

Pengaruh Penambahan Zeolit Pada Karakteristik Geoteknik Tanah Ekspansif Yang Distabilisasi Semen

Fitriyanti Kaharu, Joice Elfrida Waani, Oktovian Berty Alexander Sompie

Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

Email: kaharufit@gmail.com, joice.waani@unsrat.ac.id, bsompie@yahoo.com

ABSTRAK

Sub grade dikenal sebagai tanah dasar yang merupakan komponen penting dari struktur perkerasan jalan. Oleh karena itu, tanah dasar harus mempunyai daya dukung tanah yang kuat agar dapat memikul beban di atasnya. Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang memiliki potensi untuk mengalami perubahan volume yang signifikan ketika terjadi fluktuasi kadar air dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki karakteristik geoteknik dari tanah lempung yang bersifat ekspansif. Pengujian yang dilakukan yaitu sifat-fisik tanah, pemadatan, CBR, UCS, konsolidasi konvensional dan konsolidasi cepat. Material pengikat yaitu (10%, 12% dan 14%), dengan kandungan semen (5% dan 7%) dan persentase zeolit (3%, 5%, 7% dan 9%). Dan dilanjutkan dengan menganalisis persentase semen-zeolit yang dapat ditambahkan pada campuran tanah lempung ekspansif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin bertambahnya zeolit maka persentase zeolit pada nilai OMC naik dan nilai MDD terbesar terdapat pada campuran semen 7% + zeolit 5% dengan nilai 1,28 gram/cm³. Hasil CBR rendam memiliki nilai lebih tinggi dari pada CBR tanpa rendam. Pengujian UCS selama 14 hari diperam nilainya lebih besar dibandingkan dengan UCS selama 7 hari diperam. Pengujian konsolidasi menunjukkan tanah + bentonit lebih cepat terkompresi dibandingkan dengan variasi yang lain. Pemeriksaan SEM-EDS menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan semen dan zeolit dapat membuat sampel menjadi agak rapat atau minimnya porositas. Dengan penambahan semen-zeolit pada tanah ekspansif terbukti memperbaiki karakteristik geoteknik dari tanah lempung. Diharapkan penelitian selanjutnya dilanjutkan dengan pengujian modulus resilien, deformasi permanen dan UCS 21 hari.

Kata Kunci: Tanah Ekspansif, Stabilisasi, Semen, Zeolit, Karakteristik Geoteknik

ABSTRACT

Sub grade is known as the base soil which is an important component of the road pavement structure. Therefore, the base soil must have strong soil bearing capacity to be able to bear the load above it. Expansive clay is a type of soil that has the potential to experience significant volume changes when there are fluctuations in water content in the soil. This study aims to improve the geotechnical characteristics of expansive clay soil. The tests carried out were soil physical properties, compaction, CBR, UCS, conventional consolidation and rapid consolidation. The binding material is (10%, 12% and 14%), with cement content (5% and 7%) and zeolite percentage (3%, 5%, 7% and 9%). And continued by analyzing the percentage of cement-zeolite that can be added to the expansive clay soil mixture. The test results show that as the zeolite content increases, the percentage of zeolite in the OMC value increases and the largest MDD value is found in the mixture of 7% cement + 5% zeolite with a value of 1.28 grams/cm³. The results of soaked CBR have higher values than CBR without soaking. Soaked CBR has a higher value than unsoaked CBR. The value of UCS testing for 14 days of immersion is greater than that of UCS for 7 days of immersion. Consolidation tests show that soil + bentonite compresses faster than other variations. SEM-EDS examination shows that the addition of cement and zeolite can make the sample somewhat denser or have minimal porosity.

The addition of cement-zeolite to expansive soil has been proven to improve the geotechnical characteristics of clay soil. It is hoped that further research will be continued by testing the resilient modulus, permanent deformation and 21-day UCS.

Keywords: *Expansive Soil, Stabilization, Cement, Zeolite, Geotechnical Characteristics*

PENDAHULUAN

Tanah dasar (*sub grade*) merupakan struktur perkerasan jalan raya pada lapisan paling dasar (Simanjuntak et al., 2017). *Sub grade* adalah bagian penting dalam struktur perkerasan jalan yaitu sebagai perletakan dari struktur perkerasan secara keseluruhan, oleh karena itu keawetan dan kekuatan *sub grade* menjadi perhatian dalam konstruksi perkerasan jalan (Badaron, 2020). Dalam konstruksi jalan, kualitas tanah asli sebagai bahan dasar yang sangat memengaruhi kekuatan jalan. Jika kualitas tanah asli rendah dalam hal daya dukung tanah (kepadatan kering, dan CBR), maka konstruksi jalan akan cepat rusak. Daya dukung tanah dasar merupakan salah satu komponen yang sangat penting untuk kinerja dan struktur perkerasan jalan (Amran, 2016; Rafii, 2018; Ukiman, 2016).

Struktur tanah ekspansif memiliki stabilitas struktural yang rendah sehingga tidak dapat berfungsi sebagai perletakan struktur perkerasan jalan dan tidak mampu atau tidak stabil dalam memikul beban lalu-lintas (Arifin, 2021). Untuk dapat dijadikan perletakan dari lapis pondasi bawah dari suatu perkerasan jalan, tanah ekspansif seperti tanah lempung perlu distabilisasi, antara lain dengan cara mencampur tanah lempung dengan bahan kimia atau dengan pemadatan mekanik (Nurrosied, 2016). Beberapa material yang dapat digunakan sebagai bahan untuk stabilisasi tanah adalah, seperti semen, kapur, zeolit, dan pozzolan alam atau pozzolan buatan lainnya (Eyo et al., 2020; Muhammad et al., 2022). Material pozzolan alam yang dapat digunakan antara lain tras dan zeolit yang mengandung kalsium dan silika yang tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan tambahan atau substitusi pada campuran semen, begitupun dengan penambahan semen dapat menghasilkan pengerasan yang lebih baik, dikarenakan material tidak bisa bekerja sendiri kalau tidak ada tambahan semen. Kombinasi kedua bahan pengikat ini dapat meningkatkan kekuatan awal dan akhir pada material tanah yang distabilkan (Kolias et al., 2005; Zimar et al., 2022). Beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya, yaitu tentang pengaruh penambahan pozzolan alam terhadap sifat tanah ekspansif yang ditambahkan kapur dan semen, hasilnya menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan dari kekuatan dan kestabilan terhadap penelitian tersebut (Chenarboni et al., 2021). Demikian pula dengan penelitian yang dilakukan oleh para peneliti (Hagi et al., 2019; Sompie et al., 2018; Stavridakis et al., 2006).

Zeolit ialah mineral pozzolan alam yang bersifat non logam dan memiliki sifat-sifat fisika dan kimia, yang berperan sebagai katalisator, penukar ion, penyaring molekul, serta adanya kemampuan absorpsi yang tinggi (Abdallah et al., 2023). Zeolit ini banyak ditemui di wilayah Indonesia terutama di wilayah gunung berapi (Bujung et al., 2019). Zeolit merupakan aluminosilikat mikropori kristal yang komposisi kimianya terdiri dari SiO₄ dan AlO₄ tetrahedra, yang dimana tergabung dalam berbagai susunan

pada pembagian atom oksigen (Hadi et al., 2023). Maka dari itu dapat menghasilkan struktur terbuka dengan saluran dan sangkar yang bersilangan, dan ditempati oleh molekul tamu (biasanya air) dan kerangka ekstra, kation basa, atau alkali tanah yang lemah ikatannya, sehingga dapat menyeimbangkan muatan negatif AIO₄ tetrahedra (Liguori et al., 2019; Ragang et al., 2023; Saputra et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tanah ekspansif yang distabilisasi dengan semen dan zeolit guna memperbaiki karakteristik geotekniknya. Berdasarkan rumusan masalah, penelitian ini akan mengevaluasi pengaruh stabilisasi dengan semen dan zeolit terhadap perilaku tanah ekspansif melalui pengujian CBR (*Unsoaked* dan *Soaked*), UCS (*Unconfined Compressive Strength*), dan Konsolidasi (Konsolidasi Konvensional dan Konsolidasi Cepat). Material tanah yang digunakan yaitu dari Pineleng, Sulawesi Utara, dengan semen Portland Tipe II (PCC) dan zeolit halus berukuran $\leq 0,075$ mm (lolos saringan No. 200), yang diuji dalam skala laboratorium di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Sam Ratulangi. Tujuan penelitian ini adalah memperbaiki karakteristik geoteknik tanah lempung ekspansif serta menentukan persentase optimal semen-zeolit dalam campuran tanah tersebut. Penelitian ini memberikan manfaat berupa pemahaman mengenai pengaruh zeolit dalam stabilisasi tanah ekspansif, pengurangan penggunaan semen demi mendukung konstruksi yang lebih ramah lingkungan, serta sebagai referensi bagi praktisi dalam konstruksi perkerasan jalan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil material tanah di Kecamatan Pineleng, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara, yang kemudian diuji di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi. Lokasi pengambilan material melibatkan lereng buatan yang digunakan untuk pembangunan perumahan. Studi pustaka dilakukan sebelum pengumpulan data, mencakup penentuan topik, pengumpulan referensi, penyusunan metodologi, survei lokasi, dan persiapan bahan penelitian seperti zeolit, semen, dan bentonit. Data dikumpulkan melalui berbagai pengujian di laboratorium, termasuk sifat fisik tanah (kadar air, analisa saringan, batas cair/plastis), pemadatan, CBR (*unsoaked* dan *soaked*), UCS (7 dan 14 hari), dan konsolidasi (konvensional dan cepat).

Tahapan penelitian meliputi persiapan alat dan bahan, pengujian sifat fisik tanah, uji pemadatan, pengujian CBR tanpa rendam dan rendam, UCS, konsolidasi, dan pemeriksaan SEM-EDS. Analisis data dilakukan untuk menghasilkan kesimpulan mengenai pengaruh stabilisasi tanah dengan semen-zeolit terhadap karakteristik geoteknik tanah ekspansif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sifat Fisik Material

1. Sifat Fisik Tanah

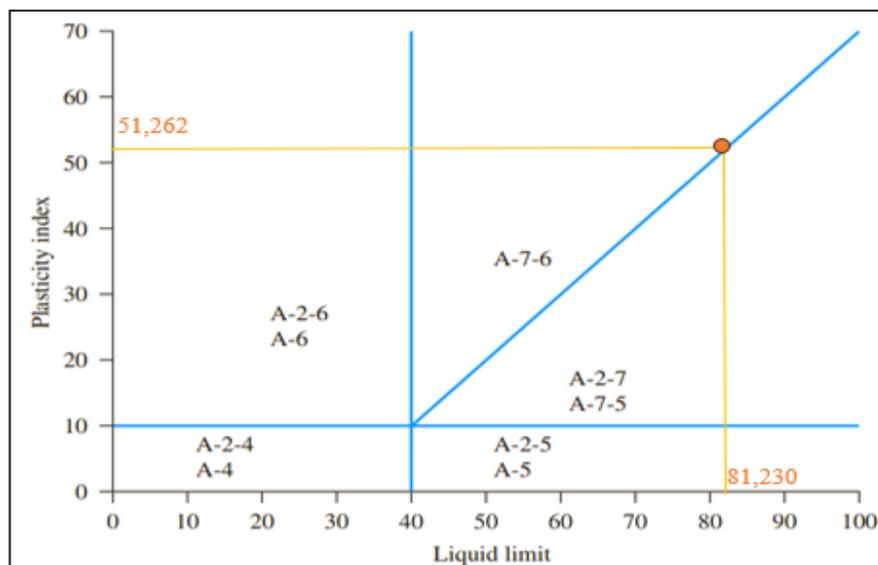
Jenis pengujian yang diuji yaitu kadar air tanah, berat jenis tanah, batas-batas atterberg, dan analisa saringan. Berikut hasil pengujian dari sifat tersebut terdapat pada tabel 1 hasil Pengujian Sifat Fisik Tanah.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sifat Fisik Tanah

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Metode Pengujian
1.	Kadar Air + Bentonite 15 % (<i>Water Content</i>)	3,91 %	ASTM D 2216
2.	Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)	2,247	ASTM D 854
3.	Batas-batas Atterberg + Bentonite 15 % Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>)	81,230 %	ASTM D 4318
	Batas Plastis (<i>Plastic Limit</i>)	29,968 %	
	Indeks Plastis (<i>Plastic Index</i>)	51,262 %	
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)

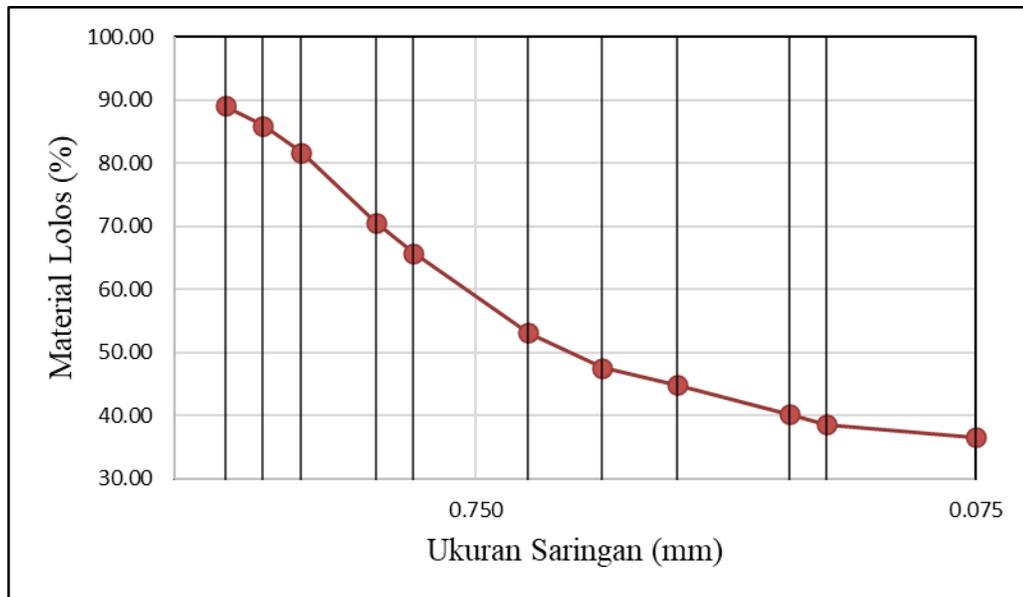
Berdasarkan data hasil pengujian sifat fisik tanah, pada pengujian batas-batas atterberg terhadap tanah + bentonit 15% menunjukkan bahwa memiliki sifat plastisitas yang tinggi (lihat tabel 1). Berikut ada juga hasil dari Klasifikasi Tanah menurut AASHTO berdasarkan Nilai Batas Cair dan Indeks Plastis terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO Berdasarkan Nilai Batas Cair dan Indeks Plastis

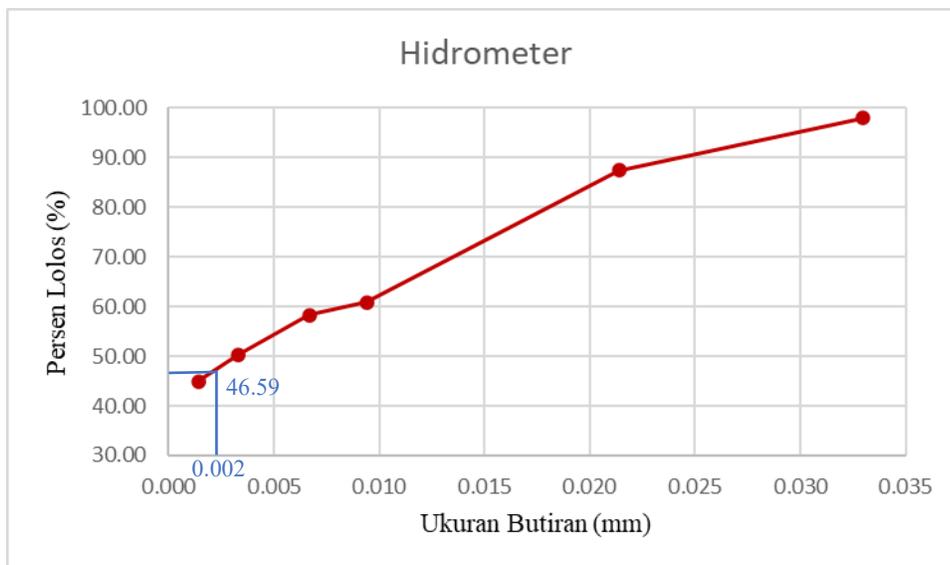
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Pada pengujian analisa saringan didapatkan hasil 36,56% yang lolos saringan No. 200. Sesuai standar klasifikasi AASTHO material tanah yang diklasifikasikan sebagai material A-7-5, yaitu syarat material yang lolos saringan No.200 > 36%.



Gambar 2. Grafik Pengujian Analisa Saringan
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Pada pengujian hidrometer didapatkan ukuran butiran yaitu < 0.002 mm dengan nilai 46,59 %. Berikut gambar grafik hasil pengujian pada Analisa hidrometer, bisa dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisa Hidrometer
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

B. Sifat Fisik Zeolit

Jenis pengujian sifat fisik dari material zeolit, yaitu pengujian berat jenis dan batas-batas atterberg. Berikut hasil dari pengujian tersebut terdapat pada Tabel 2 Hasil Pengujian Sifat Fisik Zeolit.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Fisik Zeolit

No.	Jenis Pemeriksaan	Hasil Pengujian	Metode Pengujian
1	Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i>)	2.174	ASTM D 854
2	Batas-batas Atterberg		ASTM D 4318
	- Batas Cair (<i>Liquid Limit</i>)	46,251 %	
	- Batas Plastis (<i>Plastic Limit</i>)	20,556 %	
	- Indeks Plastis (<i>Plastic Index</i>)	25,696 %	

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

C. Pengujian Pemadatan Tanah

Pengujian ini untuk melihat nilai OMC dan MDD pada setiap variasi komposisi campuran. Berikut hasil pengujian tersebut terdapat pada Tabel 3 Hasil Pengujian Pemadatan.

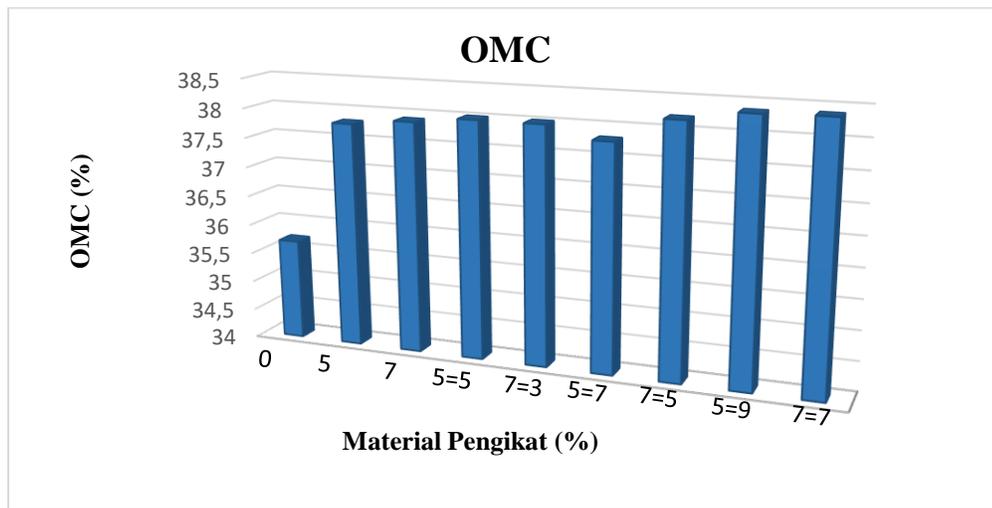
Tabel 3. Hasil Pengujian Pemadatan

Variasi	Tanah 85% + Bentonit 15%	Material Pengikat (%)	OMC (%)	MDD (gr/cm ³)	
A	100	Semen	0	35,70	1,202
		Zeolit	0		
B	100	Semen	5	37,80	1,213
		Zeolit	0		
C	100	Semen	7	37,90	1,215
		Zeolit	0		
D	100	Semen	5	38,00	1,220
		Zeolit	5		
E	100	Semen	7	38,00	1,223
		Zeolit	3		
F	100	Semen	5	37,80	1,222
		Zeolit	7		
G	100	Semen	7	38,20	1,228
		Zeolit	5		
H	100	Semen	5	38,36	1,230
		Zeolit	9		
I	100	Semen	7	38,38	1,233
		Zeolit	7		

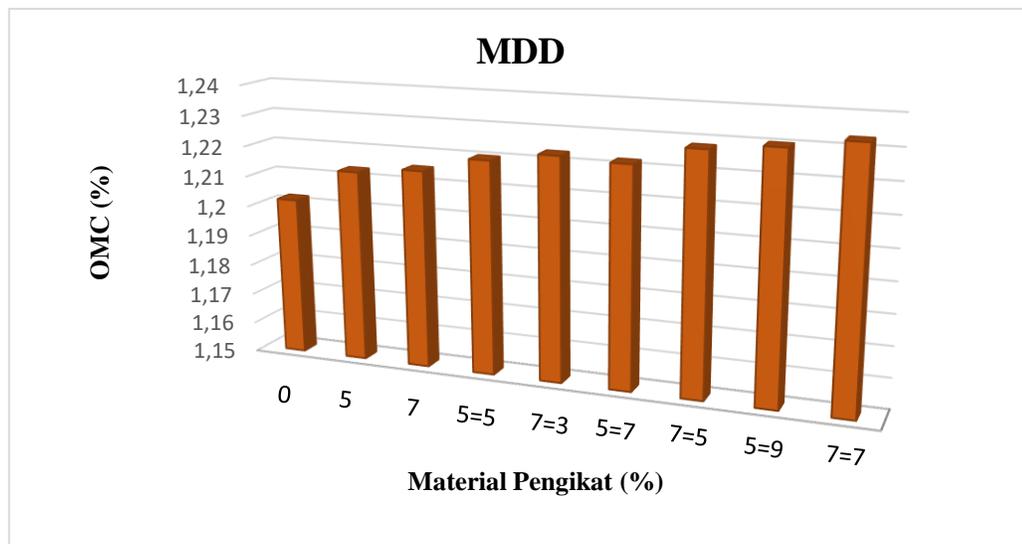
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Berdasarkan Tabel 3, maka didapatkan nilai OMC dan MDD pada tanah + bentonit adalah 35,70% dan 1,202 gram/cm³. Semakin bertambahnya zeolit maka persentase zeolit pada nilai kadar air optimum naik, akan tetapi mengalami penurunan pada campuran semen 5% + zeolit 7% dengan nilai 37,80%. Penyebab penurunan kadar air ini adalah adanya penambahan semen dan zeolit, hal ini bisa mengurangi kadar air optimum pada sampel.

Nilai MDD terbesar terdapat pada campuran semen 7% + zeolit 7% dengan nilai 1,233 gr/cm³. Berdasarkan hal ini maka dapat dilihat bahwa campuran pada persentase zeolit bisa menyebabkan peningkatan berat isi kering maksimum tanah. Berikut terdapat grafik pemadatan dari hasil semua variasi campuran, bisa dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik Hasil OMC (Optimum Moisture Content)
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 5. Grafik Hasil MDD (Maximum Dry Density)
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

D. Hasil Pengujian Sifat Mekanis Material

Pengujian yang akan diuji, yaitu pengujian CBR, UCS, dan konsolidasi, yang dilakukan di laboratorium. Hasil dari ketiga pengujian tersebut, bisa dilihat sebagai berikut :

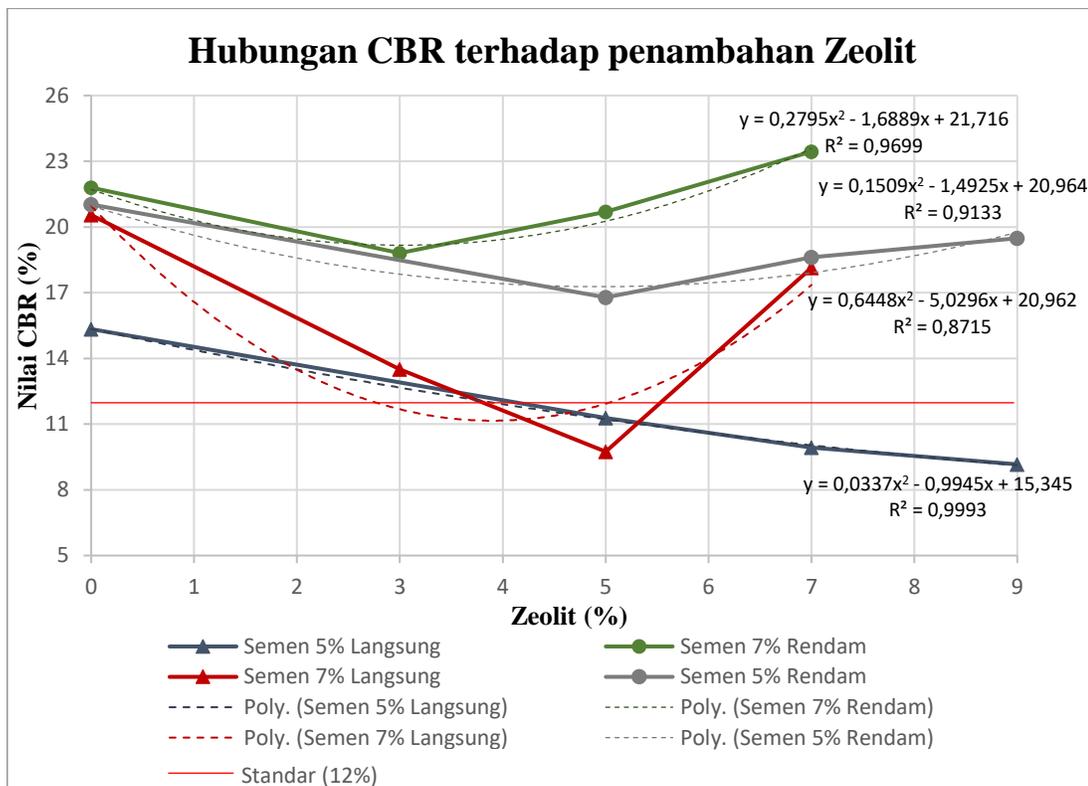
1. Pengujian CBR

Pengujian yang dilakukan ada 2 metode, yaitu CBR direndam (*soaked*) dan CBR tanpa rendam (*unsoaked*). Dan data yang dihasilkan merupakan data dari hasil nilai rata-rata terhadap dua benda uji pada tiap variasi komposisi campuran. Berikut hasil dari pengujian CBR, bisa dilihat pada Tabel 4 Hasil Pengujian CBR.

Tabel 4. Hasil Pengujian CBR

Variasi	Tanah 85% + Bentonite 15%	Material Pengikat (%)		CBR Langsung (<i>Unsoaked</i>) (%)	CBR Rendam (<i>Soaked</i>) (%)
A	100	0	Semen Zeolit 0	14,81	1,88
B	100	5	Semen Zeolit 0	15,34	21,03
C	100	7	Semen Zeolit 0	20,54	21,80
D	100	10	Semen Zeolit 5	11,28	16,78
E	100	10	Semen Zeolit 3	13,50	18,81
F	100	12	Semen Zeolit 7	9,93	18,62
G	100	12	Semen Zeolit 5	9,74	20,69
H	100	14	Semen Zeolit 9	9,16	19,84
I	100	14	Semen Zeolit 7	18,13	23,44

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 6. Pengaruh Zeolit terhadap CBR
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Pada hasil pengujian CBR ini menunjukkan bahwa nilai CBR terendah terdapat pada tanah + bentonite (rendam) dengan nilai 1,88%, sedangkan nilai CBR tertinggi terdapat pada variasi campuran tanah + bentonite + semen 7% + Zeomit 7% (rendam) dengan nilai 23,44%. Berdasarkan hasil pengujian CBR, pada campuran semen 5% + zeolit 5% dengan nilai CBR 16,78% dikatakan sudah memenuhi standar untuk stabilisasi tanah dasar, yang dimana standar tersebut yaitu nilai CBR = 12%.

Pada hasil pengujian CBR tanpa rendam (*unsoaked*) dan CBR rendam (*soaked*) ini mendapatkan perbandingan yang dimana hasil dari nilai CBR rendam cenderung lebih besar dibandingkan dengan CBR tanpa rendam, hal ini dikarenakan sampel yang direndam selama 4 hari berpengaruh dapat mengikat tanah dan semen selama proses perendaman berlangsung (Tulandi et al., 2022).

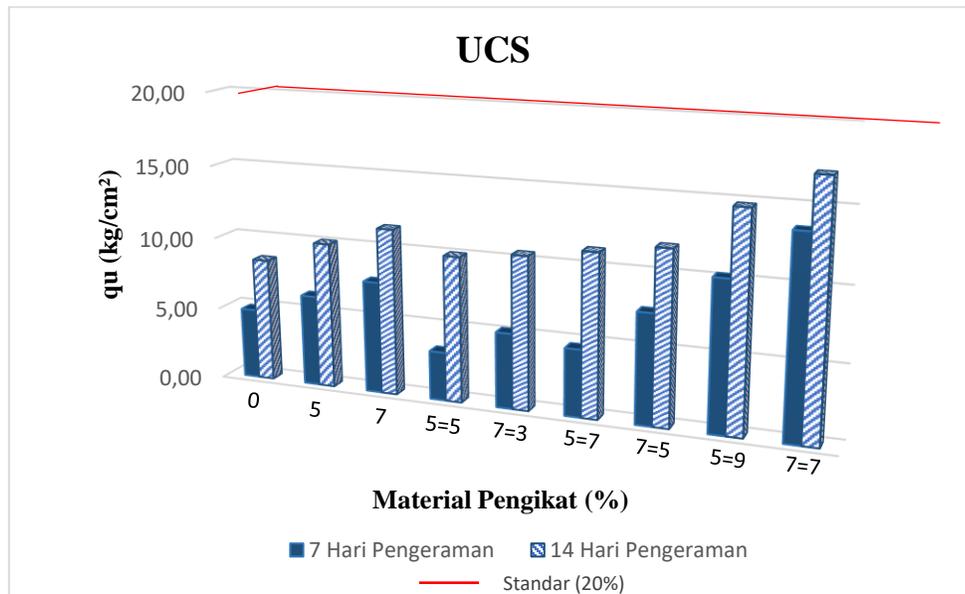
2. Hasil Pengujian UCS

Pengujian yang dilakukan ada 2 metode, yaitu UCS diperam selama 7 hari dan 14 hari. Data yang dihasilkan merupakan data dari hasil nilai rata-rata terhadap dua benda uji pada tiap variasi komposisi campuran. Berikut merupakan hasil dari pengujian UCS, bisa dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 7.

Tabel 5. Hasil Pengujian UCS

Variasi	Tanah 85% + Bentonite 15%	Material Pengikat (%)		UCS Pengeraman 7 Hari (kg/cm ²)	UCS Pengeraman 14 Hari (kg/cm ²)
A	100	0	Semen 0 Zeolit 0	4,85	8,48
B	100	5	Semen 5 Zeolit 0	6,27	10,04
C	100	7	Semen 7 Zeolit 0	7,71	11,44
D	100	10	Semen 5 Zeolit 5	3,35	9,99
E	100	10	Semen 7 Zeolit 3	5,17	10,48
F	100	12	Semen 5 Zeolit 7	4,62	11,14
G	100	12	Semen 7 Zeolit 5	7,54	11,80
H	100	14	Semen 5 Zeolit 9	10,22	14,74
I	100	14	Semen 7 Zeolit 7	13,56	17,02

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 7. Pengaruh Zeolit terhadap UCS

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Pada hasil pengujian UCS ini didapatkan hasil yang dimana selama 14 hari diperam nilainya lebih besar dibandingkan dengan UCS diperam selama 7 hari. Adapun selama 7 hari pemeraman menunjukkan bahwa nilai UCS semakin naik, akan tetapi nilai UCS menurun pada material pengikat 10 % dan mengalami kenaikan lagi

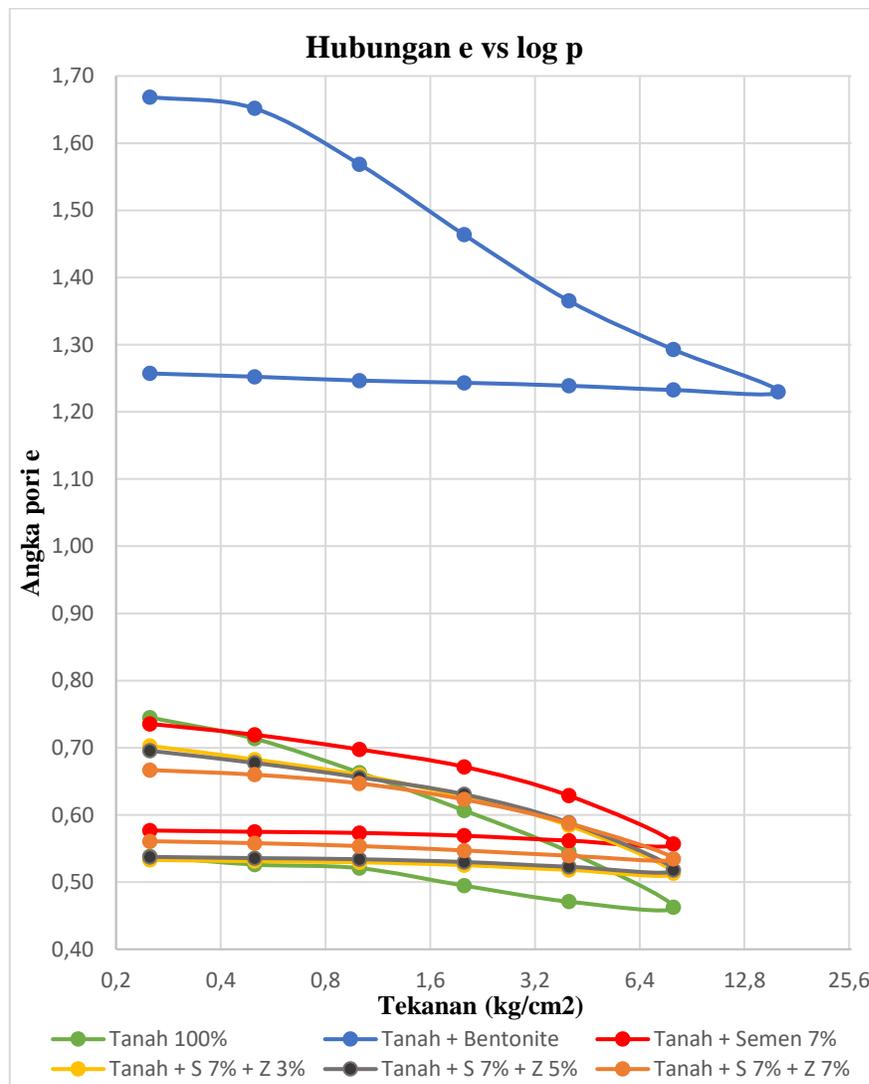
pada material pengikat 12 % (semen 7% + zeolit 5%). Sedangkan pada pengeringan 14 hari menunjukkan bahwa nilai UCS semakin naik, akan tetapi nilai UCS menurun pada material pengikat 10% (semen 5% + zeolit 5%) dan mulai mengalami kenaikan lagi pada material pengikat 10% (semen 7% + zeolit 3%).

3. Hasil Pengujian Konsolidasi

Pada pengujian konsolidasi ini, yang diuji hanya 6 (enam) variasi campuran. Variasi campuran yang diuji yaitu variasi Tanah 100%, Tanah + Bentonit, dan Tanah + semua kadar Semen 7%.

1. Konsolidasi Konvensional

Berikut hasil pengujian dari konsolidasi konvensional di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.



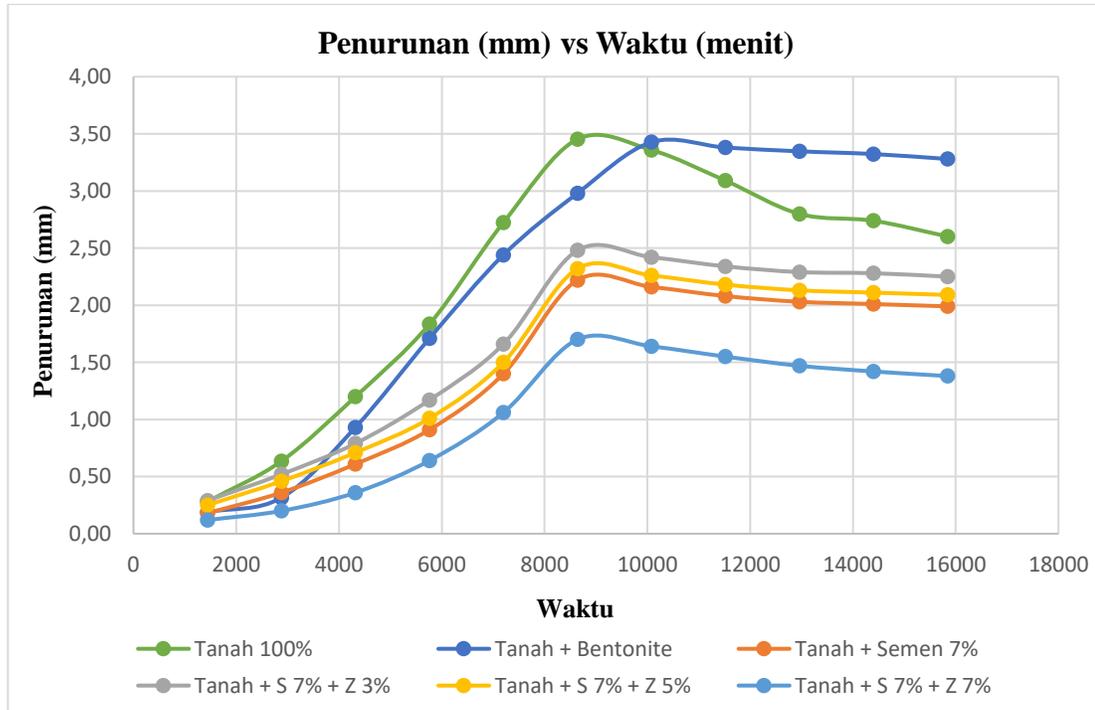
Gambar 8. Grafik e vs log P (konsolidasi konvensional)

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Tabel 6. Hasil Pengujian Konsolidasi Konvensional

Sampel	Indeks Pemampatan, Cc	Koefisien Konsolidasi, Cv (cm ² /menit)	Koefisien Muai, Cs
Tanah 100%	0.2749	0.0911	-
Tanah + Bentonite	0.2417	0.8906	0.0150
Tanah + Semen 7%	0.2385	3.2417	0.0131
Tanah + Semen 7% + Zeolit 3%	0.2353	2.8740	0.0130
Tanah + Semen 7% + Zeolit 5%	0.2339	3.5834	0.0129
Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%	0.1760	2.1054	0.0174

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



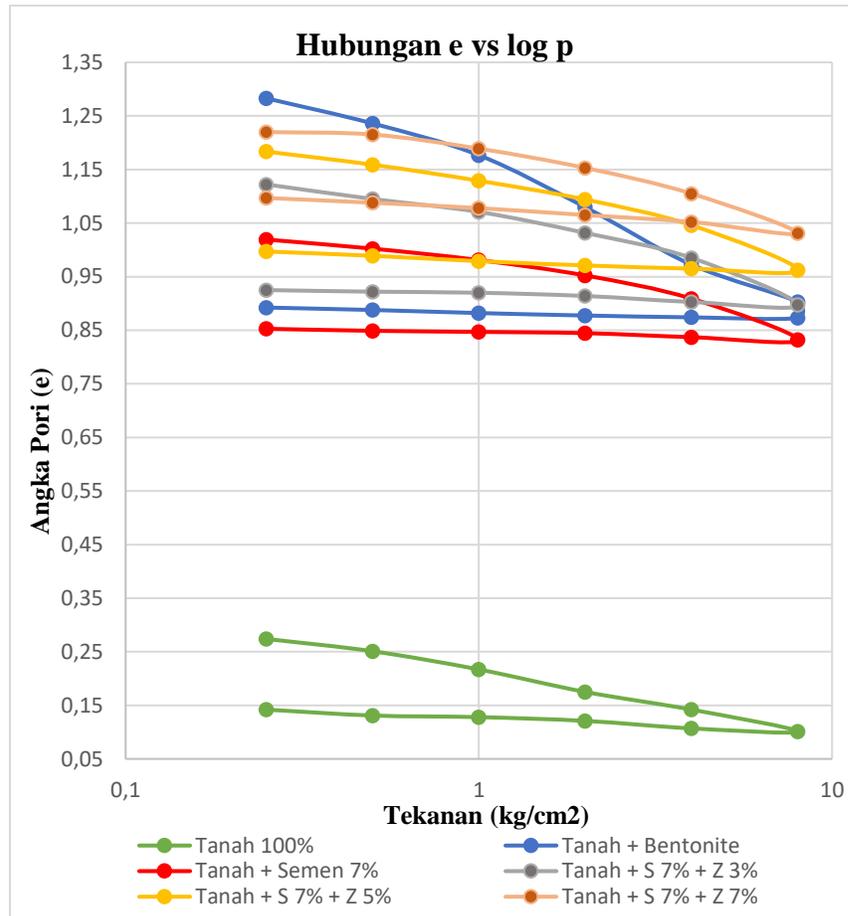
Gambar 9. Grafik Penurunan vs Waktu (konsolidasi konvensional)

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Berdasarkan grafik di atas, hubungan antara angka pori dan tekanan menunjukkan bahwa tanah + bentonit memiliki nilai yang lebih besar, yang artinya tanah + bentonit lebih cepat terkompresi dibandingkan dengan variasi yang lain. Sedangkan pada grafik penurunan dan waktu menunjukkan bahwa angka penurunan lebih besar terdapat pada tanah 100% dibandingkan dengan variasi tanah + bentonit menunjukkan nilai yang lebih rendah di karenakan bentonit memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi, hal ini dapat memperlambat proses konsolidasi.

2. Konsolidasi Cepat

Pada pengujian ini untuk melihat hasil dari perbandingan antara alat konsolidasi konvensional dan konsolidasi cepat. Pengujian ini dipersingkat 80 kali lebih cepat dengan menggunakan alat konsolidasi cepat (terganggung waktu yang di butuhkan pada saat pengujian). Berikut hasil pengujian konsolidasi cepat.



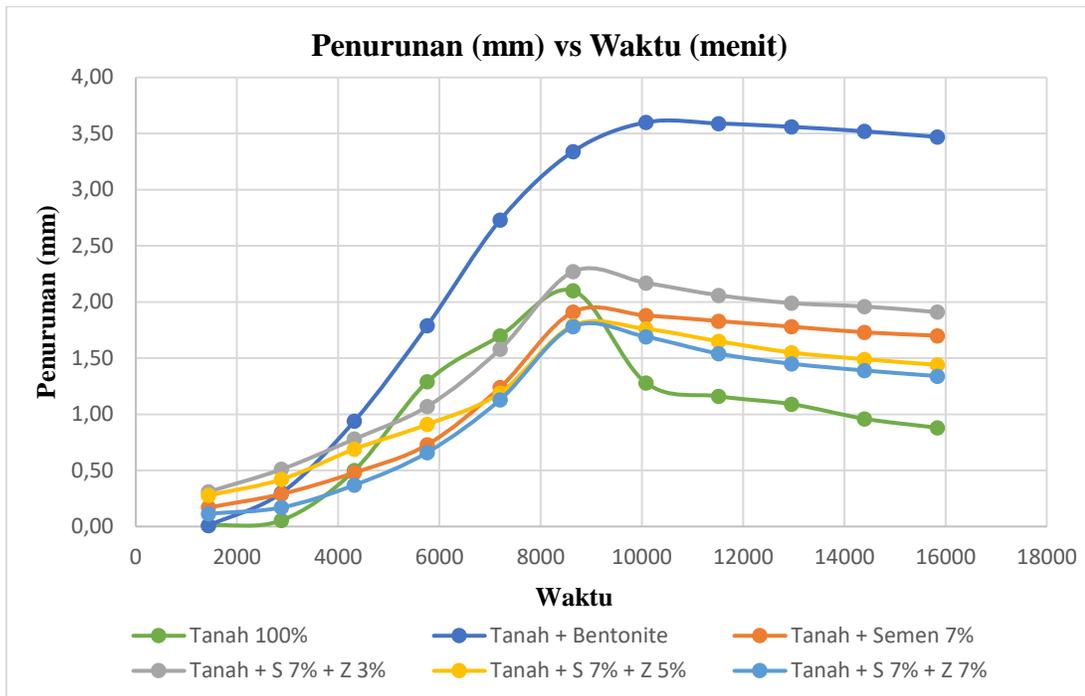
Gambar 10. Grafik e vs log P (konsolidasi cepat)

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Tabel 7. Hasil Pengujian Konsolidasi Cepat

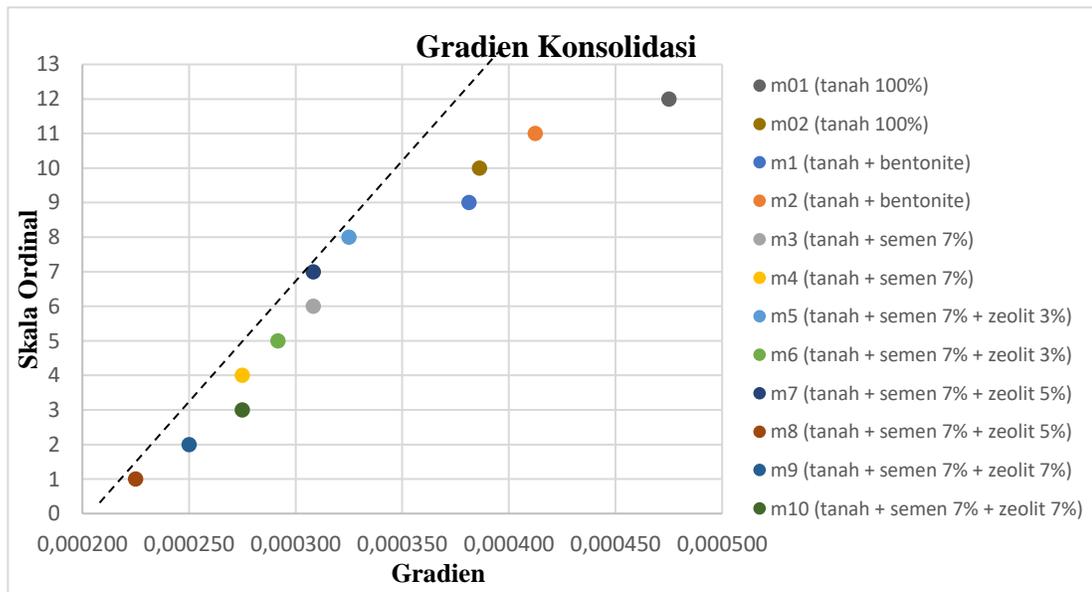
Sampel	Indeks Pemampatan, Cc	Koefisien Muai, Cs
Tanah 100%	0.1252	-
Tanah + Bentonite	0.2314	0.0129
Tanah + Semen 7%	0.2258	0.0142
Tanah + Semen 7% + Zeolit 3%	0.2247	0.0235
Tanah + Semen 7% + Zeolit 5%	0.2218	0.0259
Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%	0.2213	0.0300

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 11. Grafik Penurunan vs Waktu (konsolidasi cepat)
 (Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Berdasarkan grafik di atas, hubungan antara angka pori dan tekanan menunjukkan bahwa tanah + semen 7% + zeolit 7% memiliki nilai angka pori yang lebih besar dan lebih cepat terkompresi dibandingkan dengan variasi yang lain. Sedangkan pada grafik penurunan dan waktu menunjukkan bahwa angka penurunan lebih besar terdapat pada tanah + bentonit dibandingkan dengan variasi yang lain.

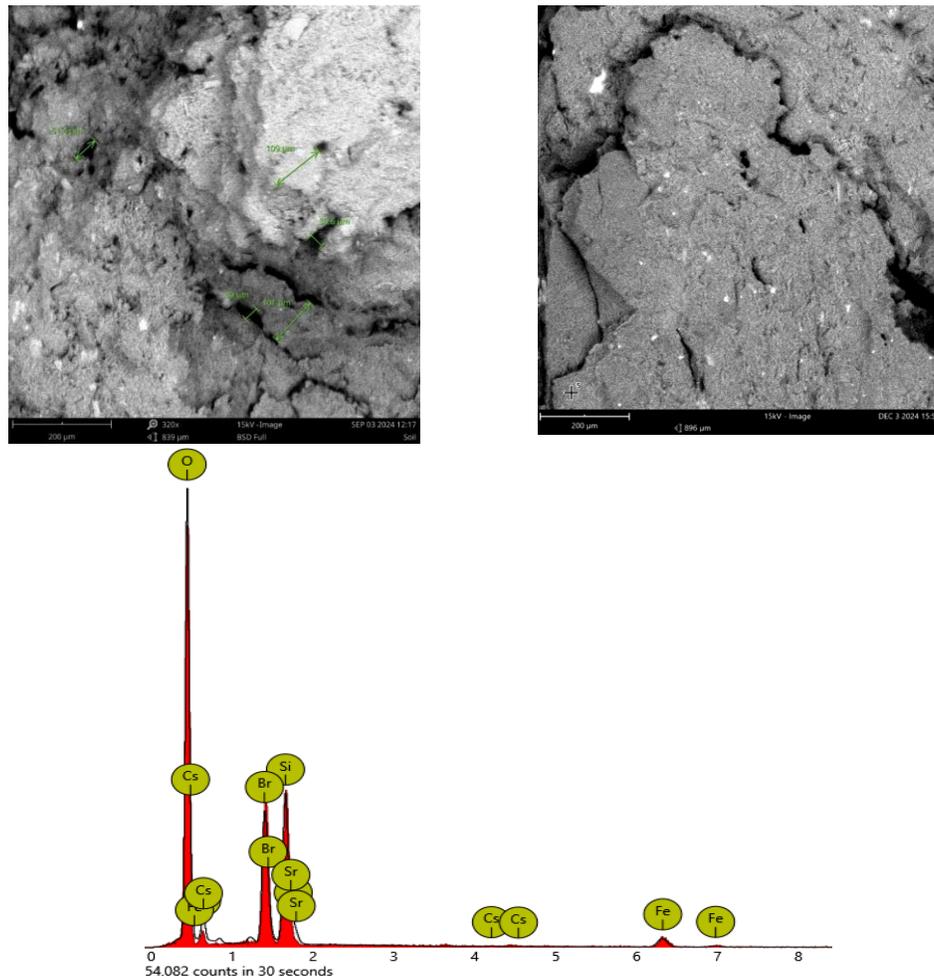


Gambar 12. Grafik Penurunan vs Waktu (konsolidasi cepat)
 (Sumber: Hasil Analisa, 2024)

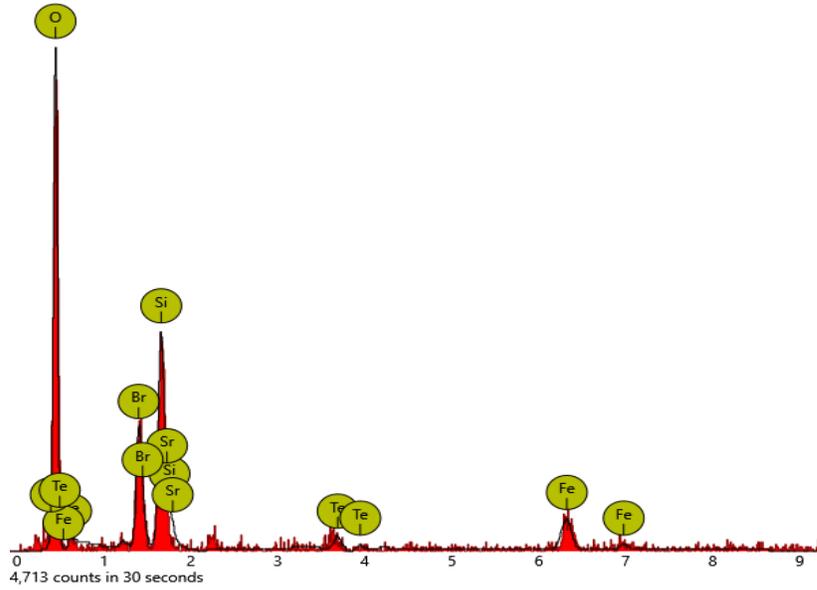
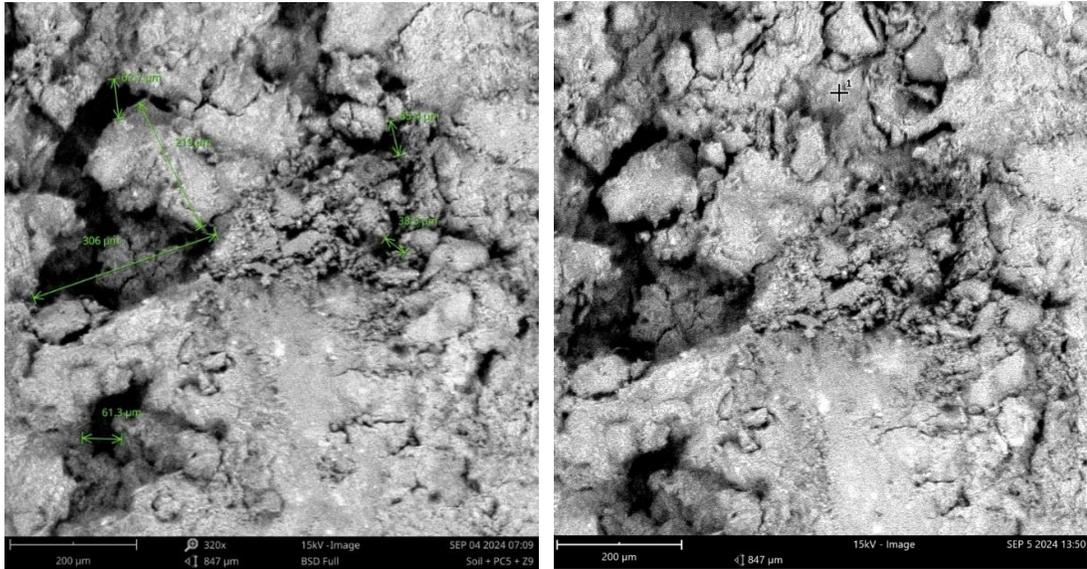
Dari grafik Gambar 12 di atas, kita bisa lihat nilai semakin meningkat dan jarak antar titik yang berdekatan kita tarik garis linear maka terlihatlah yang dimana titik m3 (tanah + semen 7%) sampai pada m10 (tanah + semen 7% + zeolit 7%) bisa direkomendasikan untuk stabilisasi tanah dasar pada perkerasan jalan yang dimana sudah sesuai dengan standar berdasarkan nilai CBR 12% (Standar Spesifikasi Umum untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan, 2018). Akan tetapi dalam hal ini lebih di rekomendasikan variasi yang sudah distabilisasi dengan zeolit, agar penggunaan semen berkurang.

E. Pengecekan Sampel Pada Alat SEM-EDS

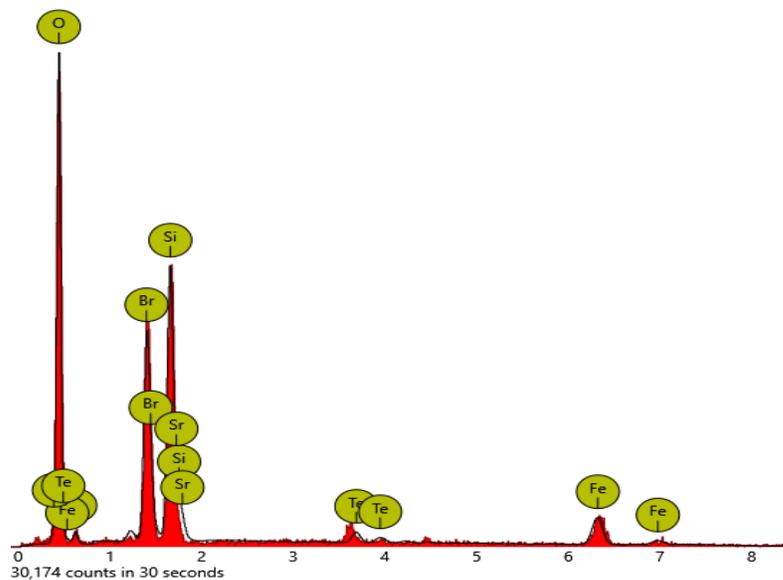
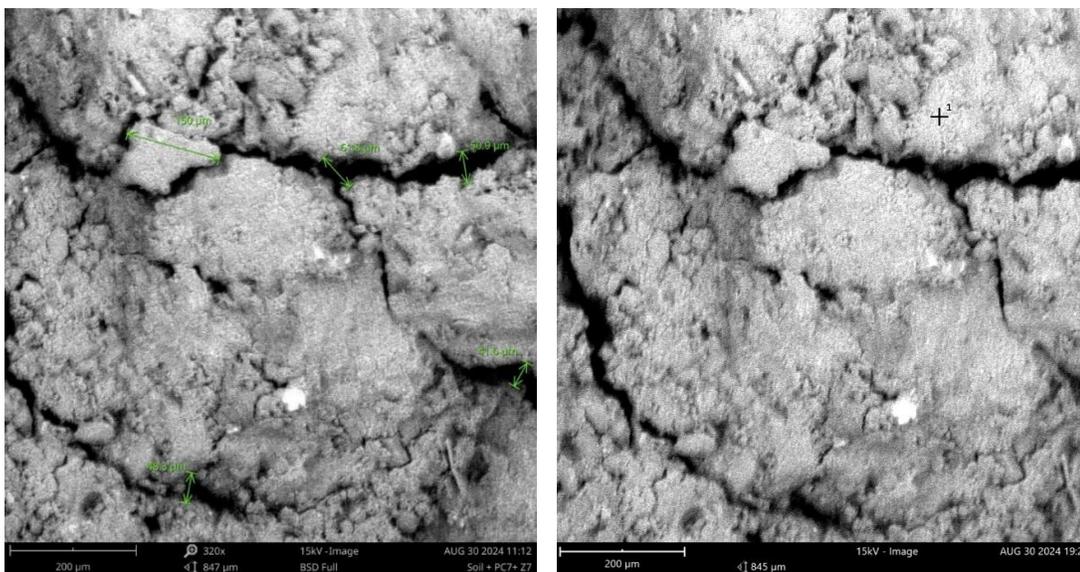
Tujuan dari pengecekan ini, untuk melihat porositas dan zat kimia yang terdapat pada sampel. Sampel yang akan dicek merupakan sampel dari hasil pengujian UCS 14 hari pengerasan, yaitu komposisi campuran tanah + bentonit, tanah + bentonit + semen 5% + zeolit 9%, dan tanah + bentonit + semen 7% + zeolit 7%. Untuk hasil dari pengecekan sampel alat SEM-EDS ini, bisa dilihat pada beberapa gambar dan tabel sebagai berikut:



Gambar 13. SEM-EDS Tanah + Bentonit
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 14. SEM-EDS Tanah + Semen 5% + Zeolit 9%
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)



Gambar 15. SEM-EDS Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%
(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Tabel 8. Hasil Pemeriksaan SEM-EDS

Sampel	O (%)	Si (%)	Br (%)	Sr (%)	Fe (%)	Te (%)
Tanah + Bentonit	77.73	11.30	6.91	1.90	2.09	-
Tanah + Semen 5% + Zeolit 9%	71.88	12.15	5.58	2.90	6.09	1.39
Tanah + Semen 7% + Zeolit 7%	68.28	15.20	8.09	2.74	4.75	0.95

(Sumber: Hasil Analisa, 2024)

Berdasarkan pemeriksaan SEM-EDS menunjukkan adanya porositas terhadap sampel. Dengan adanya penambahan semen dan zeolit dapat membuat sampel menjadi agak rapat atau minimnya porositas. Zat kimia yang didapat pada variasi tanah + bentonit terdapat zat kimia paling besar yaitu Oxygen (O) = 77.73%, pada variasi tanah + bentonit + semen 5% + zeolit 9% yaitu Oxygen (O) = 71.88%, sedangkan pada variasi tanah + bentonit + semen 7% + zeolit 7% yaitu Oxygen (O) = 68.28%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado, disimpulkan bahwa stabilisasi tanah ekspansif menggunakan semen dan zeolit dapat memperbaiki karakteristik geoteknik tanah. Pengujian menunjukkan bahwa penambahan zeolit menurunkan kadar air optimum dan meningkatkan berat isi kering maksimum, dengan nilai MDD terbesar pada campuran semen 7% + zeolit 5%. Nilai CBR tertinggi terdapat pada campuran tanah + bentonit + semen 7% + zeolit 7% (rendam) sebesar 23,44%, akan tetapi pada campuran tanah + bentonit + semen 5% + zeolit 5% sudah memenuhi standar dengan nilai 16,78% (standar Bina Marga $\geq 12\%$). UCS meningkat seiring penambahan semen dan zeolit, dengan nilai lebih tinggi setelah pengeraman 14 hari dibandingkan 7 hari. Hasil konsolidasi menunjukkan bahwa penambahan semen dan zeolit berpengaruh pada nilai C_v (koefisien konsolidasi), sehingga nilai C_v menurun. Kelebihan alat konsolidasi cepat, pengujian hanya berlangsung kurang lebih 4-5 jam, sedangkan alat konvensional membutuhkan waktu sekitar 1-2 minggu. Pemeriksaan SEM-EDS menunjukkan adanya porositas terhadap sampel. Penelitian ini membuktikan bahwa stabilisasi tanah dengan semen dan zeolit efektif mengurangi sifat ekspansif tanah lempung. Disarankan pengujian lanjutan seperti modulus resilien, deformasi permanen, dan UCS hingga 21 hari pengeraman untuk memastikan stabilitas dan keamanan jangka panjang sebagai lapisan *subgrade* pada perkerasan jalan.

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.
- Amran, Y. (2016). Analisis Daya Dukung Tanah (Ddt) Pada Sub Grade/Tanah Dasar (Studi Kasus pada Sub Grade Lahan Parkir Kampus 3 Universitas Muhammadiyah Metro). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 5(2).
- Arifin, S. (2021). Pengaruh Daya Dukung Subgrade Terhadap Kedalaman Rutting Pada Konstruksi Perkerasan Lentur. *Jurnal Sains Dan Teknologi Tadulako*, 7(2), 127–140.

- Badaron, S. F. (2020). *Studi Eksperimental Kapasitas Dukung Dan Perilaku Deformasi Lapisan Subgrade Perkerasan Kaku Akibat Siklus Basah-Kering*. Universitas Hasanuddin.
- Bujung, D. P. A. P., Turangan, A. E., & Sarajar, A. N. (2019). Pengaruh intensitas curah hujan terhadap kuat geser tanah. *TEKNO*, 17(72).
- Chenarboni, H. A., Lajevardi, S. H., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630.
- Eyo, E. U., Ng'ambi, S., & Abbey, S. J. (2020). Performance of clay stabilized by cementitious materials and inclusion of zeolite/alkaline metals-based additive. *Transportation Geotechnics*, 23, 100330.
- Hadi, Z., Gandi, S., & Sarie, F. (2023). Pengaruh Penambahan Batu Zeolit Dan Semen Portland Terhadap Daya Dukung Tanah Lempung: The Effect Of Additional Stone Zeolite And Portland Cement On The Carrying Capacity Of Clay. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, 5(2), 136–147.
- Hagi, S., Yabe, T., & Shiga, T. (2019). A study of swelling characteristics of expansive soils on high speed railway project area in India. In *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development* (pp. 745–749). Springer.
- 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.
- Liguori, B., Aprea, P., Gennaro, B. de, Iucolano, F., Colella, A., & Caputo, D. (2019). Pozzolanic activity of zeolites: the role of Si/Al ratio. *Materials*, 12(24), 4231.
- Muhammad, R., Syahril, S., Suyono, A., & Sirait, T. (2022). Nilai Kuat Tekan Bebas pada Tanah Lunak yang Distabilisasi Menggunakan Limbah Abu Sekam Padi dan Asam Fosfat. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 24(2), 94–99.
- Nurrosied, I. (2016). *Stabilisasi Tanah Gambut Menggunakan Campuran Serbuk Bata Merah Ditinjau dari Pengujian Konsolidasi*.
- Rafii, A. (2018). Analisis Perbaikan Tanah Lunak Sebagai Subgrade Jalan. *Jurnal LPPM*, 8(3), 1–10.
- Ragang, E. B., Rondonuwu, S. G., & Ticoh, J. H. (2023). Karakteristik Geoteknik Geosynthetic Clay Liners Sebagai Lapisan Penahan Lindi Pada Sanitary Landfill Melalui Uji Konsolidasi. *TEKNO*, 21(83), 61–65.
- Saputra, D. D., Sandi, D. M. N., & Erwanto, Z. (2022). Identifikasi Karakteristik Tanah Untuk Perencanaan Subgrade Pada Kecamatan Siliragung. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, 5(1), 81–89.
- Simanjuntak, M. R. A., Lubis, K., & Rangkuti, N. M. (2017). Stabilisasi Tanah Lempung dengan campuran pasir pantai terhadap nilai CBR. *Journal Of Civil Engineering Building And Transportation*, 1(2), 96–104.
- Sompie, F. A. E., Manoppo, F. J., & Sompie, O. B. A. (2018). Stabilisasi Tanah Ekspansif Dengan Campuran Abu Batu Bara Dan Abu Terbang Batu Karang Dengan Aplikasi Timbunan Tipe Urugan Tanah. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 8(2).
- Stavridakis, E. I., Al-Rawas, A., & Goosen, Z. (2006). Assessment of anisotropic behaviour of swelling soils on ground and construction work. *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*, 371–384.

- Tulandi, R. A., Rondonuwu, S. G., & Sarajar, A. N. (2022). Analisis Konsolidasi Lempung Pulutan Dengan Tambahan Geopolimer (Abu Beton). *TEKNO*, 20(81).
- UKIMAN, S. T. (2016). Karakteristik Daya Dukung Tanah Dasar (Subgrade) Tanah Lempung Merah Kampus Polines Melalui Uji Cbr Dengan Bahan Tambah Kapur. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 21(02).
- Zimar, Z., Robert, D., Zhou, A., Giustozzi, F., Setunge, S., & Kodikara, J. (2022). Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: A review. *Journal of Environmental Management*, 312, 114926.