

Faktor Koreksi terhadap Daya Dukung Selimut Tiang pada Pasir akibat Perlakuan Limbah Cair Tahu

Bagas Dwi Indrawan^{[1]*}, Agata Iwan Candra^[1]

^[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kadiri, Kediri, 64112, Indonesia

Email: bagas170403@gmail.com*

*) Corresponding Author

Received: 22 September 2025; Revised: 16 March 2026; Accepted: 24 June 2026

How to cited this article:

Indrawan, B.D., Candra, A.I., (2026). Faktor Koreksi terhadap Daya Dukung Selimut Tiang pada Pasir akibat Perlakuan Limbah Cair Tahu. Jurnal Teknik Sipil, 22(2), 262–275. <https://doi.org/10.28932/jts.v22i2.13374>

ABSTRAK

Pasir lepas memiliki densitas rendah dan hampir tidak memiliki kohesi, yang menyebabkan daya dukung pondasi tiang terbatas, baik terhadap beban aksial maupun lateral. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas limbah cair tahu (LCT) sebagai sumber urease alami dalam metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) untuk meningkatkan kapasitas dukung selimut (Q_s) dan koefisien tekanan tanah lateral (K). Sampel pasir SP dicampur LCT sebesar 28,17% dari berat kering, diinkubasi lima hari, dan dibandingkan dengan air biasa sebagai kontrol. Pengujian menggunakan model tiang baja diameter 12 mm dipancang hingga 100 mm, sesuai ASTM D1143. Nilai Q_u meningkat dari 0,0257 kN menjadi 0,1347 kN (424%), Q_s meningkat dari 0,01064 kN menjadi 0,02885 kN (171%), dan koefisien tekanan tanah lateral (K) meningkat dari 0,83 menjadi 5,23 (530%). Faktor koreksi empiris ($F_c = 6,2988$) diintegrasikan dalam formulasi K untuk meningkatkan akurasi prediksi. Uji ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p = 0,0211$) antara perlakuan LCT dan kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa LCT mampu meningkatkan interaksi tanah–tiang melalui perubahan sifat mekanik, kohesi tanah di sekitar tiang, serta dapat menjadi solusi perbaikan tanah pasir lepas yang berkelanjutan dan ekonomis.

Kata kunci: Daya Dukung Tiang, *Enzyme-Induced Precipitation*, Koefisien Tekanan Tanah, Pasir, Urease.

ABSTRACT. *Correction Factor of Shaft Pile Bearing Capacity in Loose Sand Treated Using Tofu Wastewater.* Loose sand has low density and nearly zero cohesion, resulting in limited pile foundation capacity under both axial and lateral loads. This study evaluates the effectiveness of tofu wastewater (LCT) as a natural urease source in the *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) method to improve shaft resistance (Q_s) and lateral earth pressure coefficient (K). Poorly graded sand (SP) samples were treated with 28.17% LCT by dry weight, incubated for five days, and compared with untreated samples using regular water as a control. Axial load tests were conducted using 12 mm diameter steel piles model driven to a depth of 100 mm, following ASTM D1143. The value of Q_u increased from 0.0257 kN to 0.1347 kN (424%), Q_s increased from 0.01064 kN to 0.02885 kN (171%), and the lateral earth pressure coefficient (K) increased from 0.83 to 5.23 (530%). An empirical correction factor ($F_c = 6.2988$) was incorporated into the K formulation to improve prediction accuracy. One-way ANOVA confirmed a statistically significant difference ($p = 0.0211$) between LCT and control treatments. The results demonstrate that LCT enhances soil–pile interaction through changes in the mechanical properties, cohesion of the surrounding soil, and offers a sustainable and economical solution for improving the geotechnical performance of loose sand.

Keywords: *Pile Bearing Capacity, Enzyme-Induced Carbonate Precipitation, Coefficient of Earth Pressure, Sand, Urease.*

1. PENDAHULUAN

Tanah pasir lepas memiliki densitas relatif rendah ($D_r < 35\%$), sudut geser internal rendah ($\phi < 28^\circ$) (Yao et al., 2025), permeabilitas tinggi (Hamamoto et al., 2022), dan mudah mengalami pergeseran partikel. Kondisi ini menjadikan daya dukung pondasi tiang relatif rendah, baik terhadap beban aksial maupun lateral. Sifat ini mengakibatkan pondasi tiang mengalami penurunan berlebih (*excessive settlement*), kegagalan geser akibat rendahnya kohesi, serta kapasitas dukung yang rendah (Tian et al., 2020). Stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan berbasis semen masih menjadi metode yang dominan, namun pendekatan ini dikaitkan dengan tingginya emisi karbon serta dampak lingkungan yang kurang berkelanjutan (Ackah et al., 2022; Cao et al., 2016; G. Li et al., 2024). Upaya konvensional seperti memperbesar diameter atau menambah kedalaman tiang, terbukti efektif tetapi berimplikasi pada biaya tinggi, energi besar, serta keterbatasan efisiensi jangka panjang.

Pendekatan *biocementation* berbasis *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) menjadi salah satu alternatif perbaikan tanah yang ramah lingkungan. Urease berbasis kedelai telah terbukti menjadi alternatif ekonomis pengganti enzim murni. Limbah cair tahu (LCT) yang kaya protein aktif berpotensi memicu presipitasi CaCO_3 , sehingga dapat memperkuat ikatan antar butir dan meningkatkan daya dukung tanah (Ahenkorah et al., 2023, 2024; Meng et al., 2021). Sejumlah penelitian telah mengonfirmasi efektivitas penggunaan urease berbasis kedelai dalam memperbaiki sifat mekanik tanah. Pada pasir kalseran, Zhang et al., (2023) mencatat bahwa nilai *Unconfined Compressive Strength* (UCS) hingga 6,28 MPa, yang merupakan peningkatan paling besar dibandingkan studi lainnya. Temuan serupa juga diperoleh (Xue et al., 2024) pada pasir daur ulang dengan nilai UCS sekitar 0,08939 MPa, sementara Shu et al., (2022) mendapatkan hasil kenaikan lebih dari 4 MPa pada pasir Ottawa. Pada pasir silika Pirghazani et al., (2024) dan Lai et al., (2023) masing-masing menunjukkan peningkatan UCS 4,35 MPa dan lebih dari 0,6 Mpa. Lebih lanjut, (Miao et al., 2024) menegaskan bahwa urease yang diekstraksi dari limbah kedelai berpotensi lebih efektif dibandingkan urease komersial, sehingga memperkuat argumen mengenai potensi pemanfaatan sumber hayati lokal dalam teknologi perbaikan tanah.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada parameter kuat tekan bebas (UCS) atau sifat mekanik tanah secara umum, sementara kajian mengenai pengaruh limbah cair tahu (LCT) terhadap interaksi tanah–tiang, khususnya daya dukung selimut tiang (Q_s) dan koefisien tekanan tanah lateral (K), masih sangat terbatas. Penelitian ini mengusulkan penggunaan faktor koreksi empiris (F_c) yang diturunkan dari perbandingan hasil antara perlakuan LCT dan kontrol air sebagai parameter normalisasi untuk mengintegrasikan hasil eksperimental dengan formulasi teoritis. Perbedaan fokus, metodologi, dan kontribusi

penelitian ini dibandingkan dengan studi-studi terdahulu disajikan secara sistematis dalam Tabel 1, yang sekaligus menegaskan posisi dan keterbaruan penelitian ini.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Keterbaruan Penelitian Ini

Penulis	Metodologi					Hasil			
	Urease Kedelai	Sementasi (CaCl ₂ + Urea)	Inkubasi	Pengeringan	UCS	Qs (kN)	K	K Koreksi	Validasi ANOVA
Q. Zhang et al., 2023	√	√	√	√	√	x	x	x	x
Pirghazani et al., 2024	√	√	√	√	√	x	x	x	x
Shu et al., 2022	√	√	√	√	√	x	x	x	x
Xue et al., 2024	√	√	√	√	√	x	x	x	x
Lai et al., 2023	√	√	√	x	√	x	x	x	x
Penelitian ini	√	x	√	x	x	√	√	√	√

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kontribusi limbah cair tahu (LCT) sebagai sumber urease alami dalam meningkatkan daya dukung selimut tiang (Qs) dan koefisien tekanan tanah lateral (K) pada model tiang yang dipancang pada pasir. Analisis dilakukan melalui integrasi hasil uji laboratorium dengan formulasi Meyerhof dan faktor koreksi empiris (Fc), serta diverifikasi menggunakan uji *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengonfirmasi signifikansi perbedaan antara perlakuan LCT dan kontrol air. Temuan penelitian ini memberikan implikasi praktis berupa pendekatan perbaikan tanah pasir lepas yang berkelanjutan untuk meningkatkan interaksi tanah–tiang, sekaligus kontribusi teoritis melalui pengembangan formulasi daya dukung tiang yang lebih sesuai dengan kondisi aktual terhadap perubahan sifat mekanik tanah akibat perlakuan LCT.

2. METODOLOGI

Dalam Penelitian ini menggunakan pasir berjenis SP (*Sand, Poorly Graded*) berdasarkan klasifikasi USCS dengan karakteristik fisik ditunjukkan pada Tabel 2. Pasir kering Sungai Brantas seberat 27,760 gr dimasukkan ke dalam kotak uji berukuran 19.320 cm³ menggunakan metode *air pluviation* (Gade & Dasaka, 2017).

Sebagai sumber urease alami digunakan limbah cair tahu (LCT), Gambar 1 dari industri lokal tanpa pemurnian, yang berpotensi memicu presipitasi kalsium karbonat melalui mekanisme EICP (Ahenkorah et al., 2022). Sampel pasir diberi LCT sebanyak 28,17% dari berat kering lalu diinkubasi lima hari pada suhu ruang (28°C), sedangkan kontrol menggunakan air biasa dengan volume dan proses inkubasi yang sama seperti Gambar 2.

Tabel 2. Propertis Pasir

Propertis	Nilai
Jenis Tanah	SP (<i>Sand, Poorly Graded</i>)
Densitas Relatif (%)	34,49
Berat Volume Kering (γ_t) [kN/m^3]	14,10
Koefisien Kelengkungan C_c	1,21
Koefisien Keseregaman C_u	2,93
Ukuran Partikel Rata-rata D50 [mm]	0,37
Angka Pori (e)	0,85
Angka Pori Maksimum ($e_{\max}$)	1,04
Angka Pori Minimum ($e_{\min}$)	0,47
Porositas (%)	0,46
Berat Jenis Butiran Tanah (G_s)	2,65
Sudut Geser ϕ [$^\circ$]	29,13



Gambar 1. Limbah Cair Tahu (LCT)



Gambar 2. Air

Pengujian tiang dilakukan di laboratorium dengan model tiang baja diameter 12 mm yang dipancang vertikal hingga 100 mm pada box uji dengan ukuran 400 x 260 x 200 mm. Posisi pemancangan ditempatkan pada pusat box uji sehingga jarak antara titik pemancangan dan dinding box sekitar 10,8 kali diameter tiang (10,8D) pada arah lebar dan 16,7 kali diameter tiang (16,7D) pada arah panjang. Jarak ini dipertahankan untuk meminimalkan pengaruh batas (*boundary effect*) dari dinding box terhadap pola keruntuhan tanah di sekitar tiang selama pengujian. Nilai tersebut berada di atas jarak minimum yang direkomendasikan dalam pengujian model tiang, yaitu lebih dari enam kali diameter tiang, sehingga pengaruh batas dapat diabaikan (Ni et al., 2018). Pengujian dilakukan menggunakan alat Uji Tekan Skala Kecil (*AIC Innovation*) seperti pada Gambar 3, dengan kecepatan 0,1 mm/s sesuai ASTM International, 2020. Data beban–kedalaman direkam secara *real time* melalui *data streamer* yang terhubung ke *Microsoft Excel*.

Daya dukung ultimit (Q_u) diperoleh langsung dari hasil uji pemancangan. Kapasitas dukung selimut (Q_s) dihitung dengan Persamaan (1) (Meyerhof, 1976):

$$Q_s = Q_u - Q_p \quad (1)$$



Gambar 3. Alat Uji Tekan Skala Kecil (*AIC Innovation*)

dengan Q_u merupakan daya dukung ultimit hasil pengujian dan Q_p adalah daya dukung ujung tiang. Nilai Q_p ditentukan menggunakan Persamaan (2) (Meyerhof, 1976):

$$Q_p = \sigma'_v \cdot N_q \cdot A_b \quad (2)$$

dimana σ'_v merupakan tegangan efektif vertikal, N_q adalah faktor daya dukung Meyerhof, dan A_b luas ujung tiang uji.

Nilai Q_s yang diperoleh digunakan untuk menentukan koefisien tekanan tanah lateral (K) melalui Persamaan (3).

$$K = \frac{Q_s}{(\sigma'_v \cdot \tan \delta) A_s} \quad (3)$$

Dengan δ adalah sudut gesek tanah terhadap material ($0,8 \times \phi$) sesuai Meyerhof, 1963, A_s merupakan luas selimut tiang, dan Q_s diperoleh dari Persamaan (1).

Penelitian ini difokuskan pada pembentukan faktor koreksi (F_c) untuk mengevaluasi pengaruh sumber urease alami pada LCT, yang dinyatakan dengan Persamaan (4).

$$FC_{LCT} = \frac{K_{LCT}}{K_{Air}} \quad (4)$$

Nilai $FC_{LCT} > 1$ menunjukkan adanya peningkatan kinerja akibat perlakuan LCT. Selanjutnya, faktor koreksi ini diintegrasikan ke dalam persamaan Q_s menjadi Persamaan (5).

$$Q_s = FC_{LCT} (\sigma'_v \cdot K \cdot \tan \delta) A_s \quad (5)$$

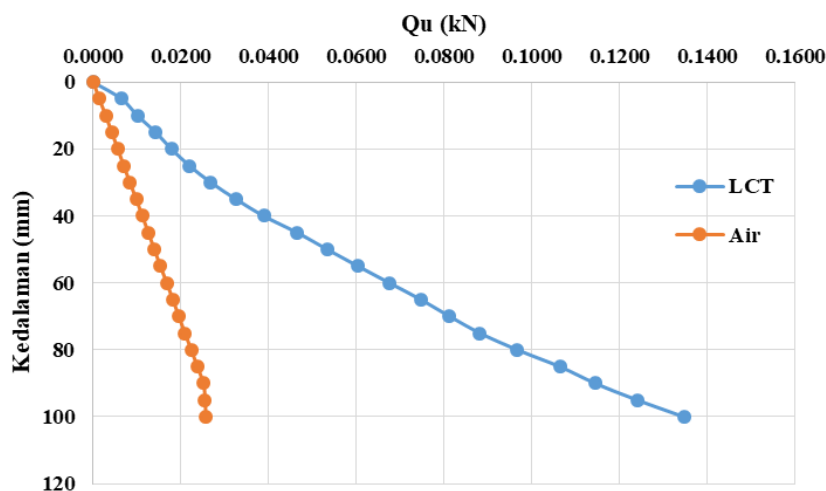
Pendekatan ini memastikan bahwa perhitungan Q_s tidak hanya didasarkan pada parameter mekanika tanah klasik, tetapi juga memperhitungkan perubahan karakteristik tanah akibat proses *biocementation* yang dipicu oleh LCT. Untuk memastikan seberapa besar perbedaan antara perlakuan LCT dan kontrol, digunakan uji *Analysis of Variance* (ANOVA) satu arah pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$) untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh perlakuan LCT terhadap

kapasitas dukung tanah. Analisis ini memvalidasi bahwa peningkatan kapasitas dukung dan koefisien tekanan tanah lateral yang diperoleh merupakan hasil perlakuan LCT, bukan variasi eksperimental semata.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Pengaruh Kedalaman terhadap Daya Dukung Ujung Tiang (Q_u)

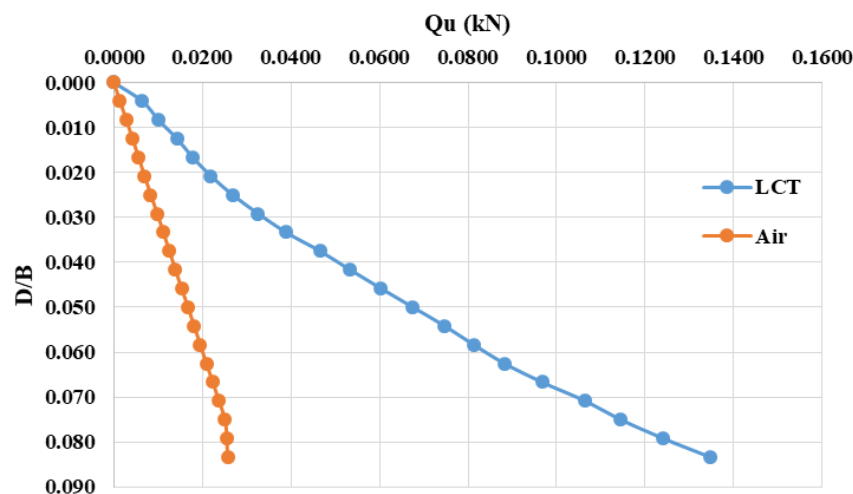
Nilai Q_u pada penelitian ini diperoleh dari hasil pengujian pemancangan langsung, sebagaimana prosedur pengujiannya telah dijelaskan pada bagian metodologi. Hasil pengujian pada Gambar 4. menunjukkan bahwa Q_u meningkat seiring bertambahnya kedalaman pemancangan pada kedua kondisi, namun peningkatannya lebih signifikan pada penggunaan LCT dibandingkan air. Pada kedalaman 20 mm, Q_u pada LCT tercatat sebesar 0,0178 kN, sedangkan pada air sebesar 0,01 kN atau sekitar 78% lebih rendah. Perbedaan ini semakin jelas pada kedalaman yang lebih besar. Pada kedalaman maksimum 100 mm, Q_u pada LCT mencapai 0,1347 kN, sementara pada air sebesar 0,0257 kN yang menunjukkan peningkatan sekitar 424% atau sekitar 5,2 kali lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan LCT berkontribusi terhadap peningkatan tahanan ujung tiang melalui perbaikan kondisi tanah di zona ujung, yang diduga berkaitan dengan meningkatnya ikatan antar butir serta perubahan struktur mikro tanah. Hasil ini sesuai dengan Gitanjali et al., (2024) yang menunjukkan bahwa perlakuan EICP mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan pasir melalui pembentukan ikatan kalsium karbonat antar partikel sehingga respon mekanik tanah menjadi lebih stabil dibandingkan kondisi tanpa perlakuan. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan LCT berpotensi meningkatkan kapasitas dukung ujung tiang pada tanah pasir melalui mekanisme sementasi biokimia yang memperkuat struktur butiran tanah.



Gambar 4. Hubungan Kedalaman dengan Q_u

3.2. Pengaruh Rasio Kedalaman terhadap Diameter (D/B) terhadap Q_u

Hasil pengujian pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai Q_u meningkat secara bertahap seiring bertambahnya rasio D/B pada kedua kondisi pengujian, namun peningkatan tersebut lebih signifikan pada penggunaan LCT dibandingkan air. Pada rasio D/B sebesar 0,017, nilai Q_u pada LCT tercatat sebesar 0,0178 kN, sedangkan pada air sebesar 0,01 kN atau sekitar 78% lebih rendah. Perbedaan ini semakin jelas dengan meningkatnya rasio penetrasi. Pada rasio D/B maksimum sebesar 0,083, nilai Q_u pada LCT mencapai 0,1347 kN, sementara pada air sebesar 0,0257 kN, yang menunjukkan peningkatan sekitar 424% atau sekitar 5,2 kali lebih besar dibandingkan kondisi air. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio penetrasi tiang berkontribusi terhadap peningkatan tahanan ujung, terutama pada tanah yang diberi perlakuan LCT. Kondisi tersebut berkaitan dengan meningkatnya interaksi antar butir serta perubahan susunan partikel tanah di sekitar zona ujung tiang, sehingga kontak antara tanah dan ujung tiang menjadi lebih efektif dalam menahan beban penetrasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Xie et al., (2024) dan Y. Li et al., (2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi tiang pada tanah pasir dapat memobilisasi tahanan ujung yang lebih besar akibat perubahan kondisi tegangan dan deformasi tanah di sekitar ujung tiang.

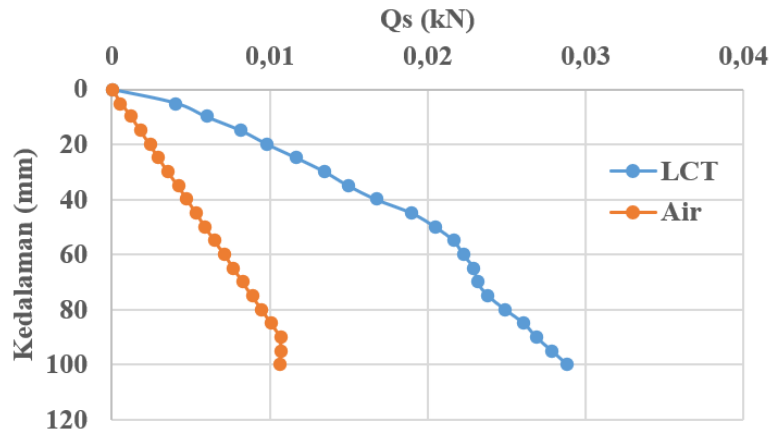


Gambar 5. Hubungan D/B dengan Q_u

3.3. Pengaruh Kedalaman terhadap Daya Dukung Selimut Tiang (Q_s)

Kapasitas dukung selimut tiang (Q_s) adalah komponen utama dalam mendukung beban aksial tiang melalui gesekan antara permukaan tiang dan tanah. Berdasarkan Gambar 6, nilai Q_s meningkat seiring bertambahnya kedalaman, baik dalam media air maupun LCT. Nilai Q_s pada LCT selalu lebih tinggi dibandingkan kontrol. Pada kedalaman 100 mm, Q_s pada LCT mencapai 0.02885 kN, sedangkan pada air hanya 0.01064 kN, atau meningkat sekitar 171%. Peningkatan

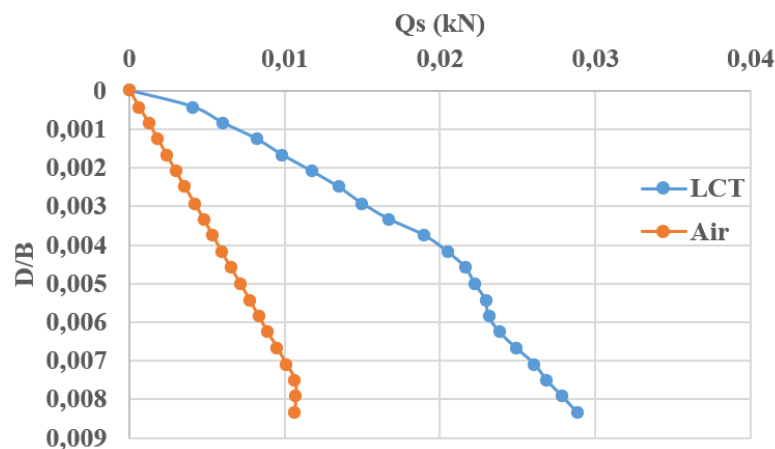
ini menunjukkan bahwa penggunaan LCT berkontribusi terhadap peningkatan daya dukung tiang, meskipun variasinya relatif konstan seiring kedalaman. Hasil ini sejalan dengan temuan Lin et al., n.d. yang menunjukkan bahwa perlakuan EICP menghasilkan presipitasi CaCO_3 di sekitar selimut tiang, sehingga memperkuat interaksi tanah–struktur dan meningkatkan daya dukung pondasi tiang.



Gambar 6. Hubungan Kedalaman dengan Q_s

3.4. Pengaruh Rasio Kedalaman terhadap Diameter (D/B) terhadap Q_s

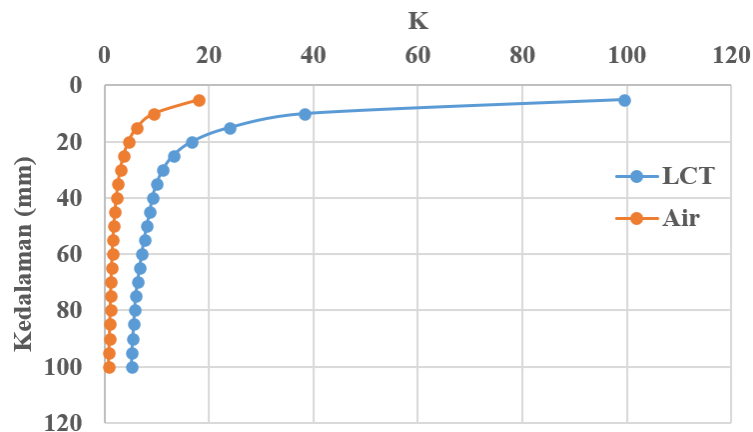
Hubungan antara Q_s dan rasio D/B seperti pada Gambar 7 menunjukkan bahwa Q_s meningkat dengan bertambahnya rasio D/B. Karena lebar pondasi konstan, rasio D/B linier terhadap kedalaman. Nilai Q_s pada LCT konsisten lebih tinggi dibandingkan air. Pada rasio D/B maksimum (0,00833), Q_s dalam LCT mencapai 0,02885 kN, sedangkan air hanya 0,01064 kN. Hal ini menunjukkan bahwa LCT efektif dalam meningkatkan kapasitas dukung selimut melalui pembentukan CaCO_3 yang memperkuat kontak butir tanah, sesuai dengan temuan Xu et al., (2023) bahwa penerapan teknologi *enzyme-induced carbonate precipitation* dapat meningkatkan daya dukung lapisan alas melalui biocementasi tanah granular.



Gambar 7. Hubungan D/B dengan Q_s

3.5. Variasi Kedalaman terhadap Koefisien Tekanan Tanah Lateral (K)

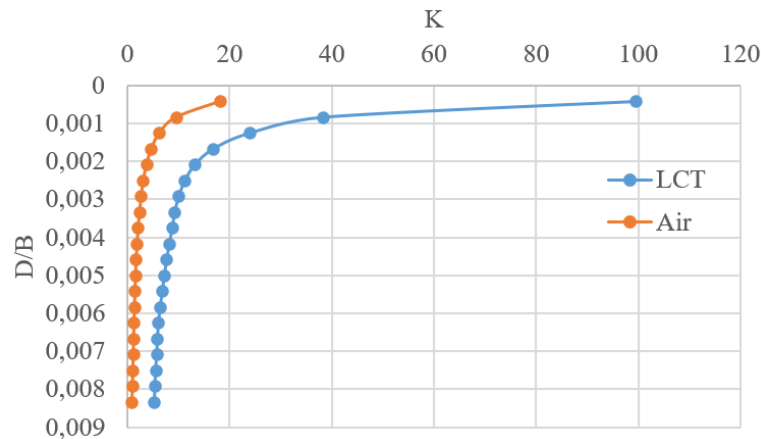
Koefisien tekanan lateral tanah (K) mencerminkan distribusi tegangan horizontal yang bekerja pada sisi tiang. Berdasarkan Gambar 8, nilai K menurun seiring kedalaman namun tetap lebih tinggi dalam media LCT dibandingkan air. Pada kedalaman 5 mm, K pada LCT mencapai 99,49, sedangkan pada air hanya 18,07. Pada kedalaman 100 mm, LCT tetap unggul (5,23) dibanding air (0,83) meningkat 530%. Nilai ini menunjukkan bahwa LCT berpengaruh dalam meningkatkan kekakuan tanah lateral, meskipun penurunan nilai K tetap terjadi seiring bertambahnya kedalaman. Temuan ini juga didukung oleh Xiao et al., (2021) yang menunjukkan bahwa proses *biocementation* di sekitar model tiang mampu meningkatkan kekakuan lateral tanah sekaligus mengurangi deformasi lateral, sehingga konsisten dengan peningkatan nilai K pada media LCT dalam penelitian ini.



Gambar 8. Hubungan Kedalaman dengan K

3.6. Pengaruh Rasio D/B terhadap Koefisien Tekanan Tanah Lateral

Pada Gambar 9, nilai K menurun terhadap rasio D/B. Nilai K dari LCT konsisten lebih tinggi dibandingkan air pada seluruh rasio. Pada D/B terendah (0,00042), K dalam LCT sebesar 99,49 sedangkan air hanya 18,07. Pada D/B maksimum (0,00833), nilai K dalam LCT masih 5,23 sedangkan air hanya 0.83. Tren ini menunjukkan bahwa LCT memperbaiki kondisi tekanan lateral tanah secara menyeluruh. Peningkatan nilai K pada sampel LCT dapat dikaitkan dengan meningkatnya kekakuan pasir akibat proses EICP, di mana presipitasi CaCO_3 memperkuat ikatan antar butir dan meningkatkan ketahanan pasir terhadap deformasi lateral, sebagaimana dilaporkan pada studi *biocementation* pasir menggunakan EICP (Gitanjali et al., 2024).



Gambar 9. Hubungan D/B dengan K

3.7. Validasi Nilai Koreksi terhadap Persamaan Qs

Pada kedalaman 100 mm, nilai koreksi koefisien tekanan lateral tanah antara LCT dan air mencapai 6,2988, menunjukkan peningkatan tekanan lateral hingga sekitar 600% akibat pengaruh LCT. Kenaikan ini tidak hanya menunjukkan perbedaan kuantitatif, tetapi juga mencerminkan adanya perubahan karakteristik tanah yang signifikan. Oleh karena itu, nilai koreksi ini digunakan untuk memvalidasi persamaan (Qs) pada Persamaan (5).

Dengan mempertimbangkan nilai koreksi yang ditemukan, persamaan Qs menjadi Persamaan (6).

$$Q_s = 6,2988 (\sigma'_v \cdot K \cdot \tan \delta) A_s \quad (6)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kontribusi LCT dalam memperbesar tekanan lateral tanah diakomodasi melalui nilai koreksi FC_{LCT} yang ditentukan secara empiris. Nilai ini merepresentasikan efek gabungan dari perubahan kondisi tanah, seperti peningkatan kohesi semu, kekakuan, modifikasi interaksi antar butiran, serta perubahan susunan mikrostruktur tanah, yang tidak dapat dijelaskan hanya dengan parameter mekanika tanah klasik (Oberhollenzer et al., 2022). Integrasi nilai 6,2988 dalam persamaan memberikan hasil prediksi Qs yang lebih mendekati kondisi aktual. Koreksi ini perlu digunakan saat merancang pondasi pada tanah yang mengalami modifikasi serupa, sehingga pendekatan desain menjadi lebih representatif dan akurat.

3.8. Hasil Analisis ANOVA *Single Factor* antara LCT dan Air

Analisis ANOVA *single factor* dalam Tabel 3 menunjukkan rata-rata faktor koreksi K pada medium air sebesar 3,31 sedangkan pada kondisi LCT lebih tinggi yaitu 15,03. Nilai uji menghasilkan $F = 5,79$ lebih besar dari $F_{kritis} = 4,09$, dengan $p\text{-value} = 0,0211 < 0,05$ sehingga perbedaan antara keduanya signifikan secara statistik. Hasil ini membuktikan bahwa penggunaan LCT mampu meningkatkan faktor koreksi tekanan tanah lateral dibandingkan Air. Secara geoteknik, hal ini menegaskan bahwa LCT memperbaiki interaksi lateral tanah–tiang, sehingga dapat meningkatkan kapasitas dukung pondasi pada tanah pasir lepas yang umumnya memiliki daya dukung rendah (Lin et al., n.d.)

Tabel 3. Hasil Uji ANOVA Air terhadap LCT

Parameter	Nilai
<i>P-value</i>	0,021115558
<i>F-statistic</i>	5,787309495
<i>F-critical</i>	4,098172

3.9. Manfaat Praktis dan Teoritis

Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang penting dalam konteks rekayasa geoteknik, khususnya untuk perbaikan tanah berbutir kasar dengan densitas rendah. Secara praktis, penggunaan limbah cair tahu (LCT) sebagai agen sumber urease alami dalam metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) menawarkan alternatif yang ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan dengan teknik stabilisasi konvensional berbasis semen atau bahan kimia sintetis. Peningkatan kapasitas dukung selimut tiang (Q_s) dan koefisien tekanan tanah lateral (K) secara signifikan membuka peluang aplikasi teknologi ini pada pondasi tiang skala kecil hingga menengah di wilayah dengan ketersediaan limbah organik melimpah. Di sisi lain, hasil koreksi empiris (F_c) yang berhasil diintegrasikan ke dalam formulasi prediksi memberikan manfaat teoritis penting, yakni pengayaan model prediktif daya dukung tiang dengan memperhitungkan efek perlakuan LCT secara eksplisit. Formulasi korektif ini memungkinkan rekayasa parameter tanah yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan, sehingga dapat meningkatkan akurasi dalam desain pondasi pada media granular yang distabilkan secara biologis. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengembangan teknik perbaikan tanah inovatif, tetapi juga memperkuat dasar teoritis dalam pemodelan interaksi tanah–struktur akibat pengaruh enzim urease.

3.10. Batasan dan Rekomendasi Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena dilakukan pada skala laboratorium dengan model tiang kecil, sehingga hasilnya belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan. Komposisi kandungan limbah cair tahu (LCT) juga belum dianalisis secara rinci, sehingga efektivitas penggunaan dapat bervariasi tergantung pada sumber bahan baku. Selain itu, durabilitas hasil presipitasi CaCO_3 dan stabilitas jangka panjang tanah yang telah distabilisasi belum diteliti, padahal aspek ini penting dalam desain pondasi yang berkelanjutan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan mencakup uji lapangan pada berbagai jenis tanah dan kondisi iklim, serta analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk memodelkan respons tegangan–regangan akibat perlakuan LCT. Kajian lebih lanjut mengenai karakteristik kimia LCT dari berbagai sumber dan pengembangan parameter evaluasi efektivitas biostabilisasi juga dibutuhkan guna mendukung penerapan teknologi ini dalam praktik rekayasa geoteknik secara lebih luas dan terstandarisasi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa pemanfaatan limbah cair tahu (LCT) sebagai sumber urease alami dalam metode *Enzyme-Induced Carbonate Precipitation* (EICP) secara signifikan meningkatkan performa geoteknik pada tanah pasir lepas, khususnya dalam peningkatan kapasitas dukung selimut tiang (Qs) sebesar 171% dan koefisien tekanan tanah lateral (K) sebesar 530% dibandingkan kontrol air. Integrasi faktor koreksi empiris ($F_c = 6,2988$) ke dalam formulasi teoritis menghasilkan estimasi yang lebih representatif terhadap kondisi aktual di lapangan.

Secara praktis, teknologi ini menawarkan pendekatan ramah lingkungan dan ekonomis untuk perbaikan tanah granular bertekanan lateral rendah, sedangkan secara teoritis, hasil penelitian ini memperkaya model prediksi daya dukung dengan mempertimbangkan efek urease alami dari LCT secara eksplisit. Namun demikian, keterbatasan skala laboratorium, variasi kualitas bahan baku LCT, serta belum dievaluasinya aspek durabilitas jangka panjang menjadi tantangan yang perlu ditindaklanjuti. Oleh karena itu, studi lanjutan direkomendasikan untuk mencakup uji lapangan, analisis numerik berbasis metode elemen hingga, serta pengembangan parameter evaluasi kinerja biostabilisasi guna mendukung standarisasi teknologi ini dalam praktik rekayasa fondasi modern.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Kadiri, khususnya Laboratorium Teknik Sipil, atas dukungan penuh berupa fasilitas dan peralatan yang telah memungkinkan penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ackah, F. S., Hailiang, W., Huaiping, F., Cheng, L., & Feng, L. Z. (2022). Use of Taguchi method to evaluate the unconfined compressive strength of quicklime stabilized silty clayey subgrade. *Case Studies in Construction Materials*, 17(August), e01417. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01417>
- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., & Beecham, S. (2023). Characteristics of MICP and EICP-Treated sands in simple shear conditions: A benchmarking with the critical state of untreated sand. *Geotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00329>
- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., & Beecham, S. (2024). Cyclic liquefaction resistance of MICP- and EICP-treated sand in simple shear conditions: a benchmarking with the critical state of untreated sand. *Acta Geotechnica*, 19(9), 5891–5913. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02222-7>
- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., Beecham, S., & Candidate, P. D. (2022). Evaluation of the Treatment Processes for MICP-and EICP-Treated Sands. *Geo-Congress*. <https://doi.org/10.1061/9780784484012.038>
- ASTM International. (2020). *ASTM D1143M - 20 Standard Test Methods for Deep Foundations Elements Under Static Axial Compressive Load*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1143_D1143M-20

- Cao, Z., Shen, L., Zhao, J., Liu, L., Zhong, S., Sun, Y., & Yang, Y. (2016). Toward a better practice for estimating the CO₂ emission factors of cement production: An experience from China. *Journal of Cleaner Production*, 139, 527–539.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.070>
- Gade, V. K., & Dasaka, S. M. (2017). Assessment of Air Pluviation Using Stationary and Movable Pluviators. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001798](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001798)
- G. G. Meyerhof. (1976). 2. 1976. meyerhof. Bearing Capacity and Settlement Pile Foundation. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102 (GT3), 627–654.
<https://doi.org/doi.org/10.1061/JPEGDN.00000000>
- Gitanjali, A., Jhuo, Y.-S., Yeh, F.-H., & Ge, L. (2024). Bio-cementation of sand using enzyme-induced calcite precipitation: Mechanical behavior and microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, 417, 135360.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135360>
- Hamamoto, S., Ohko, Y., Ohtake, Y., Moldrup, P., & Nishimura, T. (2022). Water- and air-filled pore networks and transport parameters under drying and wetting processes. *Vadose Zone Journal*, 21(4). <https://doi.org/10.1002/vzj2.20205>
- 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, G., Hua, X., Liu, J., Zhang, Y., & Li, Y. (2024). Study on Dynamic Strength Characteristics of Sand Solidified by Enzyme-Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP). *Materials*, 17(20), 4976. <https://doi.org/10.3390/ma17204976>
- Lin, H., Asce, M., O'donnell, S. T., Asce, A. M., Muhannad, Suleiman, T., Kavazanjian, E., & Brown, D. G. (n.d.). *Effects of Enzyme and Microbially Induced Carbonate Precipitation (EICP and MICP) 44 Treatments on the Response of Axially Loaded Pervious Concrete Piles 45*.
- Li, Y., Zheng, R., & Deng, Y. (2024). Model Tests on Jacked Pile Penetration Characteristics Considering a Static Press-in Piling Machine. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/app14051985>
- 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>
- Meyerhof, G. G. (1963). Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16–26. <https://doi.org/10.1139/t63-003>
- Miao, L., Wang, H., Sun, X., Wu, L., & Fan, G. (2024). Effect analysis of biomineralization for solidifying desert sands. *Biogeotechnics*, 2(1).
<https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100065>
- Ni, P., Song, L., Mei, G., & Zhao, Y. (2018). On predicting displacement-dependent earth pressure for laterally loaded piles. *Soils and Foundations*, 58(1), 85–96.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.007>
- Oberhollenzer, S., Baldermann, A., Marte, R., Tahir, D. M. M., Tschuchnigg, F., Dietzel, M., & Nachtnebel, M. (2022). Microstructure Development in Artificially Cemented, Fine-Grained Soils. *Geosciences (Switzerland)*, 12(9).
<https://doi.org/10.3390/geosciences12090333>
- Pirghazani, A., Katebi, H., Samadi Kafil, H., & Fahmi, A. (2024). Sand Improvement by Surface Percolation Method Using Urease-Containing Substance Extracted from Soybean Seed. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/4134212>

- 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>
- Tian, K., Yang, A., Nie, K., Zhang, H., Xu, J., & Wang, X. (2020). Experimental study of steady seepage in unsaturated loess soil. *Acta Geotechnica*, 15(9), 2681–2689. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00948-2>
- Xiao, Y., Stuedlein, A. W., He, X., Han, F., Evans, T. M., Pan, Z., Lin, H., Chu, J., & van Paassen, L. (2021). Lateral Responses of a Model Pile in Biocemented Sand. *International Journal of Geomechanics*, 21(11). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002179](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002179)
- Xie, X., Gong, T., Wang, Z., Liu, K., & Zheng, X. (2024). Analysis of the End-Bearing Capacity of Piles in Sand Under Limited Region Failure by a Mixed Zero-Extension Line Method. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/app14219713>
- 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>
- Xu, K., Huang, M., Zhen, J., Xu, C., & Cui, M. (2023). Field implementation of enzyme-induced carbonate precipitation technology for reinforcing a bedding layer beneath an underground cable duct. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(4), 1011–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.06.012>
- Yao, Y., Hong, B., Xu, F., Shao, Z., & Huang, S. (2025). Application and Evaluation of Cone Penetration Testing for Determining Internal Friction Angle in Composite Subgrade Cushion Layer. *Indian Geotechnical Journal*, 55(5), 2992–3011. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01098-y>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129724>