



Analisis Pengaruh Bahan Aditif Semen terhadap Mikrostruktur Tanah Lempung untuk Konstruksi Jalan

Gita Virginita Mokoginta*, Joice Waani, Samuel Yacob Recky Rompis

Universitas Sam Ratulangi Manado, Indonesia

Email: gytavirginita18@gmail.com*, joice.waani@unsrat.ac.id, semrumpis@unsrat.ac.id

Keywords

clay soil stabilization; portland cement; unconfined compressive strength (ucs); microstructure; scanning electron microscope (sem)

Abstrak

Clay soil is a common type of soil found across Indonesia and frequently poses challenges in road pavement construction due to its expansive nature, low bearing capacity, and high plasticity. Cement-based soil stabilization is an effective chemical method to improve the physical and mechanical properties of clay soil. This study aims to analyze the effect of varying cement contents (0%, 4%, 6%, 8%, and 10%) on the physical properties, unconfined compressive strength (UCS), and microstructure of clay soil from Bolaang Mongondow Regency, North Sulawesi. The research employed a quantitative laboratory experimental approach, encompassing standard compaction tests (Modified Proctor), UCS testing following ASTM D-2166 at curing ages of 7 and 14 days, and microstructural analysis using a Scanning Electron Microscope (SEM). The results indicate that cement addition reduces the optimum moisture content (OMC) from 39.48% to 35.76%, while simultaneously increasing the maximum dry density (MDD) from 1.275 g/cm³ to 1.298 g/cm³. UCS values increased significantly, from 10.421 kPa for untreated soil to 167.073 kPa for the 10% cement mixture at 14 days of curing. SEM analysis confirmed microstructural changes, including reduced pore size and quantity, formation of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) hydration products, and increased particle packing density. This study concludes that cement stabilization effectively enhances the mechanical properties and subgrade quality of clay soil, where 8% cement content yields the highest compressive strength at 7 days of curing, while 10% cement produces optimal results at 14 days of curing.

Kata Kunci

stabilisasi tanah lempung; semen portland; kuat tekan bebas (ucs); mikrostruktur; scanning electron microscope (sem)

Abstrak

Tanah lempung merupakan jenis tanah yang umum ditemukan di Indonesia dan sering menjadi kendala dalam konstruksi perkerasan jalan akibat sifatnya yang ekspansif, berdaya dukung rendah, dan plastisitas tinggi. Stabilisasi tanah menggunakan semen merupakan salah satu metode kimia yang efektif untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah lempung. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar semen (0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%) terhadap sifat fisik, kuat tekan bebas (UCS), dan mikrostruktur tanah lempung asal Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. Metode penelitian bersifat eksperimen laboratorium kuantitatif, meliputi pengujian pemadatan standar (Modified Proctor), pengujian UCS berdasarkan ASTM D-2166 pada umur pemeraman 7 dan 14 hari, serta analisis mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan semen menurunkan nilai kadar air optimum (OMC) dari 39,48% menjadi 35,76%, sekaligus meningkatkan kepadatan kering maksimum (MDD) dari 1,275 gr/cm³ menjadi 1,298 gr/cm³. Nilai UCS meningkat secara signifikan, dari 10,421 kPa pada tanah asli menjadi 167,073 kPa pada campuran semen 10% dengan pemeraman 14 hari. Analisis SEM mengonfirmasi terjadinya

perubahan mikrostruktur berupa berkurangnya ukuran dan jumlah pori, terbentuknya produk hidrasi Calcium Silicate Hydrate (C-S-H), serta meningkatnya kepadatan struktur partikel tanah. Penelitian ini menyimpulkan bahwa stabilisasi tanah lempung dengan semen secara efektif meningkatkan sifat mekanik dan kualitas tanah dasar jalan, di mana kadar semen 8% memberikan kuat tekan tertinggi pada pemeraman 7 hari, sedangkan 10% memberikan hasil optimal pada pemeraman 14 hari.

PENDAHULUAN

Tanah lempung merupakan salah satu jenis tanah yang secara umum tersebar luas di berbagai wilayah Indonesia dan sering menjadi objek kajian dalam bidang geoteknik, termasuk di Sulawesi Utara. Jenis tanah ini memiliki karakteristik yang unik namun seringkali menjadi kendala dalam bidang rekayasa geoteknik, khususnya pada konstruksi perkerasan jalan. Sifat alami tanah lempung yang bersifat ekspansif, daya dukung rendah, plastisitas tinggi, dan perubahan volume yang signifikan akibat perubahan kadar air menjadikan jenis tanah ini kurang ideal sebagai lapisan tanah dasar (*subgrade*) yang menopang konstruksi perkerasan jalan (Skempton, 1984). Kondisi ini akan berdampak pada penurunan kualitas jalan dan memperpendek umur pelayanan jalan. Oleh karena itu, untuk menjadi lapisan tanah dasar perkerasan jalan tanah lempung perlu di stabilisasi.

Stabilisasi tanah merupakan salah satu metode perbaikan tanah yang banyak digunakan dalam bidang geoteknik untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik tanah, terutama pada tanah yang memiliki daya dukung rendah, plastisitas tinggi, serta perubahan volume yang signifikan akibat kadar air. Tujuan utama stabilisasi tanah adalah meningkatkan kekuatan, mengurangi kompresibilitas, meningkatkan daya tahan terhadap perubahan cuaca, serta memperbaiki kestabilan volume tanah. Secara umum, metode stabilisasi tanah dibagi menjadi dua, yaitu stabilisasi mekanik dan stabilisasi kimia. Stabilisasi mekanik dilakukan melalui perbaikan gradasi tanah, pemadatan, atau pencampuran dengan material lain tanpa reaksi kimia, sedangkan stabilisasi kimia melibatkan penambahan bahan aditif seperti semen, kapur, atau bahan pozzolan yang bereaksi dengan mineral tanah membentuk senyawa pengikat seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H). Reaksi ini mampu meningkatkan kohesi antar partikel dan mengurangi porositas tanah (Horpibulsuk et al., 2010).

Salah satu solusi yang banyak dikembangkan adalah stabilisasi tanah melalui penambahan bahan aditif, seperti semen, yang mampu meningkatkan sifat teknis tanah melalui reaksi kimia dan perubahan mikrostruktur tanah. Proses hidrasi semen menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)* dan *Calcium Aluminate Hydrate (C-A-H)* yang mengikat partikel tanah, mengurangi porositas, dan meningkatkan kekuatan mekanik (Mitchell & Soga, 2005). Studi oleh (Al-Swaidani et al., 2016) menunjukkan bahwa penambahan bahan pozzolan pada tanah lempung yang distabilisasi mampu memperbaiki sifat geoteknik secara signifikan, yang ditunjukkan melalui terbentuknya struktur flokulasi dan material sementasi baru. Lebih lanjut, (Ural, 2016) menjelaskan bahwa penambahan bahan aditif seperti semen dan kapur dapat mengubah distribusi ukuran pori dan meningkatkan kepadatan struktur mikro tanah, yang diamati melalui pengujian SEM, dimana perubahan tersebut berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan tanah. Hal ini juga diperkuat oleh penelitian (Waani et al., 2014) yang menyatakan bahwa nilai kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*) sangat dipengaruhi oleh kandungan material sementasi, porositas, serta waktu

perawatan yang menunjukkan adanya keterkaitan erat antara perkembangan mikrostruktur dan peningkatan kekuatan mekanik tanah.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan semen terhadap tanah lempung yang diamati menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM), serta karakteristik kekuatan tanah yang diuji melalui pengujian *Unconfined Compression Strength* (UCS) berdasarkan prosedur standar. Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan analisis mikrostruktur dengan hasil uji mekanik masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya cenderung memisahkan antara analisis makroskopis dan mikroskopis, sehingga hubungan langsung antara perubahan mikrostruktur dan peningkatan kekuatan tanah belum dijelaskan secara komprehensif. Selain itu, masih terdapat keterbatasan penelitian yang secara spesifik mengevaluasi pengaruh variasi kadar semen tertentu terhadap evolusi mikrostruktur tanah lempung serta korelasinya terhadap nilai kuat tekan bebas.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan penjelasan yang lebih komprehensif mengenai mekanisme stabilisasi tanah lempung, serta menentukan komposisi optimum bahan aditif yang paling efektif untuk mendukung peningkatan teknologi pembangunan infrastruktur jalan di Kabupaten Bolaang Mongondow, khususnya dalam hal optimalisasi penggunaan tanah lokal yang bermasalah melalui pendekatan stabilisasi kimia. Hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai pedoman dalam perencanaan konstruksi jalan yang lebih efisien, berkelanjutan, dan memiliki umur pelayanan yang lebih panjang.

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, penelitian ini difokuskan pada kajian mengenai pengaruh penambahan semen terhadap karakteristik tanah lempung. Permasalahan penelitian diarahkan untuk mengetahui bagaimana penambahan semen memengaruhi sifat fisik tanah serta nilai kepadatan maksimum tanah lempung. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji pengaruh bahan aditif semen terhadap peningkatan kekuatan tekan bebas atau *Unconfined Compressive Strength* (UCS) pada tanah lempung. Tidak hanya dari aspek mekanis, penelitian ini turut menelaah perubahan mikrostruktur tanah lempung akibat proses stabilisasi semen melalui pengamatan menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar semen terhadap sifat fisik dan kepadatan maksimum tanah lempung. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui peningkatan nilai kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength*/UCS) tanah lempung setelah diberikan bahan aditif semen dengan berbagai variasi campuran. Selain itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perubahan struktur mikro tanah lempung yang telah distabilisasi menggunakan semen melalui pengamatan dengan metode *Scanning Electron Microscope* (SEM).

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, metode yang dipakai adalah eksperimen laboratorium yang bersifat kuantitatif. Penelitian ini dilakukan guna menganalisis efek variasi dalam penambahan bahan aditif semen terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur tanah lempung sebagai material dasar pada konstruksi perkerasan jalan.

Dalam penelitian ini, dilakukan serangkaian pengujian terhadap sampel tanah yang telah diberi campuran berupa semen dalam beberapa ragam kadar campuran (0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%). Masing-masing campuran kemudian diuji melalui uji pemadatan standar (Modified Proctor) untuk mendapatkan kepadatan maksimum (MDD) dan kadar air optimum (OMC), yang selanjutnya digunakan dalam pembuatan benda uji.

Benda uji tersebut kemudian dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati perubahan struktur mikro tanah akibat proses stabilisasi. Pengambilan foto SEM dilakukan pada sampel dengan umur pemeraman (curing) selama 7 hari dan 14 hari, sampel yang diamati terdiri dari beberapa variasi komposisi campuran tanah dan semen, yaitu 0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%. Selain itu, dilakukan pengujian *Unconfined Compression Strength* (UCS) untuk mengetahui nilai kuat tekan bebas dari setiap variasi campuran.

Hasil dari penelitian ini dianalisis secara kuantitatif berdasarkan data numerik hasil pengujian, serta secara deskriptif untuk menafsirkan perubahan struktur mikro dan kekuatan tekan bebas akibat perlakuan bahan aditif.

Pelaksanaan Penelitian

Penjelasan Bagan Alir :

Persiapan alat dan pengujian material

Tahapan awal meliputi persiapan semua peralatan laboratorium dan bahan uji (tanah dan semen) sebelum dilakukan pengujian

Pengujian Karakteristik Tanah Lempung

Merupakan tahap awal untuk mengetahui sifat fisik dasar dari tanah yang akan distabilisasi.

a. Analisa Saringan

Uji saringan untuk mengetahui distribusi ukuran butir (pasir, lanau, lempung).

b. Kadar Air

Untuk mengetahui kadar air alami tanah sebelum distabilisasi

c. Berat Jenis dan Penyerapan

Mengukur berat jenis tanah dan potensi penyerapan air, yang berguna dalam menghitung perbandingan campuran tanah-semen.

Batas Atterberg

Mengukur batas cair (LL), batas plastis (PL), dan indeks plastisitas (PI) untuk mengklasifikasikan jenis tanah (berhubungan dengan konsistensi dan kelakuan plastisnya).

Pencampuran Tanah dan Semen

a. TS0 : 100% tanah, 0% semen

b. TS4: 96% tanah, 4% semen

c. TS6: 94% tanah, 6% semen

d. TS8: 92% tanah, 8% semen

e. TS10: 90% tanah, 10% semen

Pemilihan variasi kadar semen sebesar 0%, 4%, 6%, 8%, 10% berdasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar semen dalam kisaran 5%-10% mampu menghasilkan perubahan mikrostruktur yang signifikan melalui pembentukan senyawa hidrasi, sehingga meningkatkan kekuatan tanah secara optimal. Sebagai contoh, penelitian oleh (Oyediran & Kalejaiye, 2011) menggunakan variasi kadar semen 0%-20%, sedangkan (Amiri et al., 2022) serta (Liu et al., 2023) menggunakan variasi hingga 10% dan menunjukkan hasil yang optimal pada kisaran tersebut.

Selain itu, penggunaan kadar semen di atas 10% umumnya menunjukkan peningkatan kekuatan yang tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan kenaikan biaya material, sehingga kurang efisien secara ekonomis. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dipilih variasi maksimum 10% sebagai batas atas untuk memperoleh keseimbangan antara peningkatan kinerja tanah dan efisiensi penggunaan bahan stabilisasi. Rentang variasi ini juga memungkinkan analisis yang lebih terfokus terhadap perubahan mikrostruktur tanah menggunakan SEM serta hubungannya dengan peningkatan nilai UCS secara bertahap.

Percobaan Pemadatan

Dilakukan uji Proctor untuk setiap variasi campuran guna menentukan:

- a. OMC (*Optimum Moisture Content*) – kadar air optimum.
- b. MDD (*Maximum Dry Density*) – kepadatan kering maksimum.

Komposisi campuran benda uji untuk pengujian pemadatan disusun berdasarkan variasi persentase semen terhadap berat kering tanah, yaitu 0%, 4%, 6%, 8%, dan 10%. Setiap variasi campuran dibuat dengan mencampurkan tanah lempung yang telah dikeringkan dan disaring dengan semen sesuai persentase yang ditentukan, kemudian ditambahkan air hingga mencapai kadar air tertentu untuk proses pemadatan. Komposisi ini bertujuan untuk memperoleh nilai kadar air optimum (OMC) dan kepadatan kering maksimum (MDD) dari masing-masing variasi, sehingga dapat diketahui pengaruh penambahan semen terhadap karakteristik pemadatan tanah.

5. Pembuatan Benda Uji

- a. Campuran tanah + semen + air dipadatkan ke dalam cetakan silinder sesuai standar UCS.
- b. Setelah itu dilakukan curing (perawatan) pada waktu tertentu (7 dan 14 hari).

6. Pengujian SEM dan UCS

- a. UCS (*Unconfined Compression Strength*): Mengukur kekuatan tekan bebas tiap variasi.
- b. SEM (*Scanning Electron Microscopy*): Mengamati mikrostruktur tanah hasil stabilisasi seperti terbentuknya gel C-S-H, ettringite, dan kepadatan antar partikel.

7. Analisis Data

- a. Pengolahan dan interpretasi data hasil uji UCS dan SEM.
- b. Menganalisis hubungan antara kadar semen, nilai kuat tekan, dan struktur mikro.

8. Kesimpulan

Merumuskan kesimpulan berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, serta menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat Fisik Material

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 tabel berikut ini.

Berdasarkan data hasil pengujian batas-batas atterberg terhadap material tanah menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki sifat plastisitas tinggi (Tabel 4 hal 14). Parameter

Atteberg Limits, yaitu *Liquid Limit* (LL) dan *Plasticity Index* (PI) yang tinggi cenderung memiliki sifat kohesif tinggi namun dengan kekuatan rendah.

Menurut (Bell, 1996), penambahan bahan stabilisasi seperti kapur atau semen dapat menurunkan nilai LL dan PI akibat terjadinya proses flokulasi dan perubahan struktur tanah. Penelitian oleh (Al-Rawas, 2006) juga menunjukkan bahwa penurunan nilai PI merupakan indikator keberhasilan stabilisasi tanah karena menunjukkan berkurangnya aktivitas lempung.

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik tanah dan analisis menggunakan sistem klasifikasi AASHTO, diperoleh nilai *Liquid Limit* (LL) sebesar 55,909% dan *Plasticity Index* (PI) sebesar 30,909%. Berdasarkan posisi titik pada grafik klasifikasi, tanah tersebut termasuk ke dalam kelompok A-7-6, yaitu tanah lempung dengan plastisitas tinggi.

Tanah kelompok A-7-6 umumnya memiliki karakteristik berupa daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, serta potensi kembang-susut yang besar akibat perubahan kadar air. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah kurang memenuhi persyaratan sebagai tanah dasar (*subgrade*) untuk konstruksi perkerasan jalan apabila digunakan tanpa perlakuan perbaikan.

Hasil pengujian analisa saringan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, menunjukkan bahwa persentase material tanah yang lolos saringan No.200 adalah sebesar 38,10%. Sesuai standar klasifikasi AASHTO, nilai tersebut mengidentifikasi bahwa tanah termasuk dalam kelompok A-7-6, yaitu tanah lempung dengan persyaratan material yang lolos saringan No.200 lebih dari 36%.

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 sampel Pengujian UCS. Berikut Adalah hasil pengujian pemadatan yang telah dilakukan :

Tabel 1. Hasil Pengujian Pemadatan

Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)	OMC (%)	MDD (gr/cm ³)
A	100	Semen	0	39,48
B	96	Semen	4	39,20
C	94	Semen	6	38,21
D	92	Semen	8	37,54
E	90	Semen	10	35,76

(Sumber: Hasil Analisa, 2025)

Berdasarkan Tabel 1 diatas menunjukkan bahwa semakin besar presentase semen dalam campuran maka semakin menurun kadar air optimum (OMC) yang dibutuhkan dan semakin meningkat kepadatan kering maksimum (MDD) campuran. Nilai OMC dan MDD tanah asli yaitu 39,48% dan 1,275 gram/cm³.

Penurunan kadar air ini disebabkan karena penambahan semen yang mampu mengurangi kadar air optimum (Horpibulsuk et al., 2010). Air yang dibutuhkan untuk tanah mencapai kepadatan optimum berkurang karena rongga-rongga yang sebelumnya terisi oleh air Sebagian terisi oleh semen (Mitchell & Soga, 2005). Maka dari itu semakin tinggi nilai berat isi kering (MDD) maka kadar air yang terdapat dalam tanah (OMC) semakin berkurang karena adanya butiran gel dari semen yang terbentuk dari reaksi pozzolan mengikat partikel-partikel tanah

dan mengisi rongga pori tanah yang dapat mengurangi jarak antar butiran tanah sehingga susunan butiran menjadi semakin rapat dan berperan terhadap peningkatan kepadatan tanah

Nilai MDD terbesar berada pada campuran dengan penambahan semen 10% sebesar 1,298 gram/cm³. Sehingga dapat dilihat bahwa campuran semen dapat menyebabkan peningkatan berat isi kering maksimum tanah.

Hasil Pengujian Sifat Mekanik Material

Pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS) dilakukan untuk mengetahui peningkatan kuat tekan bebas tanah setelah distabilisasi menggunakan material pengikat berupa semen dengan variasi kadar yang berbeda. Hasil pengujian untuk umur pemeraman 7 hari dan 14 hari ditampilkan pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Pengujian Kuat Tekan Bebas/ UCS

Berikut hasil pengujian UCS dapat dilihat pada Tabel dibawah ini

Tabel 2. Hasil Pengujian UCS (kg/cm³)

Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)	UCS (qu)	
			7 hari (kg/cm ³)	14 hari (kg/cm ³)
A	100	Semen 0	0,106	0,171
B	96	Semen 4	0,468	0,562
C	94	Semen 6	0,974	1,124
D	92	Semen 8	1,044	1,284
E	90	Semen 10	0,829	1,705

(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Tabel 3. Hasil Pengujian UCS (kPa)

Variasi	Tanah (%)	Material Pengikat (%)	UCS (qu)	
			7 hari (kPa)	14 hari (kPa)
A	100	Semen 0	10,421	16,715
B	96	Semen 4	45,888	55,104
C	94	Semen 6	95,463	110,198
D	92	Semen 8	102,293	125,864
E	90	Semen 10	81,240	167,073

(Sumber: Hasil Analisa 2025)

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan semen memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai UCS. Berikut penjelasan lebih rinci untuk tiap variasi:

Variasi A (100% Tanah + 0% Semen)

Pada variasi tanpa penambahan semen, nilai UCS 7 hari sebesar 10,421 kPa, dan meningkat menjadi 16,715 kPa pada umur 14 hari. Kenaikan ini terjadi akibat proses pemadatan dan pengeringan alami, namun masih menunjukkan kuat tekan yang sangat rendah. Nilai ini menjadi acuan dasar sebelum penambahan material pengikat.

Variasi B (96% Tanah + 4% Semen)

Penambahan semen sebesar 4% menghasilkan peningkatan UCS yang cukup besar, yakni 45,888 kPa pada 7 hari dan 55,104 kPa pada 14 hari. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi hidrasi semen mulai memberikan kontribusi nyata pada peningkatan kuat tekan tanah.

Variasi C (94% Tanah + 6% Semen)

Pada penambahan 6% semen, peningkatan UCS semakin signifikan. Nilai UCS 7 hari mencapai 95,463 kPa, sedangkan pada 14 hari meningkat menjadi 110,198 kPa. Pertambahan nilai ini menunjukkan efektivitas semen dalam memperkuat struktur tanah seiring pertumbuhan ikatan antar partikel melalui proses hidrasi.

Variasi D (92% Tanah + 8% Semen)

Variasi dengan 8% semen memberikan nilai UCS tertinggi untuk umur 7 hari, yaitu 102,293 kPa, dan meningkat menjadi 125,864 kPa pada umur 14 hari. Nilai ini menunjukkan bahwa pada kadar tersebut, reaksi pengikatan semen berlangsung optimal sehingga menghasilkan kuat tekan maksimum pada umur awal.

Variasi E (90% Tanah + 10% Semen)

Meskipun nilai UCS 14 hari pada variasi ini merupakan yang tertinggi (167,073 kPa), nilai UCS 7 hari justru lebih rendah dibanding variasi D, yaitu 81,240 kPa. Fenomena ini dapat terjadi karena kadar semen yang lebih tinggi membutuhkan lebih banyak air untuk hidrasi, proses pemeraman 7 hari belum cukup untuk mengoptimalkan pengerasan tetapi pada 14 hari, reaksi hidrasi mulai berkembang sempurna sehingga kuat tekan meningkat tajam.

Nilai UCS meningkat seiring penambahan kadar semen hingga 8%, namun pada kadar 10% terjadi penurunan pada umur 7 hari sebelum meningkat kembali pada umur 14 hari. Penurunan ini disebabkan struktur tanah belum sepenuhnya berkembang secara optimal, yang ditandai dengan masih adanya pori-pori yang belum terisi sempurna serta distribusi produk hidrasi yang tidak merata. Selain itu, ditemukan indikasi adanya partikel semen yang belum terhidrasi secara sempurna (*unhydrated cement grains*) akibat keterbatasan air dalam proses hidrasi. Hal ini menyebabkan terbentuknya struktur yang tidak homogen dan munculnya zona lemah (*weak zones*) dalam matriks tanah.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada kadar semen yang lebih tinggi, kebutuhan air untuk proses hidrasi juga meningkat. Apabila ketersediaan air tidak mencukupi, maka reaksi hidrasi tidak berlangsung secara optimal, sehingga pembentukan senyawa pengikat seperti C-S-H menjadi maksimal. Akibatnya, ikatan antar partikel tanah tidak berkembang secara efektif.

Selain itu, berdasarkan konsep rasio porositas terhadap kadar semen (*porosity/cement ratio*), penambahan semen yang berlebihan tanpa diimbangi dengan pengurangan pori secara efektif justru dapat menyebabkan struktur tanah menjadi kurang efisien dalam menahan beban. Pada kondisi ini, distribusi pori tidak seragam dan tidak seluruh ruang pori terisi oleh produk hidrasi, sehingga kontak antar partikel menjadi tidak optimal.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan kekuatan tanah tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah semen, tetapi juga oleh perkembangan mikrostruktur, distribusi pori, serta homogenitas ikatan antar partikel. (Horpibulsuk et al., 2010) menyatakan bahwa peningkatan nilai UCS sangat dipengaruhi oleh perkembangan struktur mikro yang padat dan merata, sedangkan (Consoli et al., 2011) menekankan pentingnya rasio porositas terhadap kadar semen dalam mengontrol kekuatan tanah. Selain itu,

(Zhang et al., 2013) menjelaskan bahwa struktur mikro yang tidak homogen dapat menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata, sehingga menurunkan kekuatan material.

Dengan demikian, penurunan nilai UCS pada variasi 10% untuk umur 7 hari dapat disimpulkan sebagai akibat dari ketidakseimbangan antara kadar semen, ketersediaan air, dan perkembangan mikrostruktur yang ditunjukkan melalui hasil SEM berupa struktur yang belum padat, distribusi produk hidrasi yang tidak merata, serta masih adanya pori-pori yang belum terisi secara optimal. Sebaliknya pada variasi 8%, terbentuk struktur mikro yang lebih homogen dan kompak, sehingga menghasilkan nilai kuat tekan bebas yang lebih tinggi.

Hubungan antara regangan (strain) dan tegangan (kuat tekan bebas/UCS) pada berbagai variasi campuran tanah dengan penambahan semen pada umur curing 7 hari. Secara umum, seluruh kurva menunjukkan pola perilaku material yang khas pada pengujian *Unconfined Compressive Strength* (UCS), yaitu peningkatan tegangan seiring bertambahnya regangan hingga mencapai tegangan puncak (*peak strength*), kemudian diikuti penurunan tegangan setelah melewati titik puncak yang mengindikasikan terjadinya keruntuhan struktur material.

Pada sampel tanah asli tanpa penambahan semen (0%), terlihat bahwa nilai tegangan yang dihasilkan relatif rendah, yaitu berkisar antara $\pm 0,05$ hingga $0,15 \text{ kg/cm}^2$. Kurva yang terbentuk cenderung landai tanpa puncak yang signifikan, yang menunjukkan bahwa tanah memiliki sifat plastis dan deformasi yang besar sebelum mengalami keruntuhan. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah asli memiliki daya dukung yang rendah dan kurang stabil terhadap beban.

Seiring dengan penambahan semen sebesar 4%, terjadi peningkatan nilai tegangan maksimum yang cukup signifikan dibandingkan dengan tanah asli. Nilai kuat tekan mulai menunjukkan puncak yang lebih jelas dengan kisaran tegangan maksimum mendekati $\pm 0,8$ – $1,0 \text{ kg/cm}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa proses stabilisasi mulai efektif, di mana reaksi hidrasi semen menghasilkan senyawa pengikat seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) yang meningkatkan ikatan antar partikel tanah.

Pada variasi penambahan semen 6%, peningkatan kuat tekan semakin terlihat dengan nilai tegangan maksimum yang relatif lebih tinggi dibandingkan variasi 4%. Kurva tegangan-regangan menunjukkan bentuk yang lebih curam dan puncak yang lebih tajam, yang menandakan bahwa material menjadi lebih kaku. Regangan saat mencapai tegangan maksimum umumnya terjadi pada kisaran $0,01$ – $0,02$, yang menunjukkan bahwa material mengalami keruntuhan pada deformasi yang relatif kecil.

Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi penambahan semen 8%, dengan tegangan maksimum mencapai sekitar $\pm 1,1$ – $1,2 \text{ kg/cm}^2$. Kurva yang dihasilkan menunjukkan peningkatan tegangan yang sangat cepat hingga titik puncak, kemudian diikuti dengan penurunan yang cukup drastis. Pola ini mengindikasikan bahwa material memiliki sifat yang lebih getas (*brittle*), di mana peningkatan kekuatan diikuti dengan kecenderungan keruntuhan yang lebih cepat setelah mencapai beban maksimum.

Selain itu, variasi komposisi tanah dalam campuran (100%, 96%, 94%, dan 92%) juga menunjukkan bahwa semakin besar proporsi semen dalam campuran, semakin tinggi nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini memperkuat bahwa semen berperan penting dalam meningkatkan kekuatan mekanis tanah melalui proses sementasi dan pengisian pori-pori tanah.

Hubungan regangan dan tekanan pada umur curing 14 hari menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan bebas (UCS) yang lebih tinggi dibandingkan curing 7 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa waktu pemeraman memberikan pengaruh signifikan terhadap perkembangan kekuatan tanah.

Pada tanah asli (0% semen), nilai tegangan maksimum relatif rendah dan kurva menunjukkan penurunan cepat setelah puncak, yang mencerminkan perilaku getas dengan kemampuan menahan beban yang terbatas.

Pada variasi penambahan semen 4% dan 6%, terjadi peningkatan UCS yang cukup signifikan. Kurva tegangan–regangan menunjukkan puncak tegangan yang lebih tinggi dengan regangan yang relatif kecil, menandakan material menjadi lebih kaku dan mampu menahan beban lebih besar sebelum mengalami keruntuhan.

Pada variasi 8% semen, diperoleh nilai UCS tertinggi di antara seluruh variasi. Kurva menunjukkan kenaikan tegangan yang tajam hingga mencapai puncak, namun diikuti penurunan yang cukup cepat setelahnya, yang mengindikasikan kecenderungan perilaku lebih getas akibat peningkatan kekakuan material.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan semen dan bertambahnya waktu curing meningkatkan kekuatan tanah secara signifikan. Semakin lama waktu curing, semakin tinggi nilai UCS yang diperoleh, serta semakin kaku karakteristik material, meskipun cenderung menunjukkan perilaku getas setelah mencapai tegangan puncak.

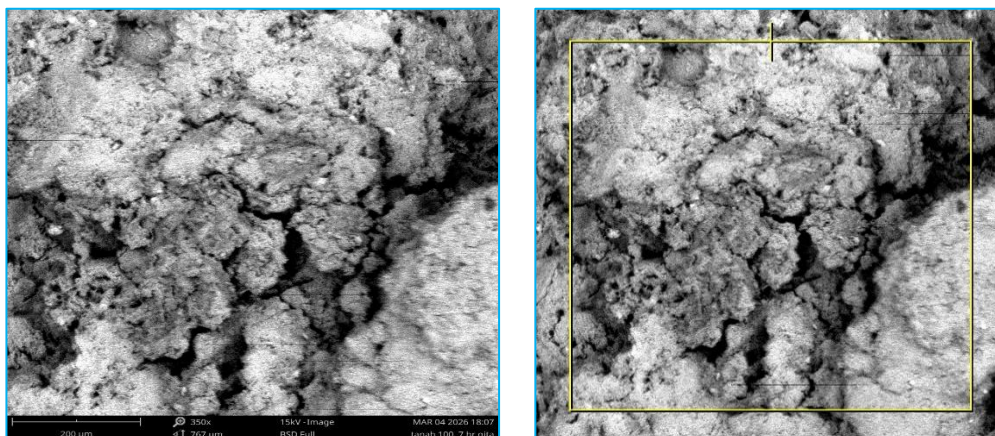
Hasil Pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscope*)

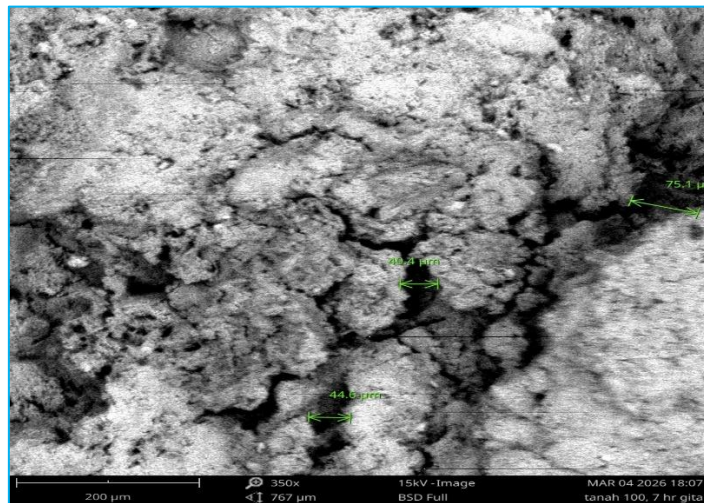
Pemeriksaan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) bertujuan untuk menganalisis karakteristik mikrostruktur material secara visual dan kualitatif. Dalam penelitian stabilisasi tanah–semen, SEM digunakan untuk mengamati perubahan struktur mikro akibat penambahan semen dan proses curing.

Dengan demikian, SEM berfungsi sebagai alat pendukung analisis mekanik untuk memperkuat interpretasi ilmiah mengenai mekanisme peningkatan kekuatan pada tanah yang distabilisasi semen.

Semen 0% (7 Hari)

Foto SEM (*Scanning Electron Microscope*)





Gambar 1. Hasil Analisa SEM pada Sampel 100% + Semen 0% (7 Hari)
(Sumber: Hasil Analisa 2026)

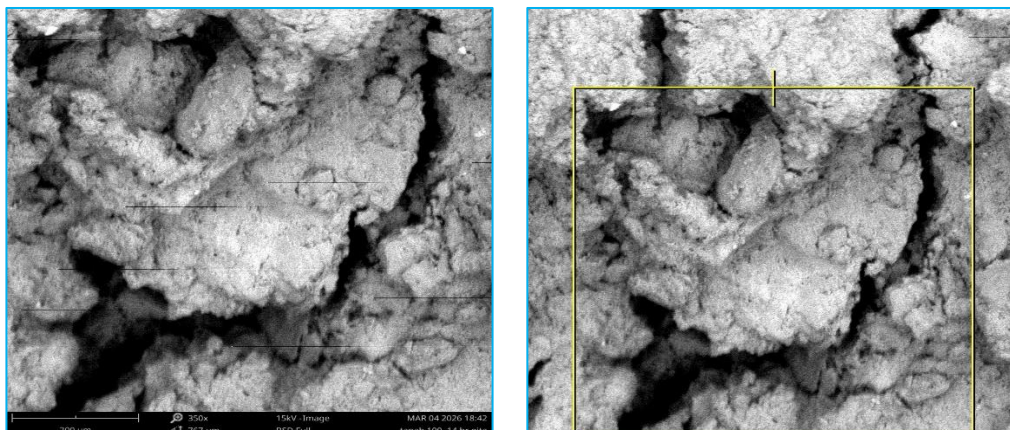
Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 1, pada kondisi tanah asli tanpa penambahan semen, struktur mikro terlihat masih didominasi oleh susunan partikel yang tidak teratur dan cenderung terdispersi. Rongga antar partikel tampak cukup besar dengan ukuran pori berkisar antara 40,4 μm hingga 75,1 μm dan tidak terisi oleh material pengikat, sehingga menunjukkan tingkat porositas yang tinggi. Tidak terlihat adanya ikatan yang kuat antar butiran tanah, yang mengindikasikan bahwa tanah masih dalam kondisi lemah secara struktural.

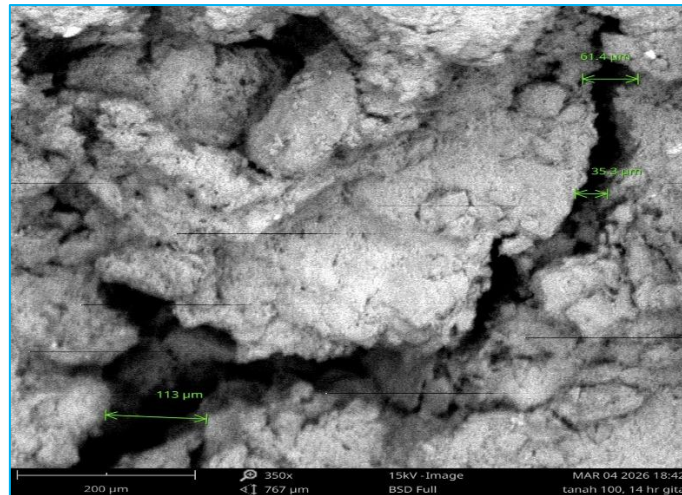
Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur tanah masih berada dalam keadaan loose structure, Dimana partikel-partikel tanah belum mengalami proses pengikatan atau sementasi yang signifikan. Distribusi partikel yang tidak teratur menyebabkan kontak antar partikel relative kecil sehingga kemampuan tanah dalam menahan beban tekan menjadi rendah.

Fenomena ini sejalan dengan hasil pengujian kuat tekan bebas (UCS) yang menunjukkan bahwa tanah tanpa penambahan semen memiliki nilai kuat tekan bebas yang paling rendah dibandingkan dengan variasi campuran lainnya. Struktur mikro yang berpori dan tidak terikat menyebabkan tegangan yang diberikan pada saat pengujian tidak dapat didistribusikan secara efektif melalui jaringan partikel tanah.

Semen 0% (14 Hari)

Foto SEM (Scanning Electron Microscope)





Gambar 2. Hasil Analisa SEM pada Sampel 100% + Semen 0% (14 Hari)
(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Hasil pengamatan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa struktur mikro tanah tanpa penambahan semen setelah 14 hari pemeraman masih memperlihatkan kondisi yang relatif sama dengan sampel tanpa semen pada umur 7 hari. Struktur tanah tetap menunjukkan susunan partikel yang longgar dengan porositas tinggi dan tanpa adanya ikatan sementasi. Rongga antar partikel masih terlihat cukup besar dengan ukuran pori berkisar antara 35,3 µm hingga 113 µm.

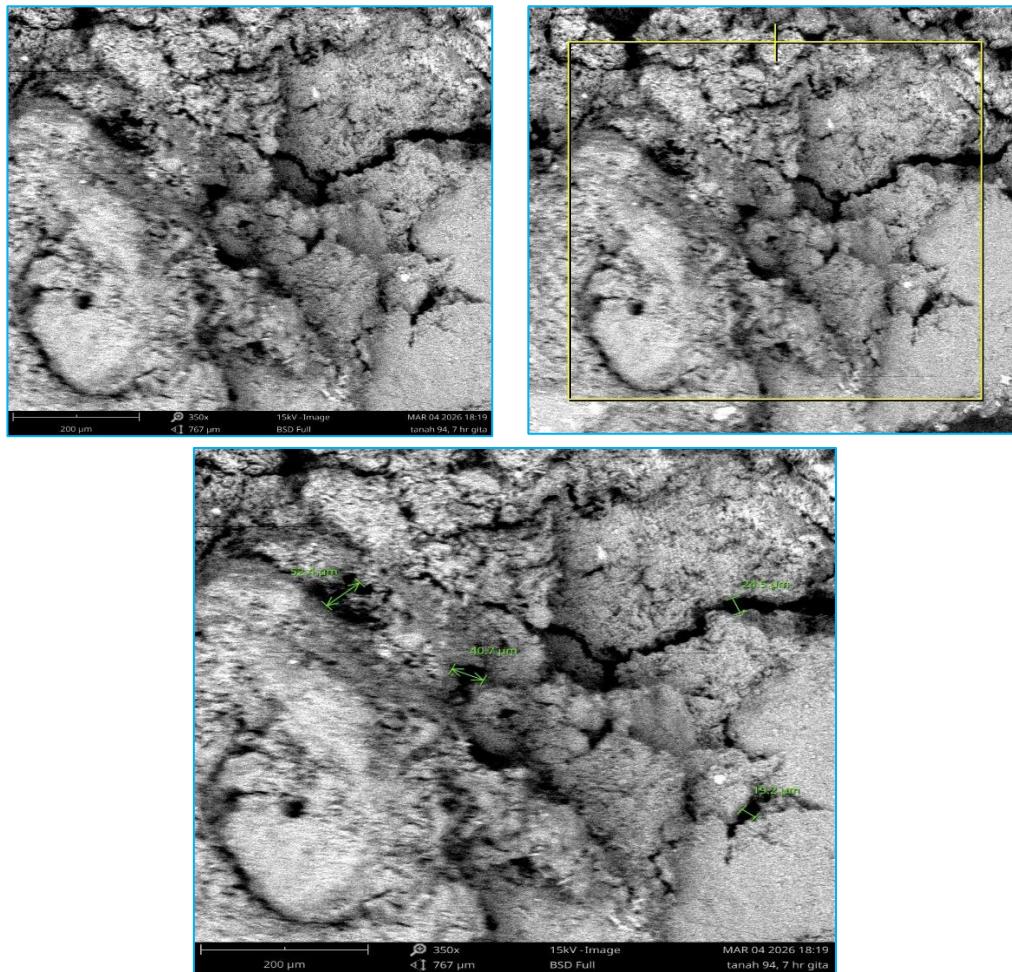
Kondisi ini sesuai dengan (Horpibulsuk et al., 2010) yang menyatakan bahwa tanah tanpa stabilisasi memiliki struktur berupa partikel yang tersusun secara longgar dengan pori yang besar dan belum mengalami pengikatan secara kimia.

Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa tidak terdapat perubahan mikrostruktur yang signifikan antar umur pemeraman 7 hari dan 14 hari. Hal ini disebabkan karena tidak adanya bahan pengikat seperti semen yang dapat menghasilkan produk hidrasi untuk mengisi pori dan membentuk ikatan antar partikel.

Sejalan dengan itu, (Yu et al., 2019) menyatakan bahwa peningkatan kekuatan tanah sangat bergantung pada perubahan distribusi pori dari makro menjadi mikro akibat proses sementasi. Oleh karena itu, pada sampel tanpa semen, tidak terjadi perubahan distribusi pori maupun pembentukan struktur yang lebih padat, sehingga sifat mekanik tanah cenderung tidak mengalami peningkatan meskipun waktu pemeraman bertambah.

Semen 6% (7 Hari)

Foto SEM (*Scanning Electron Microscope*)



Gambar 3. Hasil Analisa SEM pada Sampel 94% + Semen 6% (7 Hari)
(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Pada Gambar 3 terlihat bahwa penambahan semen sebesar 6% dengan waktu curing 7 hari, mulai memberikan perubahan pada struktur mikro tanah. Partikel-partikel tanah mulai mengalami proses flokulasi dan aglomerasi, yang ditandai dengan terbentuknya agregat partikel yang lebih besar dan lebih terikat satu sama lain.

Ukuran pori yang teramati pada sampel ini berada pada kisaran 24,5 µm hingga 52,4 µm, yang menunjukkan adanya penurunan ukuran pori dibandingkan dengan tanah tanpa semen.

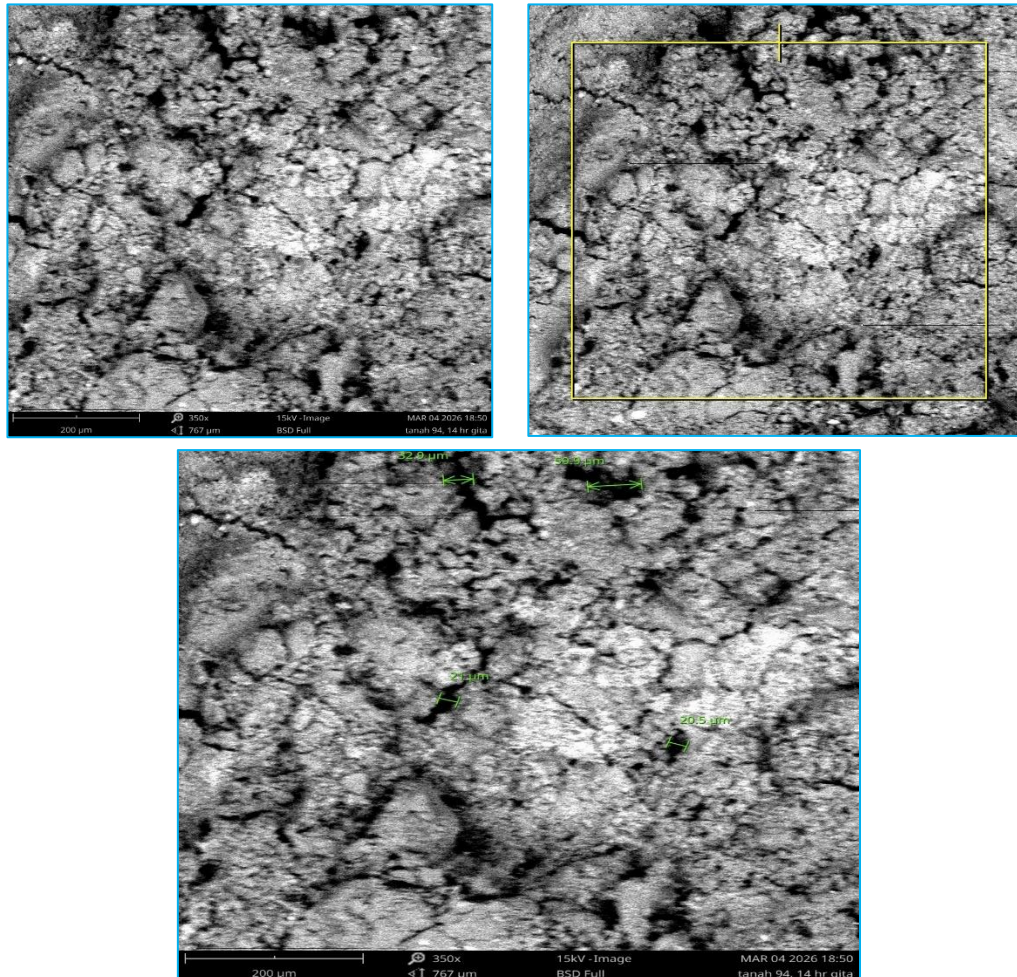
Perubahan ini terjadi akibat reaksi hidrasi antara semen dan air yang menghasilkan produk hidrasi seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (C-A-H). Produk hidrasi tersebut mulai mengisi Sebagian rongga antar partikel tanah dan berfungsi sebagai bahan pengikat yang meningkatkan kohesi antar butir tanah.

Namun, distribusi produk hidrasi masih belum merata dan jumlahnya relatif terbatas, sehingga struktur mikro masih menunjukkan porositas tinggi (void masih banyak), ikatan antar partikel belum kuat dan struktur belum kompak.

Temuan ini sejalan dengan penelitian (Consoli et al., 2007) yang menyatakan bahwa pada umur curing awal, pembentukan C-S-H masih terbatas sehingga belum mengisi seluruh pori tanah. Selain itu, (Horpibulsuk et al., 2010) menjelaskan bahwa pada fase awal pemeraman, struktur tanah masih didominasi oleh rongga karena proses hidrasi belum berlangsung sempurna.

Semen 6% (14 Hari)

Foto SEM (*Scanning Electron Microscope*)



Gambar 4. Hasil Analisa SEM pada Sampel 94% + Semen 6% (14 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Pada Gambar 4 terlihat bahwa struktur mikro tanah dengan penambahan 6% semen setelah 14 hari pemeraman menunjukkan perubahan mikrostruktur yang lebih signifikan. Struktur tanah tampak lebih padat, kompak, dan terintegrasi dengan berkurangnya jumlah rongga secara nyata.

Ukuran pori yang diamati berada pada kisaran 20,5 µm hingga 59,9 µm yang menunjukkan bahwa sebagian rongga telah terisi oleh produk hidrasi semen yang terus berkembang selama proses pemeraman. C-S-H yang terbentuk berfungsi sebagai pori dan perekat antar partikel sehingga menghasilkan struktur yang lebih stabil dan kuat.

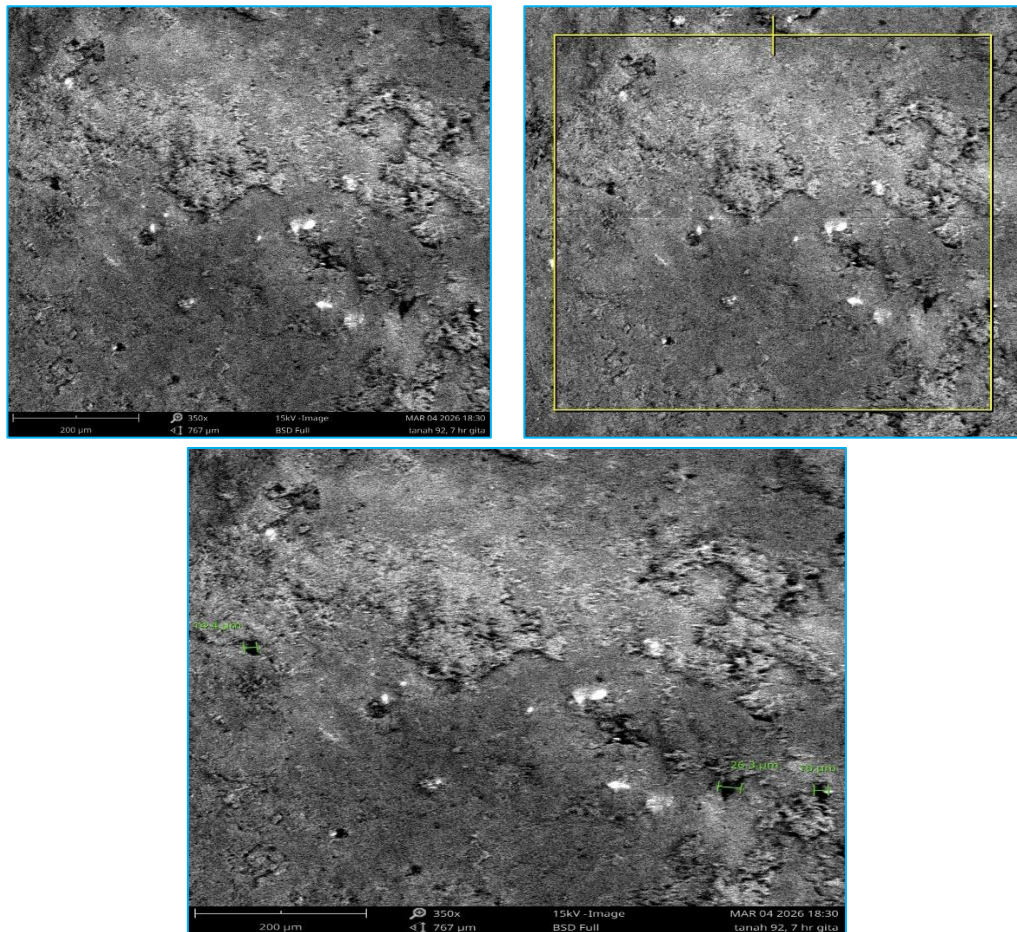
Hasil ini sesuai dengan penelitian (Consoli et al., 2007) yang menyatakan bahwa peningkatan kekuatan tanah distabilisasi terjadi akibat densifikasi mikrostruktur oleh produk

hidrasi. Selain itu, (Horpibulsuk et al., 2010) menjelaskan bahwa bertambahnya waktu pemeraman meningkatkan pembentukan ikatan sementasi dan menurunkan porositas.

Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai UCS pada umur pemeraman 14 hari dibandingkan dengan umur 7 hari. Hal ini sesuai dengan penelitian (Al-Rawas, 2006) yang menyatakan bahwa penurunan porositas akibat pembentukan produk hidrasi berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan tanah.

Semen 8% (7 Hari)

Foto SEM (*Scanning Electron Microscope*)



Gambar 5. Hasil Analisa SEM pada Sampel 92% + Semen 8% (7 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Pada Gambar 5 terlihat bahwa penambahan semen sebesar 8% dengan waktu curing 7 hari, struktur mikro tanah terlihat lebih padat dibandingkan dengan variasi sebelumnya. Ikatan antar partikel semakin jelas terlihat dengan adanya matriks sementasi yang mulai menyelimuti butiran tanah. Jumlah dan ukuran pori-pori semakin berkurang akibat terisinya rongga oleh produk hidrasi seperti C-S-H.

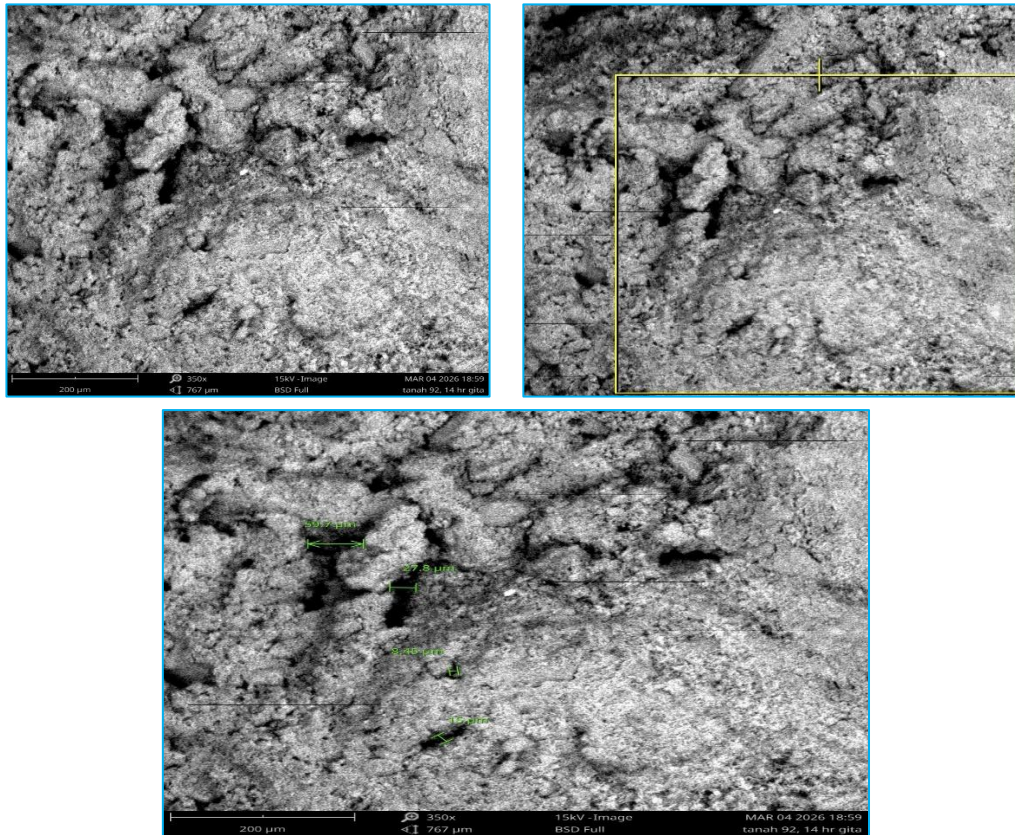
Ukuran pori yang diamati berada pada kisaran 14,4 μm hingga 26,3 μm , yang menunjukkan bahwa sebagian besar rongga telah terisi oleh produk hidrasi semen.

Kondisi ini menunjukkan proses sementasi antar partikel telah berlangsung lebih efektif. Produk hidrasi semen membentuk jaringan matriks yang mengikat partikel-partikel

tanah sehingga terbentuk struktur mikro yang lebih padat dan stabil. Sehingga nilai UCS yang diperoleh pada variasi ini menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan variasi sebelumnya.

Semen 8% (14 Hari)

Foto SEM (*Scanning Electron Microscope*)



Gambar 6. Hasil Analisa SEM pada Sampel 92% + Semen 8% (14 Hari)

(Sumber: Hasil Analisa 2026)

Pada Gambar 6 terlihat bahwa struktur mikro tanah dengan penambahan 8% semen setelah 14 hari pemeraman menunjukkan struktur yang paling padat dan terintegrasi dibandingkan dengan pada 7 hari. Struktur tanah tampak lebih kompak dan homogen dengan berkurangnya porositas secara signifikan. Rongga antar partikel terlihat semakin kecil dengan ukuran pori berkisar antara 8,46 µm hingga 59,7 µm.

Proses ini menunjukkan bahwa proses hidrasi dan sementasi telah berlangsung secara optimal sehingga menghasilkan struktur tanah yang lebih terkonsolidasi. Struktur mikro yang padat ini berperan penting dalam meningkatkan kemampuan tanah untuk menahan beban tekan, yang tercermin pada nilai UCS yang lebih tinggi pada variasi campuran ini.

Berdasarkan hasil pengamatan mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), dapat disimpulkan bahwa penambahan semen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan struktur mikro tanah lempung. Perubahan ini terlihat dari perbedaan bentuk susunan partikel, ukuran pori, serta tingkat kepadatan struktur tanah pada setiap variasi campuran.

Secara keseluruhan, hasil analisis SEM menunjukkan bahwa penambahan semen menyebabkan terjadinya proses flokulasi, aglomerasi, dan sementasi antar partikel tanah yang mengakibatkan berkurangnya porositas serta meningkatnya kepadatan struktur mikro tanah. Perubahan mikrostruktur ini berperan penting dalam meningkatkan kekuatan mekanik tanah,

yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai kuat tekan bebas (UCS) pada setiap variasi penambahan semen. Dengan demikian, hasil pengamatan SEM memberikan bukti mikrostruktural yang mendukung peningkatan kinerja mekanik tanah lempung akibat proses stabilisasi menggunakan semen.

Analisis Hubungan Mikrostruktur SEM terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (UCS)

Analisis hubungan antara mikrostruktur tanah yang diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan nilai *Unconfined Compressive Strength* (UCS) bertujuan untuk memahami mekanisme peningkatan kekuatan tanah secara mikroskopis akibat penambahan semen. Pengujian UCS memberikan informasi mengenai kekuatan tanah secara makroskopis, sedangkan pengamatan SEM memberikan Gambaran mengenai perubahan struktur partikel tanah, distribusi pori, serta terbentuknya produk hidrasi semen berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik tanah (Horpibulsuk et al., 2010; Zhang et al., 2013).

Berdasarkan hasil pengamatan SEM pada berbagai variasi campuran dan waktu pemeraman, terlihat bahwa penambahan semen menyebabkan perubahan mikrostruktur tanah yang cukup signifikan. Tanah tanpa penambahan semen menunjukkan struktur partikel yang relatif terdispersi dengan rongga antar partikel yang cukup besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa ikatan antar partikel tanah masih lemah sehingga kemampuan tanah dalam menahan beban tekan relatif rendah (Al-Swaidani et al., 2016; Ural, 2016).

Pada sampel tanah yang distabilisasi dengan semen, terlihat adanya perubahan mikrostruktur berupa terbentuknya agregasi partikel tanah, berkurangnya ukuran pori, serta munculnya matriks pengikat yang merupakan produk hidrasi semen. Reaksi hidrasi antara semen dan air menghasilkan senyawa seperti *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) dan *Calcium Aluminate Hydrate* (C-A-H) yang berfungsi sebagai bahan pengikat antar partikel tanah. Produk hidrasi tersebut mengisi rongga antar partikel tanah dan membentuk struktur yang lebih padat sehingga meningkatkan kekuatan mekanik tanah (Amiri et al., 2022; Liu et al., 2023).

Pada sampel dengan penambahan 6% semen, citra SEM menunjukkan bahwa partikel tanah mulai mengalami proses flokulasi dan aglomerasi, dimana partikel-partikel halus saling bergabung membentuk agregat yang lebih besar. Selain itu sebagian pori tanah mulai terisi oleh produk hidrasi semen sehingga struktur tanah menjadi lebih rapat dibandingkan dengan tanah tanpa semen. Perubahan ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai UCS dibandingkan dengan kondisi tanah asli.

Perubahan struktur yang lebih signifikan terlihat pada sampel dengan penambahan 8% semen. Produk hidrasi semen tampak mengisi sebagian besar rongga antar partikel dan membentuk matriks pengikat yang lebih kuat. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses sementasi antar partikel telah berlangsung lebih optimal sehingga menghasilkan struktur tanah yang lebih stabil dan memiliki kemampuan menahan beban tekan yang lebih tinggi.

Selain kadar semen, waktu pemeraman (*curing time*) juga memberikan pengaruh terhadap perkembangan mikrostruktur tanah. Pada umur pemeraman 14 hari, struktur mikro tanah terlihat lebih padat dibandingkan dengan umur 7 hari. Hal ini disebabkan oleh proses hidrasi semen yang masih berlangsung sehingga produk hidrasi yang terbentuk semakin banyak dan mampu mengisi rongga tanah secara lebih efektif. Akibatnya ikatan antar partikel

tanah menjadi semakin kuat sehingga nilai UCS yang dihasilkan juga meningkat (Consoli & Foppa, 2014; Xu et al., 2025).

Secara umum, hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa peningkatan nilai UCS pada tanah yang distabilisasi semen berkaitan erat dengan perubahan mikrostruktur tanah. Struktur mikro yang lebih padat dengan pori yang lebih kecil serta adanya matriks pengikat hasil hidrasi semen menyebabkan distribusi tegangan pada tanah menjadi lebih merata ketika menerima beban tekan. Dengan demikian, tanah yang distabilisasi memiliki kekuatan tekan bebas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah tanpa stabilisasi.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara perubahan mikrostruktur tanah yang diamati melalui SEM dengan peningkatan nilai kuat tekan bebas (UCS). Semakin padat dan terikat struktur mikro tanah akibat pembentukan produk hidrasi semen, maka semakin tinggi nilai kekuatan tanah yang dihasilkan. Hasil ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa peningkatan kekuatan tanah merupakan konsekuensi langsung dari perubahan struktur mikro berupa pengurangan pori dan peningkatan ikatan antar partikel (Horpibulsuk et al., 2010; Zhang et al., 2013).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data, dapat disimpulkan bahwa penambahan semen memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik pemadatan tanah lempung, di mana nilai kadar air optimum (OMC) meningkat dari 38,10% menjadi 39,48% dan berat isi kering maksimum (MDD) meningkat dari 1,275 gr/cm³ menjadi 1,298 gr/cm³, menunjukkan bahwa semen memperbaiki distribusi partikel dan meningkatkan kemampuan pemadatan tanah. Selain itu, nilai UCS mengalami peningkatan signifikan dari 45,888 kPa pada tanah asli menjadi 167,073 kPa pada variasi semen tertinggi, membuktikan bahwa semen efektif meningkatkan kekuatan tanah melalui proses sementasi dan pembentukan ikatan antar partikel sehingga tanah menjadi lebih kaku dan mampu menahan beban lebih besar. Hasil analisis SEM juga mengonfirmasi terjadinya perubahan mikrostruktur yang signifikan, di mana struktur tanah yang awalnya berpori dan tidak terikat berubah menjadi lebih padat dan teragregasi akibat pembentukan produk hidrasi seperti Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) yang mengisi rongga antar partikel, sehingga semakin tinggi kadar semen, struktur tanah semakin kompak dan homogen, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik tanah secara keseluruhan.

REFERENSI

- 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-Rawas, A. A. (Ed.). (2006). *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Taylor & Francis/Balkema.
- 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>

- Amiri, M., Sanjari, M., & Porhonor, F. (2022). Microstructural Evaluation of The Cement Stabilization of Hematite-Rich Red Soil. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00935. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00935>
- Andriani, Yuliet, R., & Fernandez, F. L. (2012). Pengaruh Penggunaan Semen sebagai Bahan Stabilisasi pada Tanah Lempung Daerah Lambung Bukit terhadap Nilai CBR Tanah. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 8(1), 29–44. <https://doi.org/10.25077/jrs.8.1.29-44.2012>
- Asri, L. M., Zakaria, Z., & Mulyo, A. (2023). Mineral Tanah Lempung Formasi Batuasih Berdasarkan Data SEM (Scanning Electron Microscope) dan XRD (X-Ray Diffractometer) Pada Lereng Citatah KM-23, Padalarang, Jawa Barat. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 6(1), 53–63. <https://doi.org/10.14710/jgt.6.1.2023.53-63>
- ASTM D698. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0698-07E01>
- ASTM D2487. (1993). Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- 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.
- Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., & Lee, F. H. (2004). Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 696–706. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(696\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(696))
- Consoli, N. C., Da Fonseca, A. V., Cruz, R. C., & Silva, S. R. (2011). Voids/Cement Ratio Controlling Tensile Strength of Cement-Treated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1126–1131. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000524](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000524)
- Consoli, N. C., & Foppa, D. (2014). Porosity/Cement Ratio Controlling Initial Bulk Modulus and Incremental Yield Stress of an Artificially Cemented Soil Cured Under Stress. *Géotechnique Letters*, 4(1), 22–26. <https://doi.org/10.1680/geolett.13.00081>
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., & Heineck, K. S. (2007). Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 197–205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:2(197))
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2013). *Principles of Geotechnical Engineering*, 8th Edition.
- Hariyanto, & Jatmiko, S. (2021). Pengaruh Penggunaan Semen sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Lunak di Daerah Grobogan Purwodadi. *Jurnal Ilmiah Teknosains*, 7(1/Mei), 44–51. <https://doi.org/10.26877/jitek.v7i1/Mei.8666>
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, 3rd edition.