

PENGUNAAN METODE MICP DAN BIOPOLIMER DALAM REKAYASA PASIR YANG DIINDUKSI MIKROBA

¹Rully Savitri Nurvita

¹Teknik Sipil, Universitas Langlangbuana

¹Korespondensi : rullysavitrin@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan metode Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dan biopolimer yang diinduksi mikroba dalam rekayasa pasir. Tujuan utama adalah untuk meningkatkan sifat mekanik dan hidrolis pasir melalui aplikasi teknik bioteknologi ini. Penelitian ini dilakukan dengan penerapan Biopolimer dan MICP pada sampel pasir dan menganalisis apakah ada perubahan yang terjadi pada sifat geotekniknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode MICP secara signifikan meningkatkan nilai kuat geser serta mengurangi permeabilitas pasir, biopolimer yang diinduksi oleh mikroba dapat meningkatkan stabilitas dan mampu memperbaiki sifat dan karakteristik pasir. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwasanya kedua metode tersebut memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam proyek infrastruktur sipil, seperti peningkatan kekuatan pada tanah, konstruksi untuk jalan, dan proses memadatkan tanah, memberikan solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci : *Presipitasi Kalsit yang Diinduksi Mikroba (MICP), Biopolimer, Kekuatan Geser, Rekayasa Pasir, Sifat Geoteknik.*

ABSTRACT

This research explores the use of Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) and microbially induced biopolymers in sand engineering. The primary objective is to enhance the mechanical and hydraulic properties of sand through the application of these biotechnological techniques. The study was conducted by applying biopolymers and MICP to sand samples and analyzing any changes in their geotechnical properties. The results indicate that the MICP method significantly increases shear strength and reduces the permeability of sand, while microbially induced biopolymers can enhance stability and improve the properties and characteristics of the sand. The conclusion of this research is that both methods have great potential for application in civil infrastructure projects, such as soil strengthening, road construction, and soil compaction processes, providing environmentally friendly and sustainable solutions.

Keyword : *Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), Biopolymers, Shear Strength, Sand Engineering, Geotechnical Properties.*

PENDAHULUAN

Rekayasa geoteknik telah lama mencari solusi inovatif untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik dan hidrolis material tanah, khususnya pasir. Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah penggunaan metode Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dan biopolimer yang diinduksi mikroba. Metode ini menawarkan pendekatan yang ramah

lingkungan dan berkelanjutan dalam memperbaiki kualitas pasir untuk berbagai aplikasi teknik sipil.

Metode MICP melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk menginduksi presipitasi kalsit dalam matriks pasir. Proses ini meningkatkan kekuatan geser dan mengurangi permeabilitas pasir, menjadikannya lebih stabil dan tahan terhadap erosi. Namun, biopolimer yang diinduksi

mikroba bekerja dengan cara meningkatkan stabilitasi agregat pasir dan memperbaiki sifat hidroliknya. Kedua metode ini tidak hanya efektif tetapi juga menawarkan solusi yang lebih hijau dibandingkan dengan teknik konvensional.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh metode MICP dan biopolimer yang diinduksi dengan mikroba dan meneliti bagaimana pengaruhnya terhadap sifat-sifat geoteknik pasir. Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan kedua metode tersebut pada sampel pasir dan menganalisis perubahan yang terjadi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang potensi aplikasi praktis dari kedua metode ini dalam berbagai proyek rekayasa sipil.

Dengan meningkatnya kebutuhan akan solusi rekayasa yang berkelanjutan, metode MICP dan biopolimer yang diinduksi mikroba menawarkan alternatif yang menjanjikan. Penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pemahaman ilmiah tentang mekanisme kerja kedua metode tersebut tetapi juga membuka peluang untuk penerapan praktis yang lebih luas dalam bidang rekayasa sipil, seperti perbaikan tanah, konstruksi jalan, dan pemadatan tanah. Didukung oleh teori dan hasil penelitian sebelumnya [1].

Dalam beberapa dekade terakhir, tantangan dalam rekayasa geoteknik semakin kompleks seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan infrastruktur yang lebih kuat dan tahan lama. Metode konvensional sering kali tidak cukup untuk mengatasi masalah seperti erosi, stabilitas tanah, dan kekuatan struktural. Oleh

karena itu, para peneliti terus mencari solusi inovatif yang tidak hanya efektif tetapi juga ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penggunaan metode Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) dan biopolimer yang diinduksi mikroba. Metode ini memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk mengubah sifat fisik dan kimia material tanah, khususnya pasir.

Proses MICP dan biopolimer yang diinduksi mikroba menawarkan berbagai keuntungan dibandingkan metode tradisional. Selain meningkatkan kekuatan dan stabilitas material, metode ini juga mengurangi dampak lingkungan karena menggunakan bahan-bahan alami dan mikroorganisme yang tidak berbahaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kedua metode tersebut dalam meningkatkan sifat-sifat geoteknik pasir. Dengan memahami mekanisme kerja dan potensi aplikasi yang praktis dari metode MICP dan biopolimer yang diinduksi mikroba, diharapkan akan ditemukan solusi yang lebih berkelanjutan dan efisien untuk berbagai tantangan dalam rekayasa sipil.

TINJAUAN PUSTAKA

Dengan tema Penggunaan Metode MICP dan Biopolimer dalam Rekayasa Pasir yang Terinduksi oleh Mikroba ini mempunyai fokus pada kedua cara kerja utama yang diharapkan dapat memperbaiki sifat dan karakteristik pasir: Biopolimer dan MICP yang Diinduksi oleh Mikroba.

Pada pelaksanaan rekayasa sipil geoteknik, Biopolimer dan MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) yang diinduksi oleh mikroba merupakan dua cara kerja utama yang digunakan untuk dapat memperbaiki sifat permeabilitas pasir. Didukung dengan teori dan hasil penelitian sebelumnya [2]. Penelitian telah membuktikan bahwa MICP sangat efektif dalam memperbaiki sifat mekanis dari bermacam jenis tanah yang berbeda, termasuk pasir. Penelitian ini menekankan bagaimana kemampuan MICP dalam peningkatan kuat geser dan dapat menghilangkan sifat permeabilitas pada pasir, menjadi metode yang menarik untuk di aplikasikan pada rekayasa geoteknik.

Induksi biopolimer oleh mikroba adalah aktivitas mikroba dan pendekatan yang inovatif dalam modifikasi tanah [3]. Peneliti terdahulu telah meneliti bagaimana menggunakan mikroorganisme untuk menghasilkan biopolimer yang mampu mengikat partikel-partikel tanah, meningkatkan stabilitasi dan dapat mengurangi permeabilitas, penelitian ini menawarkan keuntungan dari segi keberlanjutan dan ramah lingkungan karena dapat memanfaatkan mekanisme secara alami mikroba [4]. Tetapi, analisis di bidang ini pun masih dalam tahap perkembangan, juga sangat dibutuhkan penelitian lanjutan agar memaksimalkan strain mikroba dan memformulasi nutrisinya guna pencapaian kinerja yang efektif. Ada beberapa penelitian yang sudah membandingkan bagaimana kemampuan biopolimer dan MICP yang

terinduksi oleh mikroba didalam konteks perbaikan tanah. Contohnya, peneliti sebelumnya yang melakukan analisis menyeluruh dan membandingkan kedua metode tersebut serta penerapannya dalam aplikasi rekayasa sipil geoteknik [5]. Dan juga, Menginvestigasi bagaimana menggunakan kombinasi kedua metode ureolitik dan enzimatik dalam mempresipitasikan kalsium karbonat (CaCO_3) dengan lebih berfokus pada potensi sinergi antara berbagai pendekatan tersebut [6].

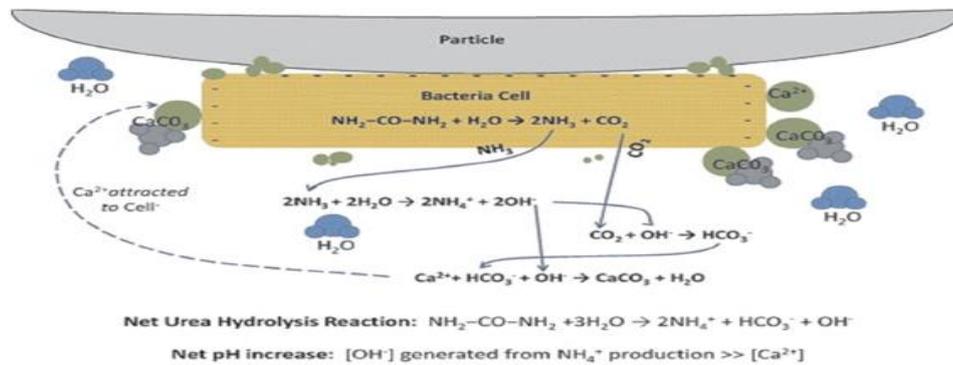
Secara garis besarnya, baik MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) ataupun biopolimer yang terinduksi oleh mikroba memiliki berbagai metode yang mumpuni dalam peningkatan sifat rekayasa geoteknik pasir [7]. Meskipun MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) merupakan cara yang cukup mumpuni dalam proses presipitasi kalsium karbonat, biopolimer yang terinduksi oleh mikroba adalah inovasi terbaru yang memiliki potensi memberikan kebermanfaatan bagi lingkungan. analisis dan penelitian yang selanjutnya sangat dibutuhkan agar dapat mudah dimengerti dan menyempurnakan teknik ini agar dapat diterapkan secara praktis dalam rekayasa geoteknik.

METODE PENELITIAN

Analisis ini menggunakan metode eksperimental dalam menilai dampak dari proses MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) dan biopolimer yang terinduksi oleh mikroba dan bagaimana sifat-

sifat mekani dan hidrolis terhadap pasir. contoh agregat pasir diambil dari beberapa lokasi lalu mempersiapkan prosedur penelitiannya yang sesuai standar di

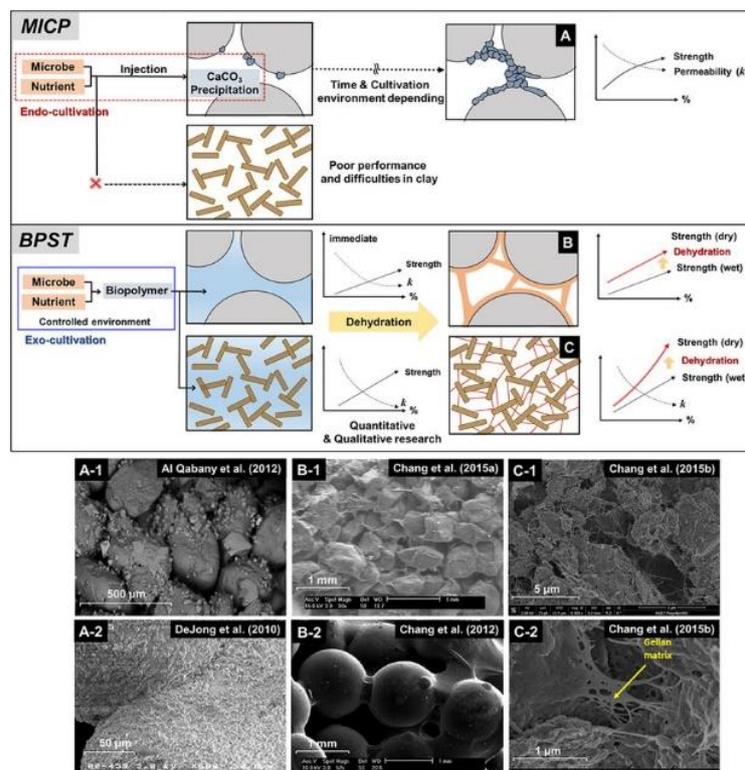
laboratorium. Kemudian, contoh agregat pasir tersebut dipisahkan jadi beberapa grup perlakuan.



Gambar 1 : Gambaran Proses Diinduksi biopolimer oleh Mikroba pada sampel Pasir [8]

grup yang kesatu menjalani perlakuan dengan proses MICP, di mana larutan kimia yang mengandung ion kalsium (Ca^{2+}) dan karbonat (CO_3^{2-}) disuntikkan ke dalam pasir untuk

memicu pembentukan kalsium karbonat. Pada proses ini diawasi dengan ketat untuk memastikan distribusi larutan presipitasi yang merata di dalam sampel pasir.[8]

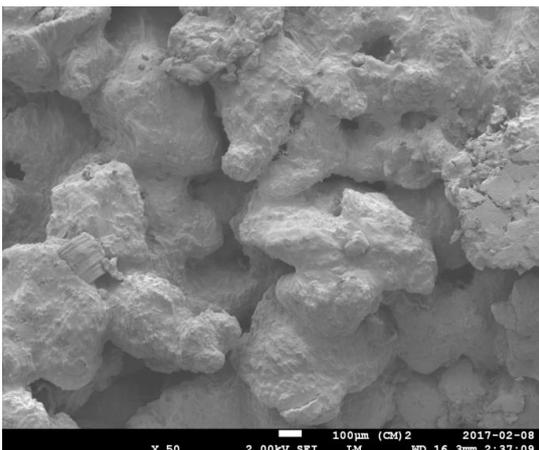


Gambar 2 : Gambaran Proses Pembentukan Induksi Biopolimer oleh Mikroba pada Pasir [9]

Kemudian kelompok yang kedua mendapatkan perlakuan dengan aplikasi biopolimer yang diinduksi secara mikroba.

Mikroba yang diaktivasi diperkenalkan ke dalam pasir bersama dengan larutan nutrisi dan biopolimer. Proses ini memungkinkan

mikroba berinteraksi dengan pasir dan memicu reaksi kimia yang menghasilkan agregat yang lebih kuat. Selama perlakuan, parameter seperti suhu, kelembaban, dan pH dijaga agar tetap maksimal untuk aktivitas mikroba. Setelah perlakuan tersebut, sampel pasir diinvestigasikan untuk melihat perbedaan perubahan pada struktural mikro dan kekuatan gesernya, permeabilitas, dan sifat hidraulis lainnya. Pengujian dilakukan menggunakan metode standar dalam rekayasa geoteknik, seperti uji geser langsung, uji permeabilitas, dan analisis mikrostruktur menggunakan alat mikroskop optik dan SEM (Scanning Electron Microscope). Yang dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3: Modifikasi Struktur Mikro Pasir setelah scanning mikroskop elektron (SEM), pasir yang diolah dengan MICP menggunakan metode pra-pencampuran [10].

Distribusi kristal homogen di sepanjang pasir. Spesimen diamati pada larutan sementasi yang lebih rendah konsentrasi.[11]

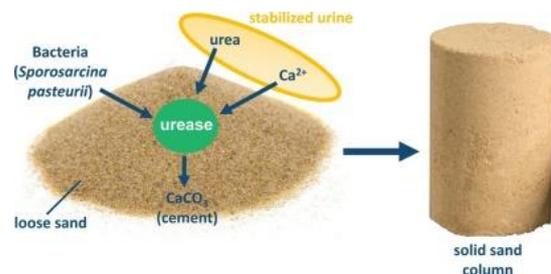
Hasilnya menunjukkan bahwa MICP bekerja lebih baik pada derajat saturasi air yang lebih

rendah, yaitu 20%, sebagai kalsit kristal terbentuk di lokasi efektif partikel kontak partikel.

Data yang diperoleh dari eksperimen ini kemudian dianalisis secara statistik untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antara sampel perlakuan dan control.

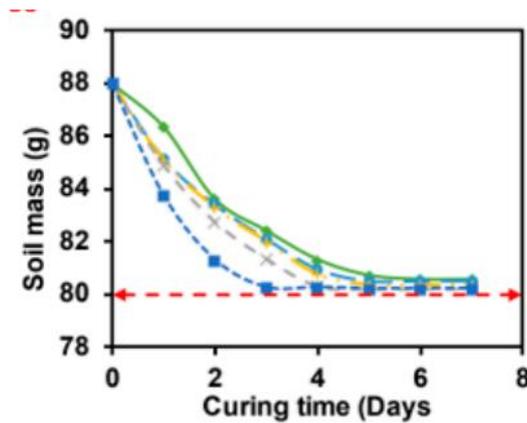
Hilangnya kelembaban secara signifikan mengakibatkan pengembangan kekuatan.

pasir yang dimodifikasi secara biopolimer. Oleh karena itu, analisis tambahan dilakukan untuk mengkaji lebih lanjut dampak pencegahan hilangnya kelembaban dengan hari pengawetan terhadap kekuatan.



Gambar 4 : Diagram Proses Pembentukan Kalsium Karbonat (MICP) pada Pasir [12].

Gambar 5 menunjukkan sedikit gambaran film biopolimer natrium alginat dan pektin yang diamati pada permukaan dan di dalam ruang pori butiran pasir. Ikatan antar butiran pasir diamati terurai setelah terpapar suhu 110°C, meninggalkan residu film biopolimer tipis di sekitar butiran pasir, yang mengakibatkan penurunan UCS dibandingkan dengan spesimen yang diawetkan pada suhu kamar 25°C.



Gambar 5 : Perubahan Kekuatan Geser Pasir setelah Perlakuan Biopolimer yang Diinduksi Mikroba
[13]

HASIL DAN PEMBAHASAN

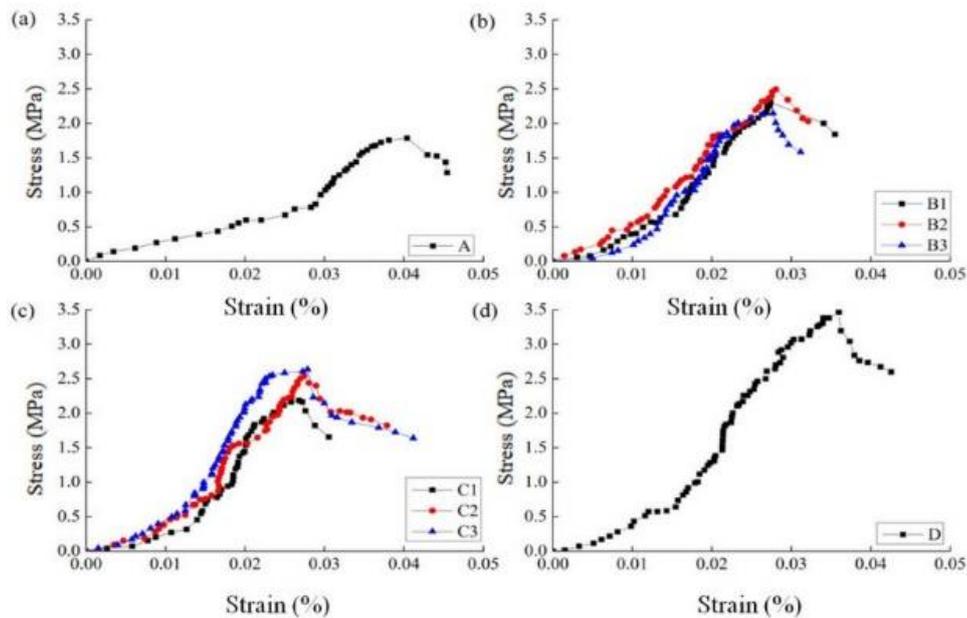
Ternyata cara kerja (MICP), biopolimer dan presipitasi kalsium karbonat yang terinduksi oleh mikroba ini sudah terbukti sebagai pendekatan yang sangat menarik dalam rekayasa sipil geoteknik modern untuk peningkatan kekuatan agregat pasir. Didalam analisis ini, kami melaksanakan beberapa eksperimental untuk menilai bagaimana dampak dari kedua mode ini terhadap sifat mekanis dan hidrolis pada agregat pasir, dan juga membandingkan apa keunggulan dan kelemahannya.

Hasil

Dari hasil penelitian menjelaskan bahwasanya pengaplikasian metode MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) dan biopolymer ini secara signifikan dapat meningkatkan nilai kuat geser pasir. Adapun bagaimana proses pembentukan kalsium karbonat yang menyebabkan butiran pasir tersebut saling mengikat, mampu

meningkatkan nilai konsistensi dan kekuatan geser pasir. Dan juga, metode MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) ini mampu mengurangi permeabilitas agregat pasir secara signifikan dengan cara mengisi pori-pori agregat dengan kalsium karbonat, sehingga dapat memperlambat aliran air melalui pasir[14].

Namun sebaliknya, justru pengaplikasian biopolimer yang terinduksi oleh mikroba lebih cenderung menambah stabilitas butiran pasir. Walaupun peningkatan kuat gesernya tersebut tidak sama besar dengan yang dihasilkan oleh MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), metode biopolimer ini sangat efisien dalam memperkuat butiran pasir juga dapat mengurangi risiko terjadinya erosi. Tetapi, dampaknya pada permeabilitas pasir tidak sekuat MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), bahkan dari banyak sampel tersebut mengidentifikasi adanya kebocoran air yang cenderung meningkat.



Gambar 6 : Grafik regangan-tegangan pasir dipadatkan dengan bermacam komposisi larutan nutrisi. regangan-tegangan untuk kel A (a); regangan-tegangan untuk kel B (b); regangan-tegangan untuk kel C (c); regangan-tegangan untuk kel D (d) [15].

Grafik regangan-tegangan dari contoh pasir yg telah padat dengan bermacam komposisi dari larutan nutrisi dapat dilihat pada Gambar 6. Baik menggunakan larutan nutrisi dasar maupun gabungan, kurva regangan-tegangan pada kolom pasir setelah pematatan memperlihatkan adanya pola yang serupa. Dimana sebelum mencapai tegangan di puncak, tegangan ini meningkat bersamaan dengan bertambahnya nilai regangan. Laju penambahan pada kolom pasir yang dipadatkan dengan campuran nutrisi. Laju pertumbuhan dengan campuran nutrisi gabungan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran nutrisi dasar. Setelah mencapai tegangan puncak, regangan terus meningkat sementara tegangan perlahan menurun, memperlihatkan ciri khas keruntuhan tiba tiba pada kolom pasir.

Pembahasan

Penggunaan Biopolimer dan MICP yang diinduksi oleh mikroba telah memperlihatkan kemampuan dalam peningkatan sifat geoteknik pada pasir. Metode MICP ini ternyata sangat efektif dan efisien dalam peningkatan kuat geser dengan mengurangi permeabilitas pasir, meskipun biopolimer mampu menambah stabilitas dari agregat Tetapi, perlu diingat bahwa ada dampak dari kedua cara kerja ini yang bermacam macam tergantung daripada banyaknya komposisi agregat pasir, bagaimana keadaan lingkungan sekitar, dan lainnya.

Aplikasi yang efektif dari metode ini juga data dipertimbangkan apa dan bagaimana keperluan detail dari proyek rekeyasa konstruksi tersebut. Misalnya, MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) akan sangat tepat untuk proyek konstruksi yang memprioritaskan ketahanan dan kekuatan terhadap erosi, kemudian biopolimer

bisa menjadi pilihan yang sangat tepat dalam pengaplikasian pada proyek dan memerlukan pendekatan berkelanjutan dan lebih ramah lingkungan.

Untuk penelitian selanjutnya, diperlukan analisis lebih lanjut untuk lebih mengerti bagaimana metode kerja dan memaksimalkan parameter-parameter dari kedua cara kerja tersebut. sehingga, aplikasi yang efisien dari Biopolimer dan MICP yang diinduksi oleh mikroba dalam proyek rekayasa geoteknik dapat menjadi lebih efektif dan dapat memberikan kontribusi yang positif untuk rekayasa infrastruktur yang andal dan berkesinambungan.

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa cara kerja biopolimer dan MICP yang terinduksi oleh mikroba ini sangat efektif dalam meningkatkan kekuatan dan permeabilitas pasir dengan bermacam aplikasi proyek teknik sipil. Proses MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) secara substansial dapat meningkatkan kekuatan geser pasir dan mampu mengurangi permeabilitasnya, sehingga sangat efektif dalam penambah kestabilan dan daya ketahanan terhadap bahaya erosi. Biopolymer yang terinduksi oleh mikroba lebih meningkatkan kestabilan agregat pasir, walaupun memiliki kecenderungan terhadap permeabilitas yang beraneka ragam.

Dalam memilih kedua metode ini bergantung dari tujuan yang lebih spesifik dari proyek konstruksi dan tergantung dari factor lain seperti lingkungan dan bagaimana keadaan

tanah sekitar. Oleh karena itu, Biopolimer dan MICP yang terinduksi oleh mikroba dapat jadi salah satu jalan keluar yang efisien, efektif, fleksibel dan berkesinambungan untuk keperluan rekayasa konstruksi geoteknik, penelitian ini juga berkontribusi pada rekayasa infrastruktur yang lebih andal dan berkesinambungan di masa depan.

Kelebihannya:

Dengan menggunakan kedua metode eksperimen memungkinkan pengujian yang lebih mendalam dan akurat terhadap efek MICP dan biopolimer yang diinduksi mikroba pada sifat geoteknik pasir. Kombinasi dari kedua metode ini memberikan pemahaman yang lebih luas tentang potensi mereka dalam proyek geoteknik. Pemilihan literatur yang komprehensif juga menyediakan dasar teoretis yang kuat untuk perkembangan penelitian ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan teknologi geoteknik yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kekurangannya:

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan dalam hal menggeneralisasikan hasil karena hanya berfokus pada eksperimen di laboratorium dan mungkin tidak mencakup semua kondisi di lapangan. Variabel seperti karakteristik tanah dan kondisi lingkungan setempat dapat mempengaruhi hasil penelitian dan membatasi penerapannya di lapangan. Kompleksitas interaksi antara mikroba dan tanah mungkin belum sepenuhnya dipahami, sehingga penelitian lebih lanjut sangat diperlukan.

Saran kepada Peneliti Selanjutnya:

Pengujian dan penerapan metode biopolimer dan MICP yang terinduksi oleh mikroba dapat diaplikasikan pada konstruksi geoteknik nyata.

Diharapkan ada analisis lanjutan untuk mengklasifikasikan dan mengaplikasikan secara spesifik dilapangan serta mengkaji bagaimana kinerja cara kerja ini dalam skala yang lebih besar. Dapat menyempurnakan penelitian Biopolimer dan MICP yang terinduksi oleh mikroba, termasuk dalam memilih mikroba yang efektif dalam penelitian selanjutnya, memformulasikan nutrisi yang ideal, dengan kondisi lingkungan mendukung sehingga mendapatkan hasil yang optimal. Dapat mengembangkan teknologi lainnya, seperti monitoring pasca-perlakuan dan teknik injeksi. Studi lanjutan untuk penyempurnaan model numerik yang mampu memperkirakan bagaimana karakteristik pasir setelah dapat perlakuan biopolimer dan MICP yang terinduksi oleh mikroba, serta menginvestigasikan keberlanjutan tentang hasil penelitian dari interaksi mikroba dan agregat pasir dalam skala kecil. Dengan penerapan yang tepat dan keberlanjutan, diharapkan cara kerja ini menjadi salah satu alternatif dan jalan keluar yang inovatif, efektif, efisien dan keberkelanjutan dalam peningkatan sifat dan karakteristik agregat pasir, dengan pengaruh yang positif untuk keberlanjutan rekayasa konstruksi geoteknik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Fu, A. C. Saracho, and S. K. Haigh, "Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review," *Biogeotechnics*, vol. 1, no. 1, p. 100002, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.bgtech.2023.100002.
- [2] R. Shahrokhi-Shahraki, S. M. A. Zomorodian, A. Niazi, and B. C. Okelly, "Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, vol. 168, no. 3, pp. 217–230, Aug. 2015, doi: 10.1680/grim.14.00001.
- [3] V. S. Whiffin, L. A. van Paassen, and M. P. Harkes, "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique," *Geomicrobiol J*, vol. 24, no. 5, pp. 417–423, Jul. 2007, doi: 10.1080/01490450701436505.
- [4] E. G. Lauchnor, L. N. Schultz, S. Bugni, A. C. Mitchell, A. B. Cunningham, and R. Gerlach, "Bacterially induced calcium carbonate precipitation and strontium coprecipitation in a porous media flow system," *Environ Sci Technol*, vol. 47, no. 3, pp. 1557–1564, Feb. 2013, doi: 10.1021/es304240y.
- [5] J. Zhang, X. Shi, X. Chen, X. Huo, and Z. Yu, "Microbial-Induced Carbonate Precipitation: A Review on Influencing Factors and Applications," 2021, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2021/9974027.
- [6] N.-J. Jiang, H. Yoshioka, K. Yamamoto, and K. Soga, "Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP)," *Ecol Eng*, vol. 90, pp. 96–104, 2016.
- [7] N. K. Dhama, M. S. Reddy, and M. S. Mukherjee, "Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: A review," 2013, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmicb.2013.00314.
- [8] M. S. Carter, M. J. Tuttle, J. A. Mancini, R. Martineau, C. S. Hung, and M. K. Gupta, "Microbially

- Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Sporosarcina pasteurii*: a Case Study in Optimizing Biological CaCO₃ Precipitation,” Aug. 01, 2023, *American Society for Microbiology*. doi: 10.1128/aem.01794-22.
- [9] I. Chang *et al.*, “Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices,” Sep. 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.trgeo.2020.100385.
- [10] F.-Z. Haouzi and B. Courcelles, “Major applications of MICP sand treatment at multi-scale levels: A review.”
- [11] A. Al Qabany and K. Soga, “Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils,” in *Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print 2013*, ICE Publishing, 2014, pp. 107–115.
- [12] J. Henze and D. G. Randall, “Microbial induced calcium carbonate precipitation at elevated pH values (> 11) using *Sporosarcina pasteurii*,” *J Environ Chem Eng*, vol. 6, no. 4, pp. 5008–5013, 2018.
- [13] K. Lemboye and A. Almajed, “Effect of Varying Curing Conditions on the Strength of Biopolymer Modified Sand,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/polym15071678.
- [14] S. Liang, X. Xiao, Z. Li, and D. Feng, “Effect of Nutrient Solution Composition on Bio-Cemented Sand,” *Crystals (Basel)*, vol. 11, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/cryst11121572.