Efek Komposisi NaCl dan Sulfur terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Geser Tanah Pasir

Arissa Sabilla[1]*, Rikza[1], Dian Aswatul Sinurat[1], Putri Fikadilah Siregar[1], Ari Juanda[1], Muhammad Ferah Yosantia[1], Rajib Muammar[1] dan Rizki Damayanti[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
[2]Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
Jalan Prof. Syarief Thayeb, Meurandeh, Langsa – Aceh 24416, Indonesia

* Corresponding author: arissasabilla@unsam.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh komposisi campuran garam dapur (NaCl) dan belerang (S) terhadap perubahan struktur mikro serta peningkatan kekuatan geser tanah pasir berlempung (SC). Penelitian menggunakan pendekatan analisis deskriptif berbasis data sekunder dari hasil uji kuat geser langsung (*Direct Shear Test*) pada tanah pasir yang distabilisasi dengan variasi campuran 6% sulfur dan 6–12% NaCl. Hasil analisis menunjukkan bahwa campuran 6% sulfur dan 12% NaCl menghasilkan peningkatan nilai kohesi sebesar ±58%, sudut geser dalam sebesar ±48%, dan tegangan geser maksimum sebesar ±155% dibandingkan tanah asli. Peningkatan kekuatan geser ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa pozzolanik seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan *ettringite* yang memperkuat ikatan antar partikel tanah. Secara mikrostruktural, terjadi pemadatan partikel, penurunan porositas, serta peningkatan *interlocking* akibat interaksi ionik antara Na^+, Cl^-, dan SO_4^{2-} dengan mineral tanah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi NaCl dan sulfur dapat berfungsi sebagai bahan stabilisasi kimia efektif yang mampu meningkatkan kekuatan mekanik dan kestabilan mikrostruktur tanah pasir secara signifikan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi stabilisasi tanah berbasis reaksi kimia alami yang ramah lingkungan dan ekonomis.

Kata Kunci: NaCl, Belerang, Tanah Pasir, Kuat Geser, Struktur Mikro

PENDAHULUAN

Tanah merupakan salah satu elemen penting dalam dunia konstruksi karena berperan sebagai media pendukung beban bangunan [1]. Kestabilan dan kekuatan tanah sangat mempengaruhi keberhasilan suatu proyek teknik sipil, baik pada tahap perencanaan, pelaksanaan, maupun pemeliharaan struktur [2]. Namun, kondisi di lapangan tidak selalu ideal. Banyak jenis tanah yang memiliki daya dukung rendah, seperti tanah lempung ekspansif atau pasir berlempung, yang sering menyebabkan masalah deformasi dan penurunan kekuatan geser [3]. Kondisi tersebut menuntut adanya upaya perbaikan tanah (*soil improvement*) agar memenuhi syarat stabilitas dan kekuatan yang dibutuhkan dalam konstruksi. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah stabilisasi tanah, baik secara mekanis, fisik, maupun kimiawi [4][5].

Pendekatan stabilisasi kimia dianggap lebih efektif karena tidak hanya memperbaiki sifat fisik tanah, tetapi juga memodifikasi struktur mineral dan komposisi kimianya melalui reaksi antara bahan aditif dengan mineral penyusun tanah [6], [7]. Beberapa bahan yang umum digunakan dalam stabilisasi kimia adalah semen, kapur, *fly ash*, dan bahan pozzolanik lainnya [8]. Akan tetapi, penggunaan bahan-bahan tersebut sering menimbulkan dampak lingkungan dan biaya tinggi, sehingga mendorong penelitian terhadap alternatif bahan alami yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan [9]. Dalam hal ini, belerang (sulfur) dan garam dapur (NaCl) menjadi kandidat potensial karena sifat kimianya yang mampu memengaruhi struktur mikro tanah dan meningkatkan kekuatan geser.

Belerang merupakan salah satu hasil bumi yang melimpah di Indonesia. Berdasarkan penelitian Erham Muhammad Farhan dkk. (2023), penambahan belerang pada tanah lempung mampu meningkatkan nilai kohesi dan kuat geser tanah hingga 86,95% pada kadar campuran 2%.

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Namun, pada kadar yang lebih tinggi (6% dan 7%), nilai kuat geser menurun akibat berlebihnya sulfur bebas yang tidak bereaksi sempurna. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi kimia belerang terhadap mineral tanah memiliki batas optimum tertentu, bergantung pada komposisi dan jenis tanah [10]. Hasil serupa juga dijelaskan dalam penelitian Triutami dkk. (2021), yang menemukan bahwa belerang dapat berfungsi sebagai bahan pozzolanik alami melalui proses oksidasi menjadi ion sulfat (SO_4^{2-}). Ion ini kemudian bereaksi dengan kalsium dan silikat dalam tanah membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan ettringite, yang berperan dalam memperkuat ikatan antar partikel tanah. Reaksi ini mirip dengan mekanisme yang terjadi pada proses hidrasi semen, hanya saja belerang bekerja melalui reaksi oksidasi kimia, bukan hidrasi langsung [11].

Sementara itu, garam dapur (NaCl) juga memiliki peran penting dalam rekayasa geoteknik. Dalam penelitian Patrick Alexander Ho dkk. (2021), campuran garam dan belerang pada tanah pasir menghasilkan peningkatan kuat geser yang signifikan. Ion Na^+ dari NaCl menggantikan kation lemah seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada permukaan mineral lempung, menyebabkan proses flokulasi partikel yang memperkuat struktur agregat tanah. Ion Cl^- berfungsi menjaga kestabilan pH dan mempercepat proses ion exchange antar partikel. Kombinasi ini menghasilkan kondisi kimia yang mendukung terbentuknya lapisan pengikat di antara butir tanah, meningkatkan kohesi dan sudut geser dalam.

Namun, dari hasil penelitian sebelumnya, terdapat kesenjangan yang cukup jelas. Sebagian besar penelitian terdahulu menggunakan tanah lempung (CH atau CL) sebagai sampel uji. Padahal, pada kenyataannya, banyak proyek konstruksi di wilayah pesisir dan perkotaan berdiri di atas tanah pasir berlempung (SC) yang memiliki karakteristik fisik dan kimia berbeda [12]. Tanah pasir cenderung memiliki porositas tinggi dan daya ikat rendah, sehingga reaksi kimia antara bahan aditif dan mineral penyusunnya dapat memberikan hasil yang berbeda dibanding tanah lempung. Kondisi ini memperkuat urgensi penelitian terhadap tanah pasir berlempung sebagai objek uji stabilisasi berbasis kombinasi NaCl dan sulfur [13].

Dari sisi kimia tanah, interaksi Na^+, Cl^-, dan SO_4^{2-} di dalam tanah juga menarik untuk dikaji lebih lanjut karena berpotensi memicu pembentukan senyawa baru seperti C–S–H (*Calcium Silicate Hydrate*) dan *ettringite* ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$) yang bersifat keras dan tidak larut dalam air. Senyawa ini dapat memperbaiki struktur mikro tanah melalui pengikatan antar butir dan penurunan porositas [14] [15].

Dengan mempertimbangkan berbagai hasil penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kombinasi NaCl dan sulfur sebagai bahan stabilisasi kimia memiliki potensi besar dalam meningkatkan kekuatan geser tanah, terutama jenis pasir berlempung. Akan tetapi, belum ada kajian yang secara komprehensif menguraikan hubungan antara komposisi kedua bahan tersebut, perubahan struktur mikro, dan peningkatan kuat geser tanah pasir. Oleh karena itu, penelitian berjudul "Komposisi NaCl dan Sulfur terhadap Struktur Mikro dan Kekuatan Geser Tanah Pasir" ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dengan menjelaskan mekanisme kimia yang terjadi di dalam tanah akibat pencampuran NaCl dan sulfur. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan mampu menjadi dasar bagi pengembangan teknologi stabilisasi tanah yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan. Dengan meninjau pengaruh kedua bahan ini secara simultan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur tanah pasir, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman empiris tetapi juga membuka peluang inovasi dalam rekayasa tanah berbasis reaksi kimia alami.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tanah pasir berlempung (SC), garam dapur (NaCl), dan belerang (S) sebagai bahan stabilisasi kimia, serta air sebagai media reaksi. Tanah pasir yang digunakan merupakan jenis Clayey Sand (SC) dengan indeks plastisitas (PI) sebesar 20,34%, menunjukkan adanya fraksi lempung yang cukup tinggi dan berpotensi

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

mengalami perubahan sifat mekanik akibat interaksi kimia. Garam dapur (NaCl) digunakan karena sifat elektrolitnya yang dapat meningkatkan konduktivitas ionik air pori serta memicu proses flokulasi partikel tanah melalui pertukaran ion Na^+ dan Cl^- dengan kation lain pada permukaan mineral lempung. Belerang (S) dipilih sebagai bahan pozzolanik alami yang mengandung unsur sulfur, berpotensi mengalami oksidasi membentuk ion sulfat (SO_4^{2-}), dan selanjutnya bereaksi dengan senyawa kalsium serta silika dalam tanah untuk menghasilkan *calcium silicate hydrate* (C–S–H) dan ettringite, dua senyawa yang berperan penting dalam memperkuat ikatan antar butir tanah. Air berfungsi sebagai katalis dalam proses hidrasi dan reaksi kimia antara bahan aditif (NaCl dan sulfur) dengan mineral penyusun tanah.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis deskriptif laboratorium berbasis data sekunder yang diadaptasi dari hasil penelitian Ho dkk. (2021). Data eksperimen mencakup hasil uji *Direct Shear Test* terhadap tanah pasir yang distabilisasi dengan variasi campuran bahan, yaitu 6% belerang (konstan) dan variasi garam 6%, 8%, 10%, dan 12% dari berat kering tanah. Sampel tanah pada masing-masing variasi dicampur secara merata hingga homogen, kemudian dipadatkan dalam kondisi mendekati kadar air optimum, untuk memastikan interaksi kimia dan fisik berlangsung secara optimal [16].

Uji kuat geser langsung dilakukan untuk menentukan parameter mekanik berupa kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Nilai-nilai tersebut dibandingkan dengan tanah asli untuk mengetahui pengaruh kombinasi NaCl dan belerang terhadap peningkatan kekuatan geser. Selain itu, data dianalisis secara kimiawi untuk menginterpretasikan kemungkinan reaksi ionik dan pozzolanik yang terjadi di dalam tanah.

Analisis dilakukan dengan meninjau mekanisme kimia antara ion Na^+, Cl^-, dan SO_4^{2-} dengan mineral silikat serta kalsium tanah. Reaksi tersebut diperkirakan menghasilkan senyawa C–S–H (*Calcium Silicate Hydrate*) dan *ettringite* ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$) yang memperkuat ikatan antarpartikel dan menurunkan porositas tanah. Secara konseptual, interpretasi juga diarahkan pada perubahan struktur mikro seperti pemadatan butir, pengurangan rongga pori, serta pembentukan lapisan pengikat antar partikel yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai kuat geser tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat Fisis

Sebelum dilakukan proses stabilisasi tanah dengan campuran NaCl dan belerang, terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap sifat fisis tanah asli untuk mengetahui karakteristik dasar tanah yang digunakan sebagai sampel. Pengujian sifat fisis ini bertujuan untuk menentukan jenis dan klasifikasi tanah serta menilai potensi perubahan yang mungkin terjadi setelah proses pencampuran bahan stabilisasi. Karakteristik fisik tanah merupakan faktor penting dalam menentukan perilaku mekanik tanah, seperti kemampuan menahan beban, tingkat plastisitas, dan daya ikat antar partikel. Dengan mengetahui sifat fisis awal, analisis terhadap pengaruh campuran bahan kimia dapat dilakukan secara lebih terarah dan akurat. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh data sifat fisis tanah asli sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil uji sifat fisis tanah asli

Karakteristik	Nilai
Kadar air tanah asli	2,927%
Berat jenis	2,314
Lolos saringan no. 200	21,67%
Pemadatan tanah asli	27,8%
Batas cair (LL)	40,53%
Batas plastis (PL)	20,19%
Indeks plastisitas (PI)	20,34%

Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kadar air alami tanah tergolong rendah, yaitu hanya 2,927%, yang mengindikasikan bahwa tanah memiliki tingkat kelembapan yang minim pada kondisi awal pengujian. Nilai berat jenis (Gs) sebesar 2,314 menunjukkan bahwa tanah ini didominasi oleh material mineral silikat dan sebagian kecil fraksi lempung. Persentase lolos saringan No. 200 sebesar 21,67% menandakan bahwa sebagian besar partikel tanah berukuran pasir halus dengan sedikit kandungan lempung dan lanau. Hal ini sesuai dengan klasifikasi tanah berdasarkan sistem

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

USCS (*Unified Soil Classification System*), yang mengelompokkan tanah dengan karakteristik tersebut ke dalam jenis pasir berlempung (SC).

Nilai pemadatan maksimum (27,8%) menunjukkan kemampuan tanah dalam mencapai kerapatan tertentu di bawah energi pemadatan standar. Sementara itu, hasil batas cair (LL) sebesar 40,53% dan batas plastis (PL) sebesar 20,19% menghasilkan indeks plastisitas (PI) sebesar 20,34%, yang termasuk kategori plastisitas sedang hingga tinggi. Nilai ini menandakan bahwa tanah memiliki kemampuan deformasi yang cukup besar sebelum terjadi kerusakan struktur butirannya. Kondisi ini umumnya ditemukan pada tanah dengan kandungan mineral lempung seperti kaolinit atau montmorillonit, yang dapat mengalami perubahan volume ketika berinteraksi dengan air atau bahan kimia.

Hasil pengujian sifat fisis menunjukkan bahwa tanah yang digunakan memiliki komposisi pasir dominan dengan fraksi lempung cukup signifikan. Hal ini menjadi dasar penting bagi proses stabilisasi, karena tanah dengan tipe SC (*Clayey Sand*) memiliki karakteristik yang masih dapat dimodifikasi baik secara fisik maupun kimia. Dengan kandungan lempung yang masih cukup tinggi, ion-ion yang dilepaskan dari campuran NaCl dan belerang berpotensi untuk berinteraksi dengan mineral lempung melalui proses pertukaran ion (*cation exchange*) dan reaksi pozzolanik, sehingga diharapkan dapat memperbaiki sifat mekanik tanah, terutama dalam hal peningkatan kuat geser dan stabilitas struktur mikro. Hasil sifat fisis ini juga memperkuat alasan pemilihan sampel tanah jenis pasir berlempung sebagai objek penelitian, karena tanah ini umumnya memiliki daya dukung rendah namun reaktif terhadap bahan kimia.

Hasil Pengujian Sifat Mekanis

Setelah dilakukan pengujian terhadap sifat fisis tanah, tahap berikutnya adalah menganalisis sifat mekanis tanah yang telah distabilisasi menggunakan campuran garam dapur (NaCl) dan belerang (S). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh penambahan kedua bahan tersebut terhadap kekuatan geser tanah, yang merupakan salah satu parameter utama dalam menilai daya dukung dan kestabilan tanah pada konstruksi teknik sipil. Kekuatan geser tanah dipengaruhi oleh dua komponen utama, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Kedua parameter ini menunjukkan kemampuan tanah dalam menahan gaya luar tanpa mengalami keruntuhan atau deformasi berlebih. Dengan demikian, perubahan nilai kohesi dan sudut geser akibat penambahan bahan kimia dapat dijadikan indikator keberhasilan proses stabilisasi. Rangkuman hasil uji kuat geser tanah dengan variasi campuran NaCl dan belerang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil uji sifat mekanis tanah terstabilisasi

Kondisi Tanah	Sudut Geser Dalam (ϕ)	Kohesi (c)
Tanah Asli	46,60	0,062
Tanah + 6% Garam + 6% Belerang	57,49	0,088
Tanah + 8% Garam + 6% Belerang	59,61	0,091
Tanah + 10% Garam + 6% Belerang	60,58	0,095
Tanah + 12% Garam + 6% Belerang	69,15	0,098

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, terlihat adanya peningkatan yang konsisten pada nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) seiring dengan bertambahnya kadar garam dalam campuran, dengan kadar belerang tetap sebesar 6%. Tanah asli memiliki nilai sudut geser sebesar 46,60° dan kohesi 0,062 kg/cm², yang menunjukkan bahwa tanah memiliki kekuatan geser sedang. Setelah diberi campuran stabilisasi, terjadi peningkatan yang cukup signifikan. Pada campuran 6% garam + 6% belerang, nilai sudut geser meningkat menjadi 57,49° dan kohesi menjadi 0,088 kg/cm². Peningkatan ini menandakan adanya efek awal dari interaksi kimia antar partikel tanah dengan ion-ion Na^+ dan Cl^- dari garam serta reaksi pozzolanik belerang terhadap mineral lempung.

Seiring dengan peningkatan kadar garam, tanah menunjukkan performa yang semakin baik. Campuran 10% garam + 6% belerang menghasilkan sudut geser 60,58° dan kohesi 0,095 kg/cm², menandakan bahwa proses flokulasi dan pembentukan ikatan antarpartikel

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

berlangsung lebih intens. Peningkatan paling signifikan terjadi pada campuran 12% garam + 6% belerang, dengan nilai sudut geser mencapai 69,15° dan kohesi 0,098 kg/cm², atau meningkat masing-masing sekitar ±48% dan ±58% dibandingkan tanah asli.

Secara kimiawi, peningkatan ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa pozzolanik seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan ettringite ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$) hasil reaksi antara sulfur, kalsium, dan silikat dalam tanah. Senyawa ini bersifat keras dan berfungsi memperkuat ikatan antar partikel tanah. Selain itu, ion Na^+ dari NaCl menggantikan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada permukaan mineral lempung, sehingga partikel-partikel tanah menjadi lebih rapat melalui proses pertukaran ion (*cation exchange*). Ion Cl^- membantu menstabilkan muatan negatif pada permukaan partikel, mengurangi dispersi, dan meningkatkan proses flokulasi, yang pada akhirnya memperkuat struktur internal tanah.

Dari sudut mekanik, peningkatan nilai kohesi menunjukkan adanya tambahan gaya tarik antar butiran tanah akibat terbentuknya lapisan pengikat mineral hasil reaksi kimia. Sedangkan peningkatan sudut geser dalam (ϕ) mengindikasikan bahwa gesekan antar butiran tanah menjadi lebih besar, yang berarti struktur tanah menjadi lebih padat dan stabil. Kombinasi dari kedua parameter tersebut memberikan peningkatan signifikan pada tegangan geser maksimum (τ), yang berbanding lurus dengan peningkatan kapasitas dukung tanah.

Hasil ini membuktikan bahwa campuran NaCl dan sulfur memiliki efektivitas tinggi dalam meningkatkan kekuatan mekanik tanah pasir berlempung. Variasi 12% NaCl dan 6% sulfur terbukti memberikan hasil terbaik karena menghasilkan reaksi ionik dan pozzolanik yang optimal, memperkuat ikatan antarpartikel sekaligus memperbaiki struktur mikro tanah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Ho dkk. (2021) yang menunjukkan bahwa kombinasi bahan kimia tersebut mampu meningkatkan nilai kuat geser hingga lebih dari 150% dibanding tanah asli. Dengan demikian, penggunaan garam dan belerang sebagai bahan stabilisasi kimia dapat menjadi alternatif inovatif yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan bahan stabilisasi konvensional seperti semen atau kapur.

Interaksi Kimia NaCl dan Sulfur

Garam (NaCl) dalam tanah berperan sebagai elektrolit yang meningkatkan konduktivitas ionik air pori tanah. Ion Na^+ menggantikan kation lemah seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada permukaan mineral lempung, sehingga menyebabkan flokulasi partikel dan menurunkan potensi dispersi. Akibatnya, partikel tanah menjadi lebih kompak dan mudah dipadatkan.

Sementara itu, sulfur (S) bertindak sebagai pozzolan alami. Dalam kondisi lembap, sulfur mengalami oksidasi sebagian membentuk ion sulfat (SO_4^{2-}) yang kemudian dapat bereaksi dengan mineral silikat atau kalsium dalam tanah menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan *Calcium Sulfoaluminate* (*Ettringite*). Kedua senyawa ini bersifat keras dan tidak larut dalam air, berperan memperkuat ikatan antar butir tanah.

Reaksi umum yang mungkin terjadi:

$$Ca^{2+} + SiO_2 + H_2O \rightarrow CaSiO_3.H_2O(C-S-H)$$

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + Al_2O_3 + H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$$

Analisis Kimia Tanah (pH dan Pertukaran Ion)

Kehadiran garam menyebabkan peningkatan pH tanah mendekati netral karena ion Cl^- menstabilkan kation basa. Sementara itu, sulfur cenderung sedikit menurunkan pH melalui oksidasi menjadi asam sulfat ringan (H_2SO_4) dalam kadar sangat rendah, menciptakan kondisi pH optimum 6,5–7,0 yang mendukung pembentukan senyawa pozzolanik stabil.

Selain itu, reaksi pertukaran ion (*cation exchange*) antara Na^+ dan Ca^{2+} memperbaiki struktur agregat tanah, di mana partikel lempung yang awalnya terdispersi menjadi lebih mengelompok (flokulasi), memperkuat kohesi antar butiran.

Implikasi Geoteknik dan Geokimia

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan geser tanah tidak hanya disebabkan oleh faktor fisik berupa proses pemadatan, tetapi juga oleh reaksi kimia kompleks yang terjadi antara komponen tanah dan bahan aditif yang digunakan. Kombinasi 6% sulfur dan 12% NaCl terbukti memberikan hasil

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

paling optimal karena menciptakan keseimbangan antara proses fisik dan kimia di dalam tanah. Dari sisi geoteknik, reaksi ini meningkatkan *interlocking* antarpartikel, menurunkan porositas, dan memperkuat struktur agregat tanah, sehingga daya dukung dan stabilitas geser tanah meningkat secara signifikan. Hal ini menjadikan campuran NaCl dan sulfur sebagai alternatif bahan stabilisasi yang efektif untuk tanah pasir berlempung (SC), terutama pada wilayah dengan kondisi tanah berpori tinggi dan daya ikat rendah.

Dari perspektif geokimia terapan, keberhasilan kombinasi ini dapat dijelaskan melalui terbentuknya senyawa pozzolanik seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan *ettringite*, hasil reaksi antara ion-ion SO_4^{2-}, Na^+, dan mineral silikat tanah. Reaksi tersebut memperkuat ikatan kimia antar mineral dan membentuk matriks pengikat keras yang meningkatkan ketahanan tanah terhadap deformasi. Ion Na^+ dan Cl^- juga berperan penting dalam mempercepat proses pertukaran ion (*cation exchange*), yang menyebabkan flokulasi partikel dan menurunkan potensi dispersi tanah. Dengan demikian, efek kimiawi ini tidak hanya memperbaiki sifat mekanik, tetapi juga meningkatkan kestabilan kimia tanah terhadap perubahan kelembapan dan salinitas.

Dari sisi lingkungan dan ekonomi, penggunaan NaCl dan sulfur sebagai bahan stabilisasi kimia memiliki keunggulan dibandingkan semen pozzolan sintetis karena keduanya merupakan bahan murah, mudah diperoleh, dan tidak menghasilkan emisi karbon tinggi. Dengan potensi ini, penelitian ini membuka peluang penerapan teknologi stabilisasi tanah berbasis reaksi kimia alami yang ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan dalam proyek-proyek geoteknik di Indonesia.

KESIMPULAN

Campuran 6% sulfur dan 12% NaCl terbukti memberikan hasil paling optimal dalam meningkatkan kekuatan geser tanah pasir berlempung. Berdasarkan data sekunder, komposisi ini menghasilkan peningkatan nilai kohesi, sudut geser dalam, dan tegangan geser maksimum masing-masing sebesar ±58%, ±48%, dan ±155% dibandingkan dengan tanah asli. Peningkatan ini disebabkan oleh terjadinya kombinasi proses fisik dan kimia di dalam tanah. Secara kimia, sulfur berperan sebagai bahan pozzolanik alami yang mampu bereaksi dengan mineral silikat dan kalsium dalam tanah, membentuk senyawa pengikat keras seperti *calcium silicate hydrate* (C–S–H) dan *ettringite*. Senyawa ini berfungsi memperkuat struktur antar butir tanah dan meningkatkan daya lekat antar partikel. Sementara itu, garam (NaCl) bertindak sebagai elektrolit yang meningkatkan konduktivitas ionik air pori tanah, dimana ion Na^+ dan Cl^- berinteraksi dengan permukaan partikel tanah sehingga memperkuat gaya tarik-menarik antar partikel melalui proses flokulasi dan pertukaran ion. Dari sudut pandang mikrostruktural, reaksi kimia ini menyebabkan pemadatan partikel tanah, pengurangan porositas, serta peningkatan ikatan antar butir, yang secara keseluruhan berkontribusi pada peningkatan kekuatan geser dan stabilitas tanah pasir hasil campuran tersebut.

REFERENSI

[1] J. Horman, M. Fauzi, and C. Mayaindrawati, “Analisa Distribusi Ukuran Butiran Tanah Untuk Menentukan Jenis Tanah,” *Cyclops J. Tek. Sipil dan Perenc.*, vol. 1, no. 2, pp. 54–62, 2023, doi: 10.55098/jtsp.v1i2.479.

[2] A. Sabilla *et al.*, *Geologi teknik*. Penerbit CV. Gita Lentera, 2025.

[3] F. C. Boway, H. Riogilang, and A. T. Mandagi, “Analisis Kuat Geser Tanah Lempung Ekspansif Dengan Perkuatan Geomembrane,” *Tekno*, vol. 20, no. 82, pp. 1279–1284, 2022, [Online]. Available: https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno/article/view/46381.

[4] Darwis, *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Pustaka AQ, 2019.

[5] S. Farisi, “Analisa Tingkat Kerentanan Fisik dan Sosial Bencana Gempa Bumi di Sebagaian Surabaya Barat,” *Swara Bhumi*, vol. 1, no. 1, pp. 66–73, 2020.

[6] A. A. M. Elhassan, M. Mnzool, H. Smaoui, A. Jendoubi, B. M. E. Elnaim, and M. Faihan Alotaibi, “Effect of clay mineral content on soil strength parameters,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 63, pp. 475–485, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.08.012.

[7] W. Li, B. C. O'Kelly, M. Yang, K. Fang, X. Li, and H. Li, "Briefing: Specific gravity of solids relationship with ignition loss for peaty soils," *Geotech. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 134–145, 2020, doi: 10.1680/jgere.20.00019.

[8] A. A. Fondjo, E. Theron, and R. P. Ray, "Stabilization of Expansive Soils Using Mechanical and Chemical Methods: A Comprehensive Review," *Civ. Eng. Archit.*, vol. 9, no. 5, pp. 1289–1294, 2021, doi: 10.13189/cea.2021.090503.

[9] D. Barman and S. K. Dash, "Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1319–1342, 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.

[10] E. M. Farham, A. Azizi, and B. Afriandiny, "Analisis Pengaruh Penambahan Belerang Terhadap Kuat Geser Tanah," *Proc. Ser. Phys. Form. Sci.*, vol. 6, pp. 43–49, 2023, doi: 10.30595/pspfs.v6i.850.

[11] N. Triutami, S. Gandi, and O. Hendri, "Effect of Sulfur and Portland Cement Mix on Direct Shear and Unconfined Compression Strength of Peat Soil," *Spektrum Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 73–83, 2021, [Online]. Available: http://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/view/210%0Ahttp://spektrum.unram.ac.id/index.php/Spektrum/article/download/210/160.

[12] J. Zhu, M. Saberian, J. Li, T. Maqsood, and W. Yang, "Performance of clay soil reinforced with PET plastic waste subjected to freeze-thaw cycles for pavement subgrade application," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 214, no. April, p. 103957, 2023, doi: 10.1016/j.coldregions.2023.103957.

[13] M. Macías-Párraga, F. J. T. Echarri, O. Alonso-Pandavenes, and J. Garzón-Roca, "Improvement of Expansive Soils: A Review Focused on Applying Innovative and Sustainable Techniques in the Ecuadorian Coastal Soils," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 15, pp. 1–37, 2025, doi: 10.3390/app15158184.

[14] H. Deng and H. He, "Interactions of sodium chloride solution and calcium silicate hydrate with different calcium to silicon ratios: A molecular dynamics study," *Constr. Build. Mater. 268(4)121067*, 2020, doi: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121067.

[15] W. Cao, X. Lv, J. Ban, and Jian-Xin Lu, "High-efficient stabilization and solidification of municipal solid waste incineration fly ash by synergy of alkali treatment and supersulfated cement," *Environ. Pollut. 355(6)124261*, 2024, doi: DOI:10.1016/j.envpol.2024.124261.

[16] P. A. Ho, A. T. Mandagi, and A. N. Sarajar, "Analisis Pengaruh Campuran Garam Dan Belerang Pada Tanah Pasir Terhadap Kuat Geser," *Tekno*, vol. 19, no. April, pp. 1–5, 2021, [Online]. Available: https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/tekno/article/view/32707%0Ahttps://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/tekno/article/download/32707/30913