Quimica: Jurnal Kimia Sains dan Terapan **ISSN 2716-0963**
Volume 7, Nomor 2, Oktober 2025 **e-ISSN 2716-1218**

Analisis Perubahan Struktur Mineral Tanah Akibat Reaksi Kimia antara Lempung dan Kapur pada Kondisi Kelembapan Tinggi

Arissa Sabilla[1]*, Rikza[1], Alfisyahrin[1], Masthura[2], Sari Rizky[3], dan Rizki Damayanti[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
[2]Program Studi Matematika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra
[3]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 perubahan struktur mineral tanah akibat reaksi kimia antara lempung dan kapur pada kondisi kelembapan tinggi dengan memanfaatkan data sekunder hasil uji laboratorium terdahulu. Analisis difokuskan pada hubungan antara variasi kadar kapur terhadap perubahan sifat mekanik dan mekanisme kimia yang mendasarinya. Bahan penelitian berupa tanah lempung berplastisitas tinggi (CH) yang distabilisasi menggunakan kapur padam ($Ca(OH)_2$) pada kadar 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, dan 12% dari berat kering tanah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan kapur hingga kadar optimum 6% meningkatkan nilai sudut geser dalam (ϕ) dari 20,545° menjadi 39,330°, serta kohesi (c) dari 1,505 t/m² menjadi 2,080 t/m². Peningkatan kekuatan ini disebabkan oleh terbentuknya senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH) hasil reaksi pozzolanisasi antara ion Ca^{2+} dari kapur dan mineral silikat–aluminat dari tanah lempung. Kelembapan tinggi mempercepat proses difusi ion dan pembentukan senyawa pengikat tersebut, sehingga struktur tanah menjadi lebih rapat dan kaku. Namun, pada kadar kapur di atas 10%, reaksi kimia tidak berjalan efektif karena terbentuk lapisan jenuh $Ca(OH)_2$ yang menghambat difusi ion. Secara geoteknis, kondisi optimum tercapai pada kombinasi kadar kapur 6–8% dengan kelembapan tinggi yang terkontrol, yang mampu meningkatkan kekuatan geser dan menurunkan plastisitas tanah secara signifikan.

Kata Kunci: Tanah Lempung, Kapur, Pozzolanisasi, Kelembapan, Struktur Mineral

PENDAHULUAN

Tanah merupakan salah satu elemen terpenting dalam konstruksi teknik sipil karena berfungsi sebagai pondasi utama bagi berbagai jenis bangunan dan infrastruktur [1]. Kekuatan serta kestabilan suatu struktur sangat bergantung pada kemampuan tanah dalam menahan beban yang bekerja di atasnya [2][3]. Namun, tidak semua jenis tanah memiliki karakteristik yang baik untuk dijadikan dasar bangunan [4]. Salah satu jenis tanah yang sering menimbulkan permasalahan teknis adalah tanah lempung, terutama yang tergolong dalam kelompok CH (*Clay of High Plasticity*) [5][6]. Tanah ini memiliki sifat plastisitas tinggi, daya ikat air besar, dan perubahan volume signifikan akibat perubahan kadar air. Akibatnya, pada musim hujan tanah dapat mengalami pengembangan (*swelling*), sementara pada musim kemarau tanah akan menyusut (*shrinkage*) [7]. Kondisi ini menimbulkan instabilitas struktur, seperti retakan pada pondasi, pergeseran lapisan tanah, dan penurunan daya dukung [8].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai teknik stabilisasi tanah telah dikembangkan. Stabilisasi tanah bertujuan untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah melalui perlakuan mekanis, kimia, maupun fisik. Salah satu metode yang paling umum dan efektif digunakan adalah stabilisasi kimia menggunakan bahan kapur (*lime stabilization*) [9]. Penggunaan kapur dalam stabilisasi tanah telah dikenal luas karena mampu meningkatkan daya dukung, menurunkan plastisitas, serta meningkatkan kekuatan geser tanah [10][11]. Secara kimiawi, kapur bereaksi dengan mineral lempung dalam tanah membentuk senyawa baru yang bersifat lebih stabil, seperti *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH). Proses ini dikenal sebagai reaksi pozzolanisasi, yang mengubah sifat mineral lempung menjadi lebih keras dan berikatan kuat [12].

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Pada tahap awal, reaksi antara kapur dan lempung menghasilkan flokulasi dan aglomerasi, di mana partikel-partikel tanah bergabung membentuk struktur agregat [13]. Tahap ini menyebabkan peningkatan porositas namun menurunkan kohesi awal tanah. Seiring waktu dan dengan adanya kelembapan yang cukup, terjadi reaksi lanjut berupa pembentukan senyawa CSH dan CAH, yang mengikat partikel-partikel tanah menjadi massa yang lebih padat dan stabil. Oleh karena itu, kelembapan berperan penting dalam mempercepat proses reaksi kimia tersebut. Pada kondisi kelembapan tinggi, air berfungsi sebagai media difusi ion Ca^{2+}, SiO_2, dan Al_2O_3 yang memungkinkan reaksi hidrasi berlangsung optimal [14].

Penelitian oleh Melisa Haras, Turangan A.E., dan Legrans R.I. (2017) menunjukkan bahwa variasi kadar kapur sebesar 0%–12% mampu meningkatkan nilai sudut geser dalam (ϕ) hingga mencapai 43,84°, dengan kadar optimum pada 6–8%. Penelitian oleh Asma Muhmed, Mostafa Mohamed, dan Amir Khan (2022) menekankan bahwa kelembapan memiliki peran dominan terhadap kekuatan dan evolusi mikrostruktur tanah lempung reaktif yang distabilisasi dengan 7% kapur. Hasil uji menunjukkan bahwa kekuatan tanah meningkat seiring dengan penambahan kadar air hingga 30% di atas kadar air optimum [15].

Sementara itu, penelitian terbaru oleh Zaini (2024) dalam Scientific Reports menyoroti pengaruh interaksi kimia antara ion kalsium dari kapur dengan mineral lempung *montmorillonite* terhadap pembentukan fase amorf CSH dan CAH. Studi ini menggunakan pendekatan difraksi sinar-X (XRD) dan mikroskopi elektron (SEM) untuk mengidentifikasi perubahan mikrostruktur tanah akibat variasi kadar kapur dan tingkat kelembapan. Hasilnya menunjukkan bahwa reaksi pozzolanisasi lebih cepat terjadi pada kondisi kelembapan tinggi karena ion Ca^{2+} mudah berdifusi melalui lapisan antar-mineral. Namun, pada kadar kapur di atas 10%, proses difusi terhambat oleh terbentuknya lapisan jenuh $Ca(OH)_2$ yang menyebabkan penurunan efektivitas reaksi kimia dan kohesi [16].

Dari ketiga penelitian tersebut, disimpulkan bahwa meskipun penambahan kapur terbukti meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah lempung, sebagian besar penelitian masih berfokus pada parameter mekanik makroskopis tanpa meninjau secara menyeluruh perubahan mineralogi dan kimia tanah pada kondisi kelembapan tinggi. Belum ada kajian yang secara spesifik mengkaji keterkaitan antara reaksi pozzolanisasi, difusi ion kalsium, dan transformasi mineral tanah lempung pada lingkungan jenuh air yang menyerupai kondisi tropis. Dengan demikian, terdapat gap penelitian yang signifikan, yaitu perlunya analisis mendalam mengenai perubahan struktur mineral tanah akibat reaksi kimia lempung–kapur dalam kondisi kelembapan tinggi, baik secara konseptual maupun eksperimental.

Penelitian ini juga memiliki relevansi praktis dalam bidang teknik sipil, terutama pada perancangan pondasi, timbunan jalan, dan bangunan bawah tanah di daerah dengan tingkat kelembapan tinggi. Dengan memahami bagaimana reaksi kimia tanah–kapur mengubah sifat mineral dan struktur mikronya, maka proses stabilisasi tanah di lapangan dapat dilakukan secara lebih efisien, baik dari segi pemilihan bahan, kadar campuran, maupun waktu pemeraman. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat dalam mengembangkan model prediktif kestabilan tanah lempung terstabilisasi kapur di lingkungan tropis yang memiliki fluktuasi kadar air tinggi.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tanah lempung, kapur padam ($Ca(OH)_2$), dan air sebagai media reaksi kimia. Tanah lempung yang dijadikan sampel merupakan tanah dengan karakteristik plastisitas tinggi (CH) yang secara umum memiliki kandungan mineral *montmorillonite* dan *kaolinite*. Kapur padam digunakan sebagai bahan stabilisasi karena mengandung senyawa kalsium oksida (CaO) dan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang dapat bereaksi dengan silika dan alumina pada tanah lempung untuk membentuk senyawa ikatan baru yang lebih stabil. Air berfungsi sebagai katalis dalam reaksi hidrasi dan pozzolanisasi yang terjadi antara kapur dan mineral lempung.

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis deskriptif laboratorium berbasis data sekunder yang diperoleh dari penelitian Haras (2017). Dalam penelitian, tanah lempung dicampur dengan kapur pada berbagai variasi kadar campuran, yaitu 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, dan 12% dari berat kering tanah. Setiap campuran dicampur secara homogen, kemudian dilakukan pemeraman selama 24 jam pada kondisi kelembapan tinggi (mendekati kadar air optimum) untuk memungkinkan terjadinya reaksi awal antara kapur dan mineral tanah [17]. Setelah pemeraman, sampel dipadatkan dengan energi pemadatan standar untuk memperoleh hubungan antara kadar air dan berat isi kering. Selanjutnya, dilakukan uji geser langsung pada setiap sampel untuk menentukan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ).

Analisis data dilakukan dengan membandingkan perubahan nilai kuat geser dan karakteristik fisik tanah terhadap variasi kadar kapur. Selain analisis numerik, ditinjau pula proses kimia yang terjadi akibat reaksi ion Ca^{2+} dari kapur dengan mineral lempung, yang menghasilkan *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH). Kedua senyawa ini berperan penting dalam memperkuat ikatan antarpartikel tanah, menurunkan plastisitas, serta meningkatkan kekuatan geser.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat Fisis

Pengujian sifat fisis tanah dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar material tanah lempung yang digunakan dalam penelitian ini sebelum dilakukan proses pencampuran dengan kapur. Uji sifat fisis bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi awal tanah, meliputi kadar air alami, batas Atterberg (batas cair dan batas plastis), indeks plastisitas, berat jenis butiran tanah, serta persentase butiran halus yang lolos saringan No. 200. Parameter-parameter tersebut sangat penting dalam menentukan perilaku tanah terhadap perubahan kadar air dan dalam mengklasifikasikan jenis tanah menurut sistem klasifikasi tanah teknik (USCS). Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanah lempung yang digunakan memiliki plastisitas tinggi dengan daya ikat air yang cukup besar. Rangkuman hasil pengujian sifat fisis ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil uji sifat fisis tanah lempung

Karakteristik	Nilai
Kadar air	7,30%
Batas cair	51%
Batas plastis	24,36%
Indeks plastisitas	26,63%
Berat jenis	2,57
Analisa saringan lolos No. 200	50,36%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, kadar air alami tanah sebesar 7,30% menunjukkan bahwa sampel berada dalam kondisi relatif kering pada saat pengambilan, sehingga masih memungkinkan untuk dilakukan pencampuran bahan stabilisasi secara efektif. Nilai batas cair sebesar 51% dan batas plastis sebesar 24,36% menunjukkan bahwa tanah memiliki tingkat plastisitas sedang hingga tinggi. Selisih antara keduanya, yaitu indeks plastisitas (PI) sebesar 26,63%, menandakan bahwa tanah termasuk dalam kategori lempung plastisitas sedang (CL) menurut sistem klasifikasi USCS. Nilai PI di atas 20% menunjukkan kecenderungan tanah untuk mengembang dan menyusut ketika terjadi perubahan kadar air, yang menjadi salah satu alasan utama dilakukannya stabilisasi kimia menggunakan kapur.

Nilai berat jenis tanah sebesar 2,57 menunjukkan bahwa butiran tanah memiliki kepadatan mineral yang umum ditemukan pada jenis lempung dengan dominasi mineral atau *montmorillonite*. Sedangkan hasil analisis saringan menunjukkan 50,36% butiran halus lolos saringan No. 200, yang berarti lebih dari setengah komposisi tanah terdiri dari partikel berukuran sangat halus (diameter < 0,075 mm). Persentase ini mengindikasikan bahwa tanah bersifat kohesif dan berpotensi memiliki daya ikat air tinggi.

Hasil uji sifat fisis ini menegaskan bahwa tanah sangat relevan untuk diteliti lebih lanjut dalam reaksi kimia antara lempung dan kapur pada kondisi kelembapan tinggi. Karakteristik ini juga mendukung alasan perlunya stabilisasi menggunakan kapur untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan struktur tanah.

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

Hasil Pengujian Sifat Mekanis

Pengujian sifat mekanis dilakukan untuk mengetahui perubahan karakteristik kekuatan geser tanah lempung akibat proses stabilisasi menggunakan kapur dengan berbagai variasi kadar campuran. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kadar kapur terhadap parameter kekuatan tanah. Ringkasan hasil pengujian sifat mekanis disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil uji sifat mekanis tanah lempung terstabilisasi

Kondisi Tanah	Sudut Geser Dalam (ϕ)	Kohesi (c)
Tanah Asli	20,545	1,505
0% Kapur	24,225	1,648
2% Kapur	29,635	1,700
4% Kapur	34,225	1,943
6% Kapur	39,330	2,080
8% Kapur	39,028	0,858
10% Kapur	40,370	0,673
12% Kapur	43,840	0,523

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa penambahan kapur memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai sudut geser dalam (ϕ), terutama hingga kadar 6%. Nilai ϕ meningkat dari 20,545° pada tanah asli menjadi 39,330° pada campuran 6% kapur, yang menunjukkan peningkatan kekuatan geser akibat terbentuknya agregasi antar partikel dan ikatan baru hasil reaksi kimia kapur–lempung. Setelah kadar 6%, peningkatan sudut geser masih terjadi namun dengan laju yang lebih lambat, hingga mencapai 43,840° pada 12% kapur, yang menunjukkan titik jenuh di mana reaksi pozzolanisasi tidak lagi berkembang signifikan.

Nilai kohesi (c) juga mengalami peningkatan pada kadar kapur rendah hingga mencapai nilai maksimum 2,080 t/m² pada 6% kapur, sebelum kemudian menurun drastis pada kadar kapur lebih tinggi. Penurunan kohesi setelah kadar optimum disebabkan oleh kelebihan ion Ca^{2+} yang membentuk lapisan jenuh $Ca(OH)_2$ pada permukaan butiran tanah, sehingga menghambat difusi silika dan alumina dari mineral lempung yang diperlukan untuk pembentukan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (CAH). Hal ini menandakan bahwa pada kadar kapur lebih dari 8%, reaksi kimia menjadi tidak efektif dan justru menurunkan kekuatan ikatan antar partikel.

Hasil uji menunjukkan bahwa kadar kapur optimum untuk stabilisasi tanah lempung berada pada rentang 6–8%, di mana kombinasi antara peningkatan sudut geser dan kohesi menghasilkan kondisi kekuatan tanah yang paling stabil. Peningkatan nilai ϕ menggambarkan dominasi ikatan struktural akibat flokulasi dan pembentukan senyawa CSH–CAH, sedangkan penurunan nilai c pada kadar tinggi menunjukkan perubahan mekanisme ikatan dari kohesi molekuler menjadi ikatan butiran yang lebih kaku. Dapat disimpulkan bahwa penambahan kapur secara terukur mampu memperbaiki sifat mekanik tanah lempung melalui reaksi kimia dan restrukturisasi mineral, terutama dalam kondisi kelembapan tinggi yang mendukung proses hidrasi dan pozzolanisasi secara optimal.

Reaksi Kimia dan Perubahan Struktur Mineral

Proses kimia yang terjadi pada pencampuran kapur dan tanah lempung dipengaruhi oleh kelembapan tinggi, yang mempercepat reaksi hidrasi dan pozzolanisasi. Reaksi utama dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + AI_2O_3 \rightarrow \mathrm{C-S-H} + \mathrm{C-A-H}$$

Pada kondisi lembap, ion kalsium (Ca^{2+}) dari kapur padam berinteraksi dengan ion silikat dan aluminat dari mineral lempung (seperti *montmorillonite*), menghasilkan senyawa baru CSH (*Calcium Silicate Hydrate*) dan CAH (*Calcium Aluminate Hydrate*). Kedua senyawa tersebut berfungsi sebagai bahan pengikat alami yang mengisi rongga antar partikel tanah dan memperkuat ikatan antar butiran, sehingga mengubah struktur mikro tanah dari yang bersifat kohesif menjadi massa padat yang lebih stabil.

Secara mikroskopis, proses ini diikuti oleh flokulasi dan aglomerasi, yaitu penggabungan partikel halus menjadi agregat yang lebih besar dan keras. Reaksi ini menyebabkan peningkatan ukuran pori makro namun diimbangi dengan terbentuknya jaringan ikatan kuat yang mengurangi mobilitas air di dalam tanah. Akibatnya, plastisitas tanah menurun, volume kembang-susut berkurang, dan kekakuan meningkat secara signifikan. Tahapan awal reaksi (1–24 jam) didominasi oleh reaksi pertukaran ion, di mana ion Ca^{2+} menggantikan

ISSN 2716-0963
e-ISSN 2716-1218

ion Na^+ dan H^+ pada permukaan partikel lempung, sedangkan tahap lanjutan (setelah 7–28 hari) melibatkan pembentukan fase hidrasi (CSH dan CAH) yang memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan jangka panjang.

Pada kadar kapur yang terlalu tinggi (lebih dari 10%), terjadi kejenuhan ion kalsium di dalam larutan tanah yang menyebabkan terbentuknya lapisan pasif $Ca(OH)_2$ pada permukaan butiran lempung. Lapisan ini menghambat difusi ion silikat dan aluminat ke dalam matriks reaksi, sehingga proses pozzolanisasi tidak berlangsung optimal. Akibatnya, walaupun nilai sudut geser dalam (ϕ) masih mengalami peningkatan kecil akibat efek struktural, nilai kohesi (c) justru menurun karena ikatan kimia antar partikel melemah dan dominasi pengikatan mekanik meningkat. Fenomena ini dikenal sebagai reaksi jenuh kapur (lime saturation) yang menandai batas efektif penggunaan kapur dalam proses stabilisasi tanah lempung.

Kelembapan terhadap Reaksi dan Sifat Mekanik Tanah

Kelembapan merupakan faktor dalam keberhasilan proses stabilisasi kimia tanah lempung menggunakan kapur. Air berperan sebagai media difusi ionik yang memungkinkan ion Ca^{2+} dari kapur bergerak dan bereaksi dengan silika serta alumina di dalam struktur mineral tanah. Pada kondisi kelembapan tinggi, reaksi hidrasi dan pozzolanisasi berlangsung lebih cepat karena mobilitas ion meningkat, sehingga pembentukan senyawa CSH dan CAH terjadi secara intensif. Proses ini meningkatkan kekakuan dan kekuatan geser tanah setelah pemeraman berlangsung cukup lama.

Kelebihan air pada tahap awal pencampuran dapat menurunkan kekuatan sementara tanah akibat peningkatan tekanan air pori (pore pressure) yang menurunkan gesekan antar butir. Kadar air optimum perlu dijaga agar proses hidrasi berlangsung efisien tanpa menyebabkan kondisi jenuh berlebih. Seiring berjalannya waktu, ketika air mulai berkurang akibat evaporasi atau reaksi hidrasi, struktur mikro tanah menjadi lebih rapat dan kuat, menghasilkan massa tanah dengan kekakuan tinggi dan plastisitas rendah.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi kelembapan tinggi mampu mempercepat peningkatan nilai sudut geser dalam (ϕ) karena pembentukan ikatan struktural yang lebih kuat, sementara kohesi (c) mencapai nilai puncak pada kadar kapur optimum (sekitar 6%). Setelah titik optimum ini, nilai kohesi menurun akibat terbentuknya lapisan $Ca(OH)_2$ jenuh yang tidak reaktif. Secara geoteknis, peningkatan ϕ mencerminkan perubahan mekanisme perlawanan geser dari dominasi kohesi molekuler menjadi dominasi friksi antar partikel yang kaku, sedangkan penurunan c menunjukkan bahwa sistem tanah telah bertransisi dari tanah plastis menjadi agregat granular berikatan kuat.

KESIMPULAN

Hasil menunjukkan bahwa penambahan kapur pada tanah lempung berplastisitas tinggi secara signifikan meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas tanah melalui reaksi kimia pozzolanisasi. Kadar kapur optimum sebesar 6–8% menghasilkan pembentukan senyawa CSH dan CAH yang memperkuat ikatan antar partikel, meningkatkan sudut geser dalam, serta menurunkan plastisitas. Kondisi kelembapan tinggi mempercepat proses hidrasi dan pembentukan struktur tanah yang lebih kaku. Namun, pada kadar kapur di atas 10%, efektivitas reaksi menurun akibat kejenuhan $Ca(OH)_2$ yang menghambat difusi ion dan menyebabkan penurunan nilai kohesi.

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] H. R. Manaviparast, N. Cristelo, E. Pereira, and T. Miranda, “A Comprehensive Review on Clay Soil Stabilization Using Rice Husk Ash and Lime Sludge,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 5, pp. 1–24, 2025, doi: 10.3390/app15052376.

[4] A. Moro Gumilang, E. Setyono, and Sunarto, “Pengaruh Penggunaan Bahan Serbuk Marmer Pada Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif,” *Media Tek. Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 99–107, 2021.

[5] V. V. Gracella, B. Nugroho, and I. Kamil, "Pengaruh Karakteristik Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Bahan Tambah Serbuk Batu Bata," *SNITT- Politek. Negeri Balikpapan 2021*, no. C, pp. 133–138, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.poltekba.ac.id/index.php/prosiding/article/view/1353/781.

[6] F. N. Yunashirson, M. Y. Purwana, H. Dananjaya, and Raden, "Stabilisasi Tanah Lempung Plastisitas Tinggi Pada Indeks Likuiditas 1 Dan 1.25 Menggunakan Semen," *e-Jurnal MATRIKS Tek. SIPIL/*, vol. 30, no. 30, pp. 92–96, 2021.

[7] H. Annisa, Z. Ibrahim, and I. Yunus, "Analisis Karakteristik Pengembangan (Swelling) Pada Tanah Lempung Dengan Stabilitasi Hasil Olahan (Limbah) Marmer Kabupaten Maros," *J. Tek. Sipil Univ. Lamappapoleonro*, vol. 2, no. 2, pp. 58–69, 2024.

[8] H. Imran, D. Al-Jeznawi, M. A. Q. Al-Janabi, and L. F. A. Bernardo, "Assessment of Soil–Structure Interaction Approaches in Mechanically Stabilized Earth Retaining Walls: A Review," *CivilEng*, vol. 4, no. 3, pp. 982–999, 2023, doi: 10.3390/civileng4030053.

[9] S. Sumiyanto and A. Apriyono, "Efektivitas Injeksi Larutan Kapur untuk Menurunkan Plastisitas Tanah Lempung sebagai Upaya Mengatasi Kerusakan Jalan Raya," *Din. Rekayasa*, vol. 8, no. 1, p. 1, 2022, doi: 10.20884/1.dr.2012.8.1.51.

[10] T. L. M. Rompas, J. F. Manoppo, and H. J. Ticoh, "Ijuk untuk Mengendalikan Tanah Berpotensi Likuifaksi pada Struktur Gedung Bangunan Akibat Gempa," *Sipil Statik*, vol. 8, no. 3, pp. 299–310, 2020.

[11] Utkarsh and P. K. Jain, "Enhancing the properties of swelling soils with lime, fly ash, and expanded polystyrene -A review," *Heliyon*, vol. 10, no. 12, p. e32908, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32908.

[12] M. A. Khodabandeh, G. Nagy, and Á. Török, "Stabilization of collapsible soils with nanomaterials, fibers, polymers, industrial waste, and microbes: Current trends," *Constr. Build. Mater.*, vol. 368, no. January, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130463.

[13] I. T. Jawad, M. R. Taha, Z. H. Majeed, and T. A. Khan, "Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 510–520, 2014, doi: 10.19026/rjaset.8.1000.

[14] M. M. Bessaim, A. Bessaim, H. Missoum, and K. Bendani, "Effect of quick lime on physicochemical properties of clay soil," *MATEC Web Conf.*, vol. 149, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1051/matecconf/201714902065.

[15] A. Muhmed, M. Mohamed, and A. Khan, "The Impact of Moisture and Clay Content on the Unconfined Compressive Strength of Lime Treated Highly Reactive Clays," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 40, no. 12, pp. 5869–5893, 2022, doi: 10.1007/s10706-022-02255-x.

[16] M. S. I. Zaini, M. Hasan, S. Almuaythir, and M. Hyodo, "Experimental investigations on physico-mechanical properties of kaolinite clay soil stabilized at optimum silica fume content using clamshell ash and lime," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61854-1.

[17] M. Haras, A. E. Turangan, and R. Legrans, "Pengaruh Penambahan Kapur Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung," *Jur. Tek. Sipil Fak. Tek. Univ. Sam Ratulangi*, vol. 15, no. 67, pp. 77–86, 2017.