BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Tanah pasir merupakan salah satu jenis tanah berbutir kasar yang banyak dijumpai di berbagai lokasi pembangunan infrastruktur. Karakteristik utamanya adalah tersusun atas butiran lepas, memiliki pori-pori yang relatif besar, serta nilai kohesi yang sangat rendah (Das & Sobhan, 2018; Knappett & Craig, 2012). Kekuatan tanah pasir terutama bergantung pada gaya gesek antarbutir yang dipengaruhi oleh tegangan normal. Ketika tegangan normal atau tegangan efektif menurun, kekuatan geser tanah juga akan berkurang. Kondisi ini menyebabkan tanah rentan mengalami penurunan (*settlement*), kehilangan kekuatan geser, bahkan likuefaksi pada kondisi jenuh saat terjadi gempa (Knappett & Craig, 2012).

Pada daerah yang didominasi oleh tanah pasir jenuh, getaran gempa dapat menyebabkan peningkatan tekanan air pori sehingga tegangan efektif tanah menurun mendekati nol. Akibatnya, tanah kehilangan kekuatannya dan dapat berperilaku seperti cairan. Fenomena ini dikenal sebagai likuefaksi (Nurbani & Yakin, 2021). Kondisi ini mengakibatkan berkurangnya kekuatan geser tanah, yang selanjutnya dapat memicu terjadinya penurunan (*settlement*) dan pergeseran tanah. (Knappett & Craig, 2012; Oktafiani dkk., 2022).

Tanah pasir juga banyak dijumpai pada wilayah pesisir yang rentan terhadap abrasi. Abrasi pantai merupakan proses pengikisan material pantai oleh gelombang dan arus laut yang dapat menyebabkan mundurnya garis pantai serta menurunkan kestabilan tanah di sekitar bangunan dan infrastruktur pesisir (Triatmodjo, 2012).

Oleh karena itu, diperlukan metode perbaikan tanah yang dapat meningkatkan kohesi, memperkuat ikatan antarbutir, dan memperbaiki sifat mekanik tanah pasir sehingga ketahanannya terhadap likuefaksi menjadi lebih baik (Putra, Yasuhara, & Kinoshita, 2017).

Pasir dengan kepadatan rendah dan kohesi yang nyaris nol memerlukan upaya perkuatan tambahan agar layak digunakan pada proyek konstruksi yang membutuhkan daya dukung tinggi. Beberapa teknik tradisional, seperti *compaction, grouting*, pemasangan geotekstil, dan stabilisasi kimia, telah terbukti dapat meningkatkan kerapatan relatif pasir dan kekuatan gesernya. Meskipun demikian, *compaction grouting* sering memerlukan banyak material *grouting* yang mengandung aditif yang dapat mencemari air tanah (Lie dkk., 2023). Penggunaan geotekstil berbasis polimer juga dapat menghasilkan mikroplastik saat material rusak, dan stabilisasi kimia dengan semen atau kapur menghasilkan emisi karbon yang tinggi selama proses produksi (Bayat, 2025).

Salah satu metode perbaikan tanah yang berkembang pesat dalam dua dekade terakhir adalah *biocementation* berbasis presipitasi kalsit, yang dikenal dengan istilah *enzyme-induced calcite precipitation* (EICP). Metode ini memanfaatkan peran enzim urease sebagai biokatalis untuk menghidrolisis urea, menghasilkan ion karbonat yang kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) dari sumber garam kalsium, sehingga terbentuk endapan kalsit ($CaCO_3$) yang berfungsi sebagai pengikat butiran tanah. Ikatan tersebut menyebabkan tanah pasir memiliki perilaku seolah-olah mempunyai kohesi, yang dikenal sebagai kohesi semu (*apparent cohesion*) (Koutsoftas, 2023). Presipitasi kalsit inilah yang

meningkatkan kepadatan, kekuatan geser, dan daya dukung tanah (Putra, Yasuhara, & Kinoshita, 2017). Proses ini meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah pasir dengan meningkatkan pengikatan antar butir pasir dan pengisian ruang pori (Putra dkk., 2020).

EICP dianggap lebih ramah lingkungan dibanding metode konvensional karena tidak melibatkan mikroba hidup sehingga lebih aman dan stabil (Kennedy dkk., 2024). Bahan baku utama seperti urea, $CaCl_2$, dan enzim urease relatif mudah diperoleh dan prosesnya bersifat bio-inspiratif, menjadikannya solusi modern untuk permasalahan geoteknik. Teknik ini diaplikasikan dalam berbagai kondisi, termasuk mitigasi likuefaksi tanah pasir dan penguatan struktur tanah lepas (Putra dkk., 2020). Meskipun EICP terbukti efektif, penggunaan enzim urease komersial sebagai katalis utama masih menjadi kendala besar. Biaya enzim yang sangat tinggi, bahkan mencapai 90% dari total biaya material, membuat metode ini tidak ekonomis untuk diterapkan pada skala lapangan (Pratama dkk., 2021). Untuk mengatasi masalah tersebut, berbagai penelitian mulai mengembangkan metode alternatif dengan memanfaatkan sumber urease alami yang lebih murah, salah satunya berasal dari kedelai.

Pemanfaatan kedelai dalam metode *soybean-crude urease calcite precipitation* (SCU-CP) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Ekstrak kedelai yang diperoleh melalui proses filtrasi maupun sentrifugasi terbukti mampu memicu pembentukan kalsit secara efektif. Penggunaan ekstrak kedelai dengan konsentrasi 20 g/L menghasilkan peningkatan kuat tekan bebas (UCS) tanah hingga 65,6 kPa pada perlakuan sentrifugasi, lebih tinggi dibandingkan filtrasi dengan 53,6

kPa (Lofianda dkk., 2021). Temuan ini menegaskan bahwa kedelai merupakan alternatif potensial untuk menggantikan enzim urease komersial yang mahal.

Efektivitas metode penguatan berbasis presipitasi sangat bergantung pada sifat-sifat larutan yang digunakan. Variasi dalam komposisi larutan (seperti konsentrasi, kemurnian bahan kimia, maupun formulasi reaktif) secara signifikan dapat memengaruhi distribusi presipitasi kalsit dan densitas tanah yang diperkuat (Zhu dkk., 2024), Dengan demikian, Perbedaan dalam pencampuran larutan seperti konsentrasi, bahan tambahan, atau tingkat kebersihan bahan dapat memengaruhi kualitas ikatan antar partikel tanah serta hasil mekanik seperti kekuatan tekan.

Penelitian ini memberikan manfaat praktis sebagai pedoman teknis bagi para praktisi di bidang konstruksi dan geoteknik dalam menentukan konsentrasi kalsium klorida ($CaCl_2$) yang paling tepat untuk meningkatkan stabilitas tanah pasir. Pemilihan konsentrasi yang optimal tidak hanya menawarkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional, tetapi juga memberikan nilai tambah dari sisi efisiensi biaya. Hal ini dicapai melalui pemanfaatan $CaCl_2$ yang *technical grade*, sehingga menekan biaya perbaikan tanah secara keseluruhan. Dengan demikian, metode *soybean-crude urease calcite precipitation* (SCU-CP) berpotensi diimplementasikan secara lebih luas, berkelanjutan, serta relevan untuk mendukung berbagai proyek infrastruktur. Keunggulan ini menjadikan metode SCU-CP sebagai alternatif inovatif yang mampu mengintegrasikan aspek teknis, ekonomis, dan ramah lingkungan dalam praktik perbaikan tanah modern (Oktafiani dkk., 2022).

Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian ini mengarah pada analisis

pengaruh perubahan kadar kalsium klorida ($CaCl_2$) dalam penerapan metode SCU-CP untuk memperbaiki tanah pasir, dengan fokus pada perbandingan efektivitas antara $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade*. Penelitian ini ditujukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai peran konsentrasi serta mutu reagen kimia terhadap proses presipitasi kalsit, distribusinya dalam media tanah, dan peningkatan sifat mekanik pasir. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis mengenai pemilihan konsentrasi $CaCl_2$ yang paling sesuai untuk memperoleh kinerja EICP yang maksimal, juga menawarkan alternatif penggunaan bahan kimia yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, serta layak diterapkan pada skala lapangan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disampaikan sebelumnya, rumusan masalah yang dapat diidentifikasi dalam penelitian ini adalah:

1. Banyak wilayah di Indonesia, khususnya daerah pesisir dan rawan gempa, memiliki tanah berjenis pasir yang rentan mengalami penurunan kekuatan, likufaksi, dan kegagalan struktur saat menerima beban dinamis.
2. Teknik perbaikan tanah tradisional seperti *compaction grouting*, penggunaan geotekstil, maupun stabilisasi kimia dengan semen atau kapur memiliki kelemahan, antara lain kebutuhan material yang besar, potensi pencemaran lingkungan, serta tingginya emisi karbon.
3. Sebagian besar penelitian masih menggunakan $CaCl_2$ *laboratory grade* yang memiliki kemurnian tinggi namun biaya mahal.

4. Kajian mengenai penggunaan $CaCl_2$ *technical grade* sebagai alternatif yang lebih ekonomis masih sangat terbatas.

1.3 Pembatasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Metode perbaikan tanah yang diteliti hanya difokuskan pada metode *soybean-crude urease calcite precipitation* (SCU-CP), yaitu *biocementation* berbasis presipitasi kalsit dengan memanfaatkan ekstrak kasar kedelai sebagai sumber enzim urease alami.
2. Variabel utama penelitian adalah konsentrasi kalsium klorida ($CaCl_2$) pada larutan *grouting*. Variasi konsentrasi yang digunakan ditentukan sesuai rancangan eksperimen, untuk melihat pengaruhnya terhadap jumlah presipitasi kalsit serta peningkatan sifat mekanik tanah pasir.
3. Jenis sumber kalsium yang digunakan dibatasi pada $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade*, untuk membandingkan efektivitas dan efisiensi kedua bahan tersebut dalam proses SCU-CP.
4. Penelitian lebih terfokus pada hasil pengujian laboratorium yang berkaitan dengan kekuatan tekan.

1.4 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi kalsium klorida ($CaCl_2$) terhadap proses presipitasi kalsit pada metode SCU-CP dengan menggunakan ekstrak kasar kedelai sebagai sumber enzim urease?

2. Apakah terdapat perbedaan efektivitas penggunaan $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade* dalam menghasilkan presipitasi kalsit pada metode SCU-CP?
3. Sejauh mana variasi konsentrasi $CaCl_2$ berpengaruh terhadap peningkatan sifat mekanik tanah pasir, yang ditinjau dari hasil uji kuat tekan bebas (UCS)?
4. Variasi konsentrasi $CaCl_2$ manakah yang memberikan hasil penguatan tanah paling optimal mempertimbangkan efektivitas biaya dengan penggunaan $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade*?

1.5 Tujuan Peneitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi kalsium klorida ($CaCl_2$) terhadap proses presipitasi kalsit pada metode SCU-CP dengan menggunakan ekstrak kasar kedelai sebagai sumber enzim urease alami.
2. Mengevaluasi perbedaan efektivitas penggunaan $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade* dalam pembentukan kalsit pada tanah pasir melalui metode SCU-CP.
3. Menilai pengaruh variasi konsentrasi $CaCl_2$ terhadap peningkatan sifat mekanik tanah pasir, khususnya melalui pengujian kuat tekan bebas (UCS).
4. Menentukan variasi konsentrasi $CaCl_2$ yang paling optimal dalam memberikan hasil penguatan tanah pasir, dengan mempertimbangkan efektivitas biaya (*cost-effective*) melalui perbandingan penggunaan $CaCl_2$ *laboratory grade* dan $CaCl_2$ *technical grade*.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, di antaranya:

- Bersifat Teoritis
  a. Bagi penulis, untuk memperdalam pemahaman mengenai konsep *biocementation* berbasis *soybean-crude urease calcite precipitation* (SCU-CP) serta peran variasi konsentrasi $CaCl_2$ dalam memengaruhi proses presipitasi kalsit.
  b. Bagi Pembaca, menambah referensi akademik mengenai perbandingan efektivitas $CaCl_2$ *laboratory grade* dan *technical grade*, dan menjadi dasar bagi penelitian lanjutan mengenai optimasi konsentrasi bahan kimia pada metode SCU-CP, baik dari sisi kinerja teknis maupun efisiensi biaya.
- Manfaat Praktis dan Ekonomis

Penelitian ini memberikan manfaat praktis sebagai acuan teknis bagi praktisi konstruksi dan geoteknik dalam memilih konsentrasi $CaCl_2$ yang optimal untuk memperbaiki tanah pasir secara lebih ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional, sekaligus manfaat ekonomis melalui efisiensi biaya material dengan penggunaan $CaCl_2$ yang *cost-effective,* sehingga metode SCU-CP dapat diterapkan secara lebih luas, berkelanjutan, dan aplikatif dalam berbagai proyek infrastruktur.