

KEDELAI MENINGKATKAN DAYA DUKUNG FONDASI TELAPAK LINGKARAN

Zaizafun Zakiya¹, Agata Iwan Candra^{2*} dan Mahardi Kamalika Khusna Ali³

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kadiri, Jl. Selomangleng No. 1, Kota Kediri, Jawa Timur
Email: zaizafunzakiya30@gmail.com

² Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kadiri, Jl. Selomangleng No. 1, Kota Kediri, Jawa Timur
Email: iwan_candra@unik-kediri.ac.id

³ Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kadiri, Jl. Selomangleng No. 1, Kota Kediri, Jawa Timur
Email: mahardi@unik-kediri.ac.id

ABSTRACT

Loose sandy soil has low bearing capacity due to high porosity and weak inter-grain bonding. This condition poses a significant challenge in shallow foundation design, as it risks excessive settlement and structural instability. This research aims to evaluate the effectiveness of the Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) method based on soybean extract in improving the bearing capacity of such soil. Treatment involved a single application of injecting 9 liters of EICP solution into sandy media using a two-phase method. The ratio of urease solution (from soybean powder extraction) to cementation solution (1 mol/L urea and 1 mol/L CaCl₂) was 1:1, with a total concentration of 22.24% by dry weight of sand. Testing included axial static load tests (ASTM D1194) and direct shear tests (ASTM D3080). Results indicate that the ultimate bearing capacity increased by 272.7% (axial test) and 368.2% (calculation). Improved soil properties were also evident from cohesion values up to 13.78 kPa, an internal friction angle reaching 57.16°, and the soil unit weight increasing from 13.48 to 18.00 kN/m³. ANOVA testing ($F(1,114) = 239.97$; $p < 0.001$) confirmed a statistically significant effect of the treatment. It is concluded that the soybean-based EICP method is effective in improving the physical and mechanical properties of loose sandy soil and significantly increasing the bearing capacity of circular footing foundations.

Keywords: EICP, soybean, loose sand, foundation bearing capacity, soil stabilization, calcium carbonate

ABSTRAK

Tanah pasir lepas memiliki daya dukung rendah akibat porositas tinggi dan ikatan antarbutir yang lemah. Kondisi ini menjadi tantangan signifikan dalam perencanaan konstruksi fondasi dangkal, karena berisiko menyebabkan penurunan berlebih dan ketidakstabilan struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) berbasis ekstrak kedelai dalam meningkatkan kapasitas daya dukung tanah tersebut. Perlakuan dilakukan satu kali dengan menyuntikkan 9 liter larutan EICP ke dalam media pasir menggunakan metode *two-phase*. Rasio larutan urease (dari ekstraksi bubuk kedelai) dan sementasi (1 mol/L urea dan 1 mol/L CaCl₂) adalah 1:1, dengan konsentrasi total 22,24% terhadap berat kering pasir. Pengujian meliputi uji beban statik aksial (ASTM D1194) dan uji geser langsung (ASTM D3080). Hasil menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung ultimit meningkat sebesar 272,7% (uji aksial) dan 368,2% (perhitungan). Peningkatan sifat tanah juga terlihat dari nilai kohesi hingga 13,78 kPa, sudut geser dalam mencapai 57,16°, dan berat volume tanah naik dari 13,48 menjadi 18,00 kN/m³. Uji ANOVA ($F(1,114) = 239,97$; $p < 0,001$) mengonfirmasi pengaruh perlakuan yang signifikan secara statistik. Disimpulkan bahwa metode EICP berbasis kedelai efektif dalam memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah pasir lepas, serta meningkatkan daya dukung fondasi telapak lingkaran secara signifikan.

Kata kunci: EICP, kedelai, pasir lepas, daya dukung fondasi, stabilisasi tanah, kalsium karbonat

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi global dan urbanisasi yang pesat telah mendorong peningkatan pembangunan infrastruktur, termasuk pada wilayah dengan tanah bermasalah, seperti pasir lepas (Guillemot *et al.*, 2024). Tanah jenis ini

memiliki daya dukung rendah akibat porositas tinggi dan ketiadaan kohesi, sehingga kurang ideal sebagai media fondasi, terutama pada fondasi telapak lingkaran (Lim *et al.*, 2024)(J. Liu & Chen, 2023).

Metode perkuatan tanah konvensional, seperti stabilisasi berbasis semen, masih umum digunakan, tetapi menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan akibat tingginya emisi karbon CO₂ selama proses hidrasi semen (Iamchaturapatr *et al.*, 2022). Sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan, pendekatan biosementasi mulai banyak dikembangkan, yaitu *Microbially Induced Carbonate Precipitation* (MICP) dan *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP). MICP memanfaatkan mikroorganisme seperti *Sporosarcina pasteurii* untuk menghidrolisis urea, membentuk presipitasi kalsium karbonat (CaCO₃) sebagai pengikat tanah. Namun, metode ini memiliki keterbatasan seperti waktu curing yang lama (7–14 hari) dan sensitivitas terhadap kondisi lingkungan (J. Zhang *et al.*, 2023).

Sebagai solusi yang lebih sederhana, EICP dikembangkan dengan menggantikan mikroorganisme menggunakan enzim urease sebagai katalis. Mekanisme ini mempercepat hidrolisis urea secara signifikan tanpa memerlukan kontrol biologis kompleks. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa EICP mampu menghasilkan kuat tekan bebas (UCS) hingga 2,5 MPa hanya dalam tiga hari masa curing (J. Zhang *et al.*, 2023). Namun, urease komersial yang digunakan dalam proses ini masih relatif mahal dan ketersediaannya terbatas, sehingga kurang ekonomis untuk aplikasi teknik sipil skala besar (L. Liu *et al.*, 2024).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, kedelai diidentifikasi sebagai urease alami yang lebih murah, tersedia secara luas, dan tidak memerlukan pemurnian yang kompleks. Enzim dalam biji kedelai, dengan kofaktor ion nikel (Ni²⁺), mampu menghidrolisis urea menjadi amonia (NH₃) dan karbonat (CO₃²⁻), yang kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca²⁺) membentuk presipitasi kalsium karbonat (CaCO₃) (Shu *et al.*, 2022). Efektivitas metode ini telah dibuktikan dalam studi sebelumnya, mencapai UCS 10,5 Mpa pada *Poorly Graded Sand* setelah 20 siklus perlakuan (Meng *et al.*, 2021), serta 6,28 MPa (12 siklus) pada Pasir Kalsaren dan 1,68 MPa (8 siklus) pada Pasir Silika (Q. Zhang *et al.*, 2023)(Weng *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, sebagian besar studi sebelumnya masih terbatas pada pengujian UCS dan karakterisasi mikroskopis, serta belum mengkaji penerapannya pada skala model fondasi, khususnya fondasi telapak lingkaran yang lebih relevan untuk menilai kinerja fondasi dangkal di lapangan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh metode EICP berbasis kedelai terhadap kapasitas daya dukung tanah pasir lepas yang menopang fondasi telapak lingkaran. Evaluasi dilakukan melalui perlakuan tunggal menggunakan Uji Beban Statik Aksial dan Uji Geser Langsung, untuk memperoleh parameter kapasitas daya dukung ultimit (q_u), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat volume tanah (γ). Diharapkan hasil penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan metode perkuatan tanah yang efektif, aplikatif, ekonomis, dan mendukung biosementasi berkelanjutan dalam praktik teknik sipil.

2. METODE

Material dan Karakteristik Tanah

Penelitian ini menggunakan sampel pasir lepas (*Poorly Graded Sand/SP*) yang diklasifikasikan berdasarkan ASTM D2487-17, dan diambil dari Sungai Brantas, Kediri, Jawa Timur. Tahap awal perlakuan tanah meliputi pengeringan dan penyaringan menggunakan ayakan No. 20 dan No. 100 untuk memperoleh distribusi partikel yang seragam. Karakteristik fisik dan indeks tanah dari sampel uji dirangkum dalam Tabel 1. Material tersebut kemudian ditempatkan dalam kotak uji berukuran 35 × 27 × 23 cm dan diisi sebanyak 29,760 kg menggunakan metode *air pluviation*, hingga mencapai kepadatan relatif sebesar 34,29% (Meng *et al.*, 2021).

Tabel 1. Propertis pasir uji

Dr (%)	γ_t (kN/m ³)	Gs	e _{max}	e _{min}	Cu	Cc
34.29	13.73	2.65	1.04	0.47	2.59	1.68

Pembuatan Larutan EICP

Metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) menggunakan dua jenis larutan, Larutan pertama, yaitu Larutan urease, dibuat dengan melarutkan 50 gram bubuk kedelai ke dalam 1000 mL air suling, diaduk hingga homogen, lalu disaring menggunakan ayakan No. 200 (75 μ m) (Q. Zhang *et al.*, 2023). Larutan didinginkan pada suhu 4°C selama 24 jam untuk mengendapkan partikel kasar dan meningkatkan kejernihan, sehingga menghasilkan ekstrak dengan aktivitas urease yang optimal (Xue *et al.*, 2024). Larutan kedua yang digunakan adalah larutan

sementasi, yang terdiri dari larutan urea 1 mol/L dan larutan CaCl_2 1 mol/L, yang dicampurkan dengan perbandingan 1:1 sesaat sebelum aplikasi untuk mencegah reaksi dini (Li *et al.*, 2024).

Prosedur Injeksi dan Curing

Larutan EICP sebanyak 9 liter diinjeksi satu kali ke dalam kotak uji menggunakan metode *two-phase* dengan rasio urease:sementasi 1:1, setara dengan 22,24% dari berat kering pasir. Setelah injeksi, sampel dikondisikan selama 24 jam pada suhu ruang ($25 \pm 2^\circ\text{C}$), kemudian dikeringkan secara alami selama 48 jam di bawah paparan sinar matahari dengan suhu berkisar antara $38\text{--}45^\circ\text{C}$ (J. Zhang *et al.*, 2023).

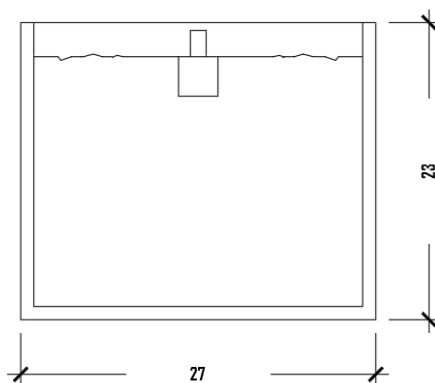
Pengujian Laboratorium

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental melalui dua pengujian utama, yaitu Uji Geser Langsung dan Uji Beban Statik Aksial. Uji Geser Langsung dilakukan menggunakan sampel berukuran $60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, dengan alat uji yang mengacu pada ASTM D3080. Sampel dikenai tiga tingkat tegangan normal (σ) yaitu 0,349 kPa; 0,994 kPa; dan 1,28 kPa. Pengujian ini bertujuan untuk menghasilkan kurva tegangan geser terhadap regangan geser. Nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) kemudian dihitung menggunakan regresi linier berdasarkan pendekatan Mohr–Coulomb.

Sementara itu, Uji Beban Statik Aksial dilakukan untuk mengevaluasi respons fondasi dangkal di bawah beban vertikal. Pengujian dilaksanakan pada model fondasi berbentuk lingkaran dengan diameter 3,8 cm dan tinggi 5 cm, yang ditanam sedalam 4 cm dalam media tanah pasir lepas. Alat uji lengkap disajikan pada Gambar 1, dan penempatan fondasi dapat dilihat pada Gambar 2. Gaya tekan aksial diukur menggunakan *load cell*, sedangkan penurunan fondasi dicatat menggunakan *potensiometer*. Kedua sensor ini terintegrasi dengan sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler Arduino, dan data direkam secara *real time* menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Pengujian dihentikan ketika penurunan fondasi mencapai 10% dari diameter fondasi, sesuai dengan prosedur uji standar ASTM D1194-94.



Gambar 1. Alat Uji Beban Statik Aksial (AIC Innovation)



Gambar 2. Detail kotak uji

Teknik Analisis Data

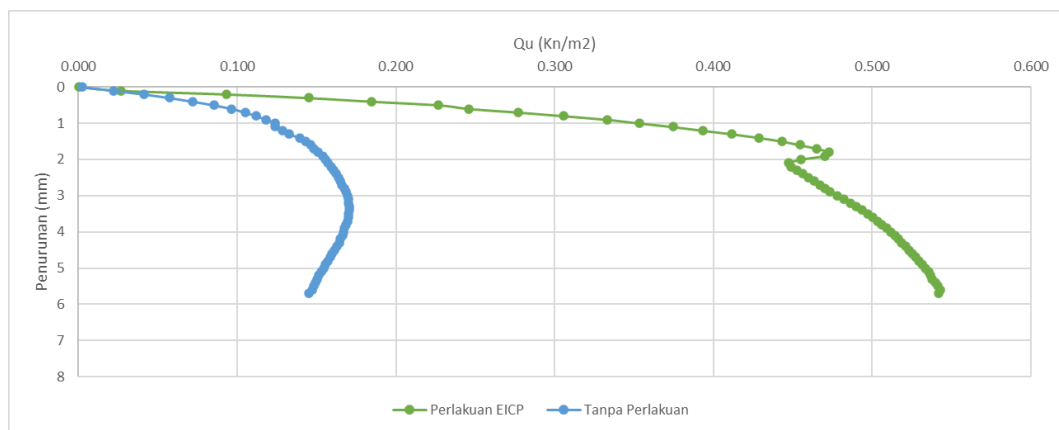
Analisis data dilakukan berdasarkan hasil uji laboratorium yang mencakup pengolahan grafik, perhitungan analitik, dan uji statistik. Kurva hubungan beban terhadap penurunan dianalisis untuk mengevaluasi peningkatan kapasitas daya dukung fondasi setelah perlakuan EICP berbasis kedelai. Parameter kuat geser tanah, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ), ditentukan dari titik potong dan kemiringan garis regresi hasil uji geser langsung, baik sebelum dan sesudah perlakuan. Kapasitas daya dukung ultimit (q_u) dihitung menggunakan rumus Terzaghi untuk fondasi berbentuk lingkaran, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$q_u = 1,3cN_c + \gamma D_f N_q + 0,3\gamma B N_\gamma \quad (1)$$

dengan q_u = kapasitas daya dukung ultimit (kN/m^2), c = kohesi (kN/m^2), γ = berat isi tanah (kN/m^3), B = lebar fondasi (m), D_f = kedalaman fondasi (m) dan N_c , N_q , N_γ = faktor daya dukung tergantung sudut geser dalam (ϕ). Untuk menguji signifikansi perlakuan terhadap perubahan kapasitas daya dukung, dilakukan analisis statistik menggunakan uji ANOVA satu arah dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Hasil uji dinyatakan signifikan secara statistik apabila nilai $p < 0,05$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

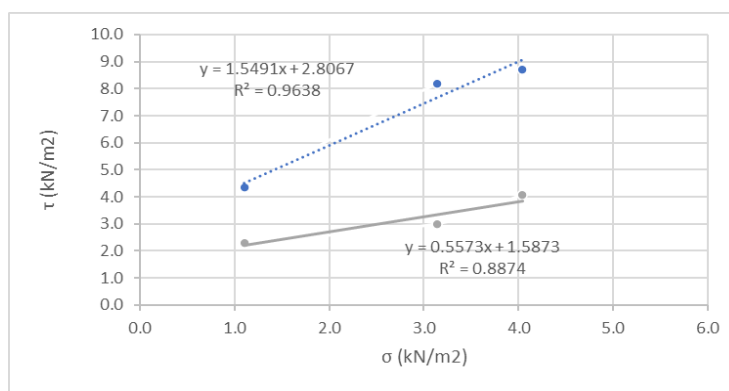
Kapasitas Daya Dukung Ultimit (Q_u)



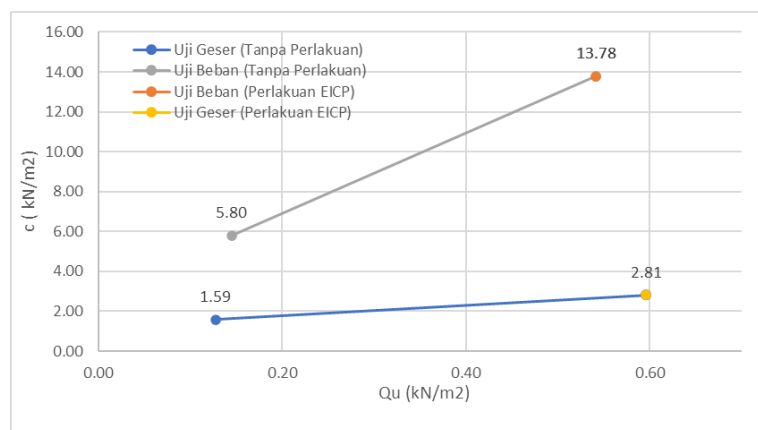
Gambar 3. Hasil Uji Beban

Hasil pengujian beban statik aksial menunjukkan nilai Q_u meningkat dari 0,145 kN/m^2 menjadi 0,542 kN/m^2 , atau mengalami peningkatan sebesar 272,7% seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Peningkatan ini juga diperkuat melalui pendekatan perhitungan dari pengujian geser langsung menggunakan Persamaan 1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Q_u meningkat dari 0,127 kN/m^2 menjadi 0,596 kN/m^2 , atau sebesar 368,2%, yang menunjukkan konsistensi peningkatan daya dukung fondasi antara hasil eksperimental dan perhitungan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa presipitasi kalsium karbonat (CaCO_3) akibat aktivitas enzim urease meningkatkan kekuatan tanah dan kemampuannya dalam menahan beban (Q. Zhang *et al.*, 2023). Secara teoritis, peningkatan daya dukung sesuai dengan rumus Terzaghi, di mana Q_u meningkat seiring dengan naiknya kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat volume (γ) (Das, 2018).

Kohesi Tanah (c)

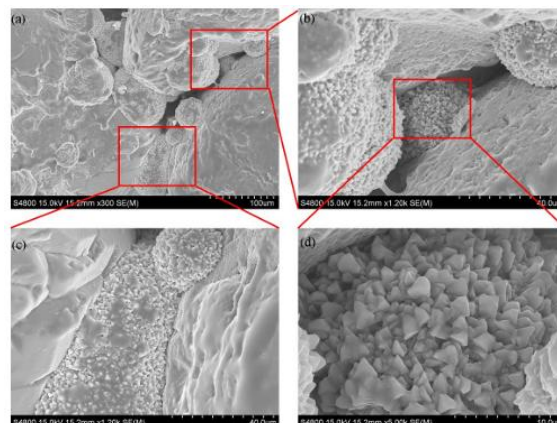


Gambar 4. Hasil Uji Geser



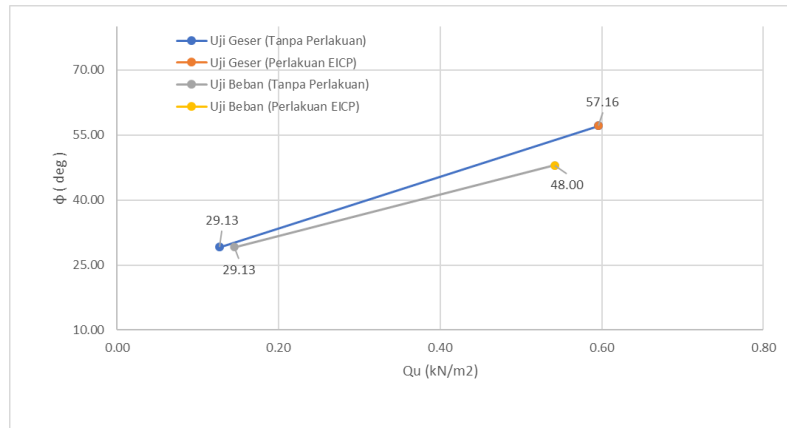
Gambar 5. Perbandingan Kohesi dari Uji Geser dan Uji Beban akibat EICP

Berdasarkan Gambar 4, nilai kohesi tanah meningkat dari 1,59 kPa menjadi 2,81 kPa berdasarkan pengujian geser langsung, dengan persentase kenaikan sebesar 76,20%. Sedangkan pada hasil perhitungan dari pengujian beban statik aksial menggunakan Persamaan 1, nilai kohesi pada Gambar 5 meningkat lebih signifikan, yaitu dari 5,80 kPa menjadi 13,78 kPa, atau 137,6%, yang mengindikasikan bahwa mekanisme pengikatan antarpartikel oleh CaCO_3 lebih efektif di bawah pembebanan aksial. Hasil ini sesuai dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa endapan kalsium karbonat yang terbentuk melalui hasil reaksi EICP tidak hanya mengisi pori-pori tanah, tetapi juga membentuk jembatan pengikat antarbutir yang memperkuat kontak antarpartikel (Iamchaturapatr *et al.*, 2022). Hal ini ditunjukkan secara visual pada Gambar 6 melalui citra SEM pasir yang telah diberi perlakuan EICP berbasis kedelai, di mana kristal CaCO_3 tampak tersebar merata di antara partikel, mengisi celah antarbutir dan menghasilkan struktur yang lebih padat, terintegrasi, dan kohesif pada skala mikro (Shu *et al.*, 2022). Dalam teori daya dukung Terzaghi, kohesi berperan dalam komponen $1.3cN_c$, di mana peningkatan c secara langsung berkontribusi pada kenaikan kapasitas daya dukung ultimit fondasi (Das, 2018).



Gambar 6. Citra SEM dari sampel pasir yang diberi perlakuan EICP (60 g/L bubuk kedelai) pada delapan tahap perlakuan dengan pembesaran: (a) 300 kali; (b, c) 1200 kali; (d) 5000 kali.
(Sumber: Shu *et al.*, 2022)

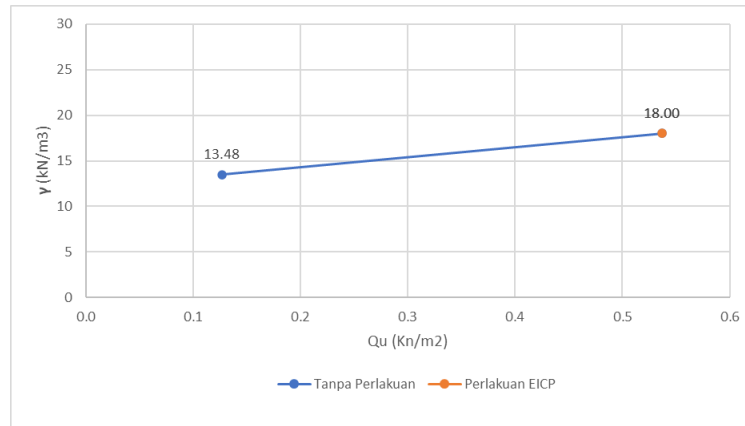
Sudut Geser Dalam (ϕ)



Gambar 7. Perbandingan Sudut Geser Dalam dari Uji Geser dan Uji Beban akibat EICP

Gambar 7 menunjukkan peningkatan sudut geser dalam tanah dari $29,13^\circ$ menjadi $57,16^\circ$ berdasarkan uji geser langsung, dengan peningkatan sebesar 96,2%. Peningkatan juga diperoleh dari perhitungan berdasarkan pengujian beban aksial menggunakan Persamaan 1, dengan nilai ϕ meningkat dari $29,13^\circ$ menjadi 48° . Temuan ini diperkuat dengan hasil penelitian sebelumnya, yang melaporkan peningkatan sudut geser dari $32,9^\circ$ menjadi 35° pada tanah pasir yang distabilisasi dengan EICP (Iamchaturapatr *et al.*, 2022). Hal ini mengindikasikan bahwa presipitasi kalsium karbonat terbukti memperkuat friksi internal antarpartikel tanah, sehingga meningkatkan nilai ϕ secara signifikan (Lai *et al.*, 2023). Dalam konteks teori daya dukung, peningkatan sudut geser dalam turut mempengaruhi kenaikan faktor daya dukung (N_c , N_q , dan N_γ) dalam rumus Terzaghi (Das, 2018).

Berat Volume Tanah (γ)



Gambar 8. Pengaruh EICP terhadap nilai berat volume tanah

Gambar 8 menunjukkan peningkatan berat volume tanah kering dari 13,48 kN/m³ menjadi 18,00 kN/m³, atau sebesar 33,5% setelah perlakuan EICP. Kenaikan ini mencerminkan penurunan porositas akibat terbentuknya presipitasi kalsium karbonat (CaCO₃) yang mengisi ruang antarpartikel tanah. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya, yang menunjukkan bahwa endapan kalsit memperkuat antarbutir dan meningkatkan kerapatan struktur tanah (Xue *et al.*, 2024). Distribusi CaCO₃ yang merata dalam pori-pori juga berkontribusi terhadap peningkatan densitas material (Xu *et al.*, 2024). Dengan demikian, perlakuan EICP terbukti efektif dalam memperbaiki struktur fisik tanah melalui mekanisme biomineralisasi. Secara teoritis, dalam rumus daya dukung Terzaghi, berat volume tanah (γ) memengaruhi komponen $\gamma D_f N_q$ dan $0,3\gamma B N_\gamma$, sehingga peningkatan γ juga secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas daya dukung ultimit fondasi (Das, 2018).

Hasil Uji Statistik

Hasil analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perlakuan metode EICP memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan daya dukung ultimit (Q_u), dengan nilai $F(1,114) = 239,97$ dan $p < 0,001$. Nilai p yang jauh di bawah 0,05 mengindikasikan bahwa peningkatan ini tidak disebabkan oleh variasi acak, melainkan merupakan hasil nyata dari terbentuknya presipitasi kalsium karbonat dalam matriks tanah. Temuan ini diperkuat oleh penelitian yang melaporkan peningkatan kekuatan tanah hingga lima kali setelah perlakuan EICP. Efektivitas mekanisme biomineralisasi ini juga telah dikonfirmasi dalam berbagai studi terdahulu yang menunjukkan peran penting presipitasi mineral dalam peningkatan parameter mekanik tanah (Pratama *et al.*, 2024).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penerapan metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) berbasis kedelai terbukti efektif parameter mekanik tanah pasir lepas. Perlakuan tunggal menghasilkan peningkatan kohesi, sudut geser dalam, dan berat volume tanah, yang secara langsung meningkatkan kapasitas daya dukung fondasi hingga 272,7% berdasarkan Uji Beban Statik Aksial dan 368,2% berdasarkan pendekatan perhitungan parameter Uji Geser Langsung, serta divalidasi secara statistik ($F(1,114) = 239,97$ dan $p < 0,001$). Hasil penelitian ini memperkuat konsep dasar dalam teori daya dukung Terzaghi bahwa peningkatan parameter geoteknik seperti kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat isi tanah (γ) berkontribusi langsung terhadap peningkatan kapasitas daya dukung fondasi. Selain itu, penelitian ini memperluas pemahaman mekanisme biomineralisasi dari sumber enzim alami seperti kedelai yang berpotensi mendorong efisiensi konstruksi dan optimalisasi desain fondasi pada tanah berpasir. Penelitian ini juga membuka peluang pengembangan lebih lanjut pada skala lapangan untuk memastikan efektivitas metode ini dalam kondisi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. M. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering Ninth Edition*. 819.
- Guillemot, J. R., Zhang, X., & Warner, M. E. (2024). Population Aging and Decline Will Happen Sooner Than We Think. *Social Sciences*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/socsci13040190>
- Iamchaturapatr, J., Piriyaikul, K., & Petcherdchoo, A. (2022). Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00871>
- Lai, H. J., Cui, M. J., Wu, S. F., Yang, Y., & Chu, J. (2023). Extraction of crude soybean urease using ethanol and its effect on soil cementation. *Soils and Foundations*, 63(3). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101300>

- Li, S., Hu, X., Zhao, Y., Wu, M., Feng, Y., Li, X., & Guo, Y. (2024). Evaluation of dust fixation effect of urease-based biological dust suppressant and its field application. *Journal of Environmental Management*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123119>
- Lim, A., Sunaryo, J. Y., Wijaya, M., Satyanaga, A., & Kristijarti, A. P. (2024). Hydraulic characteristics and incubation methods for enhancing durability of Fungi- Mycelium treated silica sand using *Rhizopus oligosporus* and *Rhizopus oryzae* combination. *Biogeotechnics*, 2(1), 100066. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100066>
- Liu, J., & Chen, X. (2023). Vertical bearing capacity of circular surface foundations considering the effect of compactness and stress level on the sand friction angle. *Ocean Engineering*, 280(238), 114748. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114748>
- Liu, L., Gao, Y., Cao, X., Meng, H., Wang, Z., Qi, Y., Li, R., & He, J. (2024). A comparative study of low-cost crude ureases extracted from multi-species of natural plant sources in enzyme-induced carbonate precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114824>
- Meng, H., Shu, S., Gao, Y., Yan, B., & He, J. (2021). Multiple-phase enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement. *Engineering Geology*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106374>
- Pratama, G. B. S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Putra, H., Almajed, A., Fukugaichi, S., & Ihsani, Z. M. (2024). Efficacy of soybean-derived crude extract in enzyme-induced carbonate precipitation as soil-improvement technique. *International Journal of Geo-Engineering*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-024-00204-6>
- Shu, S., Yan, B., Ge, B., Li, S., & Meng, H. (2022). Factors Affecting Soybean Crude Urease Extraction and Biocementation via Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Soil Improvement. *Energies*, 15(15). <https://doi.org/10.3390/en15155566>
- Weng, Y., Zheng, J., Lai, H., Cui, M., & Ding, X. (2024). Biomineralization of soil with crude soybean urease using different calcium salts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(5), 1788–1798. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.033>
- Xu, J., Li, X., Liu, Y., Li, Z., & Wang, S. (2024). Evaluation of wind erosion resistance of EICP solidified desert sand based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 447(June), 138119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138119>
- Xue, Y., Arulrajah, A., Chu, J., & Horpibulsuk, S. (2024). Soybean urease-based EICP stabilization of washed recycled sands derived from demolition wastes cured at low temperatures. *Construction and Building Materials*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136735>
- Zhang, J., Yin, Y., Shi, W., Bian, H., Shi, L., Wu, L., Han, Z., Zheng, J., & He, X. (2023). Strength and uniformity of EICP-treated sand under multi-factor coupling effects. *Biogeotechnics*, 1(1), 100007. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100007>
- Zhang, Q., Ye, W., Liu, Z., Wang, Q., & Chen, Y. (2023). Influence of injection methods on calcareous sand cementation by EICP technique. *Construction and Building Materials*, 363(October 2022), 129724. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129724>