Peran Ion Kalsium dalam Meningkatkan Stabilitas Tanah Lempung

Arissa Sabilla[1]*, Rizki Damayanti[2], Rauzah Munauwarah[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
[2]Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
Jl. Meurandeh, Langsa Aceh 24416, Indonesia

* Corresponding author: arissasabilla@unsam.ac.id

ABSTRAK

Tanah lempung merupakan salah satu jenis tanah yang sering menimbulkan permasalahan dalam konstruksi karena memiliki plastisitas tinggi, daya dukung rendah, serta sifat kembang-susut yang signifikan akibat perubahan kadar air. Berbagai metode stabilisasi telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas tanah lempung, salah satunya melalui pemanfaatan material yang mengandung ion kalsium (Ca^{2+}). Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara mendalam peran ion kalsium dalam meningkatkan stabilitas tanah lempung melalui pendekatan studi literatur dan analisis dokumen. Data penelitian diperoleh dari berbagai artikel ilmiah, prosiding, buku referensi, dan hasil penelitian terdahulu yang membahas penggunaan kapur, batu gamping, limbah marmer, semen, serta material lain yang mengandung kalsium sebagai bahan stabilisasi tanah. Literatur dipilih berdasarkan kriteria relevansi topik stabilisasi tanah lempung berbasis kalsium dengan rentang tahun publikasi 2018-2026, sumber referensi yang mencakup artikel jurnal nasional dan internasional. Analisis dilakukan menggunakan metode content analysis untuk mengidentifikasi mekanisme kerja ion kalsium serta pengaruhnya terhadap sifat fisik dan mekanik tanah lempung. Hasil kajian menunjukkan bahwa ion kalsium berperan melalui proses pertukaran kation, *flokulasi-aglomerasi*, dan reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH). Proses tersebut mampu menurunkan plastisitas tanah, mengurangi potensi kembang-susut, meningkatkan kepadatan, serta meningkatkan nilai kuat tekan dan daya dukung tanah. Ion kalsium merupakan faktor utama yang berkontribusi dalam peningkatan stabilitas tanah lempung dan menjadi komponen penting dalam berbagai metode stabilisasi tanah yang digunakan pada bidang geoteknik.

Kata Kunci: Ion Kalsium, Stabilisasi Tanah, Tanah Lempung, Reaksi Pozzolanik

PENDAHULUAN

Tanah merupakan material dasar yang memegang peranan penting dalam berbagai pekerjaan konstruksi sipil, seperti pembangunan jalan, gedung, jembatan, maupun infrastruktur lainnya [1]. Keberhasilan suatu konstruksi sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah yang berfungsi sebagai media pendukung beban [2]. Namun, tidak semua jenis tanah memiliki karakteristik yang memadai untuk mendukung struktur secara aman dan berkelanjutan [3]. Salah satu jenis tanah yang sering menimbulkan permasalahan dalam bidang geoteknik adalah tanah lempung. Tanah lempung memiliki sifat plastisitas tinggi, daya dukung rendah, serta kemampuan mengembang dan menyusut yang cukup besar akibat perubahan kadar air. Karakteristik tersebut dapat menyebabkan penurunan tanah, retak pada perkerasan jalan, hingga kerusakan struktur bangunan apabila tidak ditangani dengan baik [4].

Permasalahan tanah lempung menjadi semakin penting karena keberadaannya yang cukup luas di berbagai wilayah Indonesia. Kondisi ini mendorong para peneliti dan praktisi teknik sipil untuk mencari metode yang efektif dalam meningkatkan kualitas tanah lempung agar memenuhi persyaratan teknis sebagai tanah dasar konstruksi [5]. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah stabilisasi tanah, yaitu upaya memperbaiki sifat fisik, mekanik, maupun kimia tanah melalui penambahan bahan tertentu. Stabilisasi bertujuan meningkatkan kekuatan geser, mengurangi plastisitas, memperbaiki kepadatan, serta meningkatkan daya dukung tanah sehingga lebih stabil terhadap pengaruh lingkungan dan beban konstruksi [6].

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa bahan yang mengandung kalsium memiliki kemampuan yang baik dalam proses stabilisasi tanah lempung. Kalsium dapat memicu terjadinya reaksi pertukaran ion (*cation exchange*), flokulasi,

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

aglomerasi, serta reaksi pozzolanik yang mampu mengubah struktur mikro tanah menjadi lebih padat dan stabil [7]. Dengan demikian, keberadaan ion kalsium menjadi salah satu faktor penting dalam proses perbaikan karakteristik tanah lempung [8]. Namun demikian, mekanisme peran ion kalsium dalam meningkatkan stabilitas tanah masih memerlukan kajian lebih lanjut, terutama terkait bagaimana ion tersebut berkontribusi terhadap perubahan sifat tanah secara menyeluruh [9].

Penelitian yang dilakukan oleh Angelina (2025) mengenai perilaku sifat fisik-mekanik dan mikrostruktur tanah lempung ekspansif yang distabilisasi menggunakan kapur menunjukkan bahwa penambahan kapur mampu meningkatkan karakteristik fisik dan mekanik tanah serta memperbaiki struktur mikro tanah lempung. Hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa kandungan kalsium dalam kapur berperan penting dalam proses stabilisasi melalui perubahan struktur partikel tanah [8]. Akan tetapi, penelitian tersebut lebih berfokus pada penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi dan analisis mikrostruktur tanah, sehingga belum secara khusus menjelaskan kontribusi ion kalsium sebagai komponen utama yang menyebabkan peningkatan stabilitas tanah.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Rokhman dan Artiani (2021) meneliti upaya meningkatkan stabilisasi tanah bekas timbunan sampah dengan penambahan bahan kapur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kapur mampu memperbaiki sifat teknis tanah sehingga lebih layak digunakan sebagai material konstruksi [10]. Meskipun demikian, objek penelitian tersebut berfokus pada tanah bekas timbunan sampah yang memiliki karakteristik berbeda dengan tanah lempung alami. Selain itu, penelitian tersebut lebih menekankan efektivitas bahan kapur sebagai stabilisator tanpa mengkaji secara mendalam mekanisme ion kalsium yang berperan dalam proses peningkatan stabilitas tanah.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Indriyanti dan Kasmawati (2018) mengenai stabilisasi tanah lempung menggunakan ampas batu gamping industri marmer menunjukkan bahwa material limbah yang kaya akan kandungan kalsium dapat meningkatkan kualitas tanah lempung. Penelitian ini membuktikan bahwa unsur kalsium memiliki pengaruh terhadap peningkatan sifat mekanik tanah [11]. Namun, fokus penelitian lebih diarahkan pada pemanfaatan limbah industri sebagai bahan stabilisasi alternatif sehingga pembahasan mengenai peran ion kalsium sebagai faktor utama dalam perubahan karakteristik tanah masih terbatas.

Ketiga penelitian terdahulu tersebut menunjukkan bahwa material sumber kalsium yang berbeda-beda, yaitu kapur pada tanah ekspansif, kapur pada tanah bekas timbunan, dan ampas batu gamping pada tanah lempung, secara terpisah terbukti mampu memperbaiki kualitas tanah. Akan tetapi, masing-masing penelitian tersebut membahas efektivitas materialnya secara spesifik tanpa menempatkan ion kalsium sebagai variabel penghubung yang menjelaskan mengapa berbagai material yang berbeda tersebut menghasilkan pola perbaikan sifat tanah yang serupa. Fokus pada ion kalsium dalam penelitian ini dipilih karena ion tersebut merupakan unsur aktif yang secara konsisten muncul di balik mekanisme pertukaran kation dan reaksi pozzolanik pada seluruh jenis material stabilisasi berbasis kalsium, sehingga kajian terhadap perannya dapat memberikan penjelasan yang lebih mendasar dan berlaku umum dibandingkan kajian yang berfokus pada satu jenis material stabilisasi saja. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada penyatuan temuan dari berbagai sumber kalsium ke dalam satu kerangka mekanisme ion kalsium yang koheren.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa berbagai bahan yang mengandung kalsium, seperti kapur dan batu gamping, terbukti mampu meningkatkan kualitas tanah lempung. Oleh karena itu, penelitian berjudul “Peran Ion Kalsium dalam Meningkatkan Stabilitas Tanah Lempung” menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan mengkaji secara lebih mendalam bagaimana ion kalsium berinteraksi dengan partikel tanah lempung dan berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas tanah. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman teoritis yang lebih kuat mengenai mekanisme stabilisasi tanah berbasis kalsium serta menjadi referensi bagi pengembangan metode perbaikan tanah yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan dalam bidang teknik sipil.

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

BAHAN DAN METODE

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (library research) dan analisis dokumen. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk mengkaji dan menjelaskan peran ion kalsium dalam meningkatkan stabilitas tanah lempung berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya. Penelitian tidak melibatkan pengujian laboratorium secara langsung, melainkan memanfaatkan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah yang relevan.

Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang berasal dari dokumen ilmiah berupa artikel jurnal, prosiding seminar, buku referensi geoteknik, standar teknis, serta publikasi ilmiah lainnya yang membahas stabilisasi tanah lempung menggunakan material yang mengandung ion kalsium, seperti kapur, batu gamping, dan bahan berbasis kalsium lainnya.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi, yaitu dengan mengidentifikasi, menyeleksi, dan mengumpulkan berbagai dokumen ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Dokumen diperoleh melalui database ilmiah, jurnal nasional, prosiding konferensi, buku referensi, dan sumber akademik lainnya. Selanjutnya, dokumen yang telah terkumpul diklasifikasikan berdasarkan jenis material stabilisasi, parameter pengujian tanah, dan hasil yang diperoleh.

Kriteria dan Tahapan Seleksi Literatur

Literatur yang dianalisis dipilih menggunakan kata kunci "ion kalsium", "stabilisasi tanah lempung", "calcium ion clay stabilization", dan "pozzolanic reaction clay soil" pada basis data Google Scholar, Scopus, dan repositori institusi, dengan rentang tahun publikasi 2018-2026. Proses seleksi dilakukan melalui empat tahap, yaitu: (1) identifikasi, berupa penelusuran awal yang menghasilkan sejumlah dokumen sesuai kata kunci; (2) penyaringan (screening), yaitu pemeriksaan judul dan abstrak untuk membuang dokumen yang tidak relevan dengan topik stabilisasi tanah lempung berbasis kalsium; (3) penilaian kelayakan (eligibility), yaitu pembacaan teks lengkap untuk memastikan dokumen membahas mekanisme, material, atau parameter pengujian yang relevan; serta (4) inklusi, yaitu penetapan dokumen akhir yang dianalisis secara mendalam. Melalui tahapan tersebut diperoleh 6 sumber referensi akhir yang terdiri atas artikel jurnal, prosiding, dan buku referensi geoteknik yang menjadi dasar sintesis pada bagian hasil dan pembahasan. Dasar pemilihan referensi ini adalah keterkaitan langsung dokumen dengan mekanisme kimiawi atau fisik ion kalsium dalam memperbaiki sifat tanah lempung.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mekanisme Peran Ion Kalsium dalam Meningkatkan Stabilitas Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan jenis tanah yang memiliki karakteristik khusus berupa ukuran partikel yang sangat halus, luas permukaan spesifik yang tinggi, serta muatan negatif pada permukaan mineralnya. Karakteristik tersebut menyebabkan tanah lempung memiliki kemampuan menyerap dan menahan air dalam jumlah besar sehingga sering menunjukkan perilaku plastis, mudah mengembang saat basah, dan mengalami penyusutan ketika kehilangan kadar air. Kondisi ini menjadi salah satu faktor utama rendahnya stabilitas tanah lempung sebagai lapisan dasar konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan tanah melalui proses stabilisasi, salah satunya dengan memanfaatkan material yang mengandung ion kalsium (Ca^{2+}) [12].

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu mengenai Peran Sumber Kalsium dalam Stabilisasi Tanah Lempung

Peneliti	Sumber Kalsium	Jenis Tanah	Parameter yang Diuji	Temuan Utama
Angelina (2025)	Kapur	Lempung ekspansif	Sifat fisik-mekanik, mikrostruktur	Perbaikan sifat fisik-mekanik dan struktur mikro tanah lebih padat
Rokhman & Artiani (2021)	Kapur	Tanah bekas timbunan sampah	Kekuatan dan sifat teknis tanah	Sifat teknis tanah membaik dan lebih layak sebagai material konstruksi
Indriyanti & Kasmawati (2018)	Ampas batu gamping industri marmer	Tanah lempung	Sifat mekanik tanah	Sifat mekanik meningkat dan daya dukung tanah lebih baik
Bhattacharja et al. (2003)	Kapur dan semen Portland	Tanah lempung	Pertukaran kation, flokulasi, pozzolanik, hidrasi	Ca berperan penting dalam pertukaran kation dan flokulasi serta mendukung peningkatan kekuatan
Singh et al. (2020)	Gypsum + $CaCl_2$	Tanah lempung	MDD, OMC, CBR	4% gypsum + 0,75% $CaCl_2$ meningkatkan MDD menjadi 1,97 g/cm³ dan CBR menjadi 10,22%
Mahmoudi et al. (2026)	CCR + EAF slag	Tanah bentonit	UCS, swelling, SEM, XRD, FTIR, EDX	Terbentuk C–S–H dan C–A–S–H serta terjadi peningkatan kekuatan dan perbaikan struktur mikro

Berdasarkan Tabel 1, berbagai sumber yang mengandung kalsium menunjukkan pola peningkatan sifat geoteknik tanah yang relatif konsisten, meskipun jenis material dan karakteristik tanah yang digunakan berbeda. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kalsium dapat berkontribusi terhadap perubahan sifat tanah melalui mekanisme pertukaran kation dan flokulasi pada tahap awal, sedangkan pada tahap selanjutnya dapat berperan dalam pembentukan produk sementasi melalui reaksi pozzolanik.

Pertukaran Kation dan Flokulasi Partikel Lempung

Tahap awal yang terjadi ketika material yang mengandung kalsium ditambahkan ke dalam tanah lempung adalah proses pertukaran kation (cation exchange). Secara alami, permukaan partikel lempung memiliki muatan negatif yang menarik berbagai ion bermuatan positif seperti natrium (Na^+), kalium (K^+), hidrogen (H^+), dan magnesium (Mg^{2+}). Namun, ion-ion tersebut memiliki kemampuan ikatan yang relatif lemah sehingga lapisan air yang mengelilingi partikel lempung tetap tebal dan menyebabkan tanah bersifat plastis.

Mekanisme tersebut didukung oleh konsep stabilisasi tanah lempung melalui pertukaran kation dan flokulasi. Ketika ion kalsium (Ca^{2+}) tersedia dalam larutan pori, ion tersebut dapat menggantikan kation monovalen yang teradsorpsi pada permukaan mineral lempung. Pertukaran ini menyebabkan perubahan pada lapisan ganda difus (diffuse double layer) dan mendorong partikel lempung yang sebelumnya terdispersi untuk mengalami flokulasi dan aglomerasi. Proses tersebut berlangsung relatif cepat dan menjadi tahap awal dalam perubahan struktur tanah, sedangkan peningkatan kekuatan lebih lanjut dapat berkembang melalui reaksi pozzolanik dan hidrasi yang berlangsung secara bertahap [13].

Ketika ion kalsium masuk ke dalam sistem tanah, ion tersebut menggantikan ion-ion monovalen yang sebelumnya menempel pada permukaan mineral lempung. Karena ion kalsium memiliki muatan ganda (divalen), gaya tarik elektrostatiknya terhadap partikel tanah menjadi lebih kuat. Akibatnya, ketebalan lapisan air ganda (diffuse double layer) yang mengelilingi partikel lempung berkurang secara signifikan.

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Berkurangnya lapisan air ini menyebabkan partikel-partikel lempung yang sebelumnya terdispersi mulai saling mendekat dan membentuk agregat yang lebih besar. Fenomena ini dikenal sebagai flokulasi dan aglomerasi. Pada kondisi tersebut, struktur tanah berubah dari susunan yang bersifat teratur dan rapat (*dispersed structure*) menjadi susunan yang lebih terbuka namun stabil (*flocculated structure*). Perubahan struktur ini menghasilkan peningkatan porositas makro yang mempercepat drainase serta mengurangi sensitivitas tanah terhadap perubahan kadar air.

Penelitian Angelina (2025) menunjukkan bahwa proses flokulasi akibat penambahan kapur menghasilkan perubahan mikrostruktur yang signifikan pada tanah lempung ekspansif. Hasil pengamatan mikrostruktur memperlihatkan terbentuknya kelompok partikel yang lebih besar dan lebih padat dibandingkan kondisi awal. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Rokhman dan Artiani (2021), yang menemukan bahwa penambahan kapur pada tanah bekas timbunan mampu memperbaiki struktur tanah sehingga lebih stabil dan lebih mudah dipadatkan.

Perubahan struktur akibat flokulasi ini menjadi tahap penting karena merupakan fondasi bagi terjadinya reaksi kimia lanjutan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tanah dalam jangka panjang.

Reaksi Pozzolanik dan Pembentukan Senyawa Semen Alami



Gambar 1. Reaksi Pozzolanik dan Pembentukan Senyawa Semen Alami

Setelah proses pertukaran kation berlangsung, ion kalsium yang tersedia dalam tanah akan berpartisipasi dalam reaksi pozzolanik. Reaksi ini merupakan proses kimia antara kalsium dengan senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang terkandung secara alami dalam mineral lempung.

Pada kondisi yang cukup lembap, ion kalsium bereaksi dengan silika terlarut dan menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (CSH). Selain itu, reaksi antara ion kalsium dan alumina membentuk *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH) [14]. Kedua senyawa tersebut merupakan produk hidrasi yang memiliki sifat menyerupai semen sehingga sering disebut sebagai semen alami (natural cementitious compounds).

$$Ca^{2+}+SiO_2+H_2O \rightarrow CSH$$

Pembentukan CSH dan CAH merupakan faktor utama yang menyebabkan peningkatan kekuatan tanah secara permanen. Senyawa tersebut mengisi rongga-rongga antar partikel tanah, memperkuat kontak antar butiran, serta membentuk matriks padat yang mengikat agregat tanah menjadi satu kesatuan yang lebih kuat. Semakin banyak senyawa hidrasi yang terbentuk, semakin tinggi pula kemampuan tanah dalam menahan beban eksternal. Reaksi pada Gambar 1 dan persamaan pembentukan CSH tersebut secara langsung menjelaskan mekanisme peningkatan sifat tanah yang diamati pada bagian selanjutnya: senyawa CSH dan CAH yang mengendap pada rongga antarpartikel menjadi penyebab langsung menurunnya plastisitas tanah, karena air yang semula mengisi rongga tersebut digantikan oleh senyawa pengikat padat, sekaligus menjadi penyebab meningkatnya nilai kuat tekan dan CBR, karena matriks yang terbentuk mendistribusikan beban secara lebih merata antarbutiran tanah.

Angelina (2025) melaporkan bahwa peningkatan kekuatan tanah setelah penambahan kapur tidak hanya disebabkan oleh perubahan fisik akibat flokulasi, tetapi juga oleh terbentuknya senyawa hidrasi yang memperkuat struktur mikro tanah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Indriyanti dan Kasmawati (2018) yang menunjukkan bahwa ampas batu gamping industri marmer, yang kaya akan kandungan kalsium karbonat, mampu meningkatkan karakteristik mekanik tanah lempung melalui pembentukan ikatan antarpartikel yang lebih kuat.

Berbeda dengan proses flokulasi yang berlangsung relatif cepat, reaksi pozzolanik

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

memerlukan waktu pemeraman (curing time) agar berlangsung secara optimal. Oleh karena itu, peningkatan kekuatan tanah akibat reaksi pozzolanik umumnya semakin besar seiring bertambahnya waktu pemeraman.

Bukti eksperimental yang lebih mutakhir mengenai pembentukan produk sementasi akibat keberadaan kalsium dilaporkan oleh Mahmoudi et al. (2026). Pada tanah bentonit yang distabilisasi menggunakan calcium carbide residue (CCR) dan electric arc furnace (EAF) slag, analisis SEM, XRD, FTIR, dan EDX menunjukkan terbentuknya gel calcium silicate hydrate (C–S–H) dan calcium aluminate silicate hydrate (C–A–S–H). Peningkatan konsentrasi Ca, Si, dan Al dalam sistem stabilisasi mendukung terjadinya proses hidrasi dan polimerisasi yang memperkuat struktur tanah. Secara makroskopis, mekanisme tersebut tercermin pada peningkatan kuat tekan bebas (UCS) dan penurunan potensi pengembangan tanah. Temuan ini memperkuat bahwa ketersediaan kalsium tidak hanya berperan dalam pertukaran kation dan flokulasi pada tahap awal, tetapi juga berkontribusi terhadap pembentukan produk sementasi yang meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur tanah dalam jangka lebih panjang [15].

Pengaruh Ion Kalsium terhadap Sifat Fisik Tanah Lempung

Dampak nyata dari keberadaan ion kalsium dapat diamati melalui perubahan berbagai parameter fisik tanah. Salah satu perubahan yang paling sering dilaporkan dalam berbagai penelitian adalah penurunan batas cair (*liquid limit*) dan indeks plastisitas (*plasticity index*).

Penurunan indeks plastisitas menunjukkan bahwa tanah menjadi lebih stabil terhadap perubahan kadar air. Tanah yang semula memiliki sifat sangat plastis dan mudah berubah bentuk akan mengalami peningkatan kekakuan setelah distabilisasi. Kondisi ini sangat penting terutama pada tanah ekspansif yang rentan mengalami pengembangan dan penyusutan.

Selain itu, proses flokulasi menyebabkan kebutuhan air untuk mencapai kondisi plastis menjadi lebih rendah. Dengan berkurangnya kemampuan tanah menyerap air, risiko terjadinya pengembangan volume tanah juga menurun. Akibatnya, stabilitas dimensi tanah menjadi lebih baik sehingga potensi kerusakan konstruksi akibat pergerakan tanah dapat diminimalkan.

Penelitian-penelitian terdahulu secara konsisten menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan ion kalsium yang tersedia, semakin besar penurunan nilai indeks plastisitas yang terjadi. Temuan ini mengindikasikan bahwa ion kalsium merupakan faktor dominan dalam mengendalikan perubahan sifat fisik tanah lempung.

Pengaruh Ion Kalsium terhadap Sifat Mekanik Tanah Lempung

Selain memperbaiki sifat fisik, ion kalsium juga memberikan dampak signifikan terhadap sifat mekanik tanah. Berbagai penelitian menunjukkan adanya peningkatan nilai kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength*/UCS), kuat geser, dan *California Bearing Ratio* (CBR) setelah proses stabilisasi menggunakan material berkalsium.

Peningkatan nilai UCS terjadi karena terbentuknya ikatan yang lebih kuat antarpartikel tanah akibat reaksi pozzolanik. Struktur tanah yang semula longgar berubah menjadi lebih padat dan terintegrasi sehingga mampu menahan tegangan yang lebih besar. Sementara itu, peningkatan nilai CBR menunjukkan bahwa tanah memiliki daya dukung yang lebih baik sebagai lapisan dasar konstruksi jalan.

Rokhman dan Artiani (2021) menemukan bahwa penambahan kapur mampu meningkatkan stabilitas tanah bekas timbunan secara signifikan, yang ditunjukkan oleh perbaikan parameter kekuatan tanah. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Indriyanti dan Kasmawati (2018), dimana penambahan ampas batu gamping meningkatkan daya dukung tanah lempung sehingga lebih layak digunakan sebagai tanah dasar konstruksi.

Selain meningkatkan kekuatan, keberadaan ion kalsium juga mampu menurunkan kompresibilitas tanah. Tanah menjadi lebih tahan terhadap deformasi akibat pembebanan sehingga risiko penurunan (settlement) dapat dikurangi. Kondisi ini sangat menguntungkan pada pembangunan infrastruktur yang membutuhkan stabilitas jangka panjang.

Temuan mengenai pengaruh kalsium terhadap peningkatan sifat mekanik tanah juga diperkuat oleh penelitian Singh et al. (2020) yang

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

menggunakan gypsum dan calcium chloride ($CaCl_2$) sebagai bahan stabilisasi tanah lempung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan gypsum meningkatkan parameter pemadatan hingga kadar tertentu, dengan nilai maximum dry density (MDD) mencapai 1,92 g/cm³ pada kadar gypsum 4%. Ketika dikombinasikan dengan 0,75% $CaCl_2$, MDD meningkat lebih lanjut menjadi 1,97 g/cm³. Peningkatan juga terlihat pada nilai California Bearing Ratio (CBR), dari 4,17% pada tanah asli menjadi 10,22% pada campuran 4% gypsum dan 0,75% $CaCl_2$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberadaan bahan yang menyediakan kalsium dapat berkontribusi terhadap peningkatan kepadatan dan daya dukung tanah lempung, sehingga mendukung hubungan antara ketersediaan kalsium dan perbaikan sifat geoteknik tanah [16].

Sintesis Peran Ion Kalsium dalam Stabilisasi Tanah Lempung

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa ion kalsium merupakan komponen utama yang menentukan keberhasilan proses stabilisasi tanah lempung. Peran ion kalsium diawali melalui proses pertukaran kation yang memicu flokulasi partikel lempung, dilanjutkan dengan reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa pengikat berupa CSH dan CAH. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menyebabkan terjadinya perubahan struktur mikro tanah yang berdampak pada peningkatan sifat fisik dan mekanik tanah.

Keberadaan ion kalsium terbukti mampu menurunkan plastisitas, mengurangi potensi kembang-susut, meningkatkan kepadatan, memperbesar daya dukung, serta meningkatkan kekuatan tanah lempung. Oleh karena itu, berbagai material yang kaya kalsium seperti kapur, semen, batu gamping, limbah marmer, maupun material limbah lainnya memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi tanah yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini menegaskan bahwa bukan hanya jenis material stabilisasi yang penting, tetapi terutama ketersediaan ion kalsium yang menjadi faktor utama dalam meningkatkan stabilitas tanah lempung. Kontribusi utama kajian ini bukan sekadar merangkum ulang temuan Angelina (2025), Rokhman dan Artiani (2021), serta Indriyanti dan Kasmawati (2018), melainkan mengintegrasikan ketiga temuan tersebut ke dalam satu kerangka mekanisme ion kalsium yang sama, yaitu pertukaran kation, flokulasi-aglomerasi, dan reaksi pozzolanik, sehingga pola perbaikan sifat tanah yang tampak berbeda pada masing-masing penelitian dapat dijelaskan oleh satu prinsip kimiawi yang konsisten. Kerangka terintegrasi ini menjadi nilai tambah kajian dibandingkan penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas materialnya secara terpisah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ion kalsium (Ca^{2+}) memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan stabilitas tanah lempung melalui serangkaian mekanisme fisik dan kimia. Ion kalsium bekerja dengan menggantikan kation bermuatan lemah pada permukaan partikel lempung sehingga memicu proses flokulasi dan aglomerasi yang mengubah struktur tanah menjadi lebih stabil. Selain itu, ion kalsium bereaksi dengan senyawa silika dan alumina yang terkandung dalam tanah membentuk senyawa sementasi alami berupa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (C-A-H) yang berfungsi sebagai perekat antarpartikel tanah. Proses tersebut menghasilkan perbaikan signifikan pada sifat fisik dan mekanik tanah, yang ditunjukkan oleh penurunan plastisitas, berkurangnya potensi kembang-susut, meningkatnya kepadatan, serta meningkatnya nilai kuat tekan dan daya dukung tanah. Pola tersebut secara konsisten ditemukan pada kajian yang menggunakan kapur, batu gamping, maupun limbah marmer sebagai sumber ion kalsium, sehingga memperkuat kesimpulan bahwa ion kalsium, dan bukan jenis materialnya, merupakan faktor penentu utama keberhasilan stabilisasi tanah lempung.

Kajian ini memiliki keterbatasan karena seluruhnya bersumber dari studi literatur tanpa pengujian laboratorium langsung, sehingga besaran perubahan sifat fisik dan mekanik tanah yang dilaporkan bersifat kualitatif dan belum tentu berlaku sama pada setiap jenis tanah lempung maupun kondisi lapangan yang berbeda. Literatur yang dianalisis juga masih didominasi sumber

nasional, sehingga generalisasi temuan pada konteks geoteknik yang lebih luas perlu dilakukan dengan hati-hati. Oleh karena itu, penelitian lanjutan berupa pengujian laboratorium dan lapangan pada berbagai jenis tanah lempung serta variasi kadar ion kalsium disarankan untuk memverifikasi secara kuantitatif mekanisme yang disintesis dalam kajian ini, sekaligus memperkuat aplikasinya sebagai metode stabilisasi tanah yang efektif dan berkelanjutan pada bidang teknik sipil.

REFERENSI

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

[2] A. Sabilla, *Perhitungan Kekuatan Resonansi, Vibrasi dan Uplift Tanah dengan Mencari Nilai Gmaks, amaks, dan Swelling pada Tanah Asal Quarry Paya Kameng-Barbate, Blang Bintang untuk Mitigasi Bencana Gempa*. Universitas Syiah Kuala, 2023.

[3] N. M. Ruhilla and B. Hanshi, "Daya Dukung Tanah dan Pondasi: Memahami Pondasi Dangkal dan Menengah," *MOZAIK: Journal of Art and Architecture*, vol. 2, no. 1, pp. 54–59, 2024.

[4] S. Syahril *et al.*, "Perbaikan Tanah Problematik Lempung Lunak dengan Metode Stabilisasi Kimiawi Ditinjau dari Nilai Kadar Air dan Indeks Plastisitas," *Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung*, 2020.

[5] D. A. Safira and O. Rusdiana, "Variasi Tekstur Tanah dan Bahan Organik Berdasarkan Kerapatan Tajuk Studi Kasus pada Hutan Kota Muhammad Sabki, Kota Jambi," *Jurnal Silva Tropika*, vol. 9, no. 1, pp. 32–43, 2025, doi: 10.22437/jurnalsilvatropika.v9i1.44117.

[6] N. Noywuli, "Pendekatan Konservasi Dalam Pengelolaan Lahan Perbukitan Untuk Usaha Pertanian," *Pertanian Unggul*, vol. 2, no. 1, pp. 16–27, 2023.

[7] E. E. Hangge, R. A. Bella, and M. C. Ullu, "Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp. 89–102, 2021.

[8] F. D. B. Angelina, "Perilaku Sifat Fisik-Mekanik dan Mikrostruktur Tanah Lempung Ekspansif yang Distabilisasi Menggunakan Kapur," *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, vol. 2, no. 4, pp. 16–17, 2025, doi: 10.62603/konteks.v2i4.180.

[9] A. F. Mokoagow, J. Waani, S. Yacob, R. Rompis, U. Sam, and R. Manado, "Analisis Pengaruh Bahan Aditif (Kapur) terhadap Mikrostruktur Tanah Lempung dalam Pembangunan Jalan," *Jurnal Sosial dan Teknologi (SOSTECH) Volume 6, Number 5, Mei 2026*, vol. 6, no. 5, pp. 1764–1784, 2026.

[10] A. Rokhman and G. P. Artiani, "Upaya Meningkatkan Stabilisasi pada Tanah Bekas Timbunan Sampah dengan Penambahan Bahan Kapur," *Rekayasa Sipil Vol 5 Nomor 2*, vol. 0, pp. 3–8, 2021.

[11] I. Indriyanti and K. Kasmawati, "Uji Eksperimental Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Ampas Batu Gamping Industri Marmer," *Teknik Hidro*, vol. 11, no. 2, pp. 14–25, 2018, doi: 10.26618/th.v11i2.2443.

[12] D. M. Pangadongan, R. Rachman, and I. L. K. Wong, "Pengaruh Penambahan Bubuk Gypsum Pada Tanah Lempung Terhadap Uji California Bearing Ratio (CBR)," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 263–272, 2021, doi: 10.52722/pcej.v2i4.188.

[13] S. Bhattacharja, J. I. Bhatty, and H. A. Todres, *Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime-A Critical Review of Literature*. PCA. Portland Cement Association, 2023.

[14] A. Sabilla, R. Rikza, A. Alfisyahrin, M. Masthura, S. Rizky, and R. Damayanti, "Analisis Perubahan Struktur Mineral Tanah Akibat Reaksi Kimia antara Lempung dan Kapur pada Kondisi Kelembapan Tinggi," *QUIMICA: Jurnal Kimia Sains dan Terapan*, vol. 7, no. 2, pp. 23–28, 2025, doi: 10.33059/jq.v7i2.13354.

[15] S. Mahmoudi *et al.*, "An eco-efficient soil stabilization method: Synergistic use of calcium carbide residue and EAF slag for bentonite soil," *Results in Engineering*, vol. 29, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108852.

[16] J. Singh, U. K. Singh, and R. K. Singh, "Stabilization of Clayey Soil using Gypsum and Calcium Chloride," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878 (Online), Volume-9 Issue-2, July 2020*, 2020, doi: 10.35940/ijrte.B3828.079220.