

Pengaruh *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara

Andi Marini Indriani^{1*}, Gunaedy Utomo²

^{1,2}Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Balikpapan, 76114, Indonesia

*Corresponding author, e-mail: andi.marini@uniba-bpn.ac.id

Received 22th Feb 2023; 1st Revision 7th March 2023; Accepted 22th March 2023

ABSTRAK

Microbially induced calcite precipitation (MICP) adalah teknik perbaikan tanah dengan menggunakan mikroorganisme yang mampu mengubah dan meningkatkan sifat mekanik dan fisik. Dalam penelitian ini, uji geser langsung dengan mengacu pada standard SNI 03-3420-1994 digunakan untuk mengetahui pengaruh pengendapan calcite terhadap perilaku kuat geser tanah terkontaminasi batubara. Bakteri Bacillus subtilis sebanyak 6% ditambahkan ke dalam tanah yang terkontaminasi 5%, 10% dan 15% batubara. Bakteri yang digunakan menggunakan kultur 3 hari dimana berada pada fase stasioner. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan yang cukup baik terhadap nilai kohesi dan sudut geser dalam sebagai parameter kuat geser setelah masa pemeraman. Stabilisasi MICP pada tanah terkontaminasi 5% batubara meningkatkan kuat geser sebesar 3 kali lipat sedangkan pada tanah terkontaminasi 10% dan 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser masing-masing sebesar 7 dan 15 kali lipat dibandingkan dengan tanah asli.

Kata Kunci: MICP; kuat geser; batubara; bacillus subtilis.

ABSTRACT

Microbially induced calcite precipitation (MICP) is a soil improvement technique using microorganisms that are able to change and improve mechanical and physical properties. In this study, the direct shear test with reference to the SNI 03-3420-1994 standard was used to determine the effect of calcite deposition on the shear strength behavior of coal-contaminated soils. Bacillus subtilis bacteria as much as 6% was added to soil contaminated with 5%, 10% and 15% coal. The bacteria used used a 3-day culture which was in the stationary phase. The results showed that the stabilization increase in the cohesion and internal shear angle as shear strength parameters after the curing period. MICP stabilization on 5% coal contaminated soil increased shear strength by 3 times, whereas on 10% and 15% contaminated soil there was increase in shear strength of 7 and 15 times than untreated soil.

Keywords: MICP; shear strength; coal; bacillus subtilis.

Copyright © Andi Marini Indriani, Gunaedy Utomo

This is an open access article under the: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PENDAHULUAN

Daerah bekas tambang batubara seringkali ditinggalkan begitu saja tanpa dikelola dengan baik sehingga menyebabkan kerusakan lingkungan yang sangat memprihatinkan [1]. Daerah bekas galian menyebabkan kontur tanah berupa lereng-lereng curam yang tidak tertutup oleh tanaman pelindung berpotensi besar mengalami erosi dan bahaya kelongsoran pada musim

hujan. Daerah bekas tambang yang masih meninggalkan sisa-sisa batubara menyebabkan tanah bersifat asam sehingga tanaman tidak mudah tumbuh untuk melindungi tanah dari erosi. Sehingga diperlukan metode yang tepat untuk meningkatkan kekuatan tanah untuk menjaga keamanan lereng dari bahaya kelongsoran [2].

Stabilisasi secara kimia telah banyak dilakukan untuk meningkatkan durabilitas tanah [3]. Pengendapan kalsit yang diinduksi secara mikroba (MICP) baru-baru ini mendapat banyak perhatian dari para peneliti teknik geoteknik di seluruh dunia [4]. MICP adalah teknik biologis yang digerakkan secara alami yang memanfaatkan metabolisme bakteri untuk membuat agen sementasi *in situ* yang dikenal sebagai kalsium karbonat atau kalsit [5]. Beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan bakteri sebagai bahan stabilisasi mengungkapkan keuntungan dan kelebihan bakteri sebagai bahan stabilisasi dibandingkan material lain [6]. Mujah, menyatakan penggunaan bakteri dengan umur kultur rendah dan konsentrasi cairan tinggi sebagai bio semen memberikan hasil yang lebih baik dari pada penggunaan semen (PC) untuk meningkatkan kekuatan tanah dan menurunkan permeabilitas [7]. Penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai bahan stabilisasi pada fase stasioner dapat meningkatkan kuat geser tanah hingga 7 kali lipat [1]. Penting untuk memperhatikan metode stabilisasi yang dipilih untuk mendapatkan metode yang terbaik sehingga terhindar dari kerugian [8].

Batubara yang mengandung sulfur diudara terbuka akan mengalami oksidasi yang jika bercampur dengan air akan menimbulkan air asam tambang atau yang dikenal dengan istilah *acid rock drainage* (ARD). ARD akan memberikan serangkaian dampak yang saling berkaitan, yaitu menurunnya pH, ketersediaan dan keseimbangan unsur hara dalam tanah terganggu, serta kelarutan unsur-unsur mikro yang umumnya merupakan unsur logam meningkat [9], itu sebabnya pemilihan mikroorganisme yang tepat dan sesuai dengan kondisi lingkungan tanah terkontaminasi batubara harus dilakukan dengan hati-hati. Metode pelaksanaan pekerjaan stabilisasi juga harus dilakukan hati-hati untuk menghindari kesalahan dan kerugian materi [10].

Bacillus subtilis merupakan bakteri berbentuk batang berukuran 0,5-2,5 x 1,2-10 mikron, tersusun dalam sepasang atau bentuk rantai, dimana silika meliputi seluruh permukaan sel. Dalam kondisi kritis mampu membentuk spora. Bakteri antagonis *Bacillus subtilis* dapat bertahan pada kondisi lingkungan tertentu, yaitu pada suhu -5°C sampai 75°C, dengan tingkat keasaman (pH) antara 2-8. Pada kondisi yang sesuai dan mendukung, populasinya akan menjadi dua kali banyaknya selama waktu tertentu. Waktu ini dikenal dengan waktu generasi atau waktu penggandaan, yang untuk *Bacillus subtilis* adalah 28,5 menit pada suhu 40°C [11]. Bakteri biasanya dibudidayakan secara *ex situ* dalam kondisi steril untuk memastikan produksi aktivitas urease yang konstan [12]. Setelah bakteri aktivitas urease tinggi dibudidayakan, MICP dapat dilakukan dengan menginduksi bakteri aktif urease konsentrasi tinggi yang ditempatkan di dalam tanah sebelum memasukan larutan sementasi.

METODE

Pada lokasi bekas tambang biasanya campuran antara batubara dan tanah tidak merata disemua tempat sehingga dalam penelitian ini dibuat beberapa variasi tanah yang dicampur batubara untuk melihat perilaku kuat geser akibat variasi kandungan batubara. Pasir dan batu bara diambil pada lokasi yang sama dengan cara konvensional menggunakan skop, selanjutnya material ditempatkan dalam karung sampel dan dibungkus dengan plastik untuk menjaga kondisi kadar air asli. Pasir dan batubara diambil dalam kondisi terpisah kemudian dicampurkan dengan perbandingan persentasi pasir dan batubara dibuat dalam 3 variasi campuran seperti

ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Variasi campuran Tanah dan Batubara

Variasi	Pasir (%)	Batubara (%)
I	95	5
II	90	10
III	85	15

Material batubara yang ditambahkan adalah yang lolos saringan #100. Jenis pasir yang digunakan adalah pasir bergradasi buruk atau SP menurut sistem klasifikasi USCS dengan persentasi partikel lolos saringan #200 sebanyak 9%. Untuk mengetahui karakteristik fisik tanah terkontaminasi batubara diperoleh data-data seperti disajikan dalam Tabel 2. Dan hasil pengujian sifat mekanis ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 2. Rekapitulasi Pemeriksaan Karakteristik Fisik Tanah Terkontaminasi Batubara

Test	Hasil			Unit
	Batubara (%)			
	5	10	15	
Basic Properties of Sampel Soil :				
<i>Specific Gravity (Gs)</i>	2.60	2.59	2.52	-
Analisa saringan				
a. Koefisien Keseragaman (Cu)	2.58	2.82	2.86	-
b. Koefisien Gradasi (Cc)	1.47	1.69	1.80	-

Tabel 3. Rekapitulasi Pemeriksaan Karakteristik Mekanis Tanah Terkontaminasi Batubara

Test	Hasil			Unit
	Batubara (%)			
	5	10	15	
Standard Proctor				
a. <i>Maximum Dry Density</i> , (γ_d)	1.66	1.74	1.77	g/cm^3
b. <i>Optimum Moisture Content</i> (OMC)	6.65	6.07	6.40	%
Direct Shear				
a. <i>Cohesion</i> (c)	17.0	10.1	5.8	kPa
b. <i>Internal Friction Angle</i> (ϕ)	31	33	36	$^\circ$

Persiapan Bakteri dan Larutan Sementasi

Bakteri penghasil urease yang digunakan adalah *Bacillus subtilis*, merupakan bakteri Gram-positif berbentuk batang yang membentuk spora dorman yang tahan panas. Biasanya ditemukan di dalam tanah (Piggot, 2009), Pada percobaan ini *Bacillus subtilis* dibudidayakan dalam media B4 yang mengandung Urea (20 g / L), Nutrient Broth (3 g / L), $NaHCO_3$ 2. (12 g / L), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 4. (14 g / L) dan NH_4Cl (10 g / L) dilarutkan dalam aquades. Larutan sementasi yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari urea 0,25 M dan kalsium klorida 0,25 M. *Bacillus subtilis* dibudidayakan dengan umur kultur 3 hari. Sebanyak 6% bakteri ditambahkan kedalam tanah terkontaminasi batubara.

Prosedur Stabilisasi Tanah

Umumnya dalam stabilisasi tanah menggunakan pengendapan calcite dari urease bakteri

menggunakan metode injeksi. Beberapa penelitian bahkan melakukan injeksi dua hingga tujuh kali untuk menjadikan tanah menjadi seperti *cemented soil*. Tetapi metode ini sebenarnya kurang efektif karena metode injeksi akan menyebabkan larutan sementasi menumpuk pada bagian permukaan sampel saja dan pori-pori tanah sudah terisi calcite akibat injeksi pertama akan menyebabkan larutan yang diinjeksikan berikutnya tidak akan dapat masuk kedalam pori-pori tanah yang lebih jauh. Karena itulah dalam penelitian ini larutan bakteri dan larutan sementasi dicampurkan dalam tanah dengan system pengadukan agar dapat tercampur merata pada setiap butiran tanah.

Pasir dan batubara dicampurkan terlebih dahulu dengan perbandingan prosentase yang telah ditetapkan. Kemudian larutan bakteri dan larutan sementasi ditambahkan dan diaduk kembali hingga tercampur rata. Material siap dicetak dalam cetakan dengan ukuran diameter 6 cm dan tinggi 2 cm. Proses pemeraman dan pengujian dilakukan pada umur 3, 7, 14 dan 28 hari.



(a) Sebelum Pemeraman

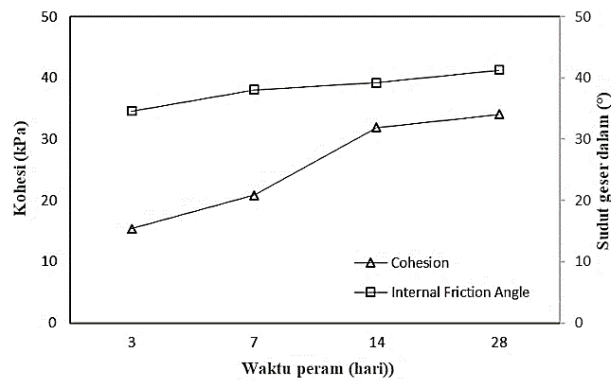
(b) Setelah Pemeraman 28 hari

Gambar 1. Sampel Pengujian Direct Shear

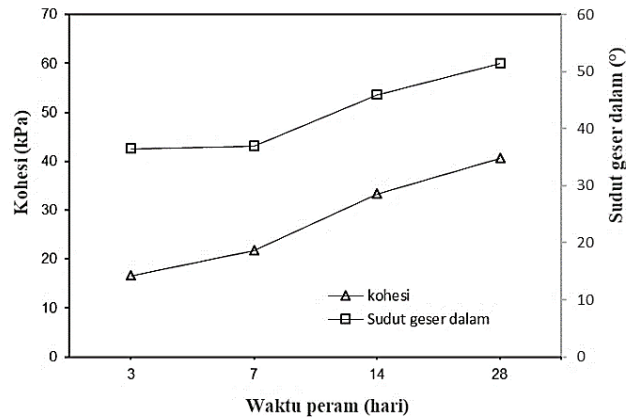
Tanah terkontaminasi batubara dicampur dan dipadatkan sesuai dengan berat isi kering maksimum dan kadar air optimum pada masing-masing komposisi. Pemadatan dilakukan menggunakan energi pemadatan yang sama dengan standard proctor yang mengacu pada ASTM D-698, yaitu dengan mengkonversi ukuran *mold* dan mengurangi jumlah tumbukan agar memperoleh nilai energi pemadatan yang relatif mendekati energi pemadatan yang diperoleh pada standard proctor. Setelah masa pemeraman yang direncanakan setiap sampel diuji dengan alat *direct shear* setiap pengujian diberikan beban sebesar 17.3 kPa, 34.6 kPa dan 52 kPa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian *direct shear* pada tanah variasi I menunjukkan terjadi peningkatan nilai kohesi dan nilai sudut geser dalam. Setelah masa peram 28 hari terjadi peningkatan nilai kohesi dari 17 kPa menjadi 34 kPa sedangkan nilai sudut geser semakin besar dari 31° menjadi 41° . Seperti ditampilkan dalam Gambar 2 terlihat nilai kohesi dan sudut geser dalam terus meningkat seiring dengan lama masa peram. Setelah parameter kohesi dan sudut geser dalam dimasukkan dalam persamaan kuat geser diperoleh nilai kuat geser sebesar 59 kPa atau meningkat 3 kali dibandingkan nilai kuat geser tanah yang tidak distabilisasi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan bakteri *Bacillus subtilis* memberikan efek yang baik terhadap peningkatan nilai kuat geser tanah

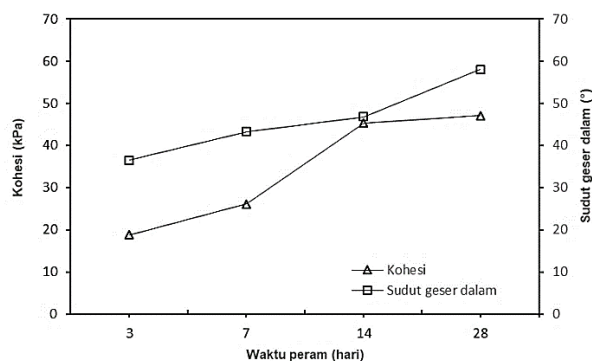


Gambar 2. Grafik Hubungan Kohesi, Sudut Geser Dalam dan Waktu Peram Tanah Variasi I



Gambar 3. Grafik Hubungan Kohesi, Sudut Geser Dalam dan Waktu Peram Tanah Variasi II

Pada tanah terkontaminasi 10% batubara atau tanah variasi II, parameter kuat geser juga meningkat setelah masa peram. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 3, pada masa peram 3 hari nilai kohesi dan sudut geser dalam sudah menunjukkan peningkatan, dari 10,1 kPa menjadi 16,6 kPa untuk kohesi dan untuk sudut geser dalam meningkat dari 33° menjadi 36°. Setelah masa peram 28 hari peningkatan yang terjadi semakin tinggi dimana nilai kohesi naik menjadi 40,6 kPa dan sudut geser dalam menjadi 51°. Kuat geser tanah terkontaminasi 10% batubara stabilisasi MICP meningkat dari 12,9 kPa menjadi 93,8 kPa atau sebesar 7 kali lipat.

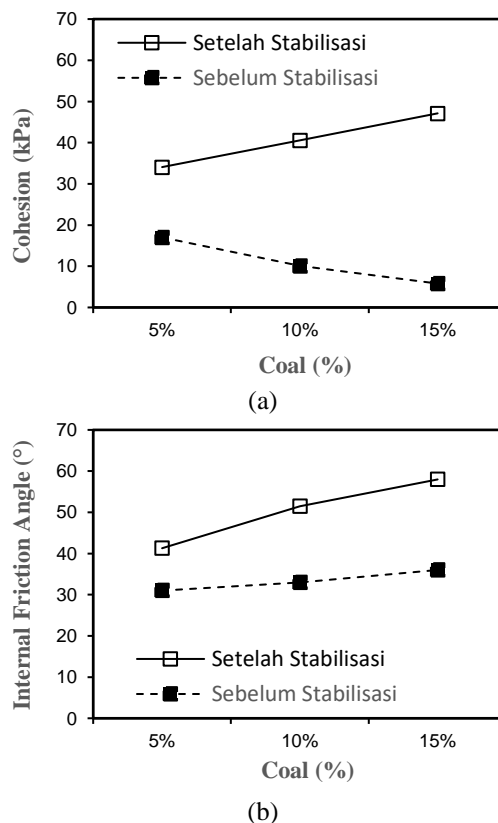


Gambar 4. Grafik Hubungan Kohesi, Sudut Geser Dalam dan Waktu Peram Tanah Variasi III

Dari Gambar 4 dapat terlihat bahwa penambahan bakteri *Bacillus subtilis* umur kultur 3 hari sebanyak 6% pada tanah Variasi III meningkatkan parameter kuat geser tanah. Nilai kohesi dan sudut geser dalam terus meningkat seiring lama waktu pemeraman. Walaupun

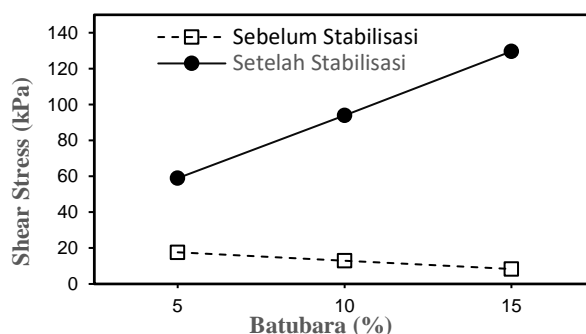
diaplikasikan pada tanah terkontaminasi batubara dengan variasi campuran yang berbeda tetapi pola perubahan parameter kuat geser cenderung sama dimana semakin lama masa peram, peningkatan parameter kuat geser menunjukkan tren yang positif. Peningkatan persentase batubara ternyata memberikan hasil yang semakin baik terhadap perubahan kuat geser tanah, dimana pada tanah terkontaminasi 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser sebesar 15 kali lipat yaitu dari 8,3 kPa menjadi 129,6 kPa.

Untuk dapat membandingkan perubahan parameter kuat geser tanah berdasarkan persentase batubara sebelum dan sesudah proses stabilisasi MICP maka dapat dilihat pada Gambar 5. Sebelum distabilisasi nilai kohesi cenderung menurun seiring peningkatan persentase batubara seperti ditunjukkan pada Gambar 5a, tetapi setelah distabilisasi MICP nilai kohesi justru meningkat dan semakin tinggi pada penambahan 15% batubara. Jika sebelum distabilisasi nilai kohesi tanah variasi III adalah sebesar 5 kPa tetapi setelah distabilisasi nilai kohesi meningkat menjadi 47 kPa. Hal yang sama juga terjadi pada perubahan nilai sudut geser langsung, dimana nilai sudut geser langsung tanah variasi III lebih tinggi dibandingkan dengan tanah variasi I dan variasi II seperti ditunjukkan pada Gambar 5b.



Gambar 5 a. Grafik Hubungan Kohesi dengan Prosentasi Batubara
b. Grafik Hubungan Sudut Geser dengan Prosentasi Batubara

Untuk dapat mengetahui perubahan kuat geser dari masing-masing variasi tanah terkontaminasi batubara maka dilihat pada Gambar 6. Sebelum dilakukan proses stabilisasi, kuat geser tanah cenderung mengalami penurunan dengan semakin bertambahnya persentase batubara tetapi setelah distabilisasi kuat geser tanah justru semakin meningkat dengan bertambahnya persentase batubara. Pada tanah terkontaminasi 15% batubara, kuat geser bahkan meningkat hingga 129,6 kPa.



Gambar 6 Grafik Hubungan Kuat Geser dengan Prosentasi Batubara

Penambahan partikel halus dari batubara berpengaruh terhadap pengendapan CaCO_3 dan perubahan nilai parameter kuat geser seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. Penambahan batubara ukuran butiran ≤ 0.149 mm mulai dari 5%, 10% dan 15% terus meningkatkan nilai parameter Shear stress. Stabilisasi MICP pada tanah terkontaminasi 5% batubara terjadi peningkatan kuat geser sebesar 3 kali, sedangkan pada tanah terkontaminasi 10% dan 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser masing-masing sebesar 7 kali dan 15 kali lipat.

Menurut Mahawish penambahan partikel halus sampai dengan 25%, meningkatkan pengendapan CaCO_3 dan nilai UCS, tetapi jika penambahan partikel halus lebih dari 25% maka pengendapan CaCO_3 dan nilai UCS akan kembali menurun (Mahawish, et al :2017).

Batubara merupakan batuan yang berasal dari pelapukan tumbuhan (seperti alga dan tanaman lainnya) sehingga kandungan organikanya sangat tinggi. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa terdapat pengaruh yang cukup signifikan terhadap proses MICP pada tanah yang memiliki kandungan organik seperti yang ditunjukkan dalam penelitian Oliveira, et.al (2017). Oliveira melakukan pengujian pada beberapa jenis tanah dengan menambahkan urease enzyme dari *Canavalia ensiformis* (jack bean) dalam bentuk bubuk dan mendapatkan hasil bahwa proses MICP pada tanah yang memiliki kandungan organik memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanah yang murni pasir.

Hasil ini sejalan dengan pengujian yang dilakukan dimana terjadi penambahan kadar organik dari batubara meningkatkan nilai parameter Shear stress tanah terkontaminasi batubara terstabilisasi MICP dengan bakteri *Bacillus Subtilis* dibandingkan dengan tanah terkontaminasi batubara yang tidak distabilisasi.

KESIMPULAN

Penambahan partikel halus dari batubara berpengaruh terhadap pengendapan CaCO_3 dan perubahan nilai parameter Shear stress. Penambahan batubara ukuran butiran ≤ 0.149 mm mulai dari 5%, 10% dan 15% terus meningkatkan nilai parameter Shear stress. Stabilisasi MICP pada tanah terkontaminasi 5% batubara terjadi peningkatan kuat geser sebesar 3 kali, sedangkan pada tanah terkontaminasi 10% dan 15% batubara terjadi peningkatan kuat geser masing-masing sebesar 7 kali dan 15 kali lipat dibandingkan tanah yang tidak di stabilisasi. Perubahan nilai koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien gradasi (C_c) yang semakin besar seiring peningkatan persentasi batubara hingga 15% menandakan gradasi butiran semakin baik. Batubara merupakan batuan yang berasal dari pelapukan tumbuhan (seperti alga dan tanaman lainnya) sehingga kandungan organikanya sangat tinggi. penambahan kadar organik dari batubara meningkatkan nilai parameter Shear stress tanah terkontaminasi batubara terstabilisasi MICP dengan bakteri *Bacillus Subtilis* dibandingkan dengan tanah terkontaminasi batubara yang tidak distabilisasi.

REFERENSI

- [1] A. M. Indriani, T. Harianto, A. R. Djameluddin, and A. Arsyad, “*Study on Biocementation of Ex-coal Mining Soil as a Road Construction Material,*” 2021, pp. 193–201.
- [2] A. M. Indriani, Gunaedy. U. M. N. Fadhillah, “*Pengaruh Semen Pada Tanah Lempung Plastisitas Rendah Terhadap Nilai,*” *J. Ilm. Tek. Sipil TRANSUKMA*, no. Vol. 4 No. 1 (2021):, pp. 23–32, 2021.
- [3] A. Oktavia, I. Adha, and S. Setyanto, “*Analisis Ionic Soil Stabilizer (Iss 2500) Terhadap Nilai Durabilitas Tanah Lempung Plastisitas Rendah Pada Perkerasan Jalan,*” *Cived*, vol. 8, no. 2, p. 94, 2021, doi: 10.24036/cived.v8i2.112885.
- [4] L. Cheng and M. A. Shahin, *Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) for Soil Stabilization*. Springer Singapore, 2019.
- [5] A. M. Indriani, T. Harianto, A. R. Djameluddin, and A. Arsyad, “*Bioremediation Of Coal Contaminated Soil As The Road Foundations Layer,*” *Int. J. GEOMATE*, vol. 21, no. 84, pp. 76–84, Aug. 2021, doi: 10.21660/2021.84.j2124.
- [6] C. S. Tang *et al.*, “*Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review,*” *Environ. Earth Sci.*, vol. 79, no. 5, 2020, doi: 10.1007/s12665-020-8840-9.
- [7] D. Mujah, L. Cheng, and M. A. Shahin, “*Microstructural and Geomechanical Study on Biocemented Sand for Optimization of MICP Process,*” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 4, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002660.
- [8] A. Marini and I. Agus, “*Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Dalam Menggunakan Data CPT dan N-SPT ,*” *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Universitas Mulawarman* pp. 1–6, 2017.
- [9] E. WIDYATI, “*The use of sulphate-reducing bacteria in bioremediation of ex-coal mining soil,*” *Biodiversitas, J. Biol. Divers.*, vol. 8, no. 4, pp. 283–286, 2007, doi: 10.13057/biodiv/d080408.
- [10] A. M. Indriani, G. Utomo, and M. Rizqy, “*Konstruksi Dengan Metode Earned Value Analysis,*” *Geo Econ.*, vol. 13, no. September 2022, pp. 128–137, 2022.
- [11] N. Djaenuddin and A. Muis, “*Karakteristik Bakteri Antagonis Bacillus subtilis Dan Potensinya Sebagai Agens Pengendali Hayati Penyakit Tanaman,*” *Pros. Semin. Nas. Serealia*, pp. 489–494, 2015.
- [12] W. Mwandira, K. Nakashima, and S. Kawasaki, “*Bioremediation of lead-contaminated mine waste by Pararhodobacter sp. based on the microbially induced calcium carbonate precipitation technique and its effects on strength of coarse and fine grained sand,*” *Ecol. Eng.*, vol. 109, no. September, pp. 57–64, 2017, doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.09.011.