



Analisis Pengaruh Bahan Aditif (Kapur) terhadap Mikrostruktur Tanah Lempung dalam Pembangunan Jalan

Abdul Fithra Mokoagow*, Joice Waani, Samuel Yacob Recky Rompis

Universitas Sam Ratulangi Manado, Indonesia

Email: fitrah270191@gmail.com*, joice.waani@unsrat.ac.id, semrompis@unsrat.ac.id

Keywords:

lime; clay soil; microstructure;
UCS; SEM; soil stabilization

Abstract

Clay soil generally possesses low bearing capacity, high plasticity, and significant shrink-swell potential, which can negatively affect road pavement performance. These conditions are commonly found in the subgrade soil of Lobong Village, Bolaang Mongondow Regency. This study aimed to analyze the effect of lime additives on the microstructural changes and unconfined compressive strength improvement of clay soil used as road subgrade material. The research employed an experimental laboratory method using lime content variations of 0%, 4%, 6%, 8%, and 10% with curing periods of 7 and 14 days. The tests conducted included physical soil properties, Proctor compaction, Unconfined Compression Strength (UCS), and Scanning Electron Microscope (SEM) analysis. The results indicated that the original soil was classified as high-plasticity clay under the AASHTO A-7-5 classification system. The addition of lime significantly increased the UCS value, with the highest strength achieved at 10% lime content reaching 377.511 kPa after 7 days of curing. SEM observations revealed microstructural improvements characterized by reduced porosity and stronger interparticle bonding due to pozzolanic reactions. Overall, the 8% lime mixture was considered the most optimal composition because it produced more stable strength values and a denser, more homogeneous soil structure.

Kata Kunci:

kapur; tanah lempung;
mikrostruktur; UCS; SEM;
stabilisasi tanah

Abstrak

Tanah lempung memiliki karakteristik daya dukung rendah, plastisitas tinggi, dan potensi kembang-susut yang dapat mempengaruhi kestabilan konstruksi jalan. Permasalahan tersebut banyak ditemukan pada tanah dasar di Desa Lobong, Kabupaten Bolaang Mongondow. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan kapur terhadap perubahan mikrostruktur dan peningkatan kuat tekan bebas tanah lempung sebagai material subgrade jalan. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi kadar kapur sebesar 0%, 4%, 6%, 8%, dan 10% serta waktu curing 7 dan 14 hari. Pengujian yang dilakukan meliputi sifat fisik tanah, pemadatan Proctor, Unconfined Compression Strength (UCS), dan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah asli tergolong lempung plastisitas tinggi dengan klasifikasi AASHTO A-7-5. Penambahan kapur mampu meningkatkan nilai UCS secara signifikan, dimana nilai tertinggi diperoleh pada campuran kapur 10% sebesar 377,511 kPa pada curing 7 hari. Hasil SEM menunjukkan perubahan mikrostruktur berupa berkurangnya porositas dan terbentuknya ikatan antarpartikel yang lebih rapat akibat reaksi pozzolanic. Secara keseluruhan, kadar kapur 8% dinilai paling optimal karena menghasilkan kekuatan yang stabil serta struktur tanah yang lebih homogen dan padat.

PENDAHULUAN

Permasalahan pada tanah dasar (subgrade) menjadi salah satu factor utama yang mempengaruhi kinerja perkerasan jalan, terutama pada daerah yang memiliki jenis tanah Lempung. Tanah Lempung dikenal memiliki sifat teknis yang kurang menguntungkan, seperti daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, serta potensi kembang-susut akibat perubahan kadar air yang signifikan (Das & Sobhan, 2010). Di wilayah seperti Bolaang Mongondow Raya, khususnya desa lobong permasalahan ini cukup sering ditemukan, mengingat kondisi geologinya yang masih didominasi oleh tanah berbutir halus yang berpotensi mengandung fraksi lempung. Berdasarkan karakteristik umum tanah lempung, material ini cenderung memiliki plastisitas tinggi, kemampuan menyerap air yang besar, serta permeabilitas rendah, sehingga air sulit keluar dari pori-pori tanah. Menurut Braja M. Das (2010), tanah dengan dominasi fraksi halus dan plastisitas tinggi umumnya memiliki daya dukung rendah dan sangat sensitive terhadap perubahan air.

Tanah dasar yang tidak stabil perlu distabilisasi agar memenuhi persyaratan teknis sebagai pondasi konstruksi jalan. Tanah yang distabilkan, secara umum, merupakan material komposit yang dihasilkan dari kombinasi dan optimasi sifat-sifat pada masing-masing material penyusunnya (Basha dkk., 2005). Studi ekstensif telah dilakukan tentang stabilisasi tanah menggunakan berbagai aditif seperti kapur dan semen. Kapur banyak digunakan dalam aplikasi teknik sipil seperti konstruksi jalan, tanggul, pelat pondasi, dan tiang pancang (Al-Rawas & Goosen, 2006). Kapur sendiri mampu memperbaiki sifat tanah Lempung atau lempung melalui reaksi kimia yang menghasilkan senyawa pengikat seperti CSH (*Calsium Silicate Hydrate*) dan CAH (*Calsium Aluminate Hydrate*) yang meningkatkan kekuatan struktur tanah (Bell, 1996).

Selain itu, penggunaan kapur yang berasal dari desa lobong sebagai bahan aditif dalam penelitian ini menjadi salah satu aspek penting yang memiliki nilai praktis dan ekonomis. Pemanfaatan material local diharapkan dapat memberikan alternatif solusi yang lebih efisien dan mudah diterapkan di lapangan, terutama untuk Pembangunan infrastruktur jalan di daerah tersebut. Namun demikian, karakteristik kimia dan efektivitas kapur local dalam memperbaiki struktur tanah lempung masih perlu dikaji lebih lanjut, khususnya dalam kaitannya dengan perubahan mikrostruktur dan peningkatan sifat mekanik tanah.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan pengamatan terhadap hubungan antara struktur mikro dan perilaku rekayasa geoteknik tanah yang distabilisasi dengan kapur, yakni perubahan dalam distribusi ukuran pori dari tanah Lempung yang distabilkan dengan kapur melalui hasil uji pemadatan standar dengan menggunakan metode *Unconfined Compressive Strength* (UCS) dan analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penambahan bahan aditif seperti kapur dapat mempengaruhi struktur mikro tanah serta dapat meningkatkan sifat mekaniknya. (Ural, 2016) menyatakan bahwa bahan aditif dapat mengubah mikrostruktur tanah lempung melalui ikatan sementasi yang berdampak pada peningkatan kekuatan tanah dimana senyawa yang terbentuk akibat reaksi ion kalsium (Ca^{2+}) dari kapur dengan silika (SiO_2) dan Alumina (Al_2O_3) yang terkandung dalam mineral lempung dapat menyebabkan terbentuknya senyawa *Calsium Silicate Hydrate* (CSH) dan *Calsium Aluminate Hydrate* (CAH) yang dapat membentuk struktur tanah yang lebih kompak dan kuat. Selain itu, (al-Swaidani dkk., 2016) menemukan bahwa stabilisasi tanah lempung dengan bahan tambahan dapat meningkatkan sifat geoteknik secara signifikan. Perubahan porositas dan rasio material

sementasi berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan material, dimana semakin kecil porositas dan semakin baik ikatan antar partikel maka kekuatan akan meningkat. (Waani dkk., t.t.).

Berdasarkan hal tersebut, Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan subgrade lemah terutama di wilayah Bolaang Mongondow Raya dengan cara meningkatkan sifat Teknik tanah Lempung melalui pencampuran kapur. Fokus utama penelitian ini adalah mengamati perubahan mikrostruktur tanah Lempung akibat penambahan kapur dan mengukur efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas tanah sebagai material tanah dasar untuk konstruksi jalan.

Berdasarkan penjelasan di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada karakteristik tanah yang berada di Desa Lobong, pengaruh penggunaan kapur sebagai bahan aditif terhadap kualitas fisik tanah pada konstruksi jalan, perubahan mikrostruktur tanah lempung akibat penambahan kapur yang diamati melalui analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM), serta efektivitas stabilisasi tanah menggunakan kapur dalam meningkatkan kuat tekan bebas tanah lempung yang diamati melalui uji *Unconfined Compression Strength* (UCS).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan karakteristik tanah yang berada di Desa Lobong, mengukur perubahan kualitas fisik dan mekanik tanah setelah distabilisasi menggunakan bahan aditif berupa kapur, menganalisis perubahan mikrostruktur tanah lempung yang distabilisasi dengan kapur menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM), serta mengetahui kuat tekan bebas tanah asli setelah distabilisasi dengan bahan aditif kapur melalui uji *Unconfined Compression Strength* (UCS).

Untuk menyederhanakan analisis, penelitian ini dibatasi pada kegiatan pengujian laboratorium yang dilakukan di Universitas Sam Ratulangi Manado sebagai lokasi utama percobaan dan pengujian. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Desa Lobong, Kabupaten Bolaang Mongondow, begitu pula bahan aditif kapur yang digunakan sebagai material stabilisasi. Komposisi campuran bahan tambah kapur dibatasi pada variasi 0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%. Pengujian laboratorium yang dilakukan meliputi pengujian sifat fisik tanah, seperti kadar air, batas Atterberg, gradasi, dan berat jenis tanah; uji kepadatan maksimum melalui metode *Modified/Standard Proctor*; pengujian *Unconfined Compression Strength* (UCS) untuk mengetahui peningkatan kuat tekan bebas tanah akibat penambahan kapur; serta analisis mikrostruktur tanah menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui perubahan struktur internal tanah setelah distabilisasi. Selain itu, waktu *curing* dibatasi pada periode 7 dan 14 hari untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap perkembangan kekuatan tanah. Penelitian ini tidak membahas aspek biaya, waktu pelaksanaan di lapangan, maupun implementasi langsung pada proyek konstruksi berskala besar.

Manfaat penelitian ini adalah memberikan alternatif solusi terhadap permasalahan tanah dasar yang lemah, khususnya pada tanah lempung yang digunakan dalam pembangunan jalan. Selain itu, penelitian ini juga memberikan data mengenai perubahan mikrostruktur tanah hasil stabilisasi dengan kapur yang dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam desain perkerasan jalan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pembangunan jalan, terutama pada wilayah Bolaang Mongondow Raya.

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Dari latar belakang, rumusan masalah dan tujuan yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh bahan aditif (Kapur) terhadap mikrostruktur tanah Lempung. Penelitian ini akan dilaksanakan dalam tiga tahapan utama yaitu karakteristik tanah, pengujian pemadatan dan analisis mikrostruktur dengan menggunakan Metode UCS dan SEM.

Tempat dan Waktu Penelitian

1. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Tanah dan Laboratorium Mesin Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado.

2. Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini akan dilaksanakan mulai bulan Juli 2025 sampai dengan bulan Mei 2026

Materi Penelitian

Materi yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bahan

- a. Tanah Lempung : Diambil dari lokasi yang memiliki karakteristik tanah dasar lemah di desa Lobong Kec. Passi Barat Kab. Bolaang Mongondow provinsi Sulawesi Utara.
- b. Kapur : Jenis kapur tohor (CaO) yang digunakan dalam variasi kadar campuran 0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%.
- c. Air : Air bersih yang digunakan untuk pencampuran dan pemadatan.

2. Alat Uji Sifat Fisik Tanah

- a. Saringan untuk analisa gradasi
- b. Peralatan untuk uji Batas Atterberg (LL, PL, PI)
- c. Timbangan digital
- d. Alat uji Proctor modifikasi untuk pemadatan.

3. Alat Uji Mekanik Tanah :

- a. Scanning Electron Microscope (SEM): Untuk menganalisis morfologi dan topografi mikrostruktur tanah.
- b. Unconfined Compressive Strength (UCS): Untuk mengukur kekuatan tekan tanah tanpa pengekangan lateral.

Rancangan Percobaan

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif komparatif dengan membandingkan hasil pengujian pada setiap variasi kadar kapur dan umur pemeraman (7 dan 14 hari). Data kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Strength/UCS*) disajikan dalam bentuk table dan grafik untuk melihat kecenderungan peningkatan kekuatan tanah. Sementara itu, hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) dianalisis secara kualitatif untuk mengamati perubahan mikrostruktur, seperti bentuk partikel, distribusi pori dan terbentuknya produk hidrasi. Hubungan hasil uji UCS dan SEM dijelaskan secara interpretative berdasarkan kecenderungan data tanpa menggunakan analisa regresi.

Analisis Data

Langkah-langkah analisis data yang akan dilakukan yaitu :

1. Persiapan Sampel

- Tanah dikeringkan, disaring dan diuji sifat dasarnya
- Kapur ditimbang sesuai variasi kadar

2. Pencampuran dan Pemadatan

- Tanah dicampur dengan kapur sesuai variasi (0%, 4%, 6%, 8%, 10%)
- Dilakukan uji Modified Proctor untuk mendapatkan MDD dan OMC

3. Pembuatan Benda Uji

- Campuran dipadatkan menggunakan nilai OMC dan MDD hasil uji Proctor

4. Curing (Perawatan Benda Uji)

- Sampel uji disimpan selama 7 hari dan 14 hari untuk proses pengikatan dan hidrasi

5. Pengujian UCS dan SEM

- Lakukan analisis Unconfined Compressive Strenght (UCS) untuk mengetahui kuat tekan bebas tanah Lempung
- Gunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengamati struktur mikro tanah.

6. Analisis Data

- Membandingkan hasil mikrostruktur dan kekuatan sampel antar variasi kapur
- Analisis statistic dilakukan untuk melihat hubungan kadar kapur dengan perubahan yang terjadi.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa di laboratorium yang dilakukan dalam tiga tahapan. Pertama, dilakukan pemeriksaan karakteristik tanah yaitu sifat-sifat geoteknikal dari tanah Lempung serta sifat-sifat fisik semen dan kapur dan kedua, menentukan kadar air campuran tanah-semen dan tanah-kapur melalui pengujian pemadatan (*modified proctor*) dan ketiga, membuat benda uji untuk pengujian SEM dan UCS dimana campuran untuk pembuatan benda uji menggunakan kadar air yang diperoleh dari pengujian Proctor, untuk selanjutnya diuji dengan SEM dan UCS.

Bagan alir penelitian ini diawali dengan tahap persiapan alat dan pengujian material, yaitu menyiapkan seluruh peralatan laboratorium serta bahan uji berupa tanah dan kapur sebelum proses pengujian dilakukan. Tahap berikutnya adalah pengujian karakteristik tanah lempung untuk mengetahui sifat fisik dasar tanah yang akan distabilisasi. Pengujian ini meliputi uji gradasi untuk mengetahui distribusi ukuran butir, seperti pasir, lanau, dan lempung; pengujian berat jenis dan penyerapan untuk mengukur berat jenis tanah serta potensi penyerapan air yang berguna dalam menentukan perbandingan campuran tanah dan kapur; pengujian *Atterberg Limit* untuk mengetahui batas cair (LL), batas plastis (PL), dan indeks plastisitas (PI) sebagai dasar klasifikasi tanah; serta pengujian kadar air untuk mengetahui kadar air alami tanah sebelum dilakukan proses stabilisasi.

Selanjutnya, dilakukan pengujian berat jenis kapur untuk menentukan karakteristik kapur yang digunakan sebagai dasar dalam pencampuran material. Setelah itu, tanah dicampur dengan kapur dalam beberapa variasi komposisi, yaitu TS0 berupa 100% tanah dan 0% kapur, TS4 berupa 96% tanah dan 4% kapur, TS6 berupa 94% tanah dan 6% kapur, TS8 berupa 92% tanah dan 8% kapur, serta TS10 berupa 90% tanah dan 10% kapur. Variasi campuran ini

digunakan untuk melihat pengaruh penambahan kapur terhadap perubahan sifat tanah lempung. Setelah proses pencampuran, dilakukan percobaan pemadatan melalui uji Proctor pada setiap variasi campuran untuk menentukan kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum.

Tahap berikutnya adalah pembuatan benda uji, yaitu campuran tanah, kapur, dan air dipadatkan ke dalam cetakan silinder sesuai standar pengujian UCS. Setelah benda uji terbentuk, dilakukan proses *curing* atau perawatan selama periode tertentu, yaitu 7 dan 14 hari, untuk mengetahui pengaruh waktu terhadap perkembangan kekuatan tanah. Setelah masa *curing* selesai, dilakukan pengujian UCS (*Unconfined Compression Strength*) untuk mengukur kuat tekan bebas pada setiap variasi campuran, serta pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengamati perubahan mikrostruktur tanah hasil stabilisasi. Data yang diperoleh dari pengujian UCS dan SEM kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara penambahan kapur, nilai kuat tekan bebas, dan perubahan struktur mikro tanah. Pada tahap akhir, hasil pengujian dan analisis data dirumuskan menjadi kesimpulan yang menjawab rumusan masalah serta tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pemeriksaan Fisik Material

1. Sifat Fisik Tanah

Jenis pemeriksaan yang dilakukan meliputi pengujian kadar air tanah, berat jenis tanah, batas-batas atterberg dan analisa saringan. Hasil pengujiannya dapat dilihat pada table berikut ini :

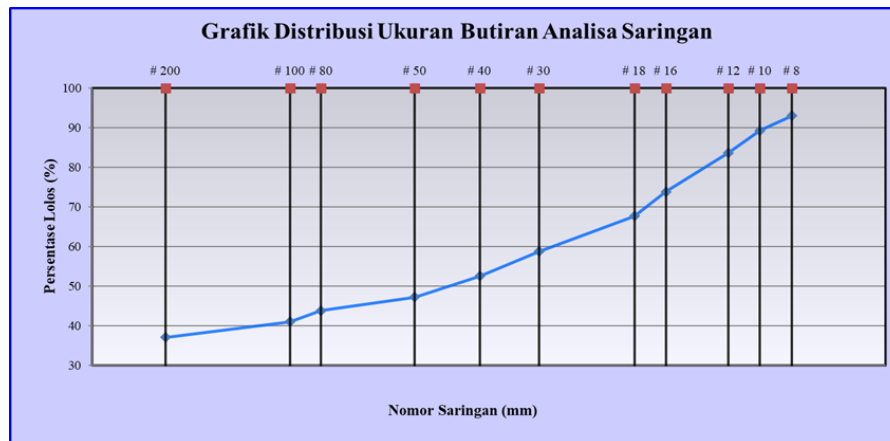
Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Tanah

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pengujian	Metode Pengujian
1.	Kadar Air (Water Content)	31,637 %	ASTM D 2216
2.	Berat Jenis (Specific Gravity)	2,221	ASTM D 854
3.	Batas-batas Atterberg		ASTM D 4318
	• Batas Cair (Liquid Limit)	63,776 %	
	• Batas Plastis (Plastic Limit)	25,000 %	
	• Indeks Plastis (Plastic Index)	38,776 %	
4.	Analisa Saringan	37,12 % (Lolos saringan No. 200)	ASTM D 421

(Sumber: Hasil Analisa, 2025)

Berdasarkan data hasil pengujian batas-batas *atterberg* terhadap material tanah menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki sifat plastisitas tinggi.

Untuk hasil pengujian analisa saringan dapat dilihat pada Gambar 2 dimana material tanah yang lolos saringan No.200 adalah sebesar 37,12%. Sesuai standar klasifikasi AASHTO, hasil pengujian analisa saringan menunjukkan tanah masuk dalam kelompok A-7-5 dengan jenis tanah lempung dimana syarat dari material yang lolos saringan No.200 >36%.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Analisa Saringan
(Sumber: Hasil Analisa, 2025)

Hasil dan Pemeriksaan Sifat Mekanis Material

1. Percobaan Pemadatan Tanah

Percobaan pemadatan dilakukan pada setiap variasi campuran untuk menentukan nilai Kadar Air Optimum (OMC) dan Kepadatan Kering Maksimum (MDD) pada masing-masing variasi dan kadar air yang diperoleh akan digunakan untuk pembuatan benda uji pengujian UCS. Berikut Adalah hasil pengujian pemadatan yang telah dilakukan:

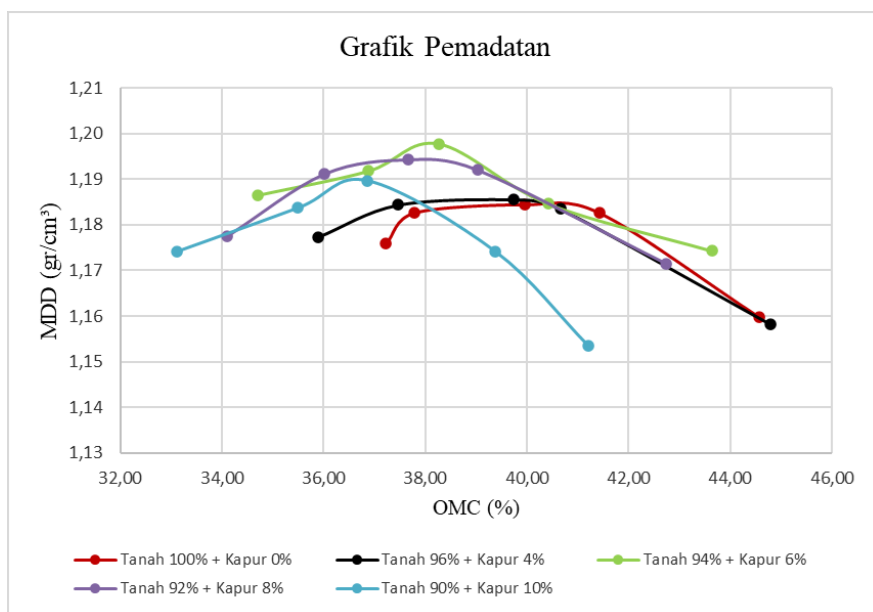
Tabel 2. Hasil Pengujian Pemadatan

Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)	OMC (%)	MDD (gr/cm ³)
A	100	Kapur 0	39,84	1,185
B	96	Kapur 4	39,05	1,186
C	94	Kapur 6	37,84	1,193
D	92	Kapur 8	38,04	1,194
E	90	Kapur 10	36,29	1,188

(Sumber: Hasil Analisa, 2025)

Berdasarkan Tabel 2 diatas menunjukkan nilai OMC dan MDD tanah asli yaitu 39,84% dan 1,185 gram/cm³. Dengan seiring bertambahnya presentasi penambahan kapur, nilai kadar air optimum yang didapat semakin mengalami penurunan sampai dengan penambahan kapur 6% namun pada penambahan kapur 8% nilai kadar air optimum naik Kembali yaitu 38,04% dan nilai kadar air optimum terendah pada campuran dengan penambahan kapur 10% dengan nilai 36,29%.

Dalam hal penurunan kadar air optimum nya disebabkan penambahan kapur yang dapat mengurangi kadar air optimum. Namun semakin banyak jumlah kapur di tambahkan belum tentu dapat menaikkan nilai kepadatan nya yang terbukti pada penambahan jumlah kapur 10% nilai kadar air nya menurun namun kepadatannya juga menurun yaitu kadair optimumnya 36,29% dan Kepadatan maksimumnya 1,188 gram/cm³. Sehingga penambahan kapur terbaik terdapat pada penambahan kapur 6% dimana nilai kadar air optimumnya 37,84% dan kepadatan maksimumnya 1,193 gram/cm³ (lihat gambar 2).



Gambar 2. Hasil Pengujian Pemadatan Tanah

(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Nilai MDD terbesar berada pada campuran dengan penambahan kapur 6% sebesar 1,193 gram/cm³. Sehingga dapat dilihat bahwa campuran semen dapat menyebabkan peningkatan berat isi kering maksimum tanah.

2. Pengujian Kuat Tekan Bebas/ UCS

Berikut hasil pengujian UCS dapat dilihat pada Tabel dibawah ini:

Tabel 3. Hasil Pengujian UCS dalam (kg/cm³)

Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)		UCS (qu) 7 hari (kg/cm ³)	UCS (qu) 14 hari (kg/cm ³)
A	100	Kapur	0	0,354	0,356
B	96	Kapur	4	2,099	0,488
C	94	Kapur	6	1,767	0,657
D	92	Kapur	8	1,901	1,793
E	90	Kapur	10	3,852	1,686

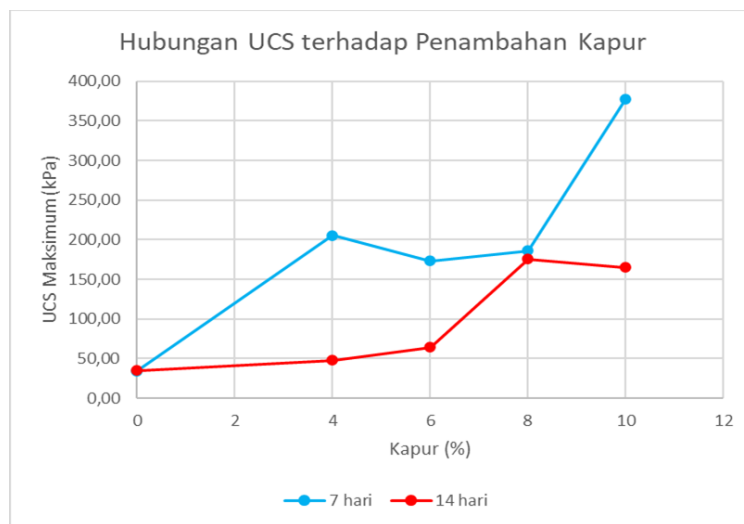
(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Tabel 4. Hasil Pengujian UCS dalam (kPa)

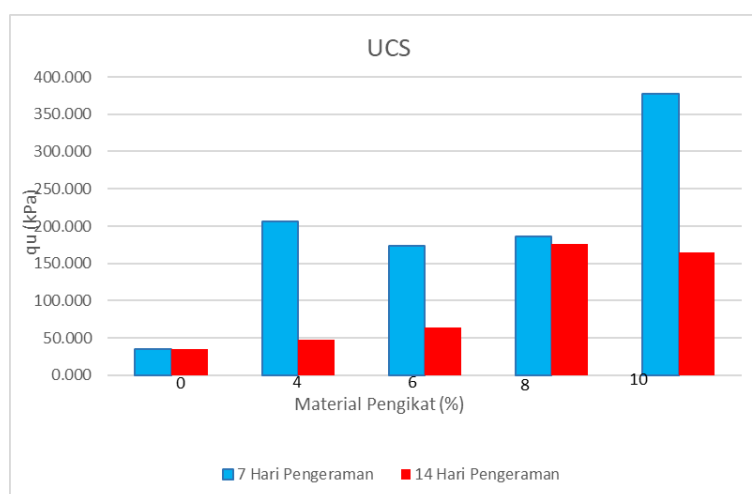
Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)		UCS (qu) 7 hari (kPa)	UCS (qu) 14 hari (kPa)
A	100	Kapur	0	34,736	34,852
B	96	Kapur	4	205,710	47,815
C	94	Kapur	6	173,143	64,345
D	92	Kapur	8	186,308	175,667
E	90	Kapur	10	377,511	165,268

(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Berdasarkan hasil pengujian UCS diatas, tanah tanpa penambahan kapur (Variasi A) menunjukkan kekuatan paling rendah dengan nilai UCS pada 7 hari sebesar 34,736 kPa dan 14 hari sebesar 34,852 kPa. Ketika kapur ditambahkan 4 – 10% kapur, kekuatan tanah meningkat signifikan. Dimana pada kadar kapur 4% (Variasi B), nilai UCS naik menjadi 205,71 kPa untuk 7 hari dan 47,815 kPa untuk 14 hari. Variasi 6% dan 8% kapur menunjukkan nilai UCS 7 hari sebesar 173,143 kPa dan 186,308 kPa, dengan nilai 14 hari masing-masing 64,345 kPa dan 175,667 kPa. Peningkatan terbesar terjadi pada 10% kapur (Variasi E) yang menghasilkan nilai UCS 377,511 kPa pada 7 hari, meskipun nilai 14 harinya menurun menjadi 165,268 kPa. Dari hal tersebut dapat dinyatakan bahwa peningkatan kuat tekan tidak selalu linier, dan pada beberapa variasi nilai UCS 14 hari tidak lebih besar dari pada 7 hari, yang dapat disebabkan oleh perubahan struktur dan proses pengerasan selama curing. Berdasarkan hasil diatas penambahan kadar kapur 8% lebih mendekati nilai kuat tekan nya pada waktu 7 hari dan 14 hari sebesar 186,308 kPa dan 175,667 kPa. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa kapur efektif sebagai bahan stabilisasi dalam meningkatkan kekuatan tanah lempung. Hal diatas dapat dilihat pada Gambar 3.

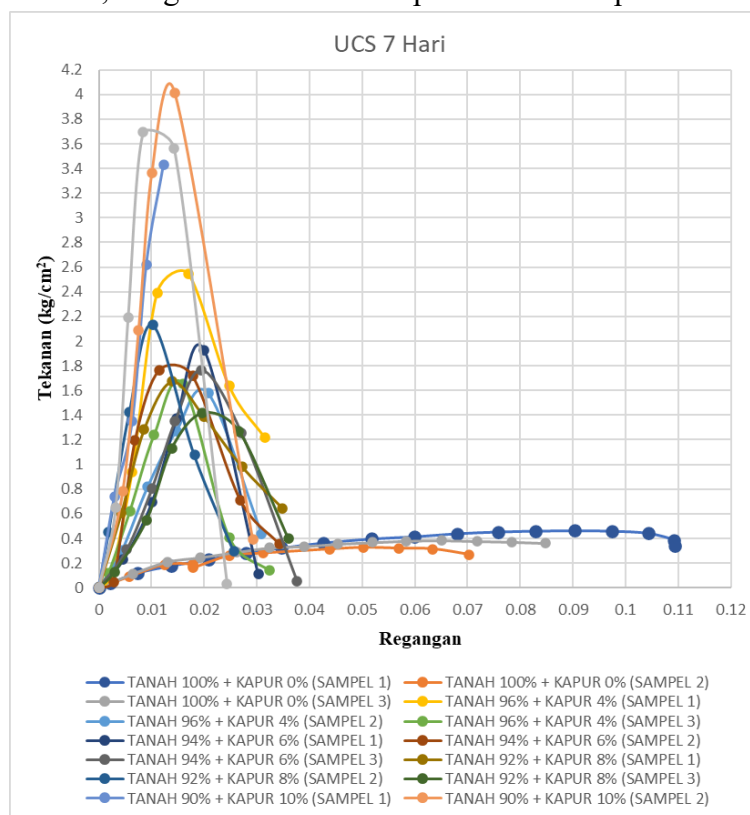


Gambar 3. Hasil Hubungan UCS terhadap Penambahan Kapur
(Sumber: Hasil Analisa 2025)



Gambar 4. Diagram Hubungan UCS terhadap Penambahan Kapur
(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4, penambahan kapur memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai kuat tekan bebas (UCS) tanah, meskipun menunjukkan pola yang tidak sepenuhnya linier. Pada kondisi tanpa kapur, nilai UCS relatif rendah ($\pm 30 - 40$ kPa), kemudian meningkat tajam pada penambahan 4% (± 210 kPa pada 7 hari) yang mengindikasikan terjadi proses awal flokulasi dan aglomerasi partikel tanah. Pada kadar 6% terjadi sedikit penurunan pada perawatan 7 hari, yang menunjukkan bahwa belum optimalnya reaksi sementasi, namun kembali meningkat pada kadar 8% seiring berkembangnya reaksi pozzolanic. Peningkatan paling signifikan terjadi pada kadar 10% dengan nilai UCS maksimum mencapai ± 380 kPa pada 7 hari, meskipun tidak diikuti peningkatan pada 14 hari, yang mengindikasikan kemungkinan kondisi over-stabilization atau keterbatasan reaksi lanjutan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kapur secara umum meningkatkan kekuatan tanah melalui pembentukan ikatan sementasi dan perubahan mikrostruktur, dengan kisaran kadar optimum berada pada 8%.

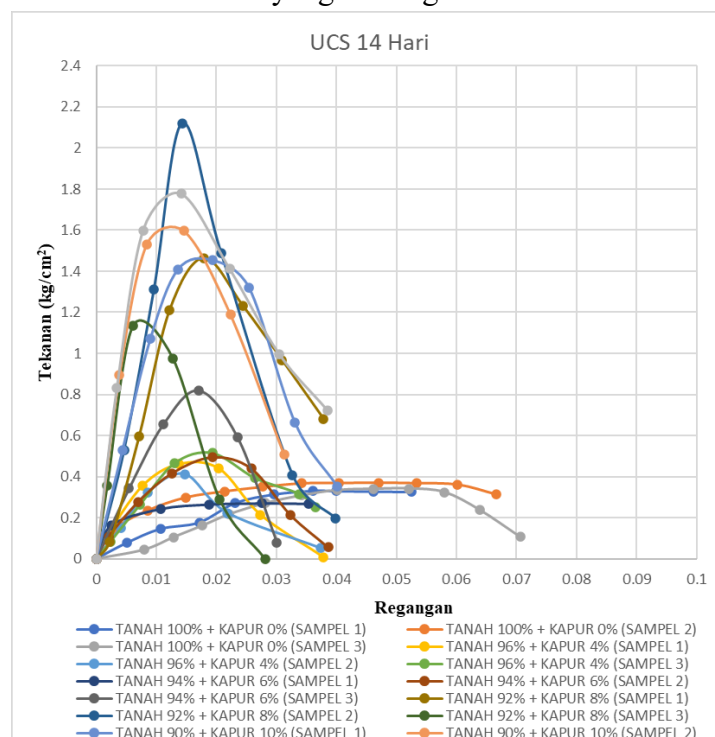


Gambar 5. Hasil Hubungan Regangan dan Tekanan pada waktu curing 7 hari
(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Berdasarkan gambar 5, ditunjukkan hubungan antara regangan dan tekanan pada pengujian kuat tekan bebas (UCS) tanah lempung yang distabilisasi menggunakan kapur pada masa perawatan 7 hari. secara umum, seluruh sampel menunjukkan pola peningkatan tegangan seiring bertambahnya regangan hingga mencapai tegangan puncak, kemudian mengalami penurunan yang menandakan terjadinya keruntuhan struktur tanah. Perbedaan bentuk kurva pada masing-masing variasi menunjukkan bahwa dengan penambahan kapur dapat memberikan pengaruh terhadap perilaku mekanik tanah, khusus nya terhadap kekuatan dan kekakuan material.

Berdasarkan grafik, variasi kadar kapur tertentu menunjukkan peningkatan nilai UCS yang cukup signifikan, terutama pada campuran dengan kadar kapur tinggi yang menghasilkan tegangan puncak terbesar. Hal ini mengindikasikan bahwa selama masa perawatan 7 hari telah terjadi perkembangan awal reaksi pozzolanik yang mampu meningkatkan ikatan antar partikel tanah. Selain meningkatkan nilai kuat tekan, penambahan kapur juga mempengaruhi karakteristik regangan saat keruntuhan. Sampel dengan kapur cenderung menunjukkan perilaku yang lebih kaku dibanding tanah asli, yang terlihat dari kenaikan tegangan yang lebih cepat menuju puncak.

Secara keseluruhan, hasil pengujian UCS pada umur perawatan 7 hari menunjukkan bahwa penambahan kapur mampu meningkatkan kekuatan tekan bebas tanah lempung. Peningkatan tersebut terjadi akibat proses flokulasi dan aglomerasi partikel lempung serta terbentuknya senyawa sementasi hasil reaksi pozzolanik seperti calcium silicate hydrate (CSH) dan calcium aluminate hydrate (CAH). Senyawa tersebut berperan sebagai pengikat antar partikel tanah sehingga porositas berkurang, struktur tanah menjadi lebih padat dan homogen, serta kemampuan tanah dalam menahan beban. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Al-Mukhtar dkk., 2012) yang menyatakan bahwa stabilisasi kapur dapat memperbaiki mikrostruktur tanah melalui pembentukan ikatan sementasi yang meningkatkan kekuatan mekanik tanah.



Gambar 6. Hasil Hubungan Regangan dan Tekanan pada waktu curing 14 hari

(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Berdasarkan gambar 6, ditunjukkan hubungan antara regangan dan tekanan pada pengujian kuat tekan bebas (UCS) tanah lempung yang distabilisasi menggunakan kapur pada masa perawatan 14 hari. secara umum, seluruh sampel menunjukkan pola peningkatan tegangan seiring bertambahnya regangan hingga mencapai tegangan puncak, kemudian mengalami penurunan tegangan setelah melewati kondisi maksimum yang menunjukkan terjadi keruntuhan material. Pola kurva yang terbentuk memperlihatkan bahwa penambahan kapur memberikan pengaruh terhadap karakteristik deformasi, kekuatan dan kekakuan tanah.

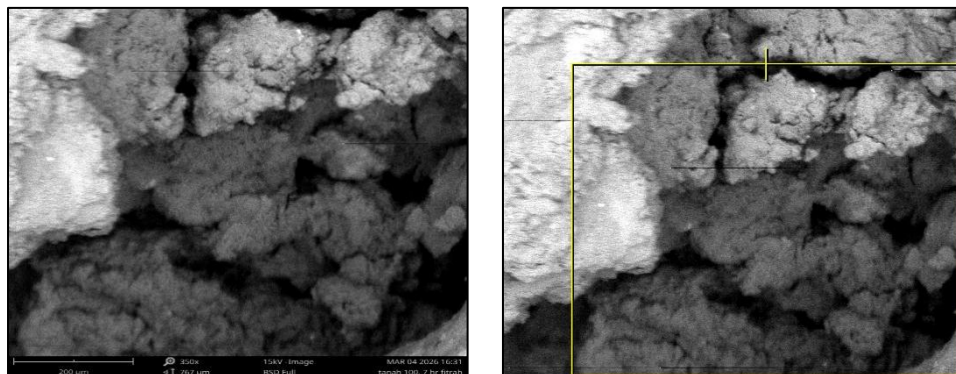
Berdasarkan grafik, sampel dengan penambahan kapur tertentu menunjukkan nilai tegangan puncak yang lebih tinggi dibandingkan sampel tanpa stabilisasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa perawatan selama 14 hari memberikan waktu yang cukup bagi perkembangan awal reaksi sementasi untuk meningkatkan kekuatan tekan bebas tanah. Selain itu, kurva tegangan-regangan pada beberapa variasi memperlihatkan kecenderungan perilaku yang lebih kaku, dimana peningkatan tegangan terjadi lebih cepat sebelum mencapai kondisi puncak. Perilaku tersebut menunjukkan bahwa tanah yang telah distabilisasi mengalami peningkatan kekakuan akibat terbentuknya ikatan sementasi didalam struktur tanah..

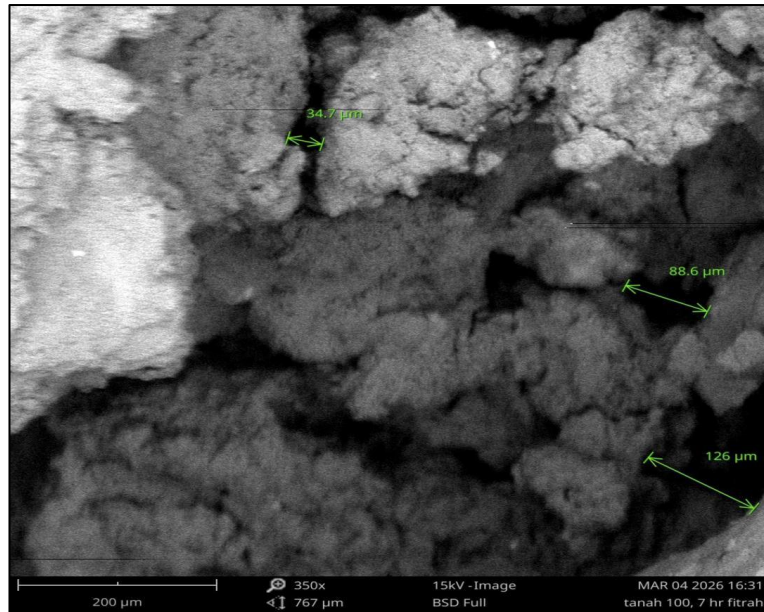
Secara keseluruhan, hasil pengujian UCS pada masa perawatan 14 hari menunjukkan bahwa penambahan kapur mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah lempung dibandingkan tanah asli. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh perubahan mikrostruktur tanah akibat flokulasi, aglomerasi serta pembentukan senyawa sementasi hasil reaksi pozzolanic yang mengurangi porositas dan memperkuat ikatan antar partikel tanah. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Al-Mukhtar dkk., 2012) yang menyatakan bahwa peningkatan waktu perawatan pada tanah stabilisasi dengan kapur menyebabkan perkembangan reaksi pozzolanic yang lebih intensif sehingga struktur tanah menjadi lebih padat dan kekuatannya meningkat. Selain itu (Little & Nair, 2009) menjelaskan bahwa stabilisasi kapur mampu menghasilkan peningkatan kekuatan tanah yang lebih permanen akibat terbentuknya ikatan sementasi antar partikel tanah.

Hasil Pemeriksaan SEM (Scanning Electron Microscope)

Berdasarkan hasil pengecekan menggunakan alat SEM (Scanning Elektron Mikroskope) maka didapat beberapa gambar sebagai berikut :

1. Sampel Tanah 100% + kapur 0% (7 Hari)



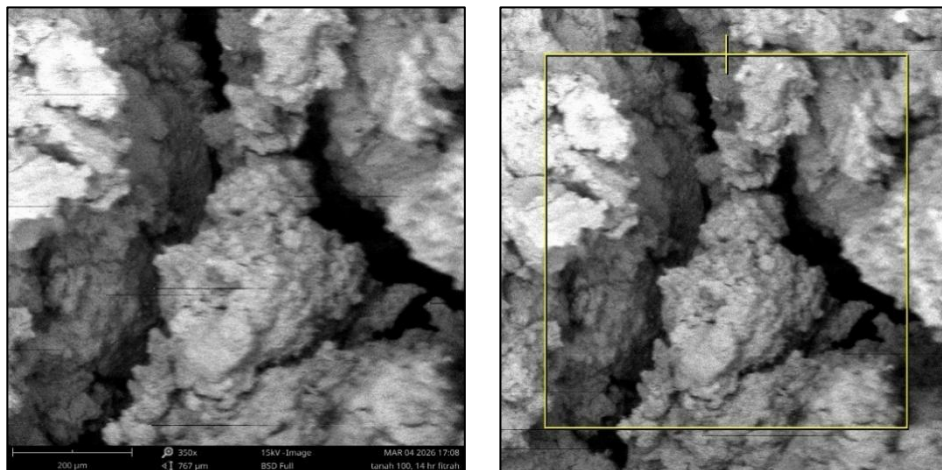


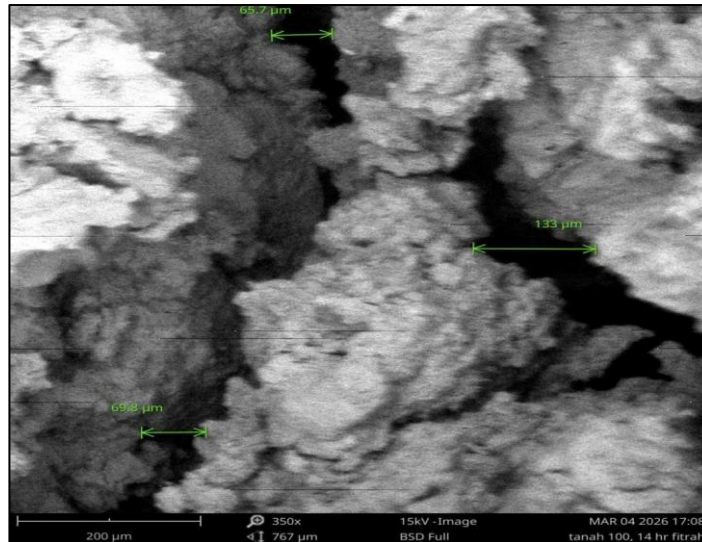
Gambar 7. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 100% + Kapur 0% (7 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 100% + Kapur 0 % dalam pemeliharaan 7 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 34,7 μ m sedangkan nilai terbesar yaitu 126 μ m.

2. Sampel Tanah 100% + kapur 0% (14 Hari)





Gambar 8. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 100% + Kapur 0% (14 Hari)

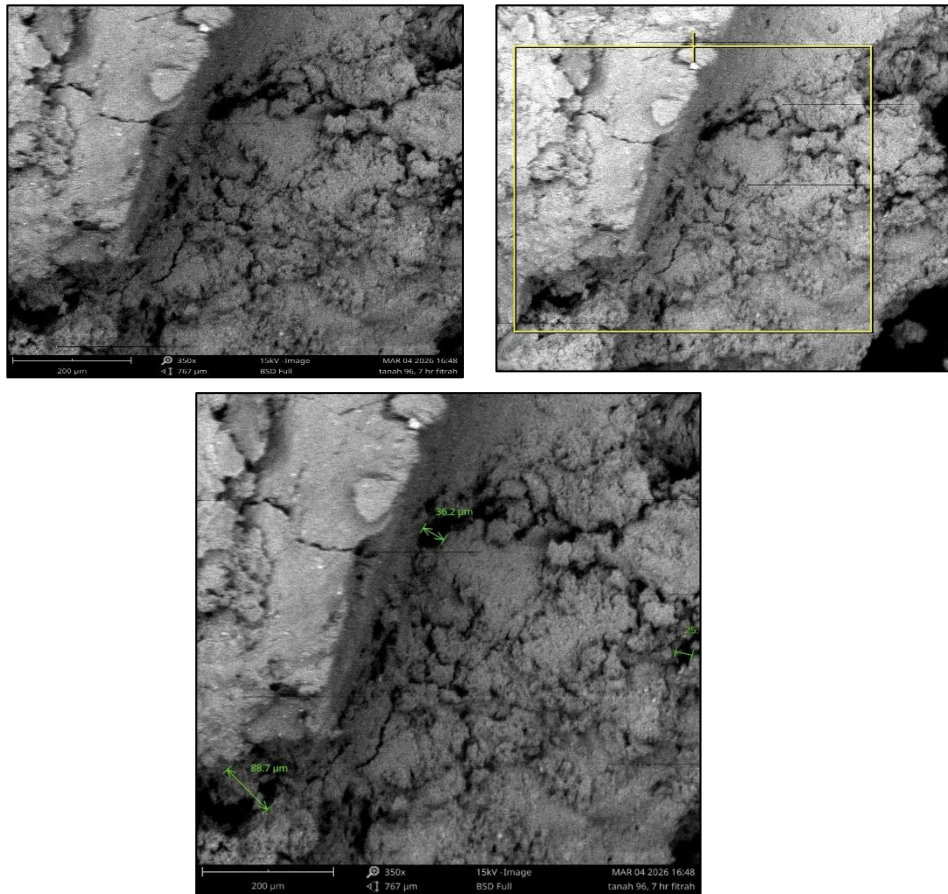
(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 100% + Kapur 0% dalam pemeliharaan 14 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 65,7μm sedangkan nilai terbesar yaitu 133 μm.

Sesuai dengan Gambar 7 dan Gambar 8 dimana pada kondisi tanpa penambahan kapur, struktur tanah menunjukkan susunan partikel yang relative tidak terikat dengan baik. Hal ini ditunjukkan oleh adanya pori-pori yang masih dominan serta distribusi partikel yang belum kompak. Struktur yang kita liat mencerminkan kondisi tanah lempung alami yang memiliki ikatan antar partikel yang lemah, sehingga berimplikasi pada rendahnya nilai kuat tekan bebas tanah (UCS).

Tidak terdapat perbedaan signifikan antara kondisi perawatan 7 hari dan 14 hari pada tanah asli, karena tidak terjadi reaksi kimia yang dapat memperbaiki struktur tanah. Kondisi ini menunjukkan bahwa gaya tolak antar partikel masih dominan akibat keberadaan lapisan ganda difus (*diffuse double layer*) yang tebal pada permukaan partikel lempung bermuatan negatif. Muatan negative tersebut berasal dari substitusi ion dalam struktur Kristal mineral lempung, khususnya pada lembaran tetrahedral dan octahedral sebagaimana dijelaskan oleh (Mitchell & Soga, 1993). Berdasarkan hal ini juga, sesuai dengan teori (Das & Sobhan, 2010), yang menyatakan bahwa tanah lempung alami memiliki struktur dispersed dengan kekuatan rendah akibat minimnya ikatan antar partikel dimana mineral lempungnya masih alami yang didominasi oleh silika dan alumina tanpa ikatan sementasi tambahan (SiO_2 dan AL_2O_3).

3. Sampel Tanah 96% + kapur 4% (7 Hari)

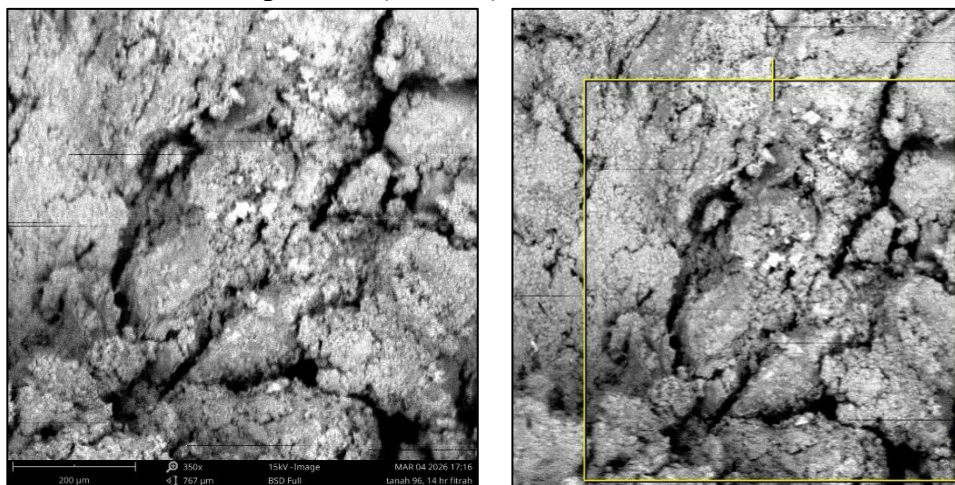


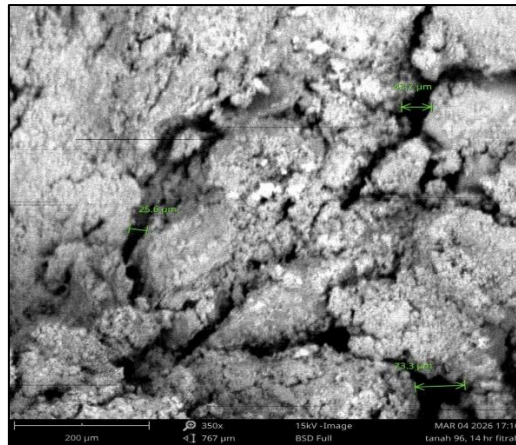
Gambar 9. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 96% + Kapur 4% (7 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 96% + Kapur 4% dalam pemeliharaan 7 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 25µm sedangkan nilai terbesar yaitu 88,7µm.

4. Sampel Tanah 96% + kapur 4% (14 Hari)





Gambar 10. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 96% + Kapur 4% (14 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

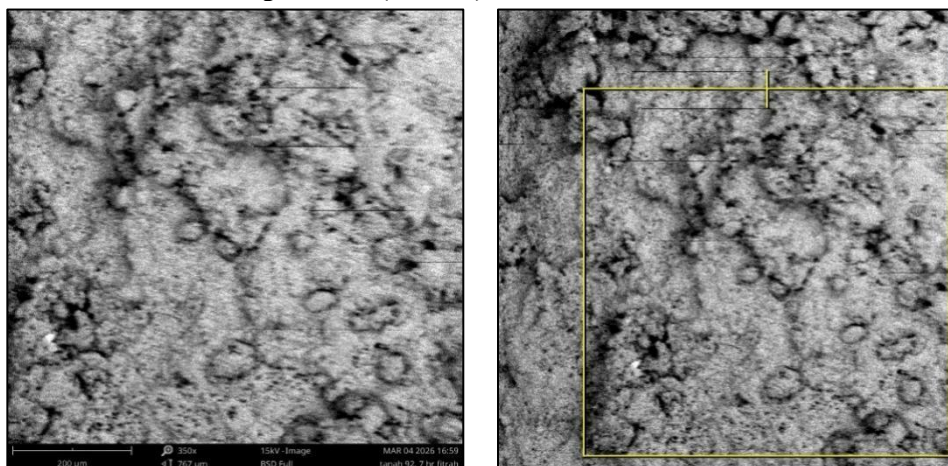
Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 96% + Kapur 4% dalam pemeliharaan 14 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 25,6μm sedangkan nilai terbesar yaitu 73,3 μm.

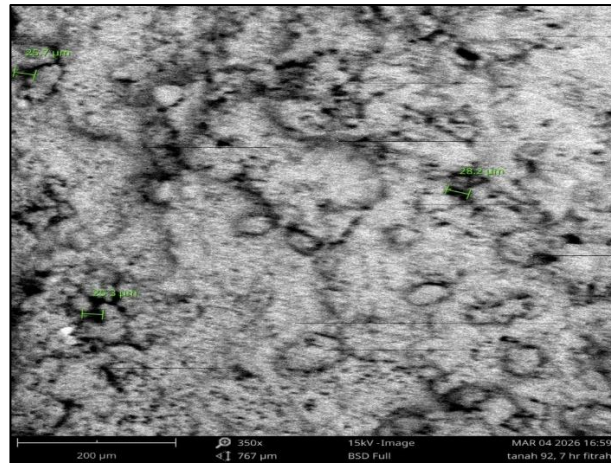
Sesuai dengan Gambar 9 dan Gambar 10 pada penambahan kapur 4%, mulai terlihat adanya perubahan struktur mikro dibandingkan tanah asli. Partikel tanah mulai menunjukkan kecenderungan untuk saling mendekat dan membentuk agregat, yang mengindikasi terjadinya proses flokulasi dan aglomerasi.

Pada perawatan 7 hari, perubahan struktur masih terbatas dimana pori-pori masih terlihat meskipun sudah berkurang dimana mulai adanya awal interaksi Ca^{2+} dengan partikel tanah dan hasil hidrasi kapur ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sedangkan pada perawatan 14 hari, struktur tanah terlihat lebih padat dan ikatan partikel mulai meningkat dimana mulai terbentuknya CSH dan CAH awal. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi kimia antara tanah dan kapur mulai berkembang seiring waktu perawatan (Al-Mukhtar dkk., 2012; Little & Nair, 2009).

Perubahan ini berkaitan dengan reaksi awal seperti pertukaran kation yang menyebabkan partikel tanah saling mendekat serta awal terbentuknya ikatan sementasi. Menurut Karl Terzaghi et al. (1996), peningkatan kekuatan tanah terjadi seiring dengan berkurangnya pori dan meningkatnya tegangan efektif akibat perubahan struktur.

5. Sampel Tanah 92% + kapur 8% (7 Hari)



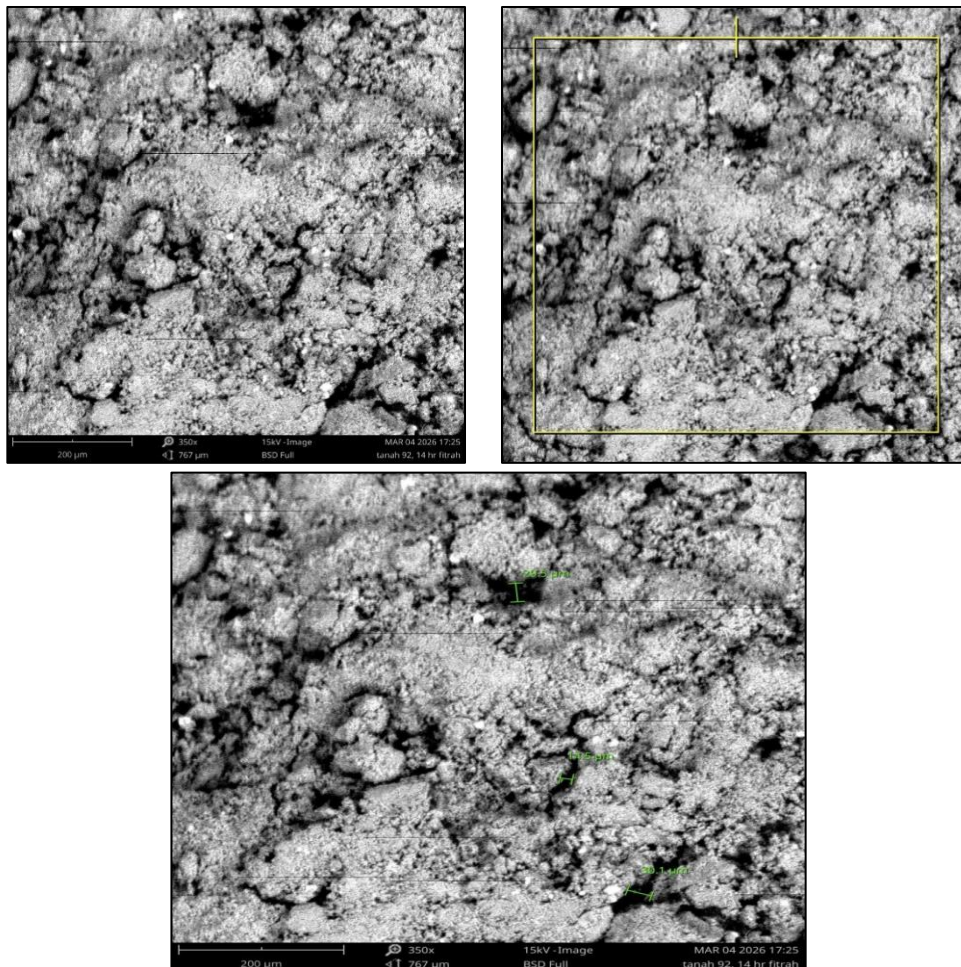


Gambar 11. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 92% + Kapur 8% (7 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 92% + Kapur 8% dalam pemeliharaan 7 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 25,3 μ m sedangkan nilai terbesar yaitu 28,2 μ m.

6. Sampel Tanah 92% + kapur 8% (14 Hari)



Gambar 12. Hasil Analisa SEM sampel Tanah 92% + Kapur 8% (14 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Berdasarkan hasil foto SEM dapat dilihat struktur atau model tanah pada sampel komposisi campuran tanah 92% + Kapur 8% dalam pemeliharaan 14 hari terdapat bahwa ada nya rongga atau porositas terhadap sampel tersebut yang Dimana nilai terkecil yaitu 14,5 μ m sedangkan nilai terbesar yaitu 30,1 μ m.

Sesuai dengan gambar 17 dan gambar 18 pada penambahan kapur sebesar 8%, perubahan struktur mikro terlihat paling signifikan. Struktur tanah menjadi kompak dan padat, dengan pori-pori yang semakin berkurang dibandingkan variasi lainnya. Pada campuran ini kandungan kimia di dominasi Calsium silicate hydrate (CSH) dan Calsium Aluminate Hydrate (CAH) dimana struktur sementasi terbentuk secara optimal.

Pada perawatan 7 hari, struktur tanah sudah menunjukkan Tingkat kerapatan yang tinggi, menandakan bahwa reaksi stabilisasi berlangsung efektif. Sedangkan pada pemeraman 14 hari, struktur terlihat semakin homogen dan ikatan antar partikel semakin kuat, yang mengindikasikan berkembangnya reaksi pozzolan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada kadar 8% terjadi keseimbangan antara jumlah kapur dan kebutuhan reaksi tanah, sehingga menghasilkan struktur mikro yang optimal. Hal ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan nilai kuat tekan bebas (UCS) yang paling tinggi dibandingkan variasi lainnya. hasil ini sejalan dengan penelitian (Ural, 2016) yang menyatakan bahwa peningkatan kekuatan tanah berkaitan dengan terbentuknya struktur mikro yang lebih padat dan berkurangnya porositas akibat reaksi pozzolan.

Kesimpulan terhadap Hasil Analisis SEM (Scanning Elektron Mikroscope) pada variasi campuran tanah dengan kapur yang waktu perawatan 7 hari serta 14 hari dimana terlihat bahwa penambahan kapur memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan mikrostruktur tanah. Pada sampel tanah 100% + Kapur 4% mulai terlihat ada nya perubahan struktur mikro tanah, dimana sebagian partikel tanah mulai mengalami penggumpalan (flokulasi) dan beberapa rongga mulai terisi oleh hasil reaksi antara kapur dan mineral tanah. Hal ini menunjukkan bahwa proses perbaikan tanah telah terjadi dan ikatan antar partikel tanah mulai meningkat. Sedangkan pada sampel tanah 100% + Kapur 8% Dimana struktur mikro tanah terlihat semakin padat dan kompak dengan jumlah rongga yang semakin berkurang serta partikel tanah yang saling terikat lebih kuat.

Selain itu, pengamatan pada waktu pemeliharaan (Curing) 14 hari menunjukkan bahwa struktur mikro tanah menjadi lebih rapat dibanding dengan pemeliharaan (Curing) 7 hari. Hal ini menandakan bahwa proses reaksi kimia antara kapur dan mineral tanah terus berlangsung seiring bertambahnya waktu perawatan sehingga dapat menghasilkan ikatan partikel yang lebih kuat.

Analisis Hubungan Mikrostruktur dengan menggunakan alat SEM dengan Nilai Kuat Tekan Bebas (UCS)

Analisis Hubungan antara hasil pengujian Scanning Elektron Mikroscope (SEM) dan Unconfined Compression Strength (UCS) dilakukan untuk mengetahui keterkaitan antara perubahan mikrostruktur tanah dengan peningkatan kekuatan mekanik tanah setelah distabilasi menggunakan kapur. Berdasarkan hasil pengujian UCS, tanah asli tanpa penambahan kapur memiliki kuat tekan bebas paling rendah yaitu sebesar 34,736 Kpa pada perawatan 7 hari dan 34,852 pada perawatan 14 hari. Nilai yang rendah ini sejalan dengan hasil pengamatan SEM yang menunjukkan bahwa struktur partikel tanah masih tersusun secara longgar deng pori yang relative besar dan ikatan antar partikelnya yang lemah.kondisi ini menyebabkan tanah memiliki

daya dukung yang rendah karena partikel tanah tidak saling terikat secara kuat.

Pada variasi penambahan kapur 4% nilai UCS mengalami peningkatan yang cukup signifikan yaitu sebesar 205,71 Kpa pada perawatan 7 hari dan 47,815 pada perawatan 14 hari. Hasil pengamatan SEM pada variasi ini menunjukkan adanya proses Flokulasi dan aglomerasi partikel tanah, dimana partikel-partikel tanah mulai menggumpal dan sebagian pori tanah mulai terisi oleh produk reaksi antara kapur dan mineral tanah sehingga menyebabkan partikel tanah menjadi lebih stabil dan meningkatkan ikatan antar butiran.

Pada penambahan kapur sebesar 6% atau 8%, perubahan mikrostruktur tanahnya semakin jelas. Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa struktur tanah menjadi lebih rapat dan kompak dapat dilihat dengan berkurangnya rongga pori pada saat sebelum di stabilisasi pori-porinya mencapai lebar 34,7 μm – 126 μm pada perawatan 7 hari dan 65,7 μm – 133 μm pada perawatan 14 hari sedangkan setelah distabilisasi dengan menambahkan kapur 8% rongga porinya berubah menjadi 25,3 μm – 28,2 μm pada perawatan 7 hari dan 14,5 μm – 30,1 μm pada perawatan 14 hari. sehingga penambahan kapur ini mampu menyatukan partikel-partikel yang ada di dalam tanah dan dapat memperbaiki kondisi tanah tersebut.

Pada variasi penambahan kapur sebesar 10%, nilai UCS mencapai nilai tertinggi pada waktu perawatan 7 hari yaitu sebesar 377,511 Kpa namun pada waktu perawatan 14 hari nilai UCS mengalami penurunan menjadi 165,264 Kpa sehingga tidak dilakukan pengamatan SEM dikarenakan penyebab penurunannya oleh distribusi produksi reaksi yang tidak merata akibat kelebihan kapur. Kondisi ini dapat menyebabkan struktur mikro tanah menjadi kurang homogen sehingga mempengaruhi kekuatan tanah secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang erat antara perubahan mikrostruktur tanah yang diamati melalui SEM dengan peningkatan nilai kuat tekan bebas (UCS). Penambahan kapur mampu memperbaiki struktur tanah dengan mengurangi porositas tanah. Perubahan mikrostruktur tersebut secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tanah sehingga tanah yang telah distabilisasi dengan kapur memiliki daya dukung yang lebih baik dibandingkan tanah asli.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data, tanah dari Desa Lobong memiliki karakteristik lempung dengan plastisitas tinggi, ditunjukkan oleh kadar air alami 31,37%, berat jenis 2,221, batas cair 63,776%, batas plastis 25%, indeks plastisitas 38,776%, serta persentase lolos saringan No. 200 sebesar 37,12%, sehingga berdasarkan klasifikasi AASHTO termasuk kelompok A-7-5 dan memerlukan stabilisasi sebelum digunakan sebagai tanah dasar perkerasan jalan. Penambahan kapur terbukti meningkatkan kuat tekan bebas (UCS) tanah secara signifikan, dari sekitar 34,736 kPa pada curing 7 hari dan 34,852 kPa pada curing 14 hari menjadi nilai tertinggi 377,511 kPa pada kadar kapur 10% dengan curing 7 hari. Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa kapur menyebabkan perubahan mikrostruktur tanah melalui proses flokulasi dan aglomerasi, sehingga susunan partikel menjadi lebih rapat, porositas berkurang, dan ikatan antarpartikel semakin kuat; pada kadar kapur 8%, ukuran pori mengecil dari sekitar 34,7–126 μm menjadi 25,3–28,2 μm . Secara umum, kadar kapur sekitar 8% dinilai relatif optimal karena menghasilkan kuat tekan yang stabil pada curing 7 hari sebesar 186,308 kPa dan 14 hari sebesar 175,667 kPa, serta membentuk struktur mikro yang lebih homogen dan padat. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan penggunaan kombinasi kapur dengan bahan

aditif lain yang lebih inovatif dan berkelanjutan, termasuk pemanfaatan limbah industri, serta penerapan analisis mikrostruktur lanjutan seperti EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) atau XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui perubahan komposisi mineral dan reaksi kimia yang terjadi pada tanah hasil stabilisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- al-Swaidani, A., Hammoud, I., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J.-F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139–140, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.04.004>
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science*, 50(2), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.023>
- Al-Rawas, A. A., & Goosen, M. F. A. (Ed.). (2006). *Expansive soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis.
- Andajani, N., & Risdianto, Y. (2022). Penambahan Kapur Sebagai Stabilisasi Tanah Ekspansif untuk Lapisan Tanah Dasar (Subgrade). *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 4(2), 90–95. <https://doi.org/10.26740/proteksi.v4n2.p90-95>
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., & Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19(6), 448–453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Basma, A. A., & Tuncer, E. R. (1991). *Effect of Lime on Volume Change and Compressibility of Expansive Clays*.
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bowen, N. L. (1928). *THE EVOLUTION OF THE IGNEOUS ROCKS*.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5. ed., internat. ed). McGraw-Hill.
- Cuisinier, O., Auriol, J.-C., Le Borgne, T., & Deneele, D. (2011). Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2010). *PRINCIPLES OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, 8TH EDITION*.
- Ghobadi, M. H., Abdilor, Y., & Babazadeh, R. (2014). Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 611–619. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0563-7>
- Goldstein et al. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy, C. Lyman, P. Echlin, E. Lifshin, L. Sawyer, and J. Michael. Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York; 2003, 688 pages (Hardback, \$75.00) ISBN 0-306-47292-9. *Microscopy and Microanalysis*, 9(5), 484–484. <https://doi.org/10.1017/S1431927603030617>

- Goodhew, P. J., Humphreys, F. J., & Beanland, R. (2017). *Electron microscopy and analysis* (Third edition). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering, 3rd edition*.
- Horpibulsk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., & Chinkulkijniwat, A. (2011). Strength development in cement admixed bangkok clay: Laboratory and field investigations. *Soils and Foundations*, 51(2), 239–251. <https://doi.org/10.3208/sandf.51.239>
- Huang, Y. H. (2004). *PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN*.
- Lea, F. M., & Hewlett, P. C. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete* (4th edition). Elsevier-Butterworth-Heinemann.
- Little & Nair. (2009). *Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials* (hlm. 22999). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22999>
- Liu, Z.-Y., & Chen, K.-S. (2023). Research on Road Characteristics and the Microscopic Mechanism of Lime–Phosphogypsum-Stabilized Red Clay. *Applied Sciences*, 13(14), 8057. <https://doi.org/10.3390/app13148057>
- Manaf, F. (2018). Pengaruh Kapur Terhadap Sifat Fisis Tanah Lempung Sebagai Tanah Dasar Konstruksi Jalan. *SAINSTECH: JURNAL PENELITIAN DAN PENGKAJIAN SAINS DAN TEKNOLOGI*, 26(1). <https://doi.org/10.37277/stch.v26i1.42>
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- Tran, T. D., Cui, Y.-J., Tang, A. M., Audiguier, M., & Cojean, R. (2014). Effects of lime treatment on the microstructure and hydraulic conductivity of Héricourt clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.001>
- Ural, N. (2016). Effects of additives on the microstructure of clay. *Road Materials and Pavement Design*, 17(1), 104–119. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1064011>
- Velde, B. (Ed.). (1995). *Clays and the environment. 1: Origin and mineralogy of clays / B. Velde (ed.)*. Springer.
- Waani, J. E., Rw, S. P., & Setiadji, B. H. (t.t.). *Influence of Natural Pozzolan on Porosity-Cementitious Materials Ratio in Controlling the Strength of Cement Treated Recycled Base Pavement Mixtures*.
- Young, S. (2003). *Soil Mineralogy with Environmental Applications*, SSSA Book Series 7, ed. J. B. D IXON & D. G. S CHULZE. Xxix+866 pp. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America (2002). US \$90 (hardback). ISBN 0 89118 839 8. *The Journal of Agricultural Science*, 140(1), 125–127. <https://doi.org/10.1017/S0021859603213101>
- Zhang, J., Li, H., Peng, J., & Zhang, Z. (2023). Effects of Lime Content on Road Performance of Low Liquid Limit Clay. *Applied Sciences*, 13(14), 8377. <https://doi.org/10.3390/app13148377>