2021).

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dilakukan penelitian pada tanah gambut yang diberi perkuatan dari kolom batuan dengan pengekan anyaman bambu dan kombinasi anyaman bambu yang dipasang secara horizontal di permukaan tanah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan pengaruh pemasangan sistem perkuatan terhadap nilai CBR tanah dan menentukan skema sistem perkuatan yang mampu memberikan pengaruh yang signifikan dalam peningkatan CBR tanah dasar untuk pekerjaan konstruksi jalan.

2. METODOLOGI

2.1. Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan tanah gambut sebagai bahan utama penelitian. Tanah gambut yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Kandis Kabupaten Siak – Riau. Kondisi tanah gambut di lapangan diperlihatkan pada Gambar 1. Sistem perkuatan yang digunakan untuk perkuatan tanah gambut berupa kolom batuan dengan kombinasi anyaman bambu.



Gambar 1. Tanah gambut di lapangan

Material kolom batuan menggunakan agregat kasar berupa batuan berukuran 3-12 mm seperti yang digunakan dalam penelitian (Salam et al., 2022). Material kolom batuan merupakan batu pecah seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Material ini diambil dari Sudamanik Kecamatan Jasinga

Kabupaten Bogor. Anyaman bambu dibuat dari material bambu yang diambil dari daerah Sudamanik Kecamatan Jasinga Kabupaten Bogor. Anyaman bambu berfungsi sebagai pengekang kolom batuan agar terhindar dari cembungan dan deformasi ke arah lateral. Panjang minimal anyaman bambu adalah 2-3 kali diameter kolom batuan (Salam et al., 2022). Panjang anyaman bambu pada penelitian digunakan sepanjang kolom batuan. Bentuk anyaman bambu untuk mengekang kolom batuan seperti pada Gambar 3a dan anyaman bambu yang dipasang di permukaan seperti pada Gambar 3b. Diameter anyaman bambu di permukaan yang digunakan adalah 10 cm.



Gambar 2. Material batuan dari batu pecah



(a)



(b)

Gambar 3. Anyaman bambu

2.2. Persiapan Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam pengujian CBR berupa tanah gambut dengan dan tanpa perkuatan. Benda uji ini berupa tanah gambut yang diberi perkuatan kolom batuan dan anyaman bambu dimasukkan dalam cetakan atau *mold* berukuran tinggi 30 cm dengan diameter 15 cm. Tanah gambut dipadatkan setiap 6 cm mengikuti kepadatan tanah gambut di lapangan. Panjang kolom

batuan diambil 25 cm dengan diameter 5 cm sekitar 20% luas permukaan gambut. Panjang anyaman bambu setidaknya 2-3 kali diameter kolom batuan, sehingga panjang anyaman bambu yang digunakan sama dengan panjang kolom batuan atau 25 cm. Kombinasi perkuatan kolom batuan dengan anyaman bambu diletakkan di tengah-tengah benda uji tanah gambut di dalam *mold*. Material pasir dihamparkan di permukaan tanah sebelum dilakukan pengujian untuk memodelkan lapisan tanah dasar konstruksi, hal ini mengikuti penelitian (Zhou et al., 2022). Selain kolom batuan dengan atau tanpa pengekan dari anyaman bambu, benda uji CBR juga diberi perkuatan anyaman bambu yang dipasang di permukaan. Hasil uji dapat diinterpretasikan dalam hubungan beban dengan penurunan untuk mendapatkan daya dukung tanah seperti yang dihasilkan oleh penelitian (Shuman et al., 2023). Bentuk benda uji CBR diperlihatkan dalam Gambar 4. Skema benda uji yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 1. Benda uji terdiri dari tanah gambut tanpa diberi perkuatan dan tanah gambut diberi perkuatan. Perkuatan yang digunakan terdiri dari anyaman bambu tanpa kolom batuan, kolom batuan tanpa anyaman bambu di permukaan, dan kolom batuan dengan anyaman bambu di permukaan.

Tabel 1. Skema uji

Benda uji	Panjang kolom batuan (cm)	Diameter kolom batuan (cm)	Diameter anyaman bambu (cm)
Tanpa perkuatan	-	-	-
Anyaman bambu	-	-	10
Kolom batuan	25	5	-
Kolom batuan dan anyaman bambu	25	5	10



Gambar 4. Benda uji CBR

2.3. Tahapan Penelitian

Benda uji yang telah disiapkan diuji menggunakan alat CBR laboratorium untuk mendapatkan nilai CBR dari masing-masing benda uji (Gambar 5). Benda uji diletakkan dengan posisi tegak lurus di atas landasan alat CBR. Beban pelat standar CBR diletakkan di atas permukaan tanah gambut. Alat ukur penetrasi menggunakan dial yang dipasang sedemikian di atas mold. Beban diberikan

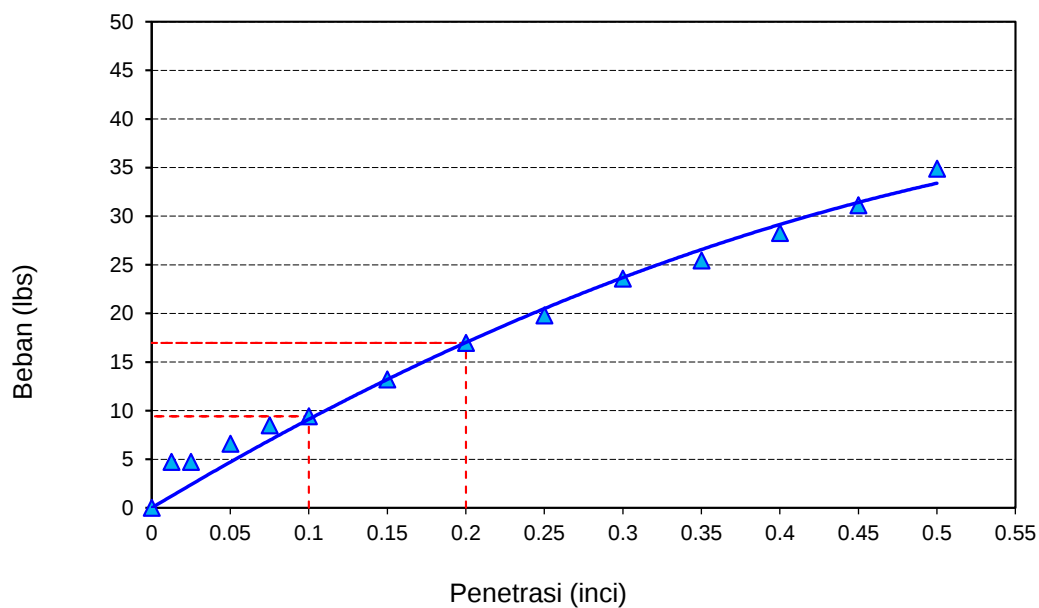
dengan cara memutar engkol pada alat CBR. Beban dibaca pada setiap penetrasi tertentu melalui proving ring yang telah dikalibrasi.



Gambar 5. Uji CBR

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji CBR



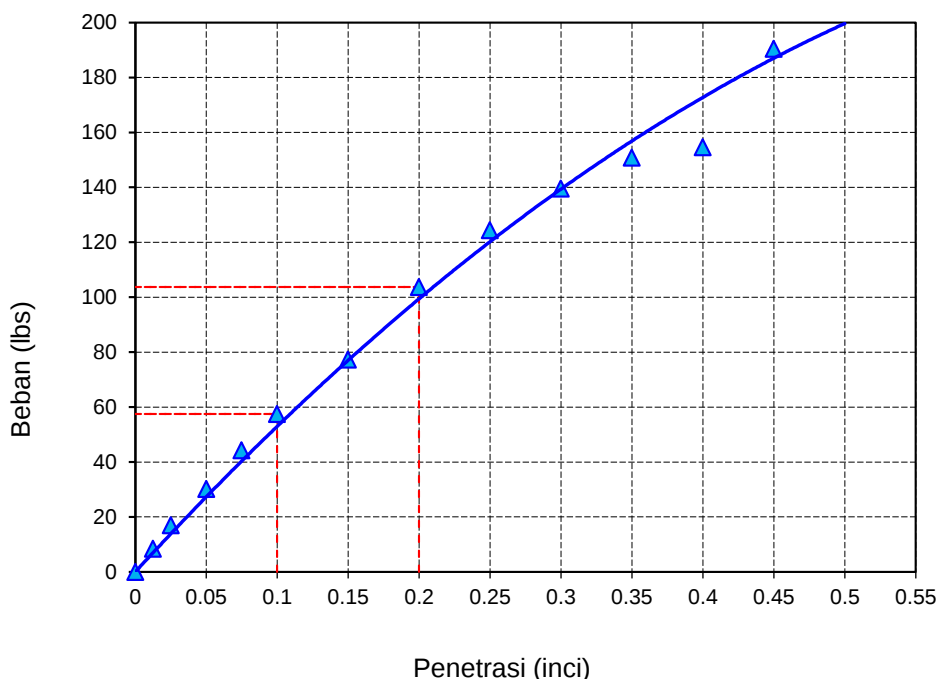
Gambar 6. Hasil uji CBR tanah gambut

Setiap benda uji yang telah disiapkan diuji menggunakan alat uji CBR laboratorium. Hasil uji dipresentasikan dalam hubungan beban dengan penetrasi. Penetrasi menggunakan standar dalam pengujian CBR laboratorium. Pembacaan beban dilakukan pada setiap penetrasi yang terjadi. Hasil uji CBR yang diuraikan terdiri dari hasil uji CBR tanah gambut tanpa perkuatan, dengan perkuatan anyaman bambu, dengan perkuatan kolom batuan, dengan perkuatan kolom batuan dan anyaman bambu di permukaan.

Hasil uji CBR pada tanah gambut tanpa sistem perkuatan ditunjukkan pada Gambar 6. Pembacaan beban pada tanah gambut tanpa perkuatan terlihat cukup kecil pada setiap penetrasi yang terjadi. Ini menunjukkan bahwa tanah gambut tidak dapat memberikan respon yang kuat dalam menahan beban. Beban yang dibaca pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci masing-masing 9,42 lbs dan 16,97 lbs. Beban tertinggi yang diperoleh pada penetrasi 0,5 inci adalah 34,88 lbs.

Hasil uji CBR pada tanah gambut dengan sistem perkuatan menggunakan anyaman bambu di permukaan tanah tanpa kolom batuan ditunjukkan pada Gambar 7. Beban yang dibaca pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci masing-masing 57,51 lbs dan 103,71 lbs. Beban tertinggi yang diperoleh pada penetrasi 0,5 inci adalah 209,30 lbs. Akibat pemasangan anyaman bambu beban pada setiap penetrasi yang terjadi didapatkan mengalami peningkatan dibandingkan pada tanah gambut tanpa perkuatan. Ini menunjukkan bahwa perkuatan tanah dapat memperkecil penurunan dan meningkatkan kemampuan tanah dalam menerima beban di atasnya.

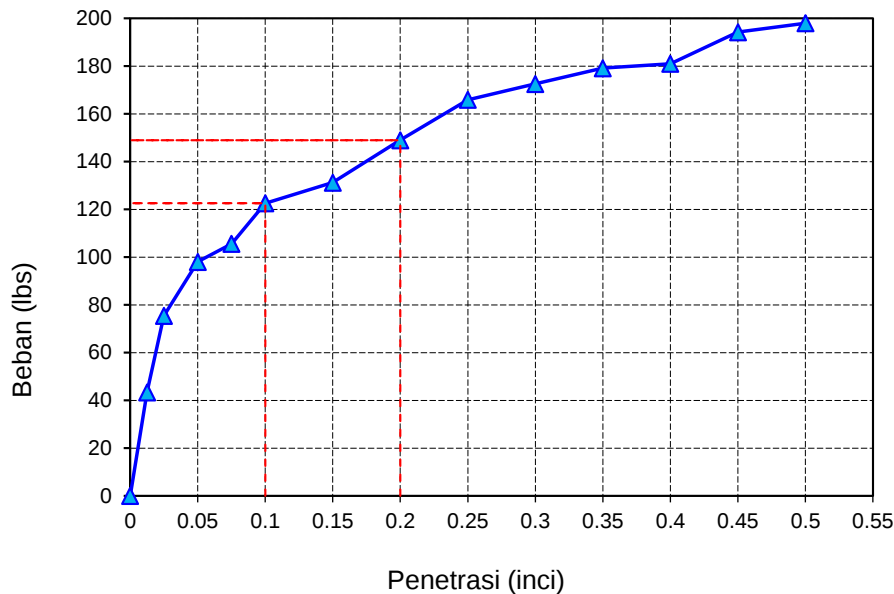
Hasil uji CBR pada tanah gambut dengan sistem perkuatan menggunakan kolom batuan tanpa anyaman bambu di permukaan ditunjukkan pada Gambar 8. Beban yang dibaca pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci masing-masing 122,56 lbs dan 148,96 lbs. Beban tertinggi yang diperoleh pada penetrasi 0,5 inci adalah 197,99 lbs. Apabila dilihat dari beban pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci, kolom batuan yang dipasang secara vertikal ke dalam lapisan gambut memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan pemasangan perkuatan anyaman bambu di permukaan. Ini dapat diartikan bahwa kolom batuan yang dipasang secara vertikal mampu mereduksi penurunan pada arah vertikal sehingga beban yang mampu ditahan semakin tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan perkuatan pada arah horizontal saja.



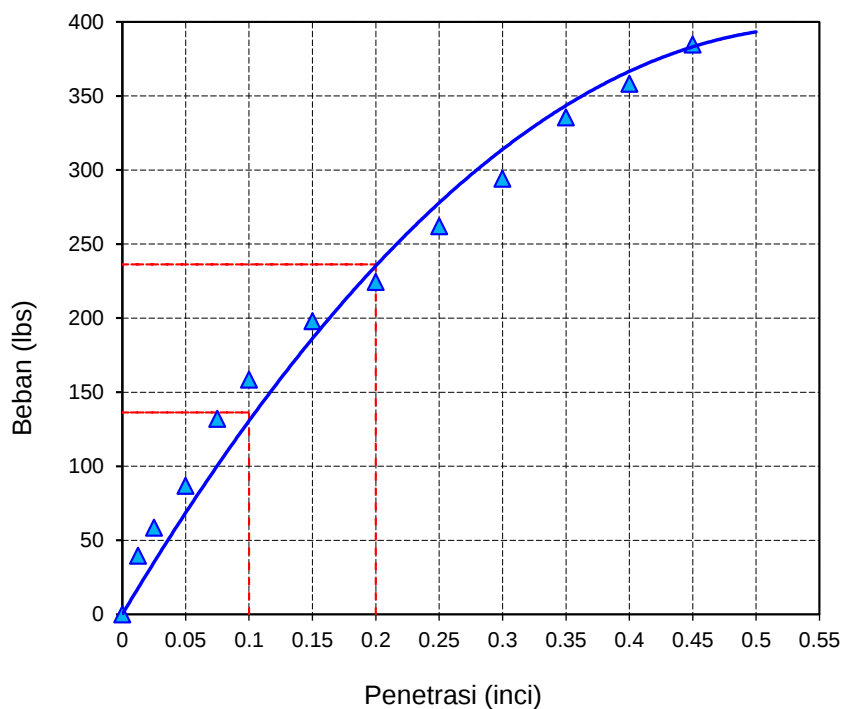
Gambar 7. Hasil uji CBR tanah gambut dengan perkuatan anyaman bambu

Hasil uji CBR pada tanah gambut dengan sistem perkuatan berupa kombinasi kolom batuan dan anyaman bambu di permukaan ditunjukkan pada Gambar 9. Beban yang dibaca pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci masing-masing 136,39 lbs dan 236,39 lbs. Beban tertinggi yang diperoleh pada

penetrasi 0,5 inci adalah 411,06 lbs. Kombinasi pemasangan sistem perkuatan pada arah vertikal dengan kolom batuan dan arah horizontal dengan anyaman bambu memperlihatkan kinerja yang lebih baik. Sistem perkuatan mampu mengurangi deformasi arah horizontal dengan kekangan dari material anyaman bambu yang dipasang sepanjang kolom batuan. Kombinasi kolom batuan dan anyaman bambu berkontribusi secara bersama-sama dalam mereduksi penurunan berlebihan sehingga beban yang dapat dipikul semakin tinggi.



Gambar 8. Hasil uji CBR tanah gambut dengan perkuatan kolom batuan



Gambar 9. Hasil uji CBR tanah gambut dengan kolom batuan dan anyaman bambu

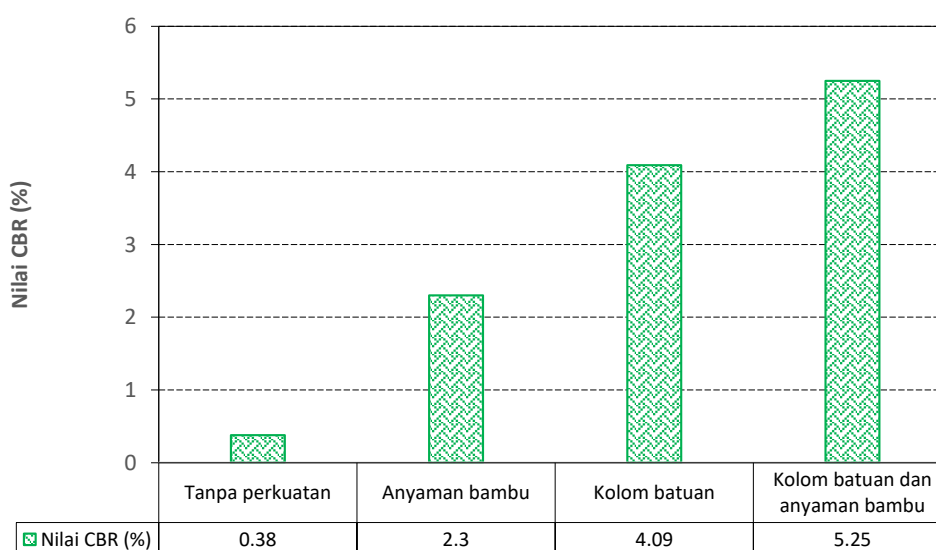
3.2. Pengaruh Sistem Perkuatan pada Nilai CBR Tanah

Pengaruh penggunaan sistem perkuatan pada nilai CBR tanah gambut ditunjukkan dalam Gambar 10. Berdasarkan uji CBR pada masing-masing benda uji didapatkan nilai CBR tertinggi pada penetrasi 0,1 inci dan 0,2 inci. Nilai CBR pada tanah gambut tanpa perkuatan didapatkan hanya 0,38%. Nilai CBR tanah gambut tanpa perkuatan didapatkan lebih kecil dari 3% dan tergolong sebagai tanah dasar dengan daya dukung sangat rendah (Bowles, 1992).

Sistem perkuatan dapat membantu perbaikan nilai CBR pada tanah dengan daya dukung yang sangat rendah (Darwis, 2017). Nilai CBR tanah gambut yang diperkuat dengan anyaman bambu di permukaan tanah didapatkan sebesar 2,30%. Nilai CBR yang diperoleh untuk penggunaan perkuatan anyaman bambu masih belum memberikan dampak pada perubahan sifat mekanis tanah gambut, hal ini terlihat dari nilai CBR < 3% dan tergolong sebagai tanah dengan daya dukung sangat rendah (Bowles, 1992). Pemasangan anyaman bambu di permukaan memberikan pengaruh pada peningkatan nilai CBR sebesar 6,05 kali dari CBR tanah gambut tanpa perkuatan.

Penggunaan kolom batuan yang dikekang dengan anyaman bambu tetapi tanpa anyaman bambu di permukaan tanah menghasilkan nilai CBR sebesar 4,09%. Penggunaan kolom batuan ini mampu mengubah perilaku tanah gambut dari sangat lunak menjadi tanah dengan daya dukung sedang dengan nilai CBR di atas 3%. Sistem perkuatan ini memberikan peningkatan nilai CBR sebesar 10,76 kali dari CBR tanah gambut tanpa perkuatan.

Pengaruh yang signifikan diperoleh pada tanah gambut dengan perkuatan kolom batuan dengan kombinasi anyaman bambu di permukaan tanah. Nilai CBR tanah dengan perkuatan ini menghasilkan nilai CBR sebesar 5,25%. Nilai CBR lebih tinggi dari 5% dapat memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk pekerjaan jalan (Waruwu et al., 2021). Faktor aman timbunan menjadi semakin lebih baik dan dapat mencapai angka keamanan 1,30 (Suyuti et al., 2020). Peningkatan nilai CBR diperoleh sebesar 13,82 kali dari nilai CBR tanah gambut tanpa sistem perkuatan.



Gambar 10. Pengaruh sistem perkuatan pada nilai CBR tanah gambut

4. KESIMPULAN

Tanah gambut merupakan salah satu tanah yang memiliki daya dukung rendah. Hal ini ditunjukkan dari nilai CBR tanah gambut yang sangat rendah, sehingga dapat dikategorikan sebagai tanah sangat lunak. Tanah gambut tanpa perkuatan tidak layak digunakan sebagai tanah dasar untuk konstruksi jalan. Sistem perkuatan tanah memberikan dampak pada peningkatan nilai CBR. Sistem perkuatan dapat berupa anyaman bambu yang dipasang horizontal di permukaan, kolom batuan yang dipasang vertikal dalam lapisan tanah gambut, atau kombinasi dari keduanya. Kolom batuan perlu

material pengekan agar terhindar dari deformasi horizontal yang berlebihan. Anyaman bambu dapat dipasang di sepanjang kolom bantuan sebagai material pengekan. Hasil terbaik dari sistem perkuatan yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan pada penggunaan sistem pekuatan dari kombinasi kolom batuan dan anyaman bambu di permukaan. Peningkatan CBR didapatkan sebesar 13,82 kali dari nilai CBR tanah gambut tanpa sistem perkuatan. Nilai CBR yang diperoleh sebesar 5,25%, ini dapat memenuhi syarat sebagai tanah dasar untuk pekerjaan konstruksi jalan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan pengaruh panjang kolom batuan, pengaruh rasio panjang material pengekan kolom batuan, dan kombinasi kolom batuan dan anyaman bambu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini baik tenaga lapangan, tenaga laboran, maupun anggota peneliti lainnya. Penulis juga berterima kasih kepada Laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Univeritas Pelita Harapan yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini. Penelitian ini didanai melalui penelitian eksternal 173/LPPM-UPH/VII/2023 dan penelitian internal No. 043/LPPM-UPH/VII/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. E. (1992). *Engineering properties of soil and their measurement*. McGraw-Hill Book Company Limited.
- Darwis, H. (2017). Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah. In *Pustaka AQ*. Pustaka AQ.
- Ehsaniyamchi, A., & Ghazavi, M. (2019). Short-term and Long-term Behavior of Geosynthetic-Reinforced Stone Columns. *Soils and Foundations*, 59(5), 1579–1590. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.007>
- Hegde, A., & Sitharam, T. G. (2015). Use of Bamboo in Soft-Ground Engineering and Its Performance Comparison with Geosynthetics: Experimental Studies. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001224](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001224)
- Maulana, M., Hanova, Y., Waruwu, A., & Putra, E. R. (2019). Simplified Method for Prediction of Settlement in Bamboo Piles-Reinforced Peat under Embankment. *Journal of Applied Engineering Science*, 17(1), 35–42. <https://doi.org/10.5937/jaes17-18793>
- Salam, M. A., Wang, Q., & Huang, J. (2022). Experimental and Numerical Study on the Composite Column Behavior: Loess Soil Reinforced by Concrete-Stone Column. *Civil Engineering Journal*, 8(10), 2022–2037. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-01>
- Shuman, N. M., Khan, S., & Amini, F. (2023). Settlement Based Load Capacity Curve for Single Helix Helical Pile in $c - \phi$ Soil. *Soils and Foundations*, 63(1), 101265. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101265>
- Suyuti, Rizal, M., & Damayanti, Y. (2020). Prediksi CBR-Lapangan pada Pondasi Matras di Atas Tanah Lunak Diperkuat Tiang-tiang Bambu Menggunakan Formula Klasif Terzaghi. *Teras Jurnal*, 10(1), 59–70. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29103/tj.v10i1.262>
- Talib, F. M., Mohamad, H. M., & Mustafa, M. N. (2021). Peat Soil Improvement with Bamboo Reinforcement Technology: a Review. *International Journal of GEOMATE*, 21(88), 75–85. <https://doi.org/10.21660/2021.88.j2259>
- Waruwu, A. (2021). *Perbaikan dan Perkuatan Tanah Gambut*. Amerta Media.
- Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2017). Deflection Behavior of The Nailed Slab System-Supported Embankment on Peat Soil. *Journal of Applied Engineering Science*, 15(4), 556–563. <https://doi.org/10.5937/jaes15-15113>
- Waruwu, A., Maulana, & Halim, H. (2017). Settlement Estimation of Peat Reinforced with Bamboo Grid under Embankment. *International Review of Civil Engineering*, 8(6), 299–306. <https://doi.org/10.15866/irece.v8i6.13130>
- Waruwu, A., Susanti, R. D., Endriani, D., & Hutagaol, S. (2020). Effect of Loading Stage on Peat Compression and Deflection of Bamboo Grid with Concrete Pile. *International Journal of GEOMATE*, 18(66), 150–155. <https://doi.org/10.21660/2020.66.62072>
- Waruwu, A., Zega, M., Endriani, D., & Susanti, R. D. (2021). Pemanfaatan Matras Bambu pada Perbaikan Nilai California Bearing Ratio (CBR) Tanah Lempung. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 9(2), 95–103.
- Zhou, Z., Lok, T. M. H., Zhou, W. H., & Zhao, L. S. (2022). An Analytical Solution for the

Deformation of Soft Ground Reinforced by Columnar Inclusions under Equal Stress
Conditions. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(22), 11574.
<https://doi.org/10.3390/app122211574>