

ANALISIS PARAMETER PEMBENTUKAN KALSIT DALAM METODE SCU-CP UNTUK PENINGKATAN KUAT GESER TANAH PASIR

RATNA ATIKA HUWAIDA



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Analisis Parameter Proses Pembentukan Kalsit dalam Metode SCU-CP untuk Peningkatan Kuat Geser Tanah Pasir” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Ratna Atika Huwaida

F0507251017



RINGKASAN

RATNA ATIKA HUWAIDA. Analisis Parameter Pembentukan Kalsit dalam Metode SCU-CP untuk Peningkatan Kuat Geser Tanah Pasir. Dibimbing oleh HERIANSYAH PUTRA dan ERIZAL.

Tanah pasir memiliki kohesi yang sangat rendah sehingga rentan mengalami erosi, penurunan, dan keruntuhan geser, sehingga diperlukan metode stabilisasi yang efektif. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan parameter pembentukan kalsit pada metode *Soybean Crude Urease–Calcite Precipitation* (SCU-CP) untuk meningkatkan kekuatan tanah pasir bergradasi buruk (SP). Variasi konsentrasi ekstrak kedelai (20–100 g/L) diterapkan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap presipitasi kalsit, laju hidrolisis, viskositas, pH, dan kadar organik larutan, serta parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) melalui pengujian *direct shear* dan *acid leaching*. Karakterisasi mineralogi dan morfologi dilakukan menggunakan XRD dan SEM, sedangkan hubungan antar parameter dianalisis menggunakan pemodelan *Random Forest* dan *Symbolic Regression*. Hasil menunjukkan bahwa rasio presipitasi, kadar organik, dan laju hidrolisis meningkat seiring peningkatan konsentrasi kedelai, namun peningkatan tersebut tidak selalu diikuti oleh peningkatan kekuatan tanah. Konsentrasi kedelai 20 g/L menghasilkan kondisi optimum, dengan kohesi meningkat dari 1,22 kPa (tanah tanpa perlakuan) menjadi 26,89 kPa dan sudut geser dalam dari 19,14° menjadi 41,22°, didukung oleh kandungan CaCO_3 efektif tertinggi (3,50%) dan dominasi polimorf kalsit yang lebih stabil dibandingkan vaterit. Analisis korelasi dan *feature importance* menunjukkan bahwa CaCO_3 merupakan parameter paling dominan terhadap peningkatan kekuatan tanah (*feature importance* rata-rata 21,5%), sementara persamaan *symbolic regression* mampu memprediksi kohesi dan sudut geser dalam dengan akurasi tinggi (R^2 0,922–0,965). Penelitian ini menunjukkan bahwa efektivitas metode SCU-CP tidak hanya ditentukan oleh jumlah presipitasi yang terbentuk, tetapi juga oleh kualitas, distribusi, dan tipe polimorf CaCO_3 yang dihasilkan.

Kata kunci: SCU-CP, kalsit, kekuatan geser tanah, tanah pasir, *symbolic regression*



SUMMARY

RATNA ATIKA HUWAIDA. Analysis of Calcite Formation Parameters in the Soybean Crude Urease–Calcite Precipitation (SCU-CP) Method for Enhancing the Shear Strength of Sandy Soil. Supervised by HERIANSYAH PUTRA and ERIZAL.

Sandy soil has inherently low cohesion, making it vulnerable to erosion, excessive settlement, and shear failure. Soil stabilization is therefore required to improve its engineering performance. This study aimed to optimize the calcite formation parameters in the Soybean Crude Urease–Calcite Precipitation (SCU-CP) method to enhance the shear strength of poorly graded sandy soil (SP). Soybean extract concentrations ranging from 20 to 100 g/L were used to investigate their effects on calcite precipitation, hydrolysis rate, viscosity, pH, and organic content of the treatment solution, as well as on the shear strength parameters of the treated soil. Direct shear and acid leaching tests were conducted to evaluate the mechanical properties and calcium carbonate content, while X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize the mineralogical composition and morphology of the precipitates. The relationships among the measured parameters were further examined using Random Forest and symbolic regression analyses. The results indicated that increasing the soybean extract concentration increased the precipitation ratio, organic content, and hydrolysis rate; however, these increases did not necessarily result in higher soil strength. The optimum performance was obtained at a soybean extract concentration of 20 g/L, which increased the cohesion from 1.22 kPa for untreated soil to 26.89 kPa and the internal friction angle from 19.14° to 41.22°. This improvement was associated with the highest effective CaCO_3 content (3.50%) and the predominance of the more stable calcite polymorph over vaterite. Correlation analysis and Random Forest feature importance identified CaCO_3 as the most influential parameter controlling soil strength, with an average feature importance of 21.5%. In addition, the symbolic regression models predicted cohesion and internal friction angle with high accuracy ($R^2 = 0.922\text{--}0.965$). These findings indicate that the effectiveness of the SCU-CP method is governed not only by the quantity of calcium carbonate precipitated but also by its quality, spatial distribution, and polymorphic form.

Keywords: SCU-CP, sandy soil, soil shear strength, symbolic regression



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

ANALISIS PARAMETER PEMBENTUKAN KALSIT DALAM METODE SCU-CP UNTUK PENINGKATAN KUAT GESER TANAH PASIR

RATNA ATIKA HUWAIDA

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Magister Teknik Sipil dan Lingkungan

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis :
1. Prof. Dr. Ir. Asep Sapei M.S



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



Judul Tesis : Analisis Parameter Pembentukan Kalsit dalam Metode SCU-CP untuk Peningkatan Kuat Geser Tanah Pasir
Nama : Ratna Atika Huwaida
NIM : F0507251017

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng.
NIP. 19900209 201803 1 001



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Erizal, M.Agr., IPU.
NIP. 19650106 199002 1 001



Diketahui Oleh

Ketua Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan:
Prof. Dr. Satyanto Krido Saptomo, S.TP., M.Si.
NIP. 19730411 200501 1 002



Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi:
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr
NIP. 19610502 198603 1 002



Tanggal Ujian : 5 Agustus 2026

Tanggal Lulus : 07 AUG 2026

PRAKATA

Puji syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas karunia dan Rahmat-Nya tesis dengan judul “Analisis Parameter Pembentukan Kalsit dalam Metode SCU-CP untuk Peningkatan Kuat Geser Tanah Pasir” dapat diselesaikan. Tesis ini digunakan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Program Studi Magister Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik dan Teknologi, Institut Pertanian Bogor.

Terima kasih penulis ucapkan kepada pihak-pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tesis ini, khususnya kepada:

1. Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng. selaku dosen pembimbing pertama yang telah membimbing dan banyak memberi dukungan serta saran.
2. Dr. Ir. Erizal, M.Agr., IPU. selaku dosen pembimbing kedua sekaligus Ketua Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan yang telah memberikan dukungan dan izin penelitian.
3. Kedua orang tua, Bapak Muhammad Ibnu Muazamsyah dan Ibu Ratna Efia Riza, serta adik-adik saya; Ratna Athifa Huwaida, Alisya Tri Ananda, Azzahra Humaira yang telah memberikan doa, dukungan, dan motivasi.
4. Mohamad Daffa Rivansyah, yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta bantuan dengan tulus selama penulis menempuh dan menyelesaikan studi ini.
5. Seluruh rekan bimbingan Geo-Mac yang senantiasa membantu serta memberikan semangat selama proses penelitian dan penyusunan tesis.
6. Seluruh rekan Sinergi SIL 58 yang telah membersamai dan membantu selama masa perkuliahan, penelitian, dan penyusunan tesis.

Semoga tesis ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Ratna Atika Huwaida



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Presipitasi Kalsit	4
2.2 Pemodelan Matematika pada SCU-CP	5
METODE	6
3.1 Waktu dan Tempat	6
3.2 Alat dan Bahan	6
3.3 Prosedur Penelitian	6
HASIL DAN PEMBAHASAN	14
4.1 Indeks Properties Tanah	14
4.2 Kuantifikasi Kalsit dan Laju Hidrolisis	14
4.3 pH dan Viskositas Larutan	18
4.4 Karakterisasi Mineralogi dan Morfologi Material Presipitasi	21
4.5 Pengaruh Konsentrasi Kedelai terhadap Kekuatan Tanah	25
4.6 Karakterisasi Mineralogi dan Morfologi Tanah Perbaikan SCU-CP	28
4.7 Pemodelan untuk Prediksi Kekuatan Tanah Pasir Metode SCU-CP	30
PENUTUP	39
5.1 Simpulan	39
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN	45

DAFTAR TABEL

1	Kondisi eksperimental penelitian	8
2	Hasil uji sifat fisik tanah	14
3	Seleksi Model Regresi dan Pemilihan Parameter Dominan	34
4	Persamaan Prediksi Kohesi dan Sudut Gesek Dalam	36

DAFTAR GAMBAR

1	Diagram alir prosedur pelaksanaan penelitian	7
2	Prosedur pembuatan larutan SCU-CP	8
3	Pengujian viskositas larutan	9
4	Prosedur pengujian kadar organik	10
5	Pembuatan sampel uji DST	11
6	Prosedur pengujian <i>acid leaching</i>	12
7	Prosedur pemodelan <i>Random Forest</i> dan <i>Symbolic Regression</i>	13
8	Distribusi ukuran pasir	14
9	Rasio presipitasi larutan SCU-CP	15
10	Konduktivitas larutan per waktu	17
11	Laju hidrolisis larutan SCU-CP	17
12	Viskositas larutan SCU-CP	19
13	Perubahan pH terhadap waktu (menit)	20
14	Hasil analisis mikrostruktur presipitasi larutan SCU-CP	22
15	Komposisi relatif polimorf CaCO_3 metode RIR	23
16	Kohesi dan Sudut Gesek Internal	25
17	Persentase kalsit dalam tanah hasil pengujian <i>acid leaching</i>	27
18	Hasil analisis XRD tanah hasil perbaikan SCU-CP kedelai 20 g/L	28
19	Hasil analisis SEM tanah hasil perbaikan SCU-CP konsentrasi 20 g/L	29
20	Matriks korelasi antar parameter proses pada metode SCU-CP	31
21	<i>Feature importance</i> parameter pada metode SCU-CP	32
22	<i>Fishbone analysis</i> jalur pembentukan kekuatan tanah	36
23	Validasi model prediksi kohesi dan sudut gesek	38

DAFTAR LAMPIRAN

1	Perhitungan Substitusi Persamaan	46
---	----------------------------------	----



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.