

# Pengaruh Stabilisasi Tanah Lunak Menggunakan Bakteri *Bacillus Subtilis* terhadap Daya Dukung Tanah dan Kuat Tekan Bebas

Rokhman

Mahasiswa Program Doktoral Jurusan Teknik Sipil – Universitas Hasanuddin

Tri Harianto

Associate Professor Departemen Teknik Sipil – Universitas Hasanuddin

Achmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad

Dosen, Departemen Teknik Sipil – Universitas Hasanuddin

**ABSTRAK:** Tanah lunak dengan daya dukung rendah tidak mampu mendukung konstruksi diatasnya sehingga diperlukan suatu metode perbaikan tanah guna memperbaiki struktur tanah tersebut. Upaya stabilisasi tanah lunak sudah banyak dilakukan dengan berbagai stabilisator yaitu kapur, semen, kombinasi semen dan abu terbang, aspal dan lain-lain, namun bahan stabilisasi ini tidak ramah lingkungan. Saat ini alternatif bio stabilisasi yang ramah lingkungan semakin berkembang dengan pemanfaatan mikroorganisme (bakteri). Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan karakteristik tanah lunak yang distabilisasi dengan bakteri dengan pengujian kuat tekan bebas tanah (UCS) dan pengujian daya dukung tanah (CBR) secara eksperimental. Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis cultur* 3 hari dengan komposisi 4%, 6%, dan 8% pada kondisi kepadatan optimum. Waktu pemeraman dilakukan selama 3, 7 dan 14 hari setelah pembuatan benda uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar bakteri optimum untuk stabilisasi tanah lunak diperoleh sebesar 6% pada kultur bakteri 3 hari. Pada waktu curing 14 hari nilai kuat tekan bebas diperoleh sebesar 1700,72 kN/m<sup>2</sup> dan modulus elastis sebesar 218,69 kN/m<sup>2</sup> atau meningkat sebesar 65% bila dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi bakteri. Daya dukung tanah (CBR) diperoleh sebesar 29,7% meningkat sebesar 50% bila dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi bakteri.

**Kata Kunci:** tanah lunak, bakteri *Bacillus subtilis*, nilai CBR, kuat tekan bebas

**ABSTRACT:** Soft soil with low bearing capacity is not able to support the construction on it so that a soil improvement method is needed to improve the soil structure. Efforts to stabilize soft soils have been carried out with various stabilizers, namely lime, cement, a combination of cement and fly ash, asphalt and others, but these stabilizing materials are not environmentally friendly. Currently, environmentally friendly bio-stabilization alternatives are growing with the use of microorganisms (bacteria). The purpose of this study was to determine the characteristics of soft soil stabilized with bacteria by testing the soil unconfined compressive strength (UCS) and testing the soil bearing capacity (CBR) experimentally. The bacteria used were *bacillus subtilis culture* 3 days with a composition of 4%, 6%, and 8% at optimum density conditions. The curing time was carried out for 3, 7 and 14 days after the manufacture of the test object. The test results showed that the optimum bacterial content for stabilizing soft soil was 6% in 3 days of bacterial culture. At curing time of 14 days the value of unconfined compressive strength was obtained at 1700.72 kN/m<sup>2</sup> and elastic modulus of 218.69 kN/m<sup>2</sup> or an increase of 65% when compared to soil without bacterial stabilization. Soil bearing capacity (CBR) was obtained at 29.7%, an increase of 50% when compared to soil without bacterial stabilization.

**Keywords:** soft soil, *Bacillus subtilis* bacteria, CBR value, unconfined compressive strength

## 1 PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan dan jembatan di Indonesia saat ini menjadi prioritas pembangunan karena mempunyai peranan

penting di bidang perekonomian, sosial, budaya, pertahanan Nasional dan lainnya. Tentunya untuk membangun insfrastruktur tersebut membutuhkan lahan dalam hal ini tanah yang cukup luas. Tanah merupakan dukungan

terakhir untuk penyaluran beban yang ditimbulkan akibat beban konstruksi di atasnya, terkadang dihadapkan pada satu pilihan dimana lokasi pembangunan tersebut sering dijumpai tanah secara geoteknis tidak memenuhi spesifikasi seperti tanah lunak.

Upaya stabilisasi tanah lunak sudah banyak dilakukan dengan berbagai stabilisator yaitu kapur, semen, kombinasi semen dan abu terbang, aspal dan lain-lain, namun bahan stabilisasi ini tidak ramah lingkungan, Omoregie et al. (2021). Dalam penelitian ini stabilisasi tanah dengan menggunakan bakteri sebagai bahan stabilisasi. Metode bio-stabilisasi tanah lempung dengan bakteri *Bacillus subtilis* diyakini dapat memperbaiki karakteristik tanah dengan meningkatkan daya dukung lapisan subbase dan juga mengurangi kompresibilitas dan permeabilitas. Manfaat bakteri *Bacillus subtilis* adalah dapat mengurangi resiko pencemaran tanah dan lingkungan, Hasriana et al. (2018).

Bakteri adalah mikroorganisme hidup yang memiliki ukuran sangat kecil, DeJong et al. (2006, 2010). Setiap sel mikroorganisme memiliki kemampuan untuk melakukan aktivitas kehidupan seperti dapat mengalami pertumbuhan, menghasilkan energi, dan berkembang biak dengan sendirinya. Mikroorganisme memiliki fleksibilitas metabolisme yang tinggi karena harus memiliki kemampuan beradaptasi yang besar. Dengan demikian, jika terjadi interaksi yang tinggi dengan lingkungan maka akan menyebabkan konversi zat yang tinggi pula. Namun karena ukurannya yang kecil, tidak ada tempat untuk menyimpan enzim yang telah dihasilkan. Oleh karena itu, enzim yang tidak perlu akan disimpan dalam bentuk cadangan. Enzim tertentu yang diperlukan dapat digunakan untuk perbaikan tanah lempung.

*Microbial Induced Calcite Precipitates* (MICP) adalah teknologi baru dan berkelanjutan yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis tanah. Teknik ini adalah dengan memasukkan larutan bakteri ke dalam masa tanah, kemudian menyuntikkan larutan kimia yang terdiri dari urea dan salah satu garam kalsium (misalnya kalsium klorida dan kalsium asetat) ke dalam masa tanah, DeJong et al. (2006); Donovan Mujah et al. (2016); Gowthaman et al. (2019); Keykha et al.

(2014); Kim et al. (2018); Liu et al. (2019); Mahawish et al. (2019); Omoregie et al. (2019); Sharma & R. (2016). Beberapa faktor harus dipertimbangkan untuk penggunaan dan pengendalian proses pengendapan kalsit yang diinduksi mikroba dalam aplikasinya di lapangan adalah konsentrasi larutan bakteri, konsentrasi larutan kimia, dan metode memasukkan bakteri dan larutan kimia. Selain faktor yang mempengaruhi pengendapan kalsit terinduksi mikroba dalam tanah tersebut juga harus mengidentifikasi faktor pengaruh bakteri, ukuran partikel tanah, unsur hara, larutan kimia, pH, suhu, dan injeksi, Al Imran et al. (2020).

Indriani et al. (2021) telah melakukan penelitian untuk melihat pengaruh pengendapan kalsit terhadap perilaku kuat tekan bebas pasir terkontaminasi batubara. Variasi konsentrasi *Bacillus subtilis* diterapkan sebanyak 3%, 4,5%, dan 6%. Bakteri yang digunakan adalah bakteri *Bacillus subtilis* kultur 3 hari masih dalam fase diam dan 6 hari kultur dalam fase mati. Setelah 28 hari perawatan, ada peningkatan yang signifikan nilai UCS dari tanah yang distabilisasi MICP dibandingkan dengan tanah yang tidak distabilisasi. Penggunaan kultur bakteri 3 hari lebih efektif meningkatkan nilai UCS dibandingkan kultur 6 hari. Pada kondisi optimum, nilai UCS meningkat hingga 15 kali setelah pemeraman 28 hari.

## 2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Geoteknik Universitas Hasanuddin Makassar. Material tanah lunak yang dipakai berasal dari Kabupaten Gowa dengan pengambilan sampel tanah secara konvensional menggunakan linggis dan sekop, selanjutnya contoh tanah ditempatkan dalam karung sampel dan dibungkus dengan plastik untuk menjaga kondisi kadar air asli. Beberapa tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut; pertama, melakukan kajian literatur dan survei pendahuluan untuk mengidentifikasi masalah dan identifikasi lokasi pengambilan sampel; kedua, melakukan uji pendahuluan terhadap sampel yang telah diambil untuk mengetahui karakteristik tanah lunak. Uji labratorium untuk mengatahui sifat-sifat fisik yang meliputi kadar

air, batas-batas konsistensi, dan spesifik gravity, sedangkan uji sifat mekanis meliputi uji pemedatan, uji kuat tekan, dan uji daya dukung.

### 2.1 Pengujian Propertis Tanah

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tanah lunak baik sifat fisis maupun mekanis. Sehingga dapat diketahui klasifikasi tanah dan karakteristik tanah asli yang akan dibandingkan dengan karakteristik tanah yang distabilisasi dengan bakteri. Uji Propertis tanah mengikuti standar ASTM dan SNI seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Uji dan Standar Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Tanah.

Jenis Pengujian	Jenis Standard	
	ASTM	SNI
Analisa saringan	C-136-06	SNI 03-1968-1990
Batas cair (LL)	D-423-66	SNI 03-1967-1990
Batas plastis (PL)	D-424-66	SNI 03-1966-1990
Index plastisitas (IP)	D-4318-10	SNI 03-1966-2008
Berat jenis tanah (Gs)	D-162	SNI 03-1964-1990
Berat isi tanah jenuh	D-2216-98	SNI 03-1743-1989
Kadar air (w)	D-2216-98	SNI 03-1965-1990
Berat isi kering (yd)	D-854-72	SNI 03-1970-2008
Uji pemedatan	D-698	SNI 03-1742-1989
Kuat tekan bebas (qu)	D-633-1994	SNI 03-6887-2002
Daya dukung tanah (CBR)	D-1833	SNI 03-6796-2002

### 2.2 Pembuatan Kultur Bakteri

Bakteri yang dipakai adalah bakteri *Bacillus subtilis* yang diperoleh dari Laboratorium Mikrobiologi Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin. Bakteri dikembangbiakan dengan menginokulasikan bakteri ke dalam suatu medium baru. Teknik inokulasi yang digunakan adalah teknik gores, dengan sebelumnya dilakukan pengenceran terlebih dahulu agar hasil koloni yang didapat berupa biakan murni. Setelah diinkubasi dalam keadaan aerob selama 24 jam. Bahan pembuatan medium dasar untuk satu liter terdiri dari Urea sebanyak 20 gram, Nutrient Broth sebanyak 3 gram, NaHCO<sub>3</sub> sebanyak 2,12 gram, CaCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O sebanyak 4,14 gram dan NH<sub>4</sub>Cl sebanyak 10 gram. Bahan-bahan tersebut dimasukkan ke dalam gelas Erlenmeyer. Kemudian dilarutkan dengan air suling (aquades) sebanyak 1000 ml, setelah itu

disterilkan dalam autoclave pada suhu 121°C tekanan 1 atm selama 15 menit. Adapun alat dan bahan sebagaimana terlihat pada Gbr. 1 dan Gbr. 2.



Gbr. 1. Bahan Nutritif Kultur Bakteri : Urea, Nutrient Broth, Sodium Bicarbonate, Calcium Chloride dan Amonium Chloride.



Gbr. 2. Alat Kultur Bakteri : Alat Autoclave, Gelas Elenmeyer dan Isolat Bakteri.

### 2.3 Pengujian Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

Sampel uji dibuat dengan memperhatikan kadar air dan kepadatan optimum yang didapat dari pengujian kompaksi. Adapun variasi kadar larutan bakteri sebesar 4%, 6% dan 8% dengan kultur bakteri pada umur 3 hari. Selanjutnya dilakukan pemeraman selama 3, 7, dan 14 hari. Setelah waktu pemeraman tersebut selanjutnya dilaksanakan pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*).

### 2.4 Pengujian Daya Dukung CBR (*California Bearing Ratio*)

Sampel uji dibuat dengan variasi jumlah tumbukan (energi pemedatan) sebanyak 10, 25 dan 56 kali. Tanah lunak dicampur dengan bakteri dengan variasi kadar larutan bakteri sebanyak 4%, 6% dan 8% dengan kultur bakteri pada umur 3 hari. Selanjutnya dilakukan pemeraman selama 3, 7 dan 14 hari. Setelah waktu pemeraman tersebut selanjutnya dilaksanakan pengujian daya dukung tanah CBR. Pengujian ini dapat dijadikan sebagai

CBR desain untuk aplikasi di lapangan dan juga dapat diketahui pengaruh energi pemadatan terhadap daya dukung tanah yang distabilisasi bakteri.



Gbr. 3. Pengujian CBR Test dan Unconfined Comfression Strength Test.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Uji Propertis Tanah Asli

Hasil pengujian propertis tanah didapatkan sifat fisis dan mekanis tanah seperti dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Propertis Tanah.

Karakteristik Tanah	Satuan	Hasil Uji
Berat jenis (Gs)	-	2,72
Properties umum tanah		
Void ratio (e)	-	1,77
Berat isi tanah basah ( $\gamma_b$ )	kN/m <sup>3</sup>	15,11
Berat isi tanah kering ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	9,61
Kadar air (w)	%	56,55
Porosity (n)	%	63,87
Derasat kejenuhan (Sr)	%	87,21
Analisa saringan dan hidrometer		
Sand	%	11,67
Silt	%	19,25
Clay	%	69,09
Batas-batas konsistensi tanah		
Batas cair (LL)	%	60,76
Batas plastis (PL)	%	28,47
Indeks plastis (PI)	%	32,29
Pemadatan standar proctor		
Berat kering maksimum ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	13,34
Kadar air optimum (OMC)	%	29,56
Klasifikasi tanah (USCS)	-	CH

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang diperoleh seperti terlihat pada Tabel 2 di atas bahwa tanah lunak memiliki kadar air lapangan sebesar 56,55 %. Uji pemadatan *Standard Proctor* diperoleh kadar air optimum 29,56% dengan berat volume kering ( $\gamma_d$ ) 13,34

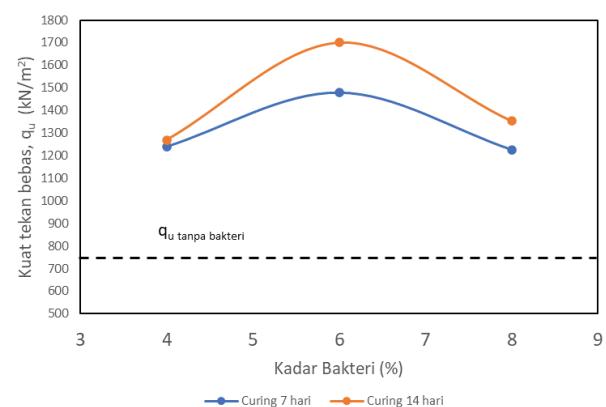
kN/m<sup>3</sup>. Berat jenis tanah sebesar 2,72. Berdasarkan pengujian batas Atterberg diperoleh batas cair sebesar 60,76% dan batas plastis sebesar 28,47 %. Batas cair yang lebih besar dari 50% merupakan salah satu ciri umum yang dimiliki oleh tanah lunak. Nilai plastisitas indeks sebesar 32,29%, ini menunjukan bahwa tanah tersebut sangat peka terhadap air disekitarnya. Pengujian distribusi ukuran butiran tanah, diketahui bahwa 88,33 % lolos saringan No.200, menurut sistem klasifikasi USCS dapat digolongkan sebagai tanah berbutir halus dan diklasifikasikan ke dalam jenis CH yaitu tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Menurut sistem klasifikasi AASHTO sampel tanah termasuk dalam kelompok A-7-5 yaitu merupakan tanah berlempung dengan penilaian sedang sampai buruk.

#### 3.2 Hasil Pengujian Unconfined Confresssion Test

Pengujian ini menghasilkan karakteristik tanah yang distabilisasi bakteri terhadap kuat tekan bebas ( $q_u$ ) dan nilai modulus ealstsitas tanah (E) seperti tertuang pada Tabel 3.

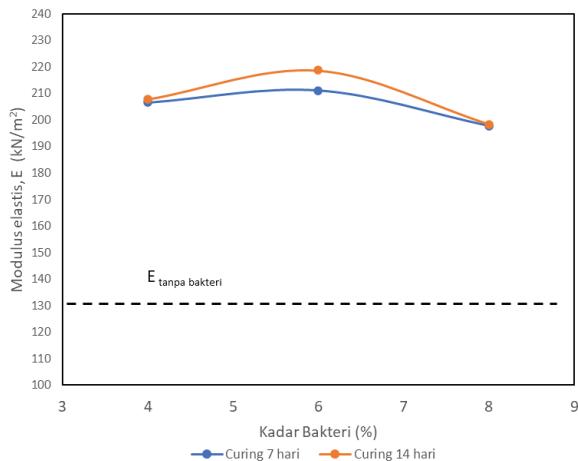
Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bebas pada Umur Pemeraman 14 hari.

Kadar Bakteri (%)	Pemeraman 7 hari		Pemeraman 14 hari	
	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )
4	1.239,27	206,53	1.269,27	207,80
6	1.477,96	211,14	1.700,72	218,69
8	1.226,13	197,80	1.353,10	198,39



Gbr. 4. Pengaruh Kadar Bakteri terhadap Kuat Tekan Bebas ( $q_u$ ) pada Umur 7 dan 14 Hari.

Berdasarkan Tabel 3 dan Gbr. 4 di atas dapat dilihat bahwa stabilisasi tanah menggunakan bakteri nilai kuat tekan bebas dipengaruhi oleh kadar bakteri dan waktu curing. Kadar bakteri optimum didapatkan sebesar 6% dengan kuat tekan bebas ( $q_u$ ) pada curing 14 hari sebesar 1700,72 kN/m<sup>2</sup> meningkat sebesar 129% bila dibandingkan dengan  $q_u$  tanah tanpa bakteri sebesar 741,48 kN/m<sup>2</sup>. Dari gambar juga dapat dilihat bahwa kuat tekan bebas akan meningkat seiring dengan lamanya waktu curing.



Gbr. 5. Pengaruh Kadar Bakteri terhadap Modulus Elastisitas Tanah (E).

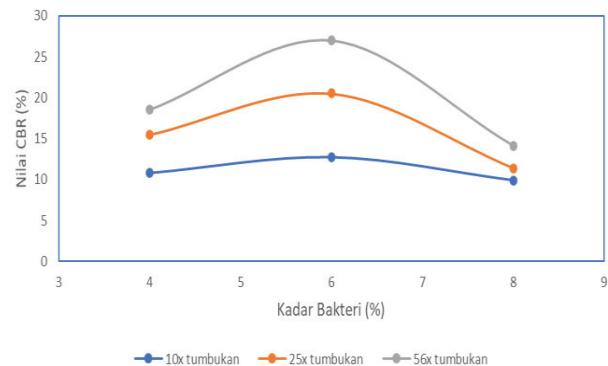
Berdasarkan Tabel 3 dan Gbr. 5 di atas dapat dilihat bahwa stabilisasi tanah menggunakan bakteri untuk nilai modulus elastis tanah dipengaruhi oleh kadar bakteri dan waktu curing. Kadar bakteri optimum didapatkan sebesar 6% dengan nilai modulus elastis (E) pada curing 14 hari sebesar 218,69 kN/m<sup>2</sup> meningkat sebesar 65% bila dibandingkan dengan nilai E tanah tanpa stabilisasi bakteri yaitu sebesar 132,49 kN/m<sup>2</sup>. Dari gambar juga dapat dilihat bahwa modulus elastis (E) akan meningkat seiring dengan bertambahnya waktu curing.

### 3.3 Hasil Pengujian Daya Dukung Tanah (CBR)

Hasil pengujian daya dukung tanah (CBR) dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gbr. 6.

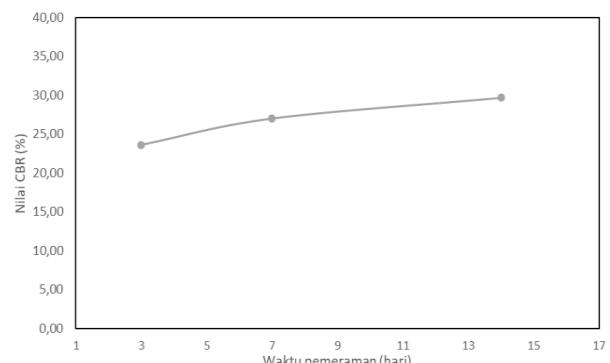
Tabel 4. Pengaruh Kadar Bakteri dan Energi Pemadatan terhadap Daya Dukung Tanah (CBR) pada Waktu Curing 7 Hari.

Kadar Bakteri (%)	Nilai CBR (%)		
	Jumlah tumbukan 10x	Jumlah tumbukan 25x	Jumlah tumbukan 56x
4	10,80	15,48	18,54
6	12,78	20,52	27,00
8	9,90	11,40	14,16



Gbr. 6. Pengaruh Kadar Bakteri dan Energi Pemadatan terhadap Daya Dukung Tanah (CBR) pada Waktu Curing 7 Hari.

Berdasarkan Tabel 4 dan Gbr. 6 di atas dapat dilihat bahwa daya dukung tanah (nilai CBR) pada stabilisasi tanah menggunakan bakteri dipengaruhi oleh kadar bakteri dan energi pemadatan. Kadar bakteri optimum diperoleh sebesar 6% dengan nilai CBR sebesar 29,7% pada umur curing 7 hari atau meningkat sebesar 50% bila dibandingkan nilai CBR tanah tanpa bakteri yaitu sebesar 11,88%. Dari gambar juga terlihat bahwa energi pemadatan mempengaruhi nilai CBR semakin besar energi pemadatan (jumlah tumbukan) semakin besar nilai CBR yang diperoleh.



Gbr. 7. Pengaruh Waktu Curing terhadap Daya Dukung Tanah (CBR) Berdasarkan Kadar Bakteri 6% dan Energi Pemadatan 56x Tumbukan.

Berdasarkan Gbr. 7 di atas dapat dilihat bahwa stabilisasi tanah dengan bakteri terhadap daya dukung tanah (nilai CBR) juga dipengaruhi oleh lamanya waktu curing. Semakin lama waktu curing semakin besar juga nilai CBR. Pada kadar bakteri optimum yang digunakan yaitu sebesar 6% dan energi pemadatan 56x tumbukan. Ada peningkatan nilai CBR pada waktu curing 3 hari sebesar 23,8% menjadi nilai CBR sebesar 27,9% pada waktu curing 14 hari.

#### 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang diperoleh bahwa tanah lunak yang diteliti menurut sistem klasifikasi USCS digolongkan tanah berbutir halus dan diklasifikasikan ke dalam jenis CH yaitu lempung dengan plastisitas tinggi. Menurut sistem klasifikasi AASHTO sampel tanah termasuk dalam kelompok A-7-5 yaitu tanah berlempung dengan penilaian sedang sampai buruk. Kadar bakteri optimum untuk stabilisasi tanah lunak diperoleh sebesar 6% pada kultur bakteri 3 hari. Pada waktu curing 14 hari nilai kuat tekan bebas diperoleh sebesar 1700,72 kN/m<sup>2</sup> dan modulus elastis sebesar 218,69 kN/m<sup>2</sup> atau meningkat sebesar 65% bila dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi bakteri. Daya dukung tanah (nilai CBR) diperoleh sebesar 29,7 % meningkat sebesar 50% bila dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi bakteri.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Al Imran, M., Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. 2020. *The Influence of the Addition of Plant-based Natural Fibers (Jute) on Biocemented Sand Using MICP Method*. Materials. 13(18). Diakses dari <https://doi.org/10.3390/MA13184198>.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. 2006. Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(11):1381–1392. Diakses dari [https://doi.org/10.1061/\(asce\)10900241\(2006\)132:1\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(asce)10900241(2006)132:1(1381)).
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. 2010. Bio-mediated Soil Improvement. *Ecological Engineering* 36(2): 197–210. Diakses pada 2008.12.029 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng>.
- Donovan Mujah, Mohamed Shahin, & Liang Cheng. 2016. Performance of Biocemented Sand Under Various Environmental Conditions. COBRAMSEG C. Diakses <https://doi.org/10.20906/cps/gj-05-0002>.
- Gowthaman, S., Mitsuyama, S., Nakashima, K., Komatsu, M., & Kawasaki, S. 2019. Microbial Induced Slope Surface Stabilization Using Industrial-grade Chemicals: A Preliminary Laboratory Study. *International Journal of GEOMATE* 17(60):110–116. Diakses <https://doi.org/10.21660/2019.60.8150>.
- Hasriana, Samang, L., Harianto, T., & Djide, M. N. 2018. Bearing Capacity Improvement of soft Soil Subgrade Layer with Bio Stabilized Bacillus subtilis. *MATEC Web of Conferences* 181:0–5. Diakses dari <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818101001>.
- Indriani, A. M., Harianto, T., Djamaluddin, A. R., & Arsyad, A. 2021. Bioremediation of Coal Contaminated Soil. *International Journal of GEOMATE* 21(84):76–84. Diakses dari <https://doi.org/10.21660/2021.84.j2124>.
- Keykha, H. A., Huat, B. B. K., & Asadi, A. 2014. Electrokinetic Stabilization of Soft Soil Using Carbonate-Producing Bacteria. *Geotechnical and Geological Engineering* 32(4):739–747. Diakses dari <https://doi.org/10.1007/s10706-014-9753-8>.
- Kim, G., Kim, J., & Youn, H. 2018. Effect of Temperature, pH, and Reaction Duration on Microbially Induced Calcite Precipitation. *Applied Sciences (Switzerland)* 8(8). Diakses dari <https://doi.org/10.3390/app8081277>
- Liu, L., Liu, H., Stuedlein, A. W., Evans, T. M., & Xiao, Y. 2019. Strength, Stiffness, and Microstructure Characteristics of Biocemented Calcareous Sand. *Canadian Geotechnical Journal* 56(10):1502–1513. Diakses dari <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0007>.
- Mahawish, A., Bouazza, A., & Gates, W. P. 2019. Unconfined Compressive Strength and Visualization of the Microstructure of Coarse Sand Subjected to Different Biocementation Levels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 145(8): 04019033. Diakses dari [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002066](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002066).
- Omoregie, A. I., Palombo, E. A., & Nissom, P. M. 2021. Bioprecipitation of Calcium Carbonate Mediated by Ureolysis: A review. *Environmental Engineering Research* 26(6): 0–2. Diakses dari <https://doi.org/10.4491/eer.2020.379>.
- Omoregie, A. I., Palombo, E. A., Ong, D. E. L., & Nissom, P. M. 2019. Biocementation of Sand by Sporosarcina pasteurii Strain and Technical-grade Cementation Reagents Through Surface Percolation Treatment Method. *Construction and Building Materials* 228: 116828. Diakses dari <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116828>
- Sharma, A., & R., R. 2016. Study on Effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on Strength of Fine Grained Soils. *Perspectives in Science* 8:198–202. Diakses dari <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.017>