

PENERAPAN ENZYME-INDUCED CARBONATE PRECIPITATION (EICP) DALAM STABILISASI PASIR PANTAI MANGROVE KABUPATEN SERDANG BEDAGAI

Muhammad Qarinur^{1*}, Ernesto Maringan Ramot Silitonga², Heriansyah Putra³, Baiq Heny Sulistiawati⁴, Aiun Hayatu Rabinah⁵, dan Faraz Ayudhya⁶

^{1*}Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Psr.V, Medan
e-mail: m.qarinur@unimed.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Psr.V, Medan
e-mail: ernestosilitonga@unimed.ac.id

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Jl. Raya Dramaga, Bogor
e-mail: heriansyahptr@apps.ipb.ac.id

⁴Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof. H. Soedarto, S.H. Tembalang, Semarang
e-mail: baiq.heny@polines.ac.id

⁵Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Semarang, Jl. Prof. H. Soedarto, S.H. Tembalang, Semarang
e-mail: aiun.hayatu@polines.ac.id

⁶Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Negeri Medan, Jl. Willem Iskandar Psr.V, Medan
e-mail: farazayudhya@mhs.unimed.ac.id

ABSTRAK

Kawasan Pantai Mangrove dikenal sebagai salah satu destinasi wisata alam yang menawarkan keindahan ekosistem pesisir serta potensi edukasi lingkungan di Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara. Akan tetapi, kondisi tanah di wilayah ini umumnya tersusun atas pasir lepas yang rentan terhadap abrasi dan kegagalan struktural, termasuk potensi likuefaksi saat terjadi gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penerapan metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) sebagai solusi biosementasi ramah lingkungan untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan tanah di kawasan pesisir tersebut. Metode EICP bekerja melalui proses hidrolisis urea yang dikatalisis oleh enzim urease, menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang berfungsi sebagai perekat antarpartikel tanah. Sampel tanah diambil dari kawasan Pantai Mangrove dan terlebih dahulu diuji untuk mengetahui sifat fisik awalnya. Perlakuan EICP kemudian dilakukan dengan variasi konsentrasi bahan kimia sementasi (urea dan CaCl_2) serta enzim urease. Setelah periode curing tertentu, efektivitas stabilisasi dievaluasi melalui uji geser langsung untuk menentukan parameter kuat geser tanah, yaitu sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi (c). Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada nilai kuat geser pada sampel yang diberi perlakuan EICP dibandingkan dengan sampel kontrol. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa proses biosementasi EICP mampu meningkatkan kepadatan serta ketahanan geser tanah, sehingga berpotensi mengurangi risiko erosi dan kerentanan terhadap likuefaksi. Dengan demikian, metode EICP dapat dipandang sebagai alternatif teknologi yang menjanjikan dan berkelanjutan dalam mendukung upaya konservasi serta stabilisasi geoteknik di wilayah pesisir, khususnya pada kawasan Pantai Mangrove di Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara.

Kata kunci: Biosementasi, Stabilisasi Tanah, Likuefaksi, Uji Geser Langsung

1. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir Pantai Mangrove di Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara memiliki peran ekologis dan ekonomis yang penting sebagai zona penyangga antara daratan dan laut (Ndruru & Delita, 2021). Namun, kawasan ini umumnya tersusun atas tanah bertekstur halus hingga pasir lepas dengan daya ikat partikel yang rendah. Kondisi tersebut menyebabkan tanah di daerah pantai memiliki stabilitas rendah dan sangat rentan terhadap gangguan mekanis, terutama ketika mengalami beban dinamis seperti gempa bumi (Ambraseys & Sarma, 1969; Sassa & Takagawa, 2019). Salah satu dampak serius dari kondisi ini adalah likuefaksi, yaitu fenomena hilangnya kekuatan geser tanah akibat peningkatan tekanan pori air, yang dapat menyebabkan amblasen, deformasi tanah, hingga kerusakan struktur di atasnya (P. S. Putra dkk., 2023).

Upaya untuk mengurangi potensi likuefaksi dan meningkatkan kestabilan tanah pesisir telah banyak dilakukan melalui metode rekayasa geoteknik. Namun, sebagian besar metode konvensional seperti pencampuran semen atau bahan kimia sintetis sering kali menimbulkan dampak lingkungan dan biaya yang tinggi (Rodrigues & Joekes, 2011). Sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, dikembangkan teknologi *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) (Ahenkorah dkk., 2021; Almajed dkk., 2020; Julianto dkk., 2023; Miftah dkk., 2022; H. Putra dkk., 2017, 2020). Metode ini memanfaatkan reaksi enzim urease yang menghidrolisis urea, menghasilkan ion karbonat yang bereaksi dengan ion kalsium untuk membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3) (Ahenkorah dkk., 2021). Endapan ini kemudian mengisi pori-pori tanah dan memperkuat ikatan antarpartikel, sehingga

meningkatkan sifat fisik dan mekanis tanah (Oktafiani dkk., 2022).

Dalam rangka menilai efektivitas penerapan metode EICP dalam memperkuat karakteristik tanah pasir pada wilayah pesisir, dilakukan serangkaian pengujian laboratorium yang meliputi uji sifat fisis dan mekanis tanah. Pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dengan karakterisasi sifat fisis tanah untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi awal dan perubahan struktur internal akibat proses presipitasi kalsium karbonat yang diinduksi oleh enzim urease. Parameter yang diuji meliputi kadar air, berat jenis, berat isi basah dan kering, angka pori, porositas, serta distribusi ukuran butiran tanah. Setelah dilakukan analisis sifat fisis, tahap selanjutnya adalah pengujian mekanis tanah melalui uji geser langsung (*direct shear test*). Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ), yang menjadi indikator utama dalam menilai stabilitas tanah. Melalui hasil uji ini, dapat diketahui sejauh mana endapan kalsium karbonat (CaCO_3) hasil reaksi enzimatis mampu meningkatkan ketahanan tanah terhadap gaya geser, memperkuat ikatan antarpartikel, serta mengubah perilaku geser tanah pada skala mikroskopis.

Dengan metodologi yang sistematis dan berbasis analisis laboratorium, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah dan praktis terhadap pengembangan teknologi biostabilisasi tanah berbasis EICP di wilayah pesisir, khususnya pada kawasan Pantai Mangrove, Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam penerapan teknologi stabilisasi tanah yang ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan, sekaligus mendukung upaya mitigasi risiko likuefaksi, peningkatan ketahanan infrastruktur pesisir, serta pengelolaan lingkungan pantai secara adaptif terhadap dinamika perubahan iklim dan peningkatan aktivitas pembangunan di daerah pesisir.

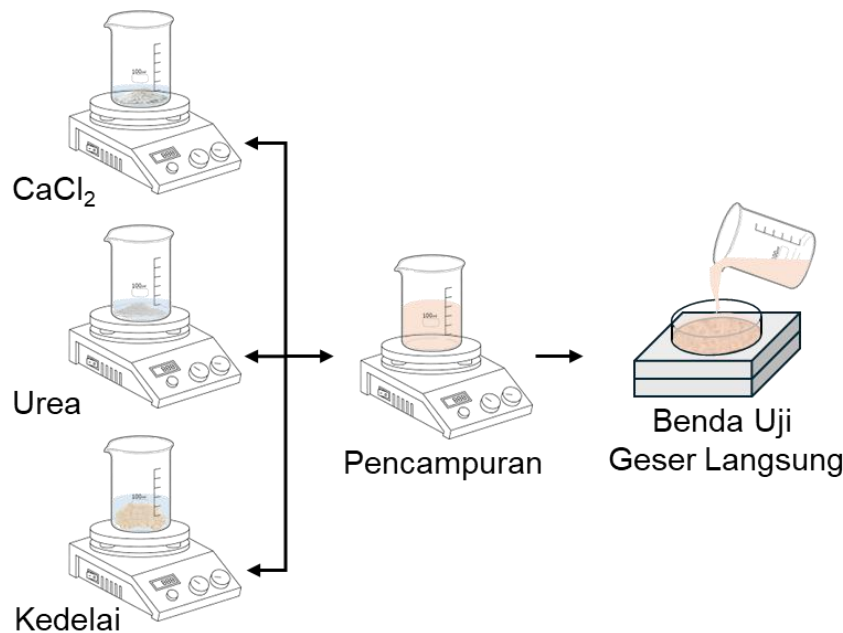
2. BAHAN DAN METODE

Bahan

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari kawasan Pantai Mangrove di Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara. Sampel tanah diambil secara terganggu dan tidak terganggu pada kedalaman ± 1 meter dari permukaan tanah untuk mewakili lapisan tanah pasir halus yang rentan terhadap likuefaksi. Bahan utama yang digunakan dalam proses EICP meliputi: Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) sebagai sumber karbonat, Kalsium klorida (CaCl_2) sebagai sumber ion kalsium, dan Enzim urease yang diekstraksi dari biji kedelai (*soybean crude urease*). Selain itu, digunakan air suling (*distilled water*) untuk menyiapkan larutan dan memastikan tidak ada pengaruh ion asing terhadap proses presipitasi kalsium karbonat. Analisis sifat fisik tanah dilakukan sebelum perlakuan, meliputi: kadar air alami (*water content*), berat isi (*density*), berat jenis (*specific gravity*), dan distribusi ukuran butir (*sieve analysis*). Data ini digunakan untuk menentukan karakteristik awal tanah serta kondisi optimum dalam proses perlakuan EICP.

Prosedur pengujian

Proses **pembuatan larutan EICP** dilakukan melalui tahapan terkontrol untuk memperoleh larutan yang stabil dan memiliki aktivitas enzimatis optimal dalam proses presipitasi kalsium karbonat. Bahan utama yang digunakan terdiri atas **urea teknis 1 mol/L**, **kalsium klorida (CaCl_2) teknis 1 mol/L**, **ekstrak enzim urease dari kedelai sebanyak 40 g/L**, serta **air suling (*distilled water*)** sebagai pelarut utama. Urea berfungsi sebagai sumber karbonat (CO_3^{2-}) yang akan dihasilkan melalui proses hidrolisis oleh enzim urease, sedangkan CaCl_2 berperan sebagai sumber ion kalsium (Ca^{2+}) yang diperlukan untuk membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3). Ekstrak enzim urease diperoleh dengan cara melarutkan bubuk kedelai dalam air suling dan diaduk hingga homogen, kemudian disaring untuk mendapatkan larutan jernih yang mengandung enzim aktif. Setelah masing-masing larutan disiapkan, yakni larutan urea, larutan CaCl_2 , dan ekstrak kedelai, ketiganya dicampurkan untuk menghasilkan larutan EICP yang siap digunakan. Pencampuran dilakukan secara perlahan menggunakan pengaduk magnetik agar reaksi awal tidak terjadi terlalu cepat dan komponen larutan tetap homogen. Larutan EICP yang telah terbentuk kemudian segera diaplikasikan pada **benda uji geser langsung** dengan cara menuangkan larutan ke dalam **cetakan uji** yang telah diisi dengan pasir kering bersih. Proses ini dilakukan secara hati-hati agar larutan meresap secara merata ke seluruh pori tanah, memungkinkan presipitasi CaCO_3 terjadi di antara butiran pasir secara seragam. Setelah proses impregnasi selesai, sampel dibiarkan dalam kondisi diam pada suhu ruang selama 3 hari untuk memberikan waktu bagi reaksi biokimia berlangsung sempurna dan terbentuk endapan kalsium karbonat yang mengikat partikel tanah. Tahapan rinci dari prosedur pembuatan dan aplikasi larutan EICP ini dapat dilihat pada Gambar 25, yang memperlihatkan skema proses mulai dari persiapan bahan, pencampuran larutan, hingga tahap penerapan pada sampel uji geser langsung.



Gambar 25. Prosedur pembuatan larutan EICP.

Uji geser langsung

Untuk mengetahui peningkatan kekuatan geser akibat perlakuan EICP, dilakukan uji geser langsung (*Direct Shear Test*) pada sampel sebelum dan sesudah perlakuan. Pengujian dilakukan berdasarkan standar SNI 2813:2008 dengan ukuran sampel 6 cm × 6 cm × 2 cm. Setiap sampel diuji pada tiga tingkat tegangan normal untuk memperoleh parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Perbandingan hasil antara tanah tanpa perlakuan (*untreated soil*) dan tanah yang telah diberi perlakuan EICP (*treated soil*) memberikan gambaran kuantitatif tentang efektivitas proses biostabilisasi yang terjadi. Umumnya, tanah yang telah mengalami perlakuan EICP menunjukkan peningkatan nilai kohesi dan sudut geser dalam yang signifikan, yang mengindikasikan adanya ikatan semen alami antarpartikel akibat presipitasi kalsium karbonat (Lamuse dkk., 2024). Selain itu, perilaku geser tanah yang diperkuat juga cenderung lebih kaku dan mengalami deformasi lebih kecil dibandingkan tanah tanpa perlakuan. Hasil uji geser langsung ini menjadi dasar untuk menilai kinerja metode EICP dalam memperbaiki kekuatan mekanis tanah pantai, khususnya pada daerah Pantai Mangrove yang berpotensi mengalami likuefaksi akibat beban dinamis seperti gempa bumi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat fisis tanah

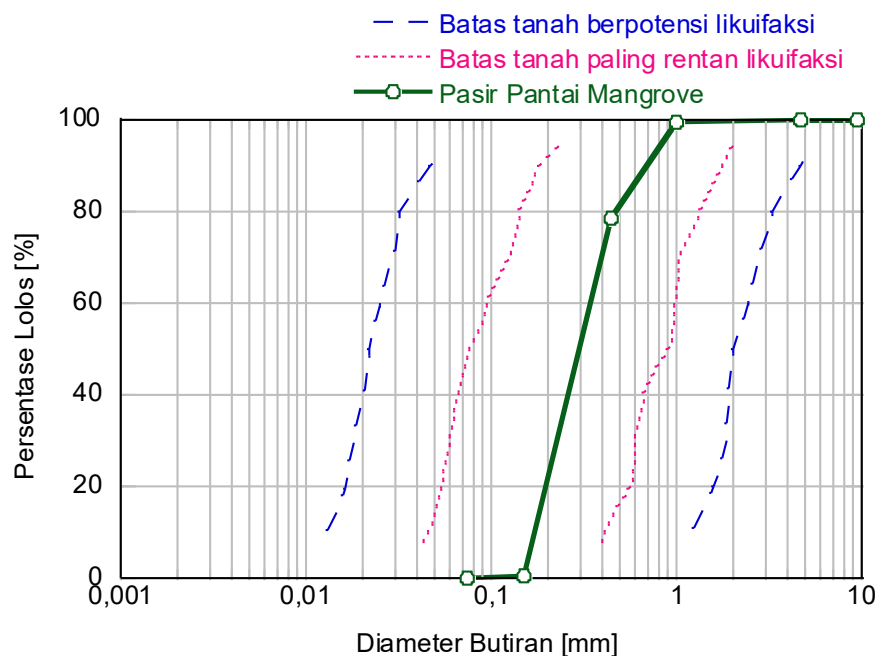
Berdasarkan hasil uji sifat fisis tanah yang ditampilkan pada Tabel 17, diketahui bahwa kadar air tanah sebesar **1,42%**, menunjukkan bahwa sampel tanah memiliki kadar kelembapan yang sangat rendah, sehingga dapat dikategorikan sebagai tanah kering. Nilai **berat isi basah** dan **berat isi kering** masing-masing sebesar **1,46 gr/cm³** dan **1,44 gr/cm³**, dengan **berat jenis partikel** sebesar **2,60**, yang menunjukkan karakteristik umum tanah berpasir. Nilai **angka pori (e)** sebesar **0,80** dan **porositas (n)** sebesar **0,45** menandakan bahwa tanah memiliki ruang pori yang cukup besar, sesuai dengan sifat alami pasir yang berpermeabilitas tinggi. Berdasarkan hasil analisis gradasi, diperoleh **koefisien keseragaman (Cu)** sebesar **2,06** dan **koefisien gradasi (Cc)** sebesar **0,89**, yang menunjukkan distribusi ukuran butir yang sempit atau tidak seragam. Mengacu pada klasifikasi sistem *Unified Soil Classification System (USCS)*, tanah ini termasuk dalam kategori **Poorly Graded Sand (SP)** atau **pasir bergradasi buruk**, yang berarti butiran pasirnya memiliki variasi ukuran yang terbatas dan cenderung sulit dipadatkan secara optimal tanpa penambahan bahan pengikat atau stabilisasi tambahan.

Berdasarkan Gambar 26, hasil uji distribusi butiran tanah menunjukkan bahwa tanah Pantai Mangrove memiliki kurva gradasi yang relatif curam dengan sebagian besar butiran berada pada rentang ukuran 0,1–1 mm, yang menandakan dominasi fraksi pasir sedang hingga halus. Kurva tersebut berada di antara batas tanah paling rentan terhadap likuifaksi, sehingga mendekati karakteristik tanah yang mudah mengalami likuifaksi, terutama pada kondisi jenuh air dan getaran tinggi seperti gempa. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi ukuran butiran tanah kurang seragam atau bergradasi buruk (*poorly graded*), sesuai dengan hasil klasifikasi SP (Pasir bergradasi buruk) pada sistem USCS. Bentuk kurva yang hampir sejajar dan tidak melebar mengindikasikan rendahnya variasi ukuran butiran, sehingga

kemampuan tanah untuk saling mengunci antarpartikel juga rendah. Secara keseluruhan, karakteristik ini memperkuat interpretasi bahwa tanah pasir Pantai Mangrove Serdang Bedagai memiliki potensi likuifaksi yang tinggi, terutama jika tidak mengalami pemadatan atau stabilisasi tambahan.

Tabel 17. Rekapitulasi hasil uji sifat fisis tanah.

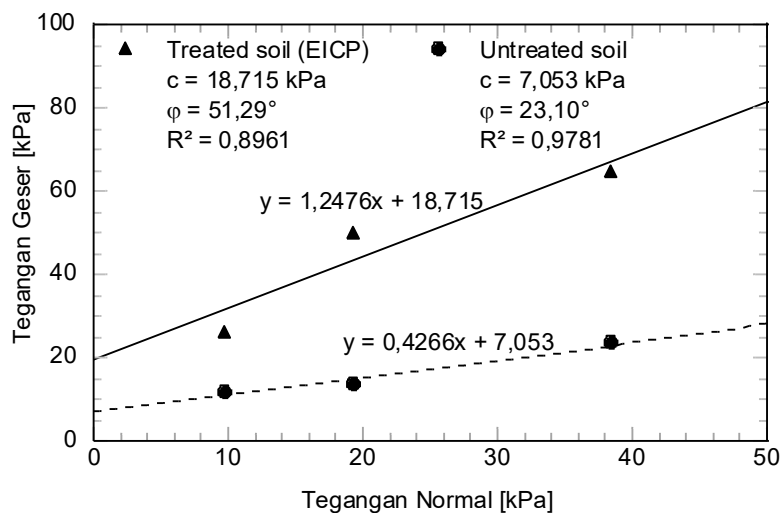
<i>Parameter</i>	<i>Nilai</i>
Kadar Air (%)	1,42
Berat Isi Basah (gr/cm ³)	1,46
Berat Isi Kering (gr/cm ³)	1,44
Berat Jenis	2,60
Angka Pori	0,80
Porositas	0,45
Koefisien Keseragaman (Cu)	2,06
Koefisien Gradasi (Cc)	0,89
Klasifikasi tanah USCS	SP (Pasir gradasi buruk)



Gambar 26. Grafik hasil uji distribusi butiran tanah.

Kuat geser tanah

Berdasarkan Gambar 27, hasil uji geser langsung (*direct shear test*) menunjukkan perbedaan yang signifikan antara tanah tanpa perlakuan (*untreated soil*) dan tanah yang telah diperkuat menggunakan metode EICP (*treated soil*). Hasil yang diperoleh menunjukkan peningkatan signifikan pada parameter kuat geser tanah setelah perlakuan EICP. Tanah tanpa perlakuan yang direpresentasikan oleh garis putus-putus dan titik lingkaran diperoleh persamaan garis regresi adalah $y = 0,4266x + 7,053$, memberikan nilai kohesi (c) sebesar 7,053 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) sekitar $23,10^\circ$. Sebaliknya, tanah yang diberi perlakuan EICP (garis dengan titik segitiga) menunjukkan peningkatan yang substansial, dengan persamaan regresi $y = 1,2476x + 18,715$. Perlakuan ini berhasil meningkatkan kohesi (c) menjadi 18.715 kPa (sekitar 2.65 kali lipat) dan sudut geser dalam (ϕ) menjadi sekitar $51,29^\circ$. Peningkatan dramatis pada kedua parameter kuat geser ini, terutama kohesi, mengindikasikan bahwa proses sementasi kalsit yang diinduksi oleh EICP telah berhasil mengikat partikel-partikel tanah, menghasilkan material tanah yang jauh lebih kaku dan lebih kuat. Kenaikan ini mengindikasikan bahwa presipitasi kalsit hasil reaksi enzim urease dengan urea dan kalsium klorida berhasil membentuk jembatan antarbutir (*inter-particle bonding*) yang memperkuat struktur tanah. Dengan demikian, perlakuan EICP terbukti efektif dalam meningkatkan daya dukung geser dan stabilitas mekanis tanah pasir Pantai Mangrove yang semula lepas dan rentan terhadap deformasi geser.



Gambar 27. Hasil uji geser langsung.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisis dan mekanis tanah, dapat disimpulkan bahwa tanah Pantai Mangrove Serdang Bedagai, Sumatera Utara memiliki karakteristik fisik yang menunjukkan kerentanan tinggi terhadap likuefaksi dan rendahnya stabilitas alami. Hasil uji sifat fisis menunjukkan kadar air yang sangat rendah (1,42%), berat isi kering 1,44 gr/cm³, serta angka pori sebesar 0,80 dengan porositas 0,45, yang mencerminkan sifat tanah berpasir dengan ruang pori besar dan tingkat kepadatan rendah. Berdasarkan klasifikasi USCS, tanah termasuk kategori SP (Pasir Bergradasi Buruk), dengan koefisien keseragaman ($C_u = 2,06$) dan koefisien gradasi ($C_c = 0,89$), menandakan distribusi ukuran butiran yang sempit dan kemampuan saling mengunci antarpartikel yang rendah. Karakteristik ini menyebabkan tanah mudah kehilangan kekuatan geser pada kondisi jenuh air dan getaran tinggi, sehingga berpotensi mengalami likuefaksi pada lingkungan pesisir.

Hasil uji geser langsung (*Direct Shear Test*) memperlihatkan bahwa penerapan metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) secara signifikan meningkatkan parameter kekuatan geser tanah. Nilai kohesi (c) meningkat dari 7,053 kPa menjadi 18,715 kPa, sementara sudut geser dalam (ϕ) naik dari 23,10° menjadi 51,29°, menunjukkan peningkatan kekuatan geser lebih dari dua kali lipat. Peningkatan ini terjadi akibat terbentuknya presipitasi kalsium karbonat (CaCO_3) hasil reaksi biokimia antara urea, kalsium klorida, dan enzim urease yang diekstrak dari kedelai, yang berfungsi sebagai agen pengikat alami antarpartikel pasir. Proses sementasi ini menghasilkan struktur tanah yang lebih kompak, berdaya ikat tinggi, serta lebih tahan terhadap deformasi geser.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa penerapan metode EICP efektif dalam meningkatkan stabilitas mekanis dan kekuatan geser tanah pasir pantai, sekaligus berpotensi mengurangi risiko likuefaksi pada wilayah pesisir. Dengan sifatnya yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan, metode EICP dapat dijadikan alternatif teknologi biostabilisasi tanah yang menjanjikan untuk aplikasi geoteknik di kawasan pesisir pantai di Sumatera Utara maupun daerah serupa lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh PNBP Universitas Negeri Medan Tahun Anggaran 2025, dengan nomor 0105/UN33.8/PPKM/PPT/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., Beecham, S., & Saint, C. (2021). A Review of Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP): The Role of Enzyme Kinetics. *Sustainable Chemistry*, 2(1), 92–114. <https://doi.org/10.3390/suschem2010007>
- Almajed, A., Abbas, H., Arab, M., Alsabhan, A., Hamid, W., & Al-Salloum, Y. (2020). Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP)-Based methods for ecofriendly stabilization of different types of natural sands. *Journal of*

- Cleaner Production*, 274, 122627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122627>
- Ambraseys, N., & Sarma, S. (1969). Liquefaction of soils induced by earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 651–664. <https://doi.org/10.1785/BSSA0590020651>
- Julianto, B. T., Ramadhan, F., Fauzan, M., & Putra, H. (2023). Pengaruh Penambahan CaCO₃ terhadap Parameter Kuat Geser Pasir Pantai. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(03), 233–239. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.03.233-239>
- Lamuse, M., Putra, H., Erizal, & Ihsani, Z. M. (2024). Improvement of Shear Strength Parameters on Clay Shale Using Calcite Precipitation Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1416(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1416/1/012007>
- Miftah, A., Khodadadi Tirkolaei, H., Bilsel, H., & El Nagggar, H. (2022). Erodibility improvement and scour mitigation of beach sand by enzymatic induced carbonate precipitation. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32, 100354. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100354>
- Ndruru, E. N., & Delita, F. (2021). Analisis Pemanfaatan Hutan Mangrove Oleh Masyarakat Kampung Nipah Desa Sei Nagalawan Kecamatan Perbaungan Kabupaten Serdang Bedagai. *EL-JUGHRAFIYAH*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.24014/jej.v1i1.14016>
- Oktafiani, P. G., Putra, H., Erizal, & Yanto, D. H. Y. (2022). Application of technical grade reagent in soybean-crude urease calcite precipitation (SCU-CP) method for soil improvement technique. *Physics and Chemistry of the Earth*, 128(October), 103292. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103292>
- Putra, H., Yasuhara, H., & Kinoshita, N. (2017). Optimum condition for the application of enzyme-mediated calcite precipitation technique as soil improvement method. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(6), 2145–2151. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.6.3425>
- Putra, H., Yasuhara, H., Kinoshita, N., & Fauzan, M. (2020). Promoting Precipitation Technique using Bio-Chemical Grouting for Soil Liquefaction Prevention. *Civil Engineering Dimension*, 22(1), 1–5. <https://doi.org/10.9744/ced.22.1.1-5>
- Putra, P. S., Yulianto, E., Kongko, W., Nugroho, S. H., Sahara, V. H., Aswan, A., & Maryunani, K. A. (2023). Geological evidence of predecessor of the 2018 Tsunami in Palu, Sulawesi, Indonesia. *Natural Hazards Research*, 3(3), 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.04.010>
- Rodrigues, F. A., & Joekes, I. (2011). Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. *Environmental Chemistry Letters*, 9(2), 151–166. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0302-2>
- Sassa, S., & Takagawa, T. (2019). Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 16(1), 195–200. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1114-x>