



Research Article

In Situ Soybean Crude Urease Calcite Precipitation (SCU-CP) untuk Perkuatan Tanah Pasir

Fauzan R. Ananda¹, Heriansyah Putra^{1,*}, Erizal¹, Angga Prayoga¹, and Maulina Lamuse¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Bogor, Indonesia

Received: 18 May 2025, Accepted: 31 August 2025, Published: 9 September 2025

Abstract

Sand has low bearing capacity due to its low shear strength and lack of cohesion. Chemical improvement is more effective than physical methods for reinforcing sand, as it does not require heavy equipment. Enzyme-Mediated Calcite Precipitation (EMCP) is a chemical method that uses pure urease enzyme, but it is not economical for field applications. Therefore, the Soybean Crude Urease Calcite Precipitation (SCU-CP) method, which substitutes pure urease with soybeans, is used as a solution. This study applies SCU-CP to reinforce sand at both laboratory and field scales using Cone Penetration Test (CPT) and Unconfined Compression Strength (UCS), with variations of 1, 2, and 3 pore volumes (PV). The study began with testing sand parameters, including gradation, specific gravity, and void ratio. Treated sand samples were tested using CPT and UCS at both scales. Calcite quantification was conducted to determine the amount and distribution of calcite formed. The results show that SCU-CP increased q_c values in coarse and fine sand in the CPT test, with the highest values at 3 PV being 1.28 MPa and 2.01 MPa, respectively. Laboratory UCS tests showed maximum values at 3 PV of 331.13 kPa for coarse sand and 104.38 kPa for fine sand. Field UCS tests showed values of 193.19 kPa for coarse sand and 210.84 kPa for fine sand. Calcite distribution was uniform, with actual calcite content reaching 27.66 - 34.10% of the theoretical mass.

© 2025 published by Sriwijaya University

Keywords: *calcite distribution, CPT, sand reinforcement, SCU-CP, UCS*

1. PENDAHULUAN

Tanah akan menerima beban konstruksi yang ada di atasnya yang disalurkan oleh fondasi sehingga diperlukan daya dukung tanah yang sesuai dengan kebutuhan [1]. Daya dukung tanah yang rendah akan menyebabkan masalah pada konstruksi [2]. Oleh karena itu, diperlukan stabilisasi pada tanah. Stabilisasi dapat dilakukan dengan berbagai cara untuk meningkatkan sifat fisik dari tanah yang diperbaiki [3]. Stabilisasi yang umum digunakan yaitu berupa stabilisasi fisik atau kimia. Stabilitas dapat diperoleh melalui penggabungan tanah alami dengan bahan penstabil secara mekanis untuk menghasilkan campuran yang seragam, atau dengan menuangkan bahan penstabil ke dalam lapisan tanah yang tidak terganggu dan memungkinkan interaksi terjadi saat bahan penstabil meresap melalui pori-pori tanah [4].

Jenis tanah yang mempunyai daya dukung yang rendah yaitu pasir. Pasir cenderung memiliki

parameter kuat geser yang rendah dan tidak memiliki nilai kohesif yang menyebabkan daya dukungnya rendah [5]. Perbaikan diperlukan untuk meningkatkan parameter kuat geser yang rendah untuk memperbaiki ikatan pada butiran tanah. Perbaikan yang pernah dilakukan pada pasir yaitu perbaikan fisik dan kimiawi. Secara fisik, pasir dapat diperbaiki dengan cara pemadatan, tetapi tidak efektif karena akan sulit dilakukan dengan kondisi kering [6]. Darwis (2017) mengatakan bahwa perbaikan secara kimiawi lebih efektif karena tidak perlu menggunakan alat berat. Perbaikan dengan cara kimiawi sudah dilakukan yaitu mencampurkan semen dengan pasir dan terbukti dapat meningkatkan nilai UCS seiring dengan penambahan persentase semen [8]. Selain itu, teknik yang dapat diterapkan pada pasir adalah dengan menggunakan metode kalsit karena proses pengendapan kalsit akan menghasilkan material yang mengisi ruang antara partikel-partikel tanah, sehingga meningkatkan kapasitas daya dukung tanah [9]. Metode kalsit saat

ini yang sedang dikembangkan yaitu dengan teknik *Enzyme-Mediated Calcite Precipitation* (EMCP). Metode ini menggunakan enzim *urease* untuk memecahkan urea menjadi ion karbonat (CO_3^{2-}) dan akan bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) yang nantinya akan membentuk senyawa kalsit [10], [11].

Metode perbaikan EMCP adalah metode kalsit yang merupakan hasil perkembangan dari berbagai metode kalsit lainnya yang diawali dengan metode *Microbial Induced Calcite Precipitation* (MICP). Metode MICP memanfaatkan bakteri untuk menghasilkan kalsit yang dapat mengisi pori di antara butiran tanah [12]. Penggunaan bakteri pada metode ini memiliki kelemahan pada produksi bakteri karena laju kematian pada bakteri sulit untuk dikontrol sehingga metode EMCP muncul sebagai solusi yang tidak memerlukan bakteri sebagai produsen kalsit, tetapi metode ini membutuhkan enzim *urease* murni [13]. Enzim *urease* murni akan sangat tidak ekonomis apabila digunakan pada skala lapangan karena membutuhkan enzim yang banyak [14]. Oleh karena itu, metode *Soybean Crude Urease Calcite Precipitation* (SCU-CP) hadir sebagai solusi. Metode ini menyubstitusi enzim *urease* murni dengan kacang kedelai yang mengandung enzim *urease*.

Penggunaan metode SCU-CP telah digunakan pada beberapa penelitian sebelumnya. Pemberian SCU-CP pada tanah gambut meningkatkan nilai CBR dari 2,93% menjadi 7,03% pada kondisi jenuh [10]. Peningkatan juga terjadi pada pasir yang mendapatkan nilai UCS 43 – 44 kPa dengan *curing time* 7 hari [15]. Nilai UCS juga mengalami peningkatan dengan *curing time* 28 hari yaitu dengan nilai maksimum mencapai 53,6 kPa [16]. Oleh karena itu, metode SCU-CP efisien dalam meningkatkan daya dukung tanah. Namun, penelitian sebelumnya baru dilakukan dengan skala laboratorium. Sehingga efektivitas metode tersebut pada skala lapangan perlu dibuktikan.

Penerapan metode *calcite precipitation* pada skala lapangan pernah dilakukan oleh Zeng et al. (2021) yang menggunakan *Cone Penetration Test* (CPT). Selain itu, Paassen et al. [18] juga melakukan penelitian kalsit dengan skala besar yang dievaluasi dengan seismik transmisi gelombang geser dan uji UCS pada sampel yang digali. Skala lapangan juga pernah dilakukan dengan metode SCU-CP, namun kekuatannya dievaluasi dengan pengujian *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) [19]. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa SCU-CP dapat meningkatkan kekuatan CBR pasir menjadi 1,4%.

Penelitian ini menggunakan dua jenis pasir, yaitu pasir kasar dan pasir halus, yang masing-masing akan diperlakukan dengan metode SCU-CP. Untuk melihat pengaruhnya, jumlah volume larutan kalsit

(*pore volume*/PV) divariasikan penuangan pada kedua jenis pasir untuk melihat banyaknya kalsit yang terbentuk. Pada penelitian ini diaplikasikan SCU-CP untuk perkuatan tanah pasir pada skala lapangan dengan *Cone Penetration Test* (CPT) yang bertujuan mengetahui peningkatan kekuatan pasir pada skala lapangan. Selain itu kekuatan pasir juga diuji melalui *Unconfined Compression Strength* (UCS) di laboratorium, serta uji UCS lapangan yang menggunakan *Pocket Soil Penetrometer*. Banyaknya pembentukan kalsit pada pasir tentunya berpengaruh pada kekuatan pasir, sehingga analisis distribusi kalsit akan dilakukan untuk mengetahui seberapa banyak kalsit yang terbentuk dalam pasir yang dapat menunjukkan efektivitas metode SCU-CP dalam memperkuat pasir tersebut.

2. METODE PENELITIAN

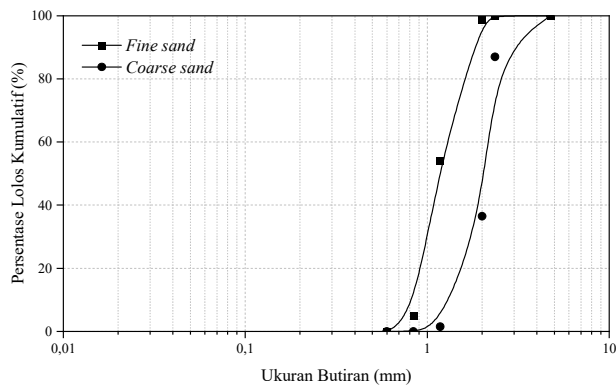
Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah larutan kalsit dan pasir bangka. Larutan kalsit terdiri dari reagen dan kedelai dengan variasi konsentrasi sebagai bio-katalis. Reagen yang digunakan berupa bahan *technical grade* yaitu urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) dengan merek nitrea yang diproduksi oleh PT. Pupuk Kujang dan kalsium klorida (CaCl_2) dengan merek Shandong Haihua dengan konsentrasi masing-masing 1 mol/L. Sementara itu, kedelai yang digunakan diproduksi oleh CMG Logistik. Adapun pasir yang digunakan pada penelitian ini yaitu pasir bangka yang termasuk pada salah satu jenis pasir silika [19]. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bahan yang digunakan pada penelitian (a) Tanah Pasir (b) Kalsium Klorida (c) Urea (d) Tepung kKedelai

Penelitian ini menggunakan variasi ukuran pasir, yaitu pasir kasar dengan ukuran tertahan pada saringan No. 8-16 dan pasir halus dengan ukuran tertahan pada saringan No. 14-20. Pengujian berat jenis yang mengacu pada SNI [20], mendapatkan nilai pada pasir kasar dan pasir halus yaitu 2,50 dan 2,47. Pasir dilakukan uji gradasi ukuran butiran yang dapat dilihat pada Gambar 2. Pada pasir kasar, nilai D10, D30, dan D60 adalah 1,3 mm; 1,73 mm; dan 2,14 mm. Nilai tersebut dianalisis sehingga didapatkan nilai koefisien keseragaman (Cu) dan Koefisien gradasi (CC) adalah 1,65 dan 1,08. Pada pasir halus, nilai D10, D30, dan D60 adalah 0,816 mm; 0,997 mm; dan 1,3 mm. Berdasarkan nilai tersebut, pasir halus mempunyai nilai koefisien

keseragaman (C_u) dan Koefisien gradasi (C_C) adalah 1,59 dan 0,94. Oleh karena itu, pasir tersebut digolongkan pada pasir bergradasi buruk (SP) ([21]).



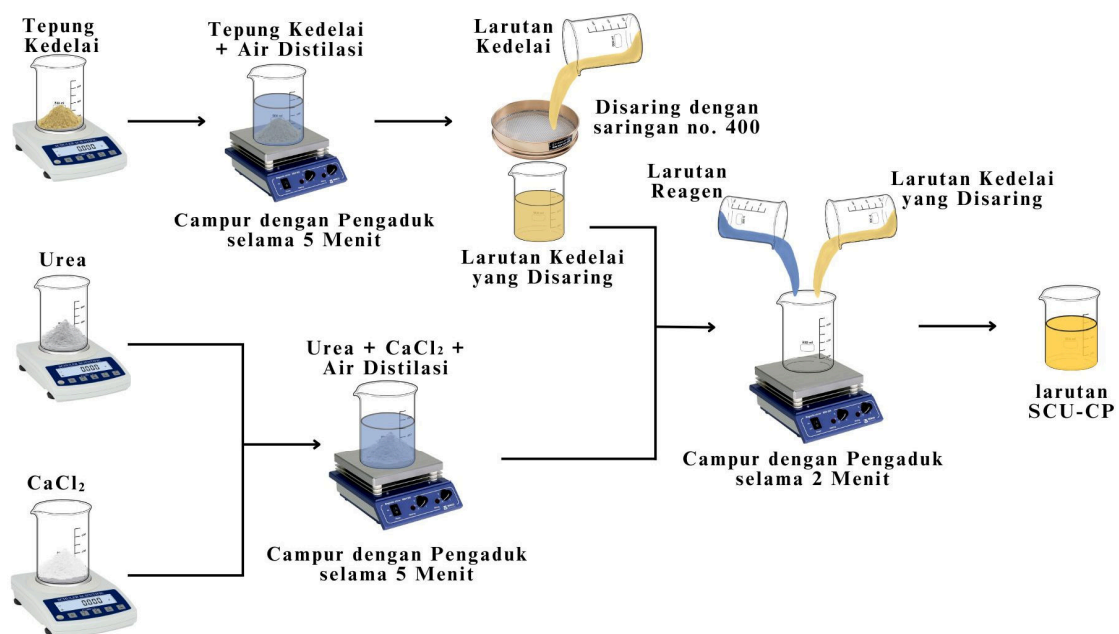
Gambar 2. Distribusi ukuran butiran pasir

Angka pori pada pasir yang didapatkan berdasarkan pada angka pori maksimum (e_{maks}) dan angka pori minimum (e_{min}). Pengujian angka pori maksimum yang dilakukan mengacu pada ASTM [22] yang mendapatkan nilai pada pasir kasar dan halus yaitu 0,65 dan 0,74. Pada pengujian angka pori

minimum yang dilakukan mengacu pada ASTM 4254-16 mendapatkan nilai pada pasir kasar dan halus yaitu 0,51 dan 0,54. Penelitian ini dirancang menggunakan pasir dengan kepadatan relatif 50 %, sehingga didapatkan angka pori aktual pada pasir kasar dan halus dengan nilai 0,58 dan 0,64.

Pembuatan Larutan SCU-CP

Bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan SCU-CP mencakup kedelai dan bahan reagen yang terdiri dari kalsium klorida dan urea. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Putra et al. [24] menunjukkan bahwa konsentrasi optimum yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 mol/L untuk reagen dan 20 g/L untuk kedelai. Reagen dan kedelai dicampur dengan air suling (akuades) dan diaduk selama 5 menit menggunakan *magnetic stirrer*. Larutan kedelai kemudian disaring menggunakan saringan No. 400. Larutan SCU-CP yang terdiri dari larutan reagen dan larutan kedelai dituangkan ke dalam tanah pasir. Skematis pembuatan larutan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pembuatan larutan SCU-CP

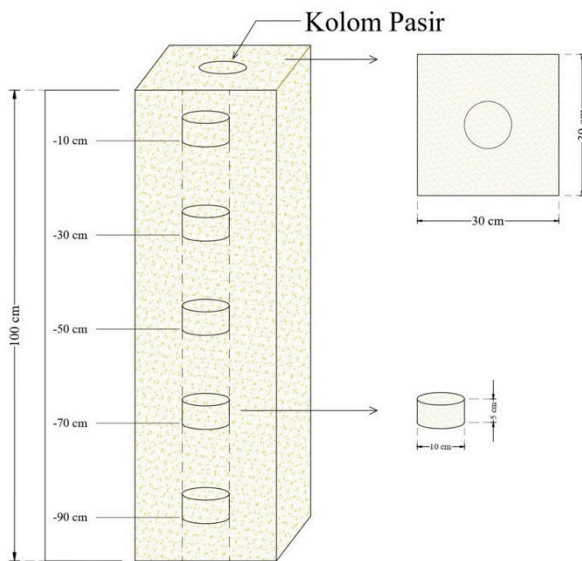
Uji Kuantifikasi Kalsit

Kuantifikasi kalsit dilakukan melalui dua pengujian, yakni uji presipitasi dan uji distribusi dengan metode *acid leaching*. Penggunaan uji presipitasi dipertimbangkan untuk memantau pembentukan kalsit. Pendekatan ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Putra et al. [25], yang menggunakan larutan urea dan kalsium klorida dengan konsentrasi 1 mol/L. Proporsi campuran larutan adalah 1:1:2 untuk urea, kalsium

klorida, dan kedelai. Tujuan utama pengujian ini adalah menentukan kadar optimal kedelai. Uji presipitasi dilakukan dengan menggunakan tabung transparan sebagai wadah. Ekstraksi kedelai dilakukan dengan proses penyaringan menggunakan saringan berdiameter 0,05 mm (No. 400).

Pengujian distribusi menggunakan metode *acid leaching*, yang bertujuan untuk menentukan persentase dan distribusi kalsit yang terbentuk pada pasir. Pendekatan ini mengikuti penelitian yang telah

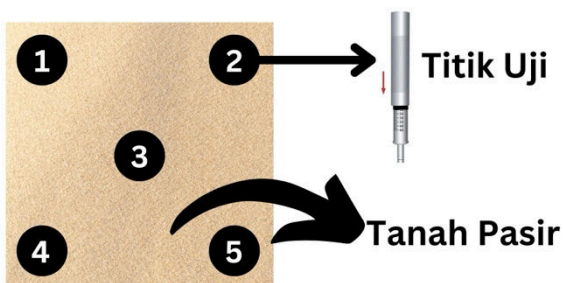
dilakukan oleh [26]. Sampel pasir yang telah melalui periode *curing* diambil setiap kedalaman 20 cm dengan total 5 sampel. Skema pengambilan sampel pasir dapat dilihat pada Gambar 4. Pasir yang telah diambil, dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 24 jam. Selanjutnya, pasir yang telah dikeringkan diambil sebanyak 100 gram dan proses *leaching* dilakukan menggunakan larutan HCl 0,1 mol/L. Setelah itu, pasir dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam dengan suhu 100°C. Berat pasir yang hilang dianggap sebagai berat kalsit yang terbentuk [27].



Gambar 4. Skema pengujian distribusi kalsit

Pengujian Kekuatan Tanah

Pengujian kekuatan dilakukan dengan dua metode yaitu *Cone Penetration Test* (CPT) dan *Unconfined Compression Strength* (UCS). Pengujian UCS terdiri dari dua pengujian yaitu pengujian yang dilakukan di lapangan dengan *soil pocket penetrometer* yang mengacu pada ASTM WK27337. Skema pengujian UCS lapangan dapat dilihat pada Gambar 5.



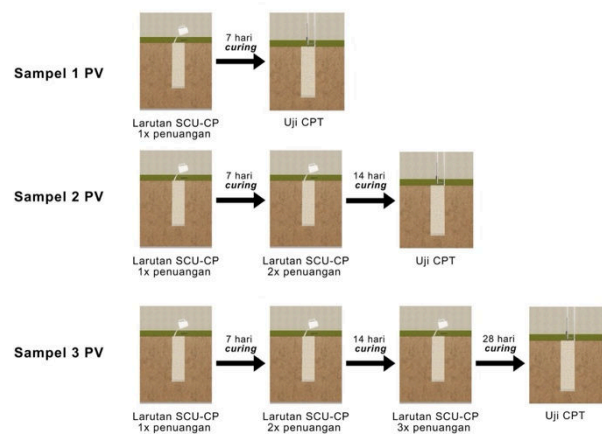
Gambar 5. Skema pengujian UCS lapangan dengan *Soil Pocket Penetrometer*

Pengujian CPT mengikuti pedoman SNI [29] tentang Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan alat sondir memiliki tujuan untuk mendapatkan

parameter-parameter yang menggambarkan perlawanan penetrasi lapisan tanah di lapangan menggunakan alat sondir. Parameter-parameter yang dihasilkan meliputi perlawanan konus (q_c), perlawanan geser (f_s), angka banding geser (R_f), dan geseran total tanah (T_f). Pengujian dilakukan juga pada skala laboratorium dengan uji UCS. Pengujian UCS berfungsi untuk mengevaluasi peningkatan nilai UCS tanah. Setelah pengujian kekuatan, peningkatan nilai UCS dan CPT dihubungkan dengan distribusi kalsit yang terbentuk. Pengujian CPT didasarkan pada variasi pasir kasar (C) dan pasir halus (F), serta jumlah larutan SCU-CP yang dituangkan, berkisar antara 1, 2, dan 3 volume pori (PV). Selama pengujian kekuatan, sampel tanah dijaga dalam kondisi jenuh ($SR \approx 100\%$). Kondisi eksperimental sampel pasir dengan variasi dan jumlah larutan SCU-CP yang dituangkan ditunjukkan pada Tabel 1 dan skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 6

Tabel 1. Kondisi eksperimental pengujian

Sampel	Penuangan Larutan SCU-CP (PV)
F1	1
F2	2
F3	3
C1	1
C2	2
C3	3



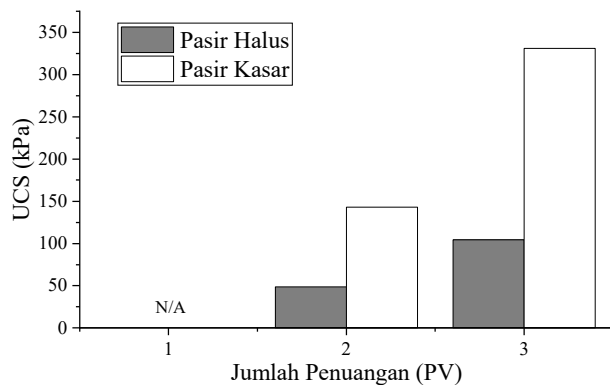
Gambar 6. Skema pengujian CPT di lapangan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

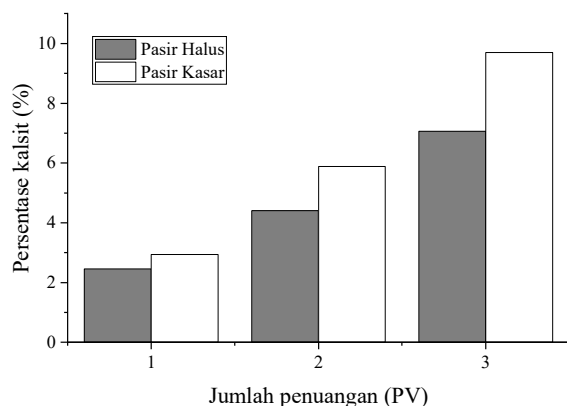
Peningkatan Nilai UCS pada Pasir

Hasil dari pengujian UCS dapat dilihat pada Gambar 7. Berbeda dengan sampel 2 PV ataupun 3 PV, sampel yang diuji UCS pada variasi penuangan 1 PV tidak memiliki nilai UCS. Sampel 1 PV pada pasir kasar maupun halus tidak dapat diuji karena ikatan antar butiran pasir oleh kalsit tidak cukup untuk mengikat secara efektif, sehingga efektivitas

dari pembentukan kalsit di antara partikel pasir perlu menjadi tantangan. Persentase kalsit yang terbentuk pada sampel di tiap penuangan dapat dilihat pada Gambar 8. Persentase kalsit yang terbentuk pada pasir kasar dan pasir halus pada penuangan 1 PV hanya 2,94% dan 2,46%. Pada 2 PV pasir kasar dan halus terbentuk kalsit dengan persentase 5,89% dan 4,41%. Penuangan 3 PV memiliki persentase kalsit yang terbentuk pada pasir kasar dan halus yaitu 9,70% dan 7,06%.



Gambar 7. Nilai UCS dengan variasi jumlah penuangan SCU-CP



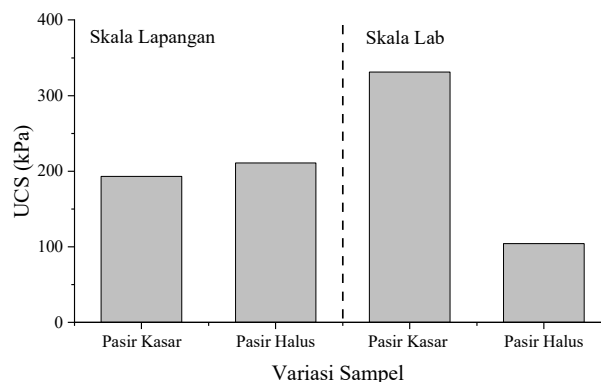
Gambar 8. Persentase Kalsit pada sampel Pasir UCS

Berdasarkan hasil pengujian UCS yang dapat dilihat pada Gambar 7, menunjukkan variasi penuangan mempengaruhi nilai UCS. Pasir kasar pada 2 PV memiliki nilai UCS 142,91 kPa dan pada 3 PV memiliki nilai UCS 331,13 kPa. Dapat dikatakan bahwa pasir kasar mengalami peningkatan kekuatan sebanyak 56,84% antara 2 PV dan 3 PV. Pasir halus pada 2 PV memiliki nilai UCS 48,61 kPa dan pada 3 PV memiliki nilai UCS 104,38 kPa. Peningkatan yang terjadi pada pasir halus antara 2 PV dan 3 PV adalah 53,43%. Pada masing-masing penuangan pasir kasar lebih tinggi nilainya dibandingkan dengan pasir halus. Hal ini disebabkan pasir kasar lebih banyak mempunyai pori, sehingga kalsit yang terbentuk akan lebih banyak [30].

Kalsit yang terbentuk pada pori-pori pasir akan menciptakan ikatan antar butiran, sehingga mobilitas butiran pasir akan berkurang dan ikatan tersebut akan

meningkatkan kekuatan daya dukung tanah [31]. Jumlah penuangan juga berpengaruh terhadap banyaknya kalsit yang terbentuk pada pasir. Penuangan berulang tentu akan berdampak pada distribusi dan pengendapan kalsit yang lebih merata sehingga kekuatan akan lebih signifikan [32]. Oleh karena itu, penuangan 3 PV optimum untuk dilakukan pada pasir.

Selain pada skala laboratorium, penuangan 3 PV dilakukan pada skala lapangan. Pengujian UCS pada skala laboratorium dan lapangan menggunakan peralatan yang berbeda. Pada skala lapangan, pengujian dilakukan menggunakan *pocket soil penetrometer*. Uji UCS dilakukan pada skala lapangan dengan memberikan penetrasi pada pasir. Pengujian dilakukan dengan 5 pengulangan penetrasi pada tiap kedalaman. Nilai UCS pada skala lapangan beserta UCS skala laboratorium dapat dilihat pada Gambar 9. UCS skala lapangan pada pasir kasar dan halus memiliki nilai 193,19 kPa dan 210,84 kPa. UCS pasir kasar pada skala lapangan lebih kecil dari UCS pada skala laboratorium yang bernilai 331,13 kPa. Meskipun kepadatan pasir telah dikontrol sebesar 50% pada skala laboratorium dan lapangan, terdapat perbedaan perilaku terutama pada pasir halus.



Gambar 9. Perbandingan nilai UCS 3 PV pada skala laboratorium dan lapangan

Pasir halus cenderung lebih mudah memadat seiring dengan semakin banyaknya larutan yang melewati pori-porinya, dibandingkan pasir kasar. Pasir kasar memiliki porositas yang tinggi, sehingga larutan SCU-CP akan mengalir dengan cepat [33]. Porositas yang tinggi menyebabkan kalsit yang terbentuk tidak terbentuk secara merata dan tidak maksimal untuk mengikat butiran antar partikel. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan kontrol kepadatan secara konsisten selama proses penuangan larutan berlangsung, guna memastikan distribusi larutan yang merata dan hasil yang akurat dalam pengujian kekuatan. Pada skala lapangan tentunya juga dipengaruhi dari lingkungan yang juga berpengaruh terhadap efektivitas pembentukan kalsit. Berbeda dengan pasir halus yang memiliki

nilai UCS pada skala laboratorium yang lebih kecil dari skala lapangan dengan nilai 104,38 kPa. Pasir halus menghasilkan kepadatan yang lebih tinggi karena ruang pori antar partikel yang lebih minimal [34].

Selain pada skala laboratorium, penuangan 3 PV dilakukan pada skala lapangan. Pengujian UCS pada skala laboratorium dan lapangan menggunakan peralatan yang berbeda. Pada skala lapangan, pengujian dilakukan menggunakan *pocket soil penetrometer*. Uji UCS dilakukan pada skala lapangan dengan memberikan penetrasi pada pasir. Pengujian dilakukan dengan 5 pengulangan penetrasi pada tiap kedalaman. Nilai UCS pada skala lapangan berserta UCS skala laboratorium dapat dilihat pada Gambar 9 UCS skala lapangan pada pasir kasar dan halus memiliki nilai 193,19 kPa dan 210,84 kPa. UCS pasir kasar pada skala lapangan lebih kecil dari UCS pada skala laboratorium yang bernilai 331,13 kPa. Meskipun kepadatan pasir telah dikontrol sebesar 50% pada skala laboratorium dan lapangan, terdapat perbedaan perilaku terutama pada pasir halus.

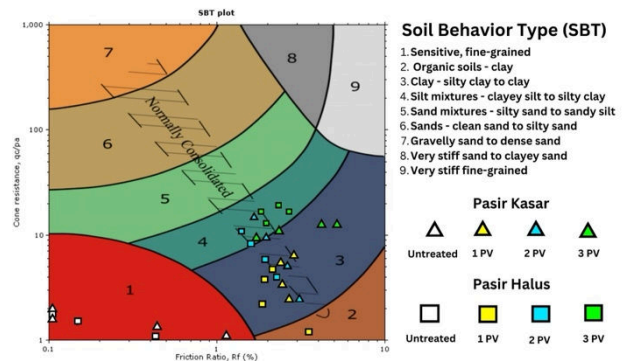
Pasir halus cenderung lebih mudah memadat seiring dengan semakin banyaknya larutan yang melewati pori-porinya, dibandingkan pasir kasar. Pasir kasar memiliki porositas yang tinggi, sehingga larutan SCU-CP akan mengalir dengan cepat [33]. Porositas yang tinggi menyebabkan kalsit yang terbentuk tidak terbentuk secara merata dan tidak maksimal untuk mengikat butiran antar partikel. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan kontrol kepadatan secara konsisten selama proses penuangan larutan berlangsung, guna memastikan distribusi larutan yang merata dan hasil yang akurat dalam pengujian kekuatan. Pada skala lapangan tentunya juga dipengaruhi dari lingkungan yang juga berpengaruh terhadap efektivitas pembentukan kalsit. Berbeda dengan pasir halus yang memiliki nilai UCS pada skala laboratorium yang lebih kecil dari skala lapangan dengan nilai 104,38 kPa. Pasir halus menghasilkan kepadatan yang lebih tinggi karena ruang pori antar partikel yang lebih minimal [34].

Nilai Cone Penetration Test (CPT) Pasir Skala Lapangan

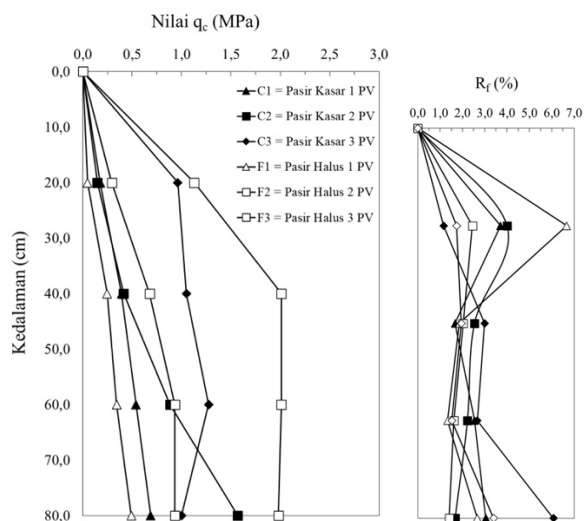
Nilai q_c dan R_f pada tiap variasi penuangan dapat dilihat pada Gambar 12. Berdasarkan Gambar 12, nilai q_c tertinggi terdapat pada pasir yang diberi perlakuan SCU-CP sebanyak 3 PV. Jumlah penuangan 3 PV pada pasir halus memiliki nilai q_c yang lebih besar dibandingkan pada pasir kasar. Pada penuangan 3 PV didapatkan nilai tertinggi q_c pada pasir kasar dan halus yaitu 1,28 MPa dan 2,01 MPa. Kedua nilai tersebut merupakan nilai tertinggi di

antara variasi PV lainnya karena penuangan 3 PV memiliki nilai tertinggi karena jumlah kalsit yang terbentuk akan lebih banyak seiring dengan adanya penambahan penuangan larutan. Pasir halus memiliki kepadatan yang lebih besar, sehingga berpengaruh pada nilai q_c yang semakin besar [35]. Gambar 11 juga menunjukkan semakin bertambahnya kedalaman maka nilai q_c akan semakin tinggi. Semakin dalam banyaknya larutan SCU-CP yang melewati rongga antar partikel pasir akan lebih banyak, sehingga kalsit yang terbentuk akan semakin banyak yang akan berpengaruh pada kekuatannya.

Analisis data sondir (*Cone Penetration Test*) pada nilai q_c (*cone resistance*) dan R_f (*friction ratio*) sering digunakan untuk mengklasifikasikan jenis perilaku tanah menggunakan metode *Soil Behavior Type* (SBT) menurut Robertson et al. [36] yang ditunjukkan pada Gambar 10. Kedua nilai ini memungkinkan untuk menentukan tipe tanah, seperti pasir, lempung, atau lanau, serta perilaku mekaniknya.



Gambar 10. Soil behaviour type (SBT) hasil uji CPT



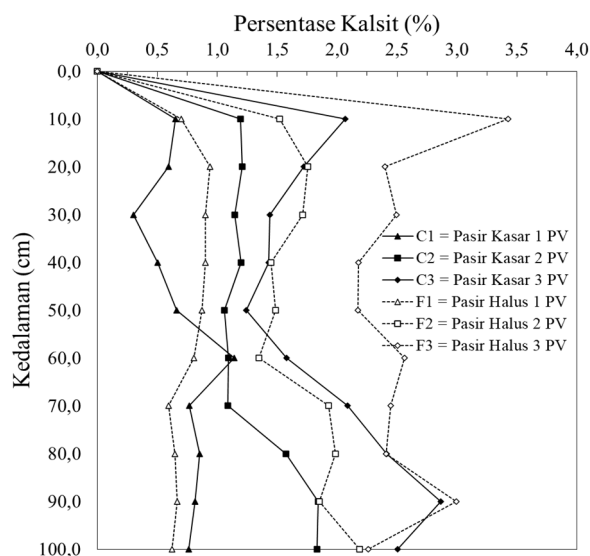
Gambar 11. Nilai q_c pada Pasir SCU-CP

Plot pada grafik data sondir menunjukkan pasir yang tidak diberi perlakuan SCU-CP memiliki karakteristik *sensitive fine-grained* (Zona 1). Plot

pada grafik data sondir yang telah diberi perlakuan SCU-CP berada pada zona 2, 3 dan 4. Zona ini menunjukkan bahwa pasir yang telah diberi perlakuan SCU-CP memiliki karakteristik *organic soils – clay, clay - silty clay to clay* dan *silt mixtures - clayey silt to silty clay*. Perubahan zona ini pada pasir SCU-CP disebabkan adanya peningkatan kekuatan yang disebabkan oleh kalsit. Kalsit yang terbentuk menjadi perekat antar partikel pasir. Kalsit yang terbentuk meningkatkan kohesi, sehingga meningkatkan nilai Rf. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gomes et al. [37], pasir yang memiliki kandungan kalsit 3% berada di zona 7. Oleh karena itu, kandungan kalsit pada penelitian ini mengandung kalsit yang lebih sedikit dan kalsit tidak terdistribusi secara merata sehingga perlu dilakukan analisis terhadap distribusi kalsit pada pasir untuk melihat banyaknya kalsit yang terbentuk pada setiap kedalaman.

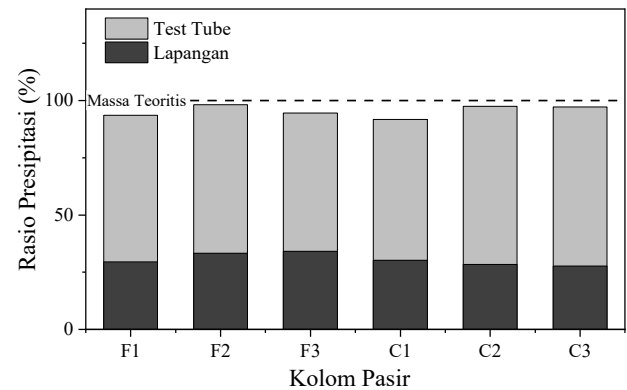
Distribusi Kalsit pada Pasir

Distribusi kalsit yang terbentuk pada kolom pasir, dievaluasi dengan *acid leaching*. Hasil pengujian *acid leaching* dapat dilihat pada Gambar 12 memperlihatkan nilai distribusi kalsit. Distribusi kalsit pada setiap sampel tanah menunjukkan penyebaran yang seragam, dengan rata-rata kandungan kalsit pada sampel F1, F2, F3, C1, C2, dan C3 masing-masing sebesar 0,76%; 1,72%; 2,53%; 0,70%; 1,32%; dan 1,93%. Nilai distribusi kalsit berkisar antara 0,3% hingga 3,43%. Pembentukan kalsit tertinggi terdapat pada permukaan tanah karena sampel pasir menyaring larutan sehingga menyisakan partikel kedelai di atasnya. Hal ini mengakibatkan terjadinya penebalan pada bagian atas karena adanya partikel kalsit dan kedelai yang tersaring oleh butiran tanah.



Gambar 12. Distribusi Kalsit pada pasir

Kandungan kalsit pada uji presipitasi untuk setiap sampel kolom pasir yang dapat dilihat pada Gambar 13 berkisar antara 90,08% hingga 91,7%, sedangkan kalsit yang terbentuk secara aktual hanya mencapai 27,66% hingga 34,10% dari massa teoritis. Hal ini disebabkan oleh pengaruh reagen teknis yang digunakan, yang memperlambat pembentukan kalsit dan memerlukan waktu lebih lama untuk menghasilkan kalsit secara penuh. Meskipun demikian, teknik penuangan larutan ini memiliki keunggulan, yaitu memungkinkan larutan menjangkau lapisan paling bawah dengan distribusi kalsit yang merata [38]. Selain itu, persentase kalsit yang terbentuk juga dipengaruhi oleh permeabilitas pasir; semakin besar ukuran butiran pasir, semakin tinggi permeabilitasnya. Oleh karena itu, pembentukan kalsit menjadi lebih sedikit, sehingga diperlukan beberapa kali *treatment* SCU-CP untuk menghasilkan kalsit yang setara dengan presipitasi massa 1 PV *treatment*.



Gambar 13. Perbandingan massa Kalsit aktual dan teoretis

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh pengujian CPT dengan jumlah penuangan 3 PV pada pasir halus memiliki nilai q_c yang lebih besar dibandingkan pada pasir kasar. Nilai tertinggi q_c pada pasir kasar dan halus yaitu 1,28 MPa dan 2,01 MPa di kedalaman 80 cm. Kandungan kalsit pada uji presipitasi untuk setiap sampel kolom pasir berkisar antara 90,08% hingga 91,7%, sedangkan kalsit yang terbentuk secara aktual hanya mencapai 27,66% hingga 34,10% dari massa teoritis. Kalsit yang terbentuk tersebut akan mempengaruhi kekuatan pasir. Plot pada grafik data sondir yang telah diberi perlakuan SCU-CP berada pada zona 2, 3, dan 4 yang menunjukkan bahwa pasir yang diberi perlakuan SCU-CP dapat meningkatkan nilai parameter CPT.

Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan pasir SCU-CP yang telah diberi perlakuan 1 PV tidak efektif dalam pembentukan kalsit, sehingga perlu dilakukan upaya peningkatan

efektivitas kalsit pada 1 PV. Selain itu, pengaruh lingkungan perlu dievaluasi terhadap efektivitas pembentukan kalsit.

REFERENSI

- [1] B. Leshchinsky, "Bearing Capacity of Footings Placed Adjacent to $c'-\phi'$ Slopes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 141, no. 6, 2015, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001306.
- [2] N. Juliana and N. F. B. Bawadi, "Effects of Physical and Mechanical Properties of Soft Soil on Subgrades Performances in Lubuk Bayas Village, Serdang Bedagai Regency," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, pp. 0–5. doi: 10.1088/1755-1315/1216/1/012017.
- [3] H. Afrin, "A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques," *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, p. 19, 2017, doi: 10.11648/j.ijtet.20170302.12.
- [4] W. H. Perloff and W. Baron, *Soil Mechanics: Principles and Applications*. New York (US): John Wiley & Sons, 1976.
- [5] G. Wibisono, S. A. Nugroho, and K. Umam, "THE INFLUENCE of SAND's GRADATION and CLAY CONTENT of DIRECT SHEAR TEST on CLAYEY SAND," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 316, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/316/1/012038.
- [6] J. Huang and A. E. Hartemink, "Soil and environmental issues in sandy soils," *Earth-Science Reviews*, vol. 208, no. June, p. 103295, 2020, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103295.
- [7] Darwis, *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta (ID): Pustaka Aq, 2017.
- [8] A. J. Choobbasti, A. Vafaei, and S. S. Kutanaei, "Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica," *Open Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 111–116, 2015, doi: 10.1515/eng-2015-0011.
- [9] M. P. Harkes, L. A. van Paassen, J. L. Booster, V. S. Whiffin, and M. C. M. van Loosdrecht, "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement," *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 112–117, Feb. 2010, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2009.01.004.
- [10] H. Putra and I. Yudhistira, "Improvement of the California Bearing Ratio of Peat Soil Using Soybean Crude Urease Calcite Precipitation," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 8, no. 11, pp. 2411–2423, 2022, doi: 10.28991/CEJ-2022-08-11-04.
- [11] R. Prayodi et al., "Influence of Soybean and Reagent Concentration on Characteristics of Precipitated Materials," *Journal of GeoEngineering JOG*, vol. 20, no. 1, pp. 16–28, 2025, doi: 10.6310/jog.202503_20(1).0002.
- [12] N. Tiwari, N. Satyam, and M. Sharma, "Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-89687-2.
- [13] H. Yasuhara, D. Neupane, K. Hayashi, and M. Okamura, "Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation," *Soils and Foundations*, vol. 52, no. 3, pp. 539–549, 2012, doi: 10.1016/j.sandf.2012.05.011.
- [14] H. S. Baiq, H. Yasuhara, N. Kinoshita, H. Putra, and E. Johan, "Examination of calcite precipitation using plant-derived urease enzyme for soil improvement," *International Journal of GEOMATE*, vol. 19, no. 72, pp. 231–237, 2020, doi: 10.21660/2020.72.9481.
- [15] L. Lofianda, H. Putra, and H. Yasuhara, "Pengaruh Variasi Ukuran Butiran Tepung Kedelai pada Metode Calcite Precipitation untuk Peningkatan Kekuatan Tanah Pasir," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 29–36, 2023, doi: 10.29244/jstil.8.1.29-36.
- [16] L. Lofianda, H. Putra, Erizal, Sutoyo, and H. Yasuhara, "Potentially of soybean as bio-catalyst in calcite precipitation methods for improving the strength of sandy soil," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 9, no. 7, pp. 2317–2325, Dec. 2021, doi: 10.13189/cea.2021.090719.
- [17] C. Zeng et al., "Experimental and Numerical Analysis of a Field Trial Application of Microbially Induced Calcite Precipitation for Ground Stabilization," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 147, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002545/.
- [18] L. A. Van Paassen, G. Ranajit, van der L. Thomas, J. M., van der S. Wouter, R., L., and van L. Mark, C., M., "Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale BiogROUT Experiment," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, no. 12, pp. 1721–1728, 2010.
- [19] P. G. Oktafiani, H. Putra, and Sutoyo, "Scale-Up Soybean Crude Urease Calcite Precipitation (SCU-CP) Method for Sandy Soil Improvement," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1249, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1249/1/012035.
- [20] [BSN] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1964:2008 Cara Uji Berat Jenis Tanah*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 1964.
- [21] [ASTM] American Society for Testing and Material, *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials, 2017. doi: 10.1520/D2487-17E01.2.
- [22] [ASTM] American Society for Testing and Materials, *D4253-16 Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vitory Table*. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials, 2016. doi: 10.1520/D4253-16.
- [23] [ASTM] American Society for Testing and Materials, *D4254-16 Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials, 2016. doi: 10.1520/D4254-16.1.
- [24] H. Putra, Erizal, Sutoyo, M. Simatupang, and D. H. Y. Yanto, "Improvement of organic soil shear strength through calcite precipitation method using soybeans as bio-catalyst," *Crystals*, vol. 11, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/cryst11091044.
- [25] H. Putra, H. Yasuhara, N. Kinoshita, . E., and T. Sudibyo, "Improving Shear Strength Parameters of Sandy Soil using Enzyme-Mediated Calcite Precipitation Technique," *Civil Engineering Dimension*, vol. 20, no. 2, pp. 91–95, Oct. 2018, doi: 10.9744/ced.20.2.91-95.
- [26] H. Putra, H. Yasuhara, N. Kinoshita, D. Neupane, and C. W. Lu, "Effect of magnesium as substitute material in enzyme-mediated calcite precipitation for soil-improvement technique," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 4, no. MAY, p. 185845, May 2016, doi: 10.3389/FBIOE.2016.00037/BIBTEX.

- [27] H. Putra, H. Yasuhara, N. Kinoshita, D. Neupane, and C. W. Lu, "Effect of magnesium as substitute material in enzyme-mediated calcite precipitation for soil-improvement technique," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 4, no. MAY, p. 185845, May 2016, doi: 10.3389/FBIOE.2016.00037/BIBTEX.
- [28] [ASTM] American Society for Testing and Materials, *WK27337 New Test Method for Pocket Penetrometer Test*. Pennsylvania (US): American Society for Testing and Materials, 2019.
- [29] [BSN] Badan Standardisasi Nasional, *SNi 2827:2008 Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan Alat Sondir*. Badan Standardisasi Nasional, 2008.
- [30] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, and M. A. Shahin, "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation," <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0023>, vol. 50, no. 1, pp. 81–90, Jan. 2013, doi: 10.1139/CGJ-2012-0023.
- [31] K. Feng and B. M. Montoya, "Influence of Confinement and Cementation Level on the Behavior of Microbial-Induced Calcite Precipitated Sands under Monotonic Drained Loading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 142, no. 1, p. 04015057, Jul. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001379.
- [32] M. G. Gomez, C. M. R. Graddy, J. T. DeJong, D. C. Nelson, and M. Tsesarsky, "Stimulation of Native Microorganisms for Biocementation in Samples Recovered from Field-Scale Treatment Depths," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 1, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001804.
- [33] A. Mahawish, A. Bouazza, and W. P. Gates, "Improvement of Coarse Sand Engineering Properties by Microbially Induced Calcite Precipitation," *Geomicrobiology Journal*, vol. 35, no. 10, pp. 887–897, 2018, doi: 10.1080/01490451.2018.1488019.
- [34] X. W. Ren and J. C. Santamarina, "The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective," *Engineering Geology*, vol. 233, no. November 2017, pp. 48–54, 2018, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.022.
- [35] X. W. Ren and J. C. Santamarina, "The hydraulic conductivity of sediments: A pore size perspective," *Engineering Geology*, vol. 233, no. November 2017, pp. 48–54, 2018, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.022.
- [36] P. Kay. Robertson and K. Cabal, *Guide to Cone Penetration Testing*, 7th ed. Signa Hill (US): Gregg Drilling LLC, 2022. doi: 10.1007/978-0-85729-439-5.
- [37] M. G. Gomez, C. M. Anderson, C. M. R. Graddy, J. T. DeJong, D. C. Nelson, and T. R. Ginn, "Large-Scale Comparison of Bioaugmentation and Biostimulation Approaches for Biocementation of Sands," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 143, no. 5, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001640.
- [38] P. G. Oktafiani, H. Putra, and Sutoyo, "Scale-Up Soybean Crude Urease Calcite Precipitation (SCU-CP) Method for Sandy Soil Improvement," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*, vol. 1249, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1249/1/012035.

