

Perilaku Mekanikal Tanah Ekspansif yang Distabilisasi Semen-Zeolit

Elita Lovely Zevanya¹, Joice Elfrida Waani², Steeva Gaily Rondonuwu³

Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

Email: zevanyaelitaa@gmail.com, joice.waani@unsrat.ac.id,

steeva_rondonuwu@unsrat.ac.id

ABSTRAK

Daya dukung tanah dasar/*subgrade* sangat berpengaruh terhadap lapisan perkerasan jalan sebagai pemikul beban lalu lintas di atasnya. Tanah ekspansif adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume ketika kadar airnya berubah dan struktur tanah ekspansif sering menimbulkan permasalahan pada struktur di atasnya yang disebabkan oleh daya dukung yang relatif rendah dan perlu dilakukan stabilisasi. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki perilaku mekanikal tanah dengan penambahan semen dan zeolit sebagai bahan stabilisasi. Tiga variasi material pengikat (10%, 12% dan 14%) dengan dua kandungan semen (5% dan 7%) dan berbagai persentase zeolit (3%, 5%, 7% dan 9%). Data dikumpulkan melalui beberapa pengujian yang dilakukan di laboratorium yaitu CBR, UCS, konsolidasi dan pemeriksaan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan semen menyebabkan peningkatan OMC dan MDD, sedangkan penambahan kandungan zeolit menyebabkan penurunan OMC dan peningkatan MDD. Pengujian CBR menunjukkan semakin tinggi kadar semen dan zeolit maka hasil juga meningkat baik rendam maupun tanpa rendam. Sedangkan hasil UCS juga meningkat seiring bertambahnya semen dan zeolite serta waktu pemeraman juga berpengaruh terhadap kekuatan tanah, dimana semakin lama waktu pemeraman maka nilai UCS lebih besar. Pada pengujian konsolidasi pada tanah yang mengandung semen-zeolit mengalami penurunan lebih kecil daripada tanah asli. Hasil pemeriksaan foto SEM juga menunjukkan perbedaan antara tanah asli dan tanah yang sudah distabilisasi semen-zeolit lebih rapat disebabkan oleh semen yang mampu mengikat butiran-butiran sehingga kurangnya rongga dalam benda uji.

Kata Kunci: tanah ekspansif, stabilisasi, semen, zeolit, perilaku mekanikal

ABSTRACT

The bearing capacity of the subgrade greatly influences the road pavement layer which carries the traffic load above it. Expansive soil is soil that can experience changes in volume when the water content changes and the structure of expansive soil often causes problems in the structure above it due to its relatively low bearing capacity and the need for stabilization. This research aims to investigate the mechanical behavior of soil with the addition of cement and zeolite as stabilizing materials. Three types of binder materials (10%, 12% and 14%) with two cement contents (5% and 7%) and various zeolite percentages (3%, 5%, 7% and 9%). Data was collected through several tests carried out in the laboratory, namely CBR, UCS, consolidation and SEM examination. The results showed that the addition of cement caused an increase in OMC and MDD, while the addition of zeolite content caused

a decrease in OMC and an increase in MDD. CBR testing shows that the higher the cement and zeolite content, the higher the results, both soaked and unsoaked. Meanwhile, the UCS yield also increases with the addition of cement and zeolite and the curing time also affects the strength of the soil, where the longer the curing time, the greater the UCS value. In the consolidation test, the soil containing cement-zeolite experienced a smaller decrease than the original soil. The results of the SEM photo examination also show that the difference between the original soil and the cement-zeolite stabilized soil is denser due to the cement being able to bind the grains so that there is a lack of voids in the test object.

Keywords: *expansive soil, stabilization, cement, zeolite, mechanical behavior*

PENDAHULUAN

Pembangunan jalan baru seringkali menghadapi tantangan teknis berupa daya dukung tanah dasar yang rendah (Dewi et al., 2024). Pada daerah-daerah dengan struktur tanah ekspansif seperti tanah lempung, untuk menjadi tanah dasar perkerasan jalan, dibutuhkan penguatan/stabilisasi tanah agar dapat memenuhi fungsinya sebagai lapis perkerasan yang memikul beban lalu lintas (Prawesthi & Santosa, 2017).

Tanah ekspansif adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume ketika kadar airnya berubah (Ismail et al., 2019). Struktur tanah ekspansif sering menimbulkan permasalahan pada struktur di atasnya yang disebabkan oleh masalah daya dukung yang relatif rendah dan perlu dilakukan stabilisasi terlebih dahulu. Stabilisasi tanah bertujuan untuk memperbaiki daya dukung tanah agar mampu memenuhi kebutuhan spesifikasi proyek (Kolias et al., 2005). Stabilisasi tanah ekspansif terbukti efektif dan efisien untuk meningkatkan kekuatan tanah dengan menggunakan campuran bahan kimia seperti *fly ash*, kapur, semen, zeolit dan material pozzolan lainnya. Namun demikian, untuk dapat mencapai target kekuatan metode stabilisasi bergantung pada jenis tanah, kondisi kelembaban konstruksi perkerasan jalan, juga dipengaruhi oleh sifat-sifat fisika dan kimia dari bahan stabilisasi yang digunakan (Mina et al., 2017).

Zeolit adalah mineral pozzolan alam dan salah satu komoditas mineral non logam yang memiliki sifat fisika dan kimia sebagai penyerap, penukar ion, penyaring molekul dan sebagai katalisator. Proses terbentuknya mineral ini adalah hasil sedimentasi debu vulkanik yang telah mengalami proses alterasi, diagenesis dan hidrotermal. Zeolit dapat dijumpai di banyak wilayah di Indonesia dengan wilayah rangkaian gunung api mulai dari Sumatera, Jawa, hingga Sulawesi (Ismawati, 2018; Kusdarto, 2008). Komposisi kimia dari zeolit terdiri dari silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) atau disebut juga alumino-silikat dengan ikatan alkali atau alkali tanah lemah serta memiliki struktur tetrahedra dimana masing-masing struktur memiliki empat atom yang dikelilingi kation. Pada kerangka inilah terdapat saluran yang biasa diisi kation secara bergantian dan mengakibatkan zeolit sangat efektif sebagai penukar kation (Setiawan, 2020).

Persyaratan yang dikeluarkan oleh Astm, (1985) menunjukkan bahwa material pozzolan alam dengan komposisi kimia SiO_2 , Fe_2O_3 , dan Al_2O_3 lebih besar dari 70% dapat digunakan sebagai mineral tambahan atau substitusi pada campuran semen yang berpengaruh positif dalam meningkatkan kinerja semen. Waani et al., (2014) melakukan penelitian mengenai campuran daur ulang perkerasan jalan lapis

pondasi (CTRB) yang distabilisasi dengan semen dan tras membuktikan bahwa substitusi pozzolan terhadap semen meningkatkan nilai CBR (*California Bearing Ratio*), ITS (*Indirect Tensile Strength*) dan UCS (*Unconfined Compressive Strength*) pada campuran CTRB (Rock, 2007). Bervariasinya komposisi unsur kimia dalam mineral pozzolan alam termasuk zeolit perlu diteliti lebih mendalam terutama jika digunakan sebagai substitusi material semen atau kapur dalam menstabilkan tanah ekspansif (Sheikh et al., 2022). Penelitian ini bermaksud menyelidiki pengaruh penambahan semen dan zeolit sebagai bahan stabilisasi bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan semen dan zeolit sebagai bahan stabilisasi terhadap sifat mekanikal tanah ekspansif dan mengetahui persentase semen-zeolit yang ditambahkan pada campuran tanah ekspansif (Wuisan et al., 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan semen dan zeolit sebagai bahan stabilisasi terhadap sifat mekanikal tanah ekspansif, serta untuk menentukan persentase semen-zeolit yang optimal untuk ditambahkan pada campuran tanah ekspansif. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan pengetahuan dan pemahaman tentang sifat-sifat mekanik tanah ekspansif serta pengaruh penambahan zeolit dan semen terhadap kinerja tanah ekspansif yang distabilisasi dengan semen-zeolit. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi praktisi konstruksi perkerasan jalan dalam menstabilisasi tanah ekspansif, serta berpotensi mengurangi penggunaan semen dalam industri konstruksi yang dapat berdampak negatif terhadap lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini juga dapat membantu meningkatkan pemanfaatan material zeolit dalam bidang konstruksi perkerasan jalan, khususnya untuk lapisan tanah dasar.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, dengan pengambilan sampel tanah dari Jalan Raya Manado-Tomohon, Kabupaten Minahasa. Tahapan penelitian meliputi studi pustaka, pengumpulan data, dan pengujian laboratorium. Material utama yang digunakan adalah tanah lempung, semen Portland Tipe II, dan zeolit halus, yang diuji dengan berbagai metode seperti pengujian kadar air, berat jenis, batas Atterberg, analisis saringan, dan hidrometer. Pengujian mekanis mencakup pemadatan untuk menentukan OMC dan MDD, uji CBR (soaked dan unsoaked), uji kuat tekan bebas (UCS) pada waktu pemeraman 7 dan 14 hari, serta uji konsolidasi untuk mengukur deformasi tanah. Pemeriksaan SEM juga dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan struktur tanah akibat stabilisasi. Variasi campuran melibatkan tanah dengan kadar semen 5% dan 7% dengan berbagai persentase zeolit yaitu 3%, 5%, 7% dan 9%. Hasil pengujian ini dianalisis untuk menilai efektivitas stabilisasi tanah dalam meningkatkan daya dukung, kekuatan tekan, dan kestabilan mekanis tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Material
Sifat Fisik Tanah

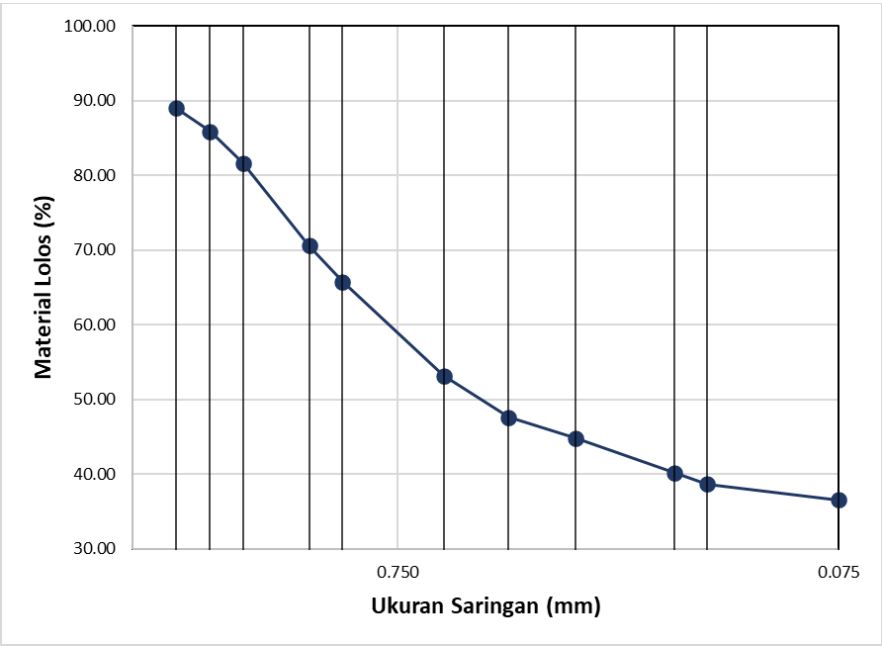
Jenis pemeriksaan yang dilakukan meliputi kadar air tanah, berat jenis tanah, batas-batas atterberg, analisa saringan serta hidrometer.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisik Tanah

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pengujian	Metode Pengujian
1	Kadar Air (<i>Water Content</i>)	8,33%	ASTM D 2216
2	Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)	2,247	ASTM D 854
3	Batas-batas Atterberg		ASTM D 4318
	- Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>)	78,012%	
	- Batas Plastis (<i>Plastic Limit</i>)	37,865%	
	- Indeks Plastis (<i>Plastic Index</i>)	40,146%	
4	Analisa Saringan	36,56% (Lolos saringan No. 200)	ASTM D 421
5	Hidrometer	46,59% (ukuran butiran ≤ 0.002 mm)	ASTM D 7928

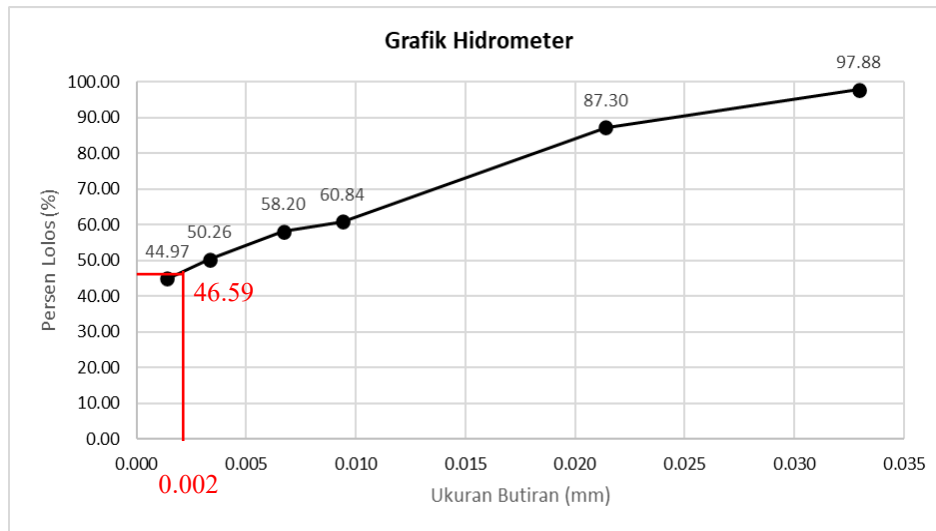
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Berdasarkan data hasil pengujian batas-batas Atterberg terhadap material tanah menunjukkan bahwa tanah tersebut memiliki sifat plastisitas tinggi dan pada sistem klasifikasi AASHTO, hasil pengujian analisa saringan menunjukkan tanah masuk dalam kelompok A-7-5 dengan jenis tanah lempung. Selanjutnya dapat juga dilihat pada hasil pengujian hidrometer (Gambar 2) dimana ukuran butiran < 0.002 mm adalah sebesar 46.59%.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Analisa Saringan Tanah

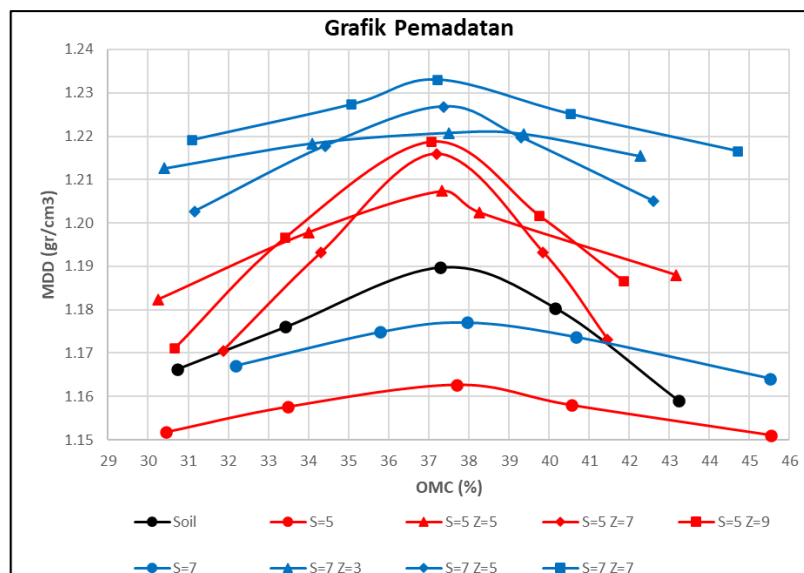
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 2. Grafik Analisa Hidrometer Tanah
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Percobaan Pemadatan Tanah

Parameter pada pemadatan tanah berupa kadar air optimum/OMC (*Optimum Moisture Content*) dan kepadatan kering maksimum/MDD (*Maximum Dry Density*). Percobaan pemadatan dilakukan pada setiap komposisi campuran untuk mendapatkan nilai kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum dari setiap variasi campuran dimana kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum yang diperoleh dari pengujian ini digunakan untuk pembuatan benda uji pada pengujian CBR, UCS dan konsolidasi. Berikut adalah hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3 dibawah ini.



Gambar 3. Hasil Pengujian Pemadatan Tanah

Perilaku Mekanikal Tanah Ekspansif yang Distabilisasi Semen-Zeolit

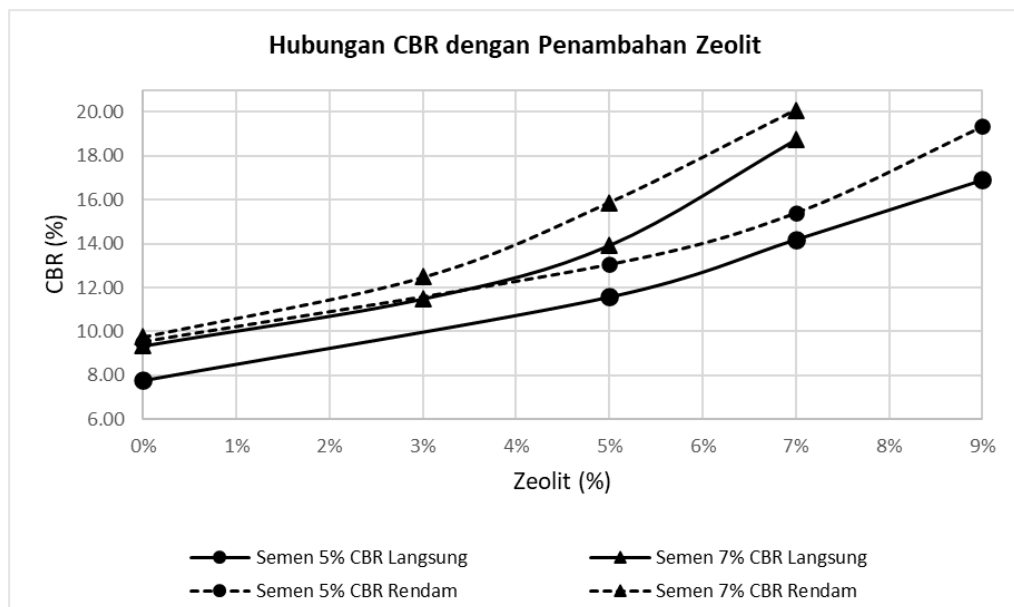
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Hasil percobaan pemadatan menunjukkan dengan seiring bertambahnya persentase zeolit nilai kadar air optimum yang didapat semakin mengalami penurunan dan nilai kadar air optimum terendah pada campuran dengan penambahan semen 5% + zeolit 9% dengan nilai sebesar 37.07%. Penurunan kadar air ini disebabkan karena penambahan semen dan zeolit yang mampu mengurangi kadar air optimum. Air yang dibutuhkan untuk tanah mencapai kepadatan maksimum berkurang karena rongga-rongga yang sebelumnya terisi oleh air sebagian terisi oleh semen dan zeolit. Maka dari itu semakin tinggi berat isi kering maka kadar air yang terdapat dalam tanah semakin berkurang karena adanya butiran atau gel dari semen yang terbentuk dari reaksi pozolan 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 (lihat Gambar 3).

Nilai kepadatan kering maksimum terbesar berada pada campuran dengan penambahan semen 7% + zeolit 7% sebesar 1.23 gram/cm³. Sehingga dapat dilihat bahwa campuran persentase zeolit dapat menyebabkan peningkatan kepadatan kering maksimum. Menurut Amelia, (2023) peningkatan ini terjadi karena bahan stabilisasi mengisi rongga-rongga pori pada tanah dan terjadi peningkatan jumlah partikel padat pada tanah sehingga mempengaruhi kepadatan kering maksimum sebelum dan sesudah distabilisasi.

Hasil Pemeriksaan Sifat Mekanis Material Pengujian CBR

Hasil pengujian CBR terhadap campuran tanah yang ditambahkan semen dan zeolit dapat dilihat pada Gambar 4.



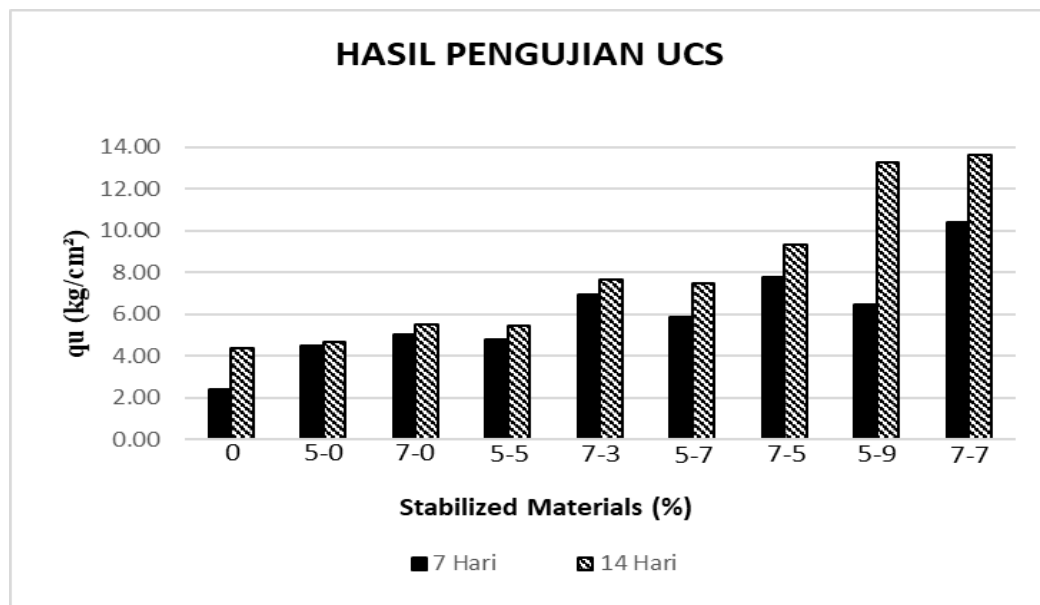
Gambar 4. Pengaruh Penambahan Zeolit terhadap Nilai CBR
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Hasil uji CBR menunjukkan bahwa nilai CBR terendah berada pada tanah asli yang direndam sebesar 1.14%, sedangkan nilai CBR tertinggi berada pada campuran tanah dengan semen 7% + zeolit 7% yang direndam sebesar 20.09%. Sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan Bina Marga dalam stabilisasi tanah dasar (2018) dapat dilihat pada Tabel 7 dimana campuran yang telah memenuhi spesifikasi adalah campuran yang memiliki nilai CBR diatas 15%. Hasil pengujian CBR pada Gambar 4 pengaruh material stabilisasi dimana semakin besarnya kadar semen dan zeolit mampu meningkatkan nilai CBR pada tanah. Hal ini disebabkan karena semen dan zeolit dapat mengikat tanah sehingga daya dukung tanah semakin besar.

Perbandingan antara percobaan tanpa rendam (*unsoaked*) dan percobaan yang direndam (*soaked*) juga diperhatikan dalam penelitian ini dimana hasil menunjukkan nilai CBR rendam cenderung lebih besar daripada CBR tanpa rendam. Adanya pengaruh sampel yang direndam selama 4 hari disimpulkan dapat mengikat tanah dengan semen selama proses perendaman.

Pengujian Kuat Tekan Bebas/UCS

Berikut hasil pengujian UCS dapat dilihat pada Gambar 5 dibawah.



Gambar 5. Hasil Pengujian UCS
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Hasil pengujian UCS menunjukkan adanya perbedaan pencapaian kekuatan antara setiap variasi dimana proporsi kadar semen dan zeolit yang berpengaruh sehingga membedakan perilaku campuran. Gambar 5 merupakan grafik hasil pengujian dimana nilai UCS maksimum untuk masing-masing kadar semen (5% dan 7%) berada di posisi yang sama yaitu pada material pengikat 14%. Hal ini menunjukkan peningkatan penggunaan semen dan zeolit mampu meningkatkan nilai kekuatan campuran (q_u). Waktu pemeraman sampel juga berpengaruh pada

peningkatan nilai kekuatan campuran karena sampel pada saat diperam memiliki waktu untuk mengeras yang menyebabkan adanya aktivitas reaksi pozzolan dan menghasilkan produk hidrasi sebagaimana terlihat pada Gambar 5, pada pengujian 14 hari nilai UCS meningkat dari pengujian 7 hari.

Gambar 7 menunjukkan bahwa kekuatan tanah yang distabilisasi dengan semen-zeolit jauh lebih tinggi daripada tanah tanpa stabilisasi atau tanah yang distabilisasi dengan semen saja. Zeolit dalam sampel yang distabilkan dengan semen mengubah struktur mikro sampel dengan mengisi porositas besar antara partikel tanah dan reaksi pozzolan dalam pasta semen (ShahriarKian et al., 2021)

Pengujian Konsolidasi

Pengujian konsolidasi ini bertujuan untuk mendapatkan perubahan nilai angka pori pada contoh tanah asli maupun contoh tanah dengan penambahan bahan stabilisator. Tanah ekspansif mempunyai butiran yang halus dan menyerap air yang tinggi sehingga akan sulit mengalirkan air dengan cepat. Penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi tanah karena memiliki partikel halus sehingga dapat mengisi pori-pori tanah dan berfungsi sebagai bahan pengikat yang kuat maka dapat mengurangi penyerapan air.

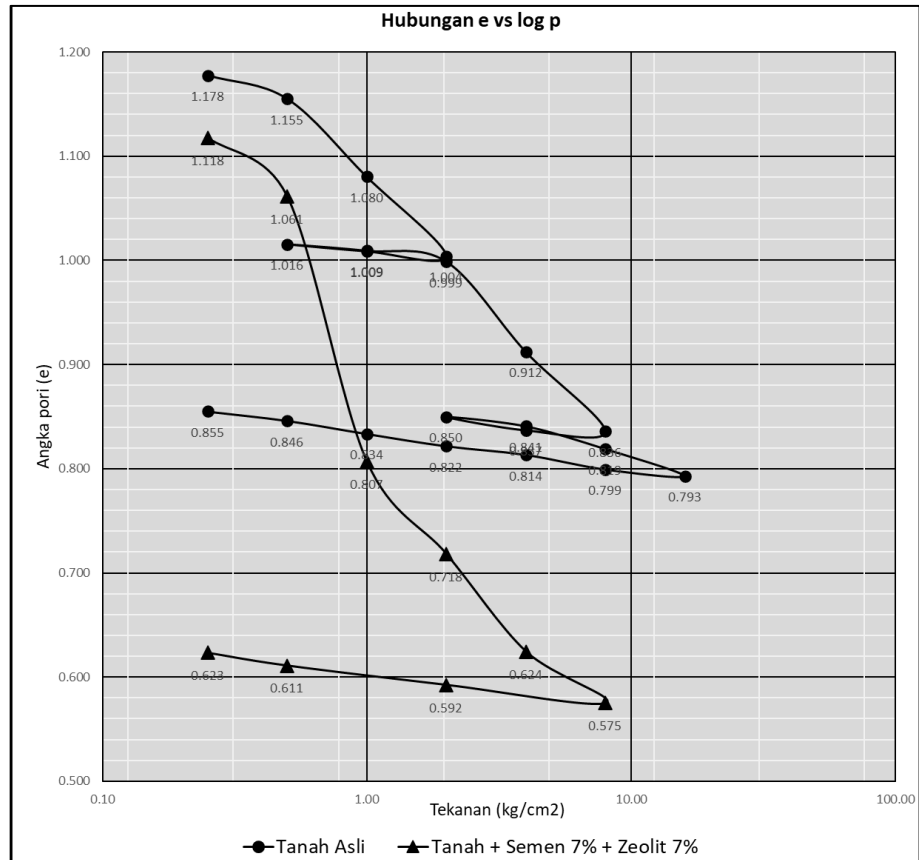
Pengujian konsolidasi hanya dibuat 2 (dua) percobaan dengan komposisi campuran hasil CBR tertinggi dan terendah dari penelitian ini, yaitu tanah asli tanpa bahan stabilisasi dan tanah dengan campuran semen 7% + zeolit 7%.

Tabel 2. Hasil Pengujian Konsolidasi

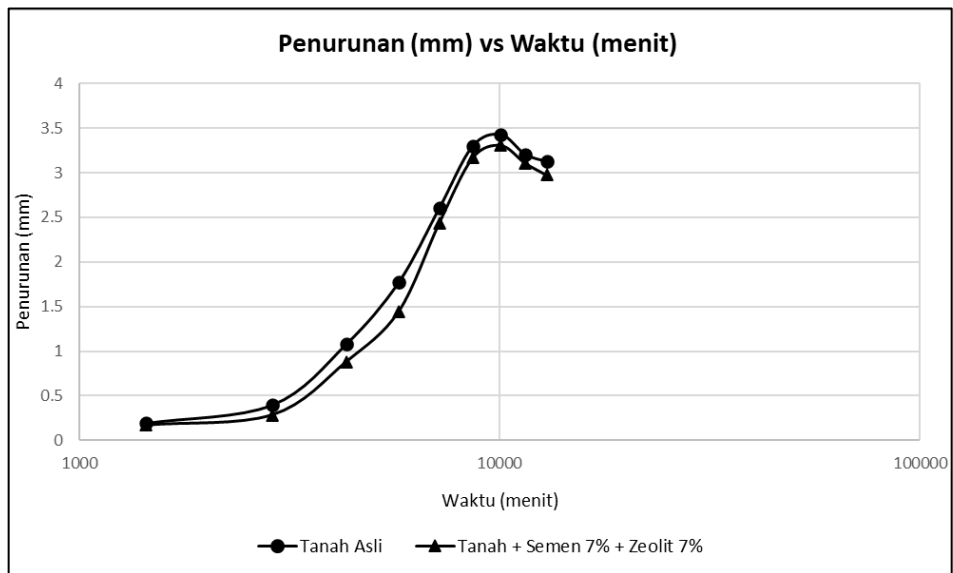
Sampel	Indeks Pemampatan, Cc	Koefisien Konsolidasi,	Koefisien Muai Cs
		Cv (cm ² /menit)	
Tanah Asli	0.166	0.0107	0.0343
Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%	0.087	0.0120	0.0326

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Penambahan setiap beban pada pengujian konsolidasi dilakukan setiap 24 jam. Dari pengujian ini didapatkan kurva hubungan angka pori dengan tekanan dan kurva hubungan penurunan terhadap waktu dimana hasil pengujian didapatkan parameter konsolidasi tanah seperti nilai indeks pemampatan (Cc), koefisien konsolidasi (Cv) dan koefisien muai (Cs) yang tertera pada Tabel 2. Dari hasil pengujian konsolidasi, dapat dilihat grafik pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan adanya perbedaan antara sampel tanah asli dan sampel tanah yang mengandung semen dan zeolit.



Gambar 6. Grafik e vs Log P
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 7. Grafik Penurunan vs Waktu
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Perilaku Mekanikal Tanah Ekspansif yang Distabilisasi Semen-Zeolit

Grafik hubungan antara angka pori (e) dan tekanan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa tanah asli memiliki angka pori lebih besar artinya tanah asli lebih mudah terkompresi ketika diberikan beban sedangkan tanah yang distabilisasi semen mengisi ruang kosong antara partikel tanah sehingga lebih rapat dan angka pori lebih kecil. Seiring bertambahnya waktu dan pembebanan, tanah asli mengalami penurunan yang lebih besar daripada tanah dengan campuran yang distabilisasi (lihat Gambar 7) dikarenakan semen dan zeolit yang berperan mengisi rongga yang ada dalam tanah sehingga mengurangi kemampuan tanah untuk mengalami deformasi (Gunawan et al., 2018).

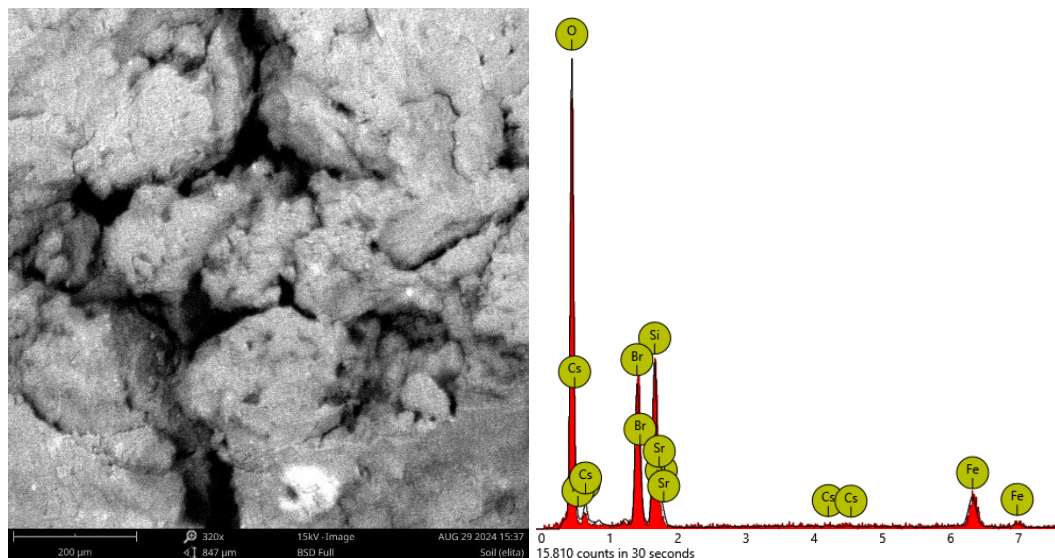
Pemeriksaan SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Pemeriksaan SEM bertujuan untuk mempelajari variasi mikropori dan morfologi campuran tanah yang berbeda (Abdallah et al., 2023). Benda uji UCS yang pecah dikeringkan untuk menyiapkan benda uji. Selain itu tujuan dari pengujian juga adalah untuk mengetahui komposisi kimia campuran tanah, seperti yang ditunjukkan Gambar 8 tanah asli memiliki struktur putus-putus dan lebih banyak rongga karena kurangnya proses hidrasi. Sedangkan Gambar 9 tanah yang telah dicampur bahan stabilisasi lebih rapat dibandingkan sampel tanah asli. Dalam proses stabilisasi ini terjadi reaksi pozolanik antara semen-zeolit dan tanah membentuk kalsium silikat hidrat (CSH) yang memperkuat ikatan antar partikel dan mengurangi ruang pori (Abu-Farsakh et al., 2015).

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan SEM

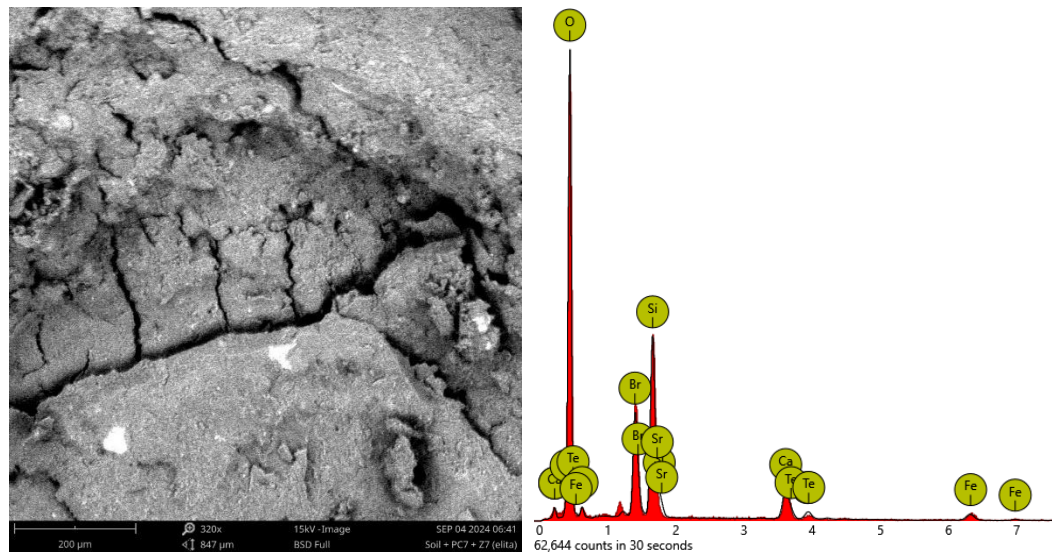
Sampel	O (%)	Si (%)	Br (%)	Sr (%)	Fe (%)	Dy (%)	Ti (%)
Tanah Asli	77.16	11.78	7.08	2.15	1.83	-	-
Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%	73.33	3.98	2.58	-	11.30	6.20	2.61

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 8. Hasil SEM Tanah Asli

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 9. Hasil SEM Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, hasil percobaan pemadatan menunjukkan bahwa $W_{Optimum}$ dan γ_d lebih besar pada kadar semen 7% dari kadar semen 5%, sedangkan semakin besar zeolit mengakibatkan penurunan $W_{Optimum}$ dan γ_d meningkat. Hasil pengujian CBR cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar semen dan zeolit baik uji CBR langsung maupun CBR rendam. Pengujian CBR rendam memiliki hasil lebih besar daripada CBR tanpa rendam, hal ini disebabkan karena adanya perendaman dengan air yang membuat semen dan zeolit dapat mengikat tanah sehingga daya dukung tanah meningkat. Hasil pengujian UCS juga meningkat seiring bertambahnya kadar semen dan zeolit. Nilai UCS maksimum untuk masing-masing kadar semen (5% dan 7%) berada di posisi yang sama yaitu pada material pengikat 14%. Hal ini menunjukkan peningkatan penggunaan semen dan zeolit mampu meningkatkan nilai kekuatan campuran (q_u). Waktu pemeraman sampel juga berpengaruh pada peningkatan nilai kekuatan campuran karena sampel pada saat diperam memiliki waktu untuk mengeras yang menyebabkan adanya aktivitas reaksi pozzolan dan menghasilkan produk hidrasi. Hasil pengujian konsolidasi menunjukkan tanah asli memiliki angka pori lebih besar artinya tanah asli lebih mudah terkompresi ketika diberikan beban sedangkan tanah yang distabilisasi semen-zeolit mengisi ruang kosong antara partikel tanah sehingga lebih rapat dan angka pori lebih kecil. Seiring bertambahnya waktu dan pembebanan, tanah dengan campuran mengalami penurunan yang lebih kecil daripada tanah asli dikarenakan semen dan zeolit yang berperan mengisi rongga yang ada dalam tanah sehingga mengurangi kemampuan tanah untuk mengalami deformasi. Hasil pemeriksaan SEM juga menunjukkan hal yang sama yaitu pengaruh penambahan semen dan zeolit membuat sampel tanah menjadi lebih rapat atau porositas rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdallah, H. M., Rabab'ah, S. R., Taamneh, M. M., Taamneh, M. O., & Hanandeh, S. (2023). Effect of zeolitic tuff on strength, resilient modulus, and permanent strain of lime-stabilized expansive subgrade soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(5), 4023081.
- Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., & Chen, Q. (2015). Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 55(3), 504–516.
- Amelia, D. T. (2023). *Pengaruh Substitusi Pasir Zeolit Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas Tanah Lempung*. Universitas Andalas.
- Astm, C. (1985). Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. *ASTM, Philadelphia, ASTM C*, 618–685.
- Dewi, R. A. P. K., Robinson, P., Puspitarini, R. C., Maksin, M., Putri, R. Y., Hidayati, N., & Fitrianti, D. (2024). Relevansi Pembangunan Berkelanjutan dengan Risiko. *PERSPEKTIF*, 13(3), 767–784.
- Gunawan, W. N., Manoppo, F., & Sarajar, A. N. (2018). Analisis Stabilitas Tanah rawa Terhadap Embankment Jalan Tol Manado Bitung dengan Menggunakan semen yang Dipadukan dengan Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 6(3), 189–198.
- Ismail, A. I. M., Awad, S. A., & Mwafy, M. A. G. (2019). The utilization of electric arc furnace slag in soil improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 401–411.
- Ismawati, R. (2018). Zeolite: Structure and potential in agriculture. *Jurnal Pena Sains*, 5(1).
- Khairunisa, C., Triyanto, D., & Nirmala, I. (2018). Implementasi Sistem Pengendalian Pemupukan dan Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis Arduino Mega 2560 Dengan Antarmuka Website. *Coding Jurnal Komputer Dan Aplikasi*, 6(3).
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., & Karahalios, A. (2005). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 301–313.
- Kusdarto, K. (2008). Potency of zeolite in Indonesia. *Jurnal Zeolit Indonesia*, 7(2), 78–87.
- Mina, E., Kusuma, R. I., & Ridwan, J. (2017). Stabilisasi tanah lempung menggunakan pasir laut dan pengaruhnya terhadap nilai kuat tekan bebas (Studi Kasus: Jalan Mangkualam Kecamatan Cimanggu–Banten). *Fondasi Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 13–23.
- Prawesthi, W. A., & Santosa, L. P. (2017). Stabilization of the Shear Strength of Clay Soil with Limestone Powder. *International Conference on Coastal and Delta Areas*, 3, 549–556.
- Rock, A. C. D.-18 on S. and. (2007). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 Ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³))* 1. ASTM international.
- Setiawan, A. R. (2020). Pembelajaran tematik berorientasi literasi saintifik. *Jurnal Basicedu*, 4(1), 51–69.

- ShahriarKian, M., Kabiri, S., & Bayat, M. (2021). Utilization of zeolite to improve the behavior of cement-stabilized soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(2), 35.
- Sheikh, A., Akbari, M., & Shafabakhsh, G. (2022). Laboratory study of the effect of zeolite and cement compound on the unconfined compressive strength of a stabilized base layer of road pavement. *Materials*, 15(22), 7981.
- Waani, J. E., RW, S. P., & Setiadji, B. H. (2014). Influence of Natural Pozzolan on Porosity-Cementitious Materials Ratio in Controlling the Strength of Cement Treated Recycled Base Pavement Mixtures. *International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)*, 4–11.
- Wuisan, I. R., Ticoh, J. H., & Rondonuwu, S. G. (2021). Stabilisasi Tanah Pasir Berlempung Menggunakan Campuran Kapur Dan Garam Dapur Terhadap Nilai CBR. *TEKNO*, 19(77).