



Pengaruh Rasio Semen - Zeolit dan Jumlah Material Stabilisasi Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Ekspansif

*Joice Elfrida Waani, Mecky Richards Emanuel Manoppo, Agnes Tegla Mandagi

Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado

*) joyce.waani@unsrat.ac.id

Received: 16 April 2025 Revised: 16 Juli 2025 Accepted: 22 Juli 2025

Abstract

Expansive clays is one of the problematic soils which cause numerous problems in pavement engineering and construction such as on airports, highways and roads. Although cement is widely used commonly perceived as the most conventional materials used in treating expansive soils in geotechnical and geoenvironmental engineering applications, of treating expansive soils the increasing trend of cement production has resulted in considerable environmental issues like raising the greenhouse gas emission. The present investigation aims at documenting the effect of adding zeolite a natural pozzolans as a supplementary cementitious material - on the mechanical and physical behaviour of cement stabilized expansive soil mixture. Specifically the Influence of cement-zeolite ratio and level. Soil samples for testing consisted of two different mixtures, namely Clay Soil with 15% bentonite addition and Clay Soil without bentonite addition, each with five binder contents (5%, 7%, 10%, 12%, 14%) and various cement to zeolite ratios (5:0; 7:0; 5:5; 7:3; 5:7; 7:5; 5:9; 7:7) were prepared for experimentation. Tests conducted on all soil mixture samples, namely Compaction Test, CBR and UCS revealed that the effectiveness of adding zeolite on the strength of expansive clay soil mixtures is at cement-zeolite percentages of 10%; 12% and 14%, at all cement-zeolite ratios.

Keywords: Soil improvement, cement, zeolite, clay soil, ratio and level

Abstrak

Tanah lempung yang bersifat ekspansif, merupakan salah satu jenis tanah yang menyebabkan banyak masalah dalam rekayasa dan konstruksi perkerasan jalan, landasan pesawat terbang dan konstruksi bangunan lainnya. Meskipun semen telah banyak digunakan dan dianggap sebagai bahan yang paling umum dipakai dalam penanganan tanah ekspansif pada rekayasa geoteknik dan geoenvironmental, namun peningkatan produksi semen telah mengakibatkan masalah lingkungan yang cukup besar seperti peningkatan emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan untuk mendokumentasikan pengaruh penambahan zeolit sebagai pozolan alami yang tersedia secara alamiah sebagai bahan tambahan semen terhadap perilaku mekanik dan fisik campuran tanah ekspansif yang distabilisasi dengan semen. Khususnya Pengaruh Rasio dan Kadar Semen-Zeolit terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Ekspansif. Sampel tanah untuk pengujian terdiri dari dua campuran yang berbeda yaitu Tanah Lempung dengan tambahan bentonite 15% dan Tanah Lempung tanpa tambahan bentonite masing-masing dengan lima kandungan bahan pengikat (5%, 7%, 10%, 12%, 14%) dan variasi rasio semen - zeolit (5:0; 7:0; 5:5; 7:3; 5:7; 7:5; 5:9; 7:7). Pengujian yang dilakukan pada semua sampel campuran tanah yaitu Pengujian Pemadatan, CBR dan UCS mengungkapkan bahwa efektivitas penambahan zeolit pada kekuatan campuran tanah lempung ekspansif adalah pada persentase semen-zeolit 10%; 12% dan 14% yaitu pada semua rasio semen-zeolit

Kata kunci: Perbaikan tanah, semen, zeolit, tanah lempung, ratio dan level

Pendahuluan

Tanah lempung ekspansif sering ditemukan dalam praktik rekayasa geoteknik. Pada umumnya, jenis tanah ini memiliki banyak masalah dalam hal

rekayasa geoteknik karena sifat plastisitasnya tinggi, permeabilitas rendah, kompresibilitas tinggi, kekuatan mekanis rendah, dan perubahan volumetrik tinggi karena mudah mengembang saat jenuh air atau menyusut saat kering. Untuk dapat

digunakan sebagai perletakan perkerasan jalan raya dan bandara, tanah lempung perlu ditingkatkan daya dukungnya. Gradasi tanah yang baik, pengurangan plastisitas dan pengurangan potensi kembang susut secara umum dapat meningkatkan stabilisasi tanah (Chou *et al.*, 2004).

Perbaikan tanah lempung menggunakan semen yang dikenal sebagai metode stabilisasi kimia berhasil diterapkan pada berbagai jenis konstruksi teknik sipil, seperti pondasi dangkal, tanah dasar untuk perkerasan jalan, dan perletakan kanal. Semuanya menunjukkan peningkatan mekanis dan keuntungan ekonomi yang baik. Campuran tanah semen telah diteliti dalam beberapa studi geoteknik (Osman dan Al-Tabbaa, 2009; Horpibulsuk, *et al.*, 2010). Stabilisasi tanah menggunakan semen dan bahan kimia lainnya menunjukkan pengaruh positif dalam memperbaiki karakteristik tanah, baik untuk tanah berpasir, tanah berbutir halus seperti lempung dan lanau, maupun tanah berbutir kasar (Fonseca *et al.*, 2009; Tsuchida *et al.*, 2009) Akan tetapi, penggunaan material ini kurang diminati berkaitan dengan konsep pembangunan berkelanjutan, permasalahan lingkungan hidup, dan produksi semen yang mahal (Al-Swaidani *et al.*, 2016; Bentur., 2002; Guthrie *et al.*, 2002).

The European Cement Association (2001) melaporkan bahwa substitusi semen dengan material pozolan dianggap sebagai metode yang efektif untuk memperoleh sifat geoteknik dan mekanikal dalam campuran semen. Material pozolan adalah material yang memiliki sifat yang menyerupai semen (*cementlike*) jika ditambahkan pada campuran semen. Material ini terbagi atas pozolan alam dan pozolan buatan. Pozolan alam, dapat diperoleh langsung di alam, contohnya tras, zeolit, tanah diatomice, shale, batu apung. Sedangkan pozolan buatan adalah merupakan hasil sisa buangan industri batu bara, atau besi seperti *fly ash*, *ground granulated blast furnace slag*, *electric arc furnace slag* atau produk sisa pabrikasi bahan pertanian seperti abu sekam padi (*rice husk ash*), Abu sabut kelapa, Abu ampas tebu (*Bagasse Ash*) dll. Menurut ASTM (2003) material pozolan dengan komposisi kimia SiO_2 , Fe_2O_3 , dan Al_2O_3 lebih besar dari 70% dapat digunakan sebagai mineral tambahan atau pengganti semen pada campuran semen. Penelitian lain tentang campuran semen dengan penambahan atau substitusi material pozolan antara lain, Osman and Tabbaa (2009); ShahriarKian *et al.* (2020); Jongpradist *et al.* (2010).

Pozzolan alam, Zeolit yang mengandung silika dan alumina dalam jumlah besar, dapat digunakan sebagian material substitusi semen pada stabilisasi tanah ekspansif untuk mengurangi konsumsi energi

tidak terbarukan pada produksi semen, melestarikan lingkungan, dan meminimalkan dampak lingkungan karena produksi semen yang menghasilkan emisi gas CO_2 (Saberian *et al.*, 2018; Poon *et al.*, 1999) serta dapat meningkatkan ketahanan terhadap retak (Chenarboni *et al.*, 2021).

Disamping itu, penambahan zeolit memungkinkan terjadinya pengurangan berat elemen struktural tanpa mengubah sifat fisik dan mekanisnya, sehingga mempercepat proses hidrasi semen Portland (Sabatino *et al.*, 2011). Abdallah *et al.* (2023) menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan kering maksimum (KKM) dan penurunan kadar air optimum (KAO) pada tanah ekspansif yang distabilkan dengan kapur dan zeolit terjadi karena peningkatan kandungan zeolit. Berdasarkan penelitian Poon *et al.* (1999) ditemukan bahwa reaksi pozolan zeolit meningkat seiring dengan peningkatan waktu pengerasan. MolaAbasi *et al.* (2016) menyimpulkan bahwa penambahan zeolit berhasil memperbaiki struktur mikro yang mengakibatkan meningkatkan kekuatan material.

Karakteristik mekanik campuran semen dapat dijelaskan melalui kuat tekan (UCS), California Bearing Ratio (CBR), dan MR (Arora dan Aydilek, 2005; Bentz *et al.*, 2009), juga digunakan untuk mengevaluasi kekuatan campuran tanah dan dalam desain campuran perkerasan. Waani *et al.*, 2014 menyatakan bahwa pengujian CBR, UCS, dan ITS dapat mengukur sifat mekanis campuran CTRB. Sabatino *et al.* (2011) juga menggunakan uji CBR untuk mengevaluasi daya dukung tanah yang distabilisasi dengan kapur, dan hasilnya menunjukkan bahwa penambahan pozzolan alami terhadap kapur meningkatkan nilai CBR secara signifikan hingga 90% yang merupakan karakteristik untuk desain lapis perkerasan jalan.

Berdasarkan uraian diatas, ada begitu banyak penelitian yang telah dilakukan terhadap tanah ekspansif yang distabilisasi dengan semen atau kapur dengan penambahan atau substitusi material zeolit. Namun, karena bervariasinya sifat fisik dan kimia material zeolit yang merupakan faktor utama yang mempengaruhi proses hidrasi campuran semen, maka perlu dilakukan penelitian terhadap material zeolit (pozolan alam) dari daerah lain termasuk dari Minahasa, Sulawesi Utara. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh rasio antara semen dan zeolit serta total jumlah material stabilisasi (semen-zeolit) terhadap sifat fisik dan mekanik tanah lempung dari Minahasa, Sulawesi Utara melalui pengujian CBR dan UCS. Jika tanah lempung ekspansif distabilkan dengan semen sebesar 5% dan 7%, berapa besar rasio semen - zeolit yang efektif untuk meningkatkan kekuatan campuran secara signifikan.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, pengujian sifat fisik dan mekanik tanah lempung dan material stabilisasi. Kedua, pengujian pemadatan untuk mendapatkan kadar air optimum (KAO) dan kepadatan kering maksimum (KKM). Tahap ketiga adalah pengujian CBR dan UCS di laboratorium.

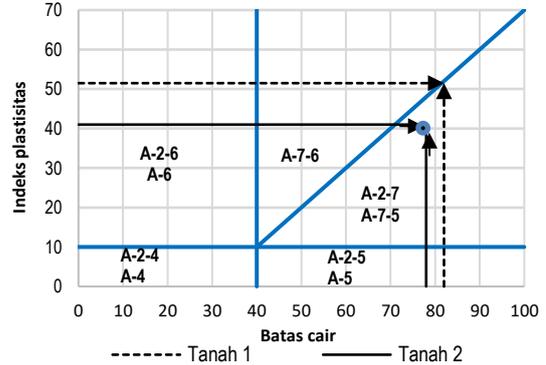
Tanah lempung

Tanah lempung yang menjadi objek diambil dari Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara, di Indonesia. Dua jenis tanah dengan kondisi khusus, pertama, tanah dengan penambahan 15% bentonit, dan kedua, tanah tanpa penambahan bentonit dengan masing-masing dinamakan sebagai tanah I dan tanah II. Penambahan bentonit pada tanah I dimaksudkan untuk meningkatkan sifat plastis pada tanah tersebut sehingga dalam pengujian ini tanah lempung yang diteliti adalah tanah lempung yang memiliki dua plastisitas yang berbeda. Bentonit dapat meningkatkan sifat plastis tanah, karena mengandung mineral utama montmorillonit, yang sangat menyerap air dan memiliki kapasitas ekspansi yang tinggi, sehingga bentonit sangat plastis saat basah.

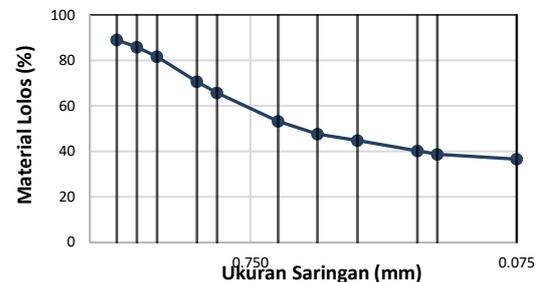
Besarnya penyerapan air bentonit membuat tanah menjadi lebih "lembek" dan lentur dalam rentang kelembapan yang lebih besar (Barast, 2017 dan Nesse, 2000). Sifat fisik dari tanah I (dengan 15% Bentonit) dan tanah II (tanpa bentonit) disajikan dalam Tabel 1 dan Gambar 1. Sedangkan distribusi ukuran butiran digambarkan pada Gambar 2.

Hasil uji plastisitas yang diplot pada grafik Casagrande sebagaimana terlihat pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kedua jenis tanah diklasifikasikan sebagai A-2-7 dan A-7-5 menurut sistem klasifikasi AASHTO yaitu tanah lempung yang tidak dapat digunakan sebagai tanah dasar untuk perletakan perkerasan jalan. Jenis tanah ini perlu distabilkan untuk meningkatkan daya dukungnya. Nilai Indeks plastis dari tanah I dan II masing-masing sebesar 51,262 dan 40,146 dan jika merujuk pada Tabel 2 merupakan jenis tanah dengan tingkat ekspansif yang tinggi dan sangat

tinggi. Distribusi ukuran butir tanah I dan Tanah II sebagaimana terlihat pada Gambar 2 menunjukkan bahwa ukuran butir tanah yang diteliti adalah berbutir halus yaitu >35% lolos saringan 0.075 mm (No. 200).



Gambar 1. Klasifikasi tanah lempung berdasarkan klasifikasi AASHTO



Gambar 2. Kurva distribusi ukuran butiran

Tabel 1. Hubungan antara indeks plastis dengan tingkat ekspansif tanah

Indeks plastis (ASTM D4318)	Tingkat ekspansif
≥ 41	Sangat tinggi
25- 41	Tinggi
15- 28	Sedang
≤ 15	Rendah

Semen portland dan zeolit

Material stabilisasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland tipe I dengan Berat Jenis (Gs) 3,141. Sedangkan pozolan alam (zeolit) diperoleh dari Minahasa, Sulawesi Utara, Indonesia.

Tabel 2. Sifat fisik tanah lempung

Pengujian	Tanah I	Tanah II	Standar
Berat Jenis (Gs)	2,247	2,175	SNI-1965-2008
Kadar Air %	3,91	8,33	SNI 03-6793/2002
Batas Cair %	81,230	78,012	ASTM D 4318
Batas Plastis %	29,968	37,865	ASTM D 4318
Indeks Plastis %	51,262	40,146	ASTM D 4318

Menurut ASTM (2003) dan ACI, (2001) Material pozolan alam dengan komposisi kimia SiO_2 , Fe_2O_3 , dan Al_2O_3 lebih besar dari 70% dapat digunakan sebagai mineral tambahan dalam campuran semen. Material dengan kandungan silika atau silika dan alumina memiliki sedikit atau tidak memiliki sifat semen tetapi, dalam bentuk yang sangat halus dan dengan adanya uap air, akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang terkandung dalam semen, dan pada suhu biasa akan membentuk senyawa yang memiliki sifat semen. Zeolit yang digunakan dalam penelitian ini memiliki sifat fisik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat fisik zeolit

No	Jenis pemeriksaan	Hasil pengujian	Metode pengujian
1	Berat Jenis	2,174	ASTM D854
2	Batas-batas Atterberg		ASTM D318
	- Batas cair	45,98 %	
	- Batas plastis	20,56 %	
	- Indeks Plastis	25,42 %	

Ukuran partikel material ini sekitar $\pm 2-3$ mm dan setelah digiling halus mencapai 99% lolos saringan no. 200 untuk meningkatkan *specific surfaceny*. Sementara sifat kimia zeolit dirangkum dalam Tabel 4., dimana kandungan SiO_2 , Fe_2O_3 , dan Al_2O_3 dalam material ini lebih besar dari 70% sehingga layak untuk digunakan sebagai material tambahan dalam campuran semen.

Hasil dan Pembahasan

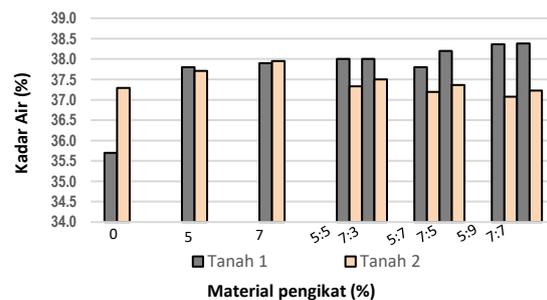
Pengujian pematatan

Pengujian ini dilakukan terhadap Tanah I dan Tanah II yang distabilisasi dengan semen-zeolit dengan variasi penggunaan material pengikat (semen dan zeolit) sebagai berikut: 0%; 5%; 7%; 10%; 12%; dan 14% dengan rasio semen – zeolit sebesar: 0%S-0%Z; 5%S - 0%Z; 7%S - 0%Z; 5%S - 5%Z; 7%S - 3%Z; 5%S - 7%Z; 7%S - 5%Z; 5%S - 9%Z; 7%S - 7%Z. Hasil pengujian pematatan menunjukkan bahwa efektifitas penambahan semen - zeolit secara bersamaan terhadap kadar air optimum dan kepadatan dari dua jenis tanah yang diteliti adalah sebagaimana terlihat pada Gambar 3a dan 3b. Gambar 3a menunjukkan bahwa pada campuran tanah I terjadi sedikit peningkatan KAO seiring peningkatan persentase kandungan semen-zeolit. Peningkatan ini disebabkan oleh adanya proses

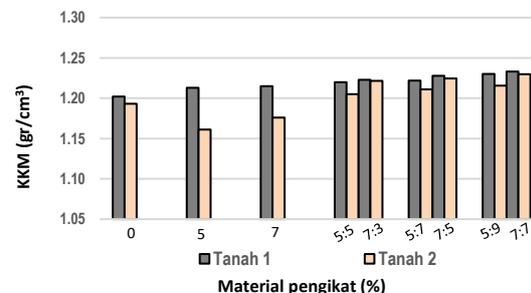
hidrasi semen-zeolit dengan air dalam campuran serta kehalusan butiran material (semen-zeolit) sebagaimana juga dinyatakan oleh ShahriarKian *et al.* (2020). Peningkatan ini juga dipengaruhi oleh adanya bentonit dalam campuran tanah I (Bentonit memiliki sifat kimiawi yang hampir sama dengan zeolit) dimana penyerapan air dari bentonit dan zeolit yang tinggi mengakibatkan peningkatan KAO pada campuran Tanah I (Abbey *et al.*, 2018).

Pada campuran tanah II, peningkatan persentasi kandungan semen-zeolit mengakibatkan penurunan KAO dibandingkan dengan campuran tanah yang distabilisasi semen saja yakni pada semua rasio semen-zeolit (5% - 5%; 7% - 3%; 5% - 7%; 7% - 5%; 5% - 9%; 7% - 7%). Dengan bertambahnya persentase zeolit, nilai KAO semakin menurun disebabkan oleh peningkatan distribusi ukuran partikel campuran, yang secara efektif menurunkan KAO campuran (Chenarboni *et al.*, 2021).

Gambar 3b menunjukkan peningkatan kepadatan (KKM) karena adanya penambahan persentase semen dan zeolit (10%; 12% dan 14%) baik untuk campuran tanah I maupun campuran tanah II sebagaimana dikonfirmasi oleh Mola Abasi *et al.* (2016) bahwa zeolit mampu memperbaiki struktur mikro dari campuran tanah yang distabilisasi yaitu meningkatnya kepadatan yang pada akhirnya dapat meningkatkan kekuatan campuran tanah.



Gambar 3a. KAO campuran tanah stabilisasi



Gambar 3b. KKM campuran tanah stabilisasi

Tabel 4. Sifat kimia zeolit

Senyawa Oksida	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O
Kandungan(%)	66,71	12,45	1,78	2,48	2,74	1,31	1,78

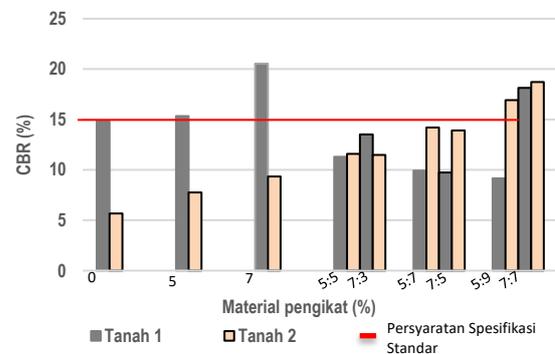
Gambar 3a dan 3b juga menunjukkan bahwa pada tanah yang distabilisasi dengan semen saja, khususnya pada campuran tanah II, peningkatan KAO mengakibatkan penurunan KKM disebabkan oleh beberapa mekanisme geoteknis dan kimia. Saat tanah dicampur dengan semen dan air, terjadi hidrasi semen dengan air membentuk produk semen yang kaku. Namun, ketika kadar air bertambah, air tidak ikut dalam proses hidrasi tetapi mengisi pori-pori campuran. Struktur menjadi lebih encer, dan mengurangi kemampuan partikel tanah untuk saling mengikat saat dipadatkan dan menghasilkan rongga dalam campuran yang lebih banyak. Adanya air yang berlebihan mengakibatkan butiran tanah tersebar lebih jauh satu sama lain sehingga membentuk *flocculation-dispersion imbalance* yaitu partikel tanah menjadi lebih terdispersi (Rehman *et al.*, 2025).

California bearing ratio

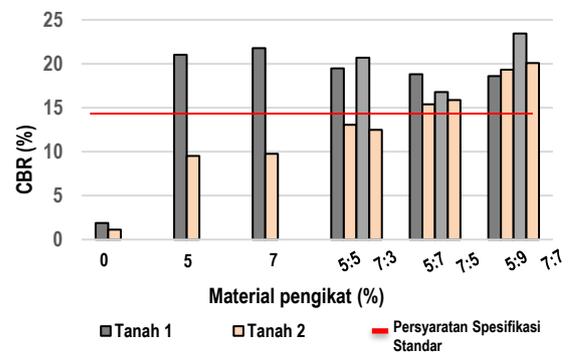
Pengujian CBR merupakan salah satu pengujian yang umum digunakan dalam perancangan perkerasan, evaluasi kekuatan serta daya dukung tanah dasar yang dipadatkan. Pengujian ini dilakukan mengikuti Standar SNI 03-1744:2012. Tiga sampel dari setiap variasi campuran tanah telah diuji untuk sampel CBR yang tidak direndam dan tiga sampel dari setiap variasi campuran tanah yang direndam dalam air selama 96 jam untuk mensimulasikan perilaku tanah dasar dalam kondisi jenuh air. Dalam penelitian ini, sampel dipadatkan menggunakan nilai KAO dari masing-masing variasi campuran yang diperoleh melalui pengujian pemadatan hingga mencapai KKM.

Untuk sampel tanah yang tidak direndam, pada campuran tanah I (Gambar 4a), penambahan zeolit mengakibatkan penurunan nilai CBR kecuali pada rasio semen-zeolit 7% -zeolit 7%. Pada campuran tanah dengan penambahan bentonite 15%, pada kadar semen 0% nilai CBR dapat mencapai standar 15%. Hal ini disebabkan oleh adanya bentonit yang dapat meningkatkan kekuatan campuran terutama ketahanan terhadap pembekuan dan pecairan (Osman and A. Al-Tabbaa, 2009). Namun demikian stabilisasi tanah dengan semen-bentonite dapat mengakibatkan kerusakan secara signifikan oleh adanya bahan kimia tertentu di tanah, terutama larutan sulfat (Roy *et al.*, 2003). Penurunan ini berkaitan dengan reaksi pozolanik yang belum berpengaruh terhadap kekuatan campuran pada umur campuran semen-zeolit yang masih relatif muda. Pengujian CBR dilakukan langsung setelah selesai proses perendaman, tanpa pemeraman sehingga penambahan zeolit dalam campuran mengakibatkan penurunan nilai CBR dibandingkan dengan campuran yang distabilisasi hanya dengan semen saja. Sementara itu pada campuran tanah II

peningkatan nilai CBR terjadi pada persentase semen-zeolit 10%; 12%; dan 14% yaitu pada semua rasio semen-zeolit dan dapat melampaui standar spesifikasi nilai CBR 15% pada rasio semen-zeolit 5%-9% dan 7%-7%. Faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan CBR adalah ukuran partikel halus dari semen dan zeolit yang mengisi pori-pori campuran sehingga semakin meningkatkan daya dukungnya (Kiattikomol *et al.*, 2001).



Gambar 4a. Nilai CBR tanah tidak direndam



Gambar 4b. Nilai CBR tanah direndam

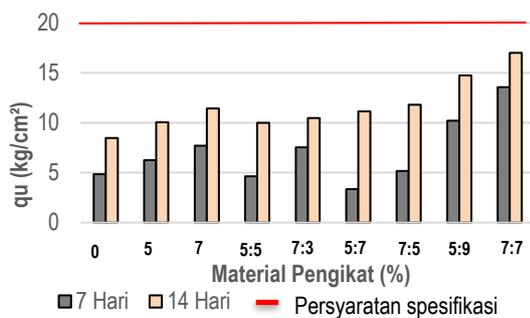
Gambar 4b memperlihatkan perbedaan nilai CBR dari sampel tanah yang direndam. Untuk campuran tanah I, nilai CBR dapat melampaui standar 15% yaitu masing-masing pada kadar semen-zeolit 10%; 12%; dan 14% pada semua rasio semen-zeolit. Pada campuran tanah II terjadi pada kadar semen-zeolit 12%; dan 14% pada semua rasio semen-zeolit. Peningkatan nilai CBR ini berkaitan dengan tekanan pori yang mengandung air pada benda uji yang direndam sehingga ketika terjadi tekanan pada saat pengujian, nilai CBR meningkat dan mencapai lebih besar dari pada nilai CBR benda uji tanpa direndam.

Umar *et al.* (2025) menyatakan bahwa bentonit memiliki sifat ekspansif, berplastisitas tinggi, dan memiliki daya serap air besar. Sifat ini berakibat buruk terhadap nilai CBR dalam kondisi tanpa stabilisasi dan terendam air. Pada saat distabilisasi dengan semen dan zeolit, bentonit berubah sifat secara drastis. karena reaksi pozzolan dan proses hidrasi. Bentonit juga mampu meningkatkan

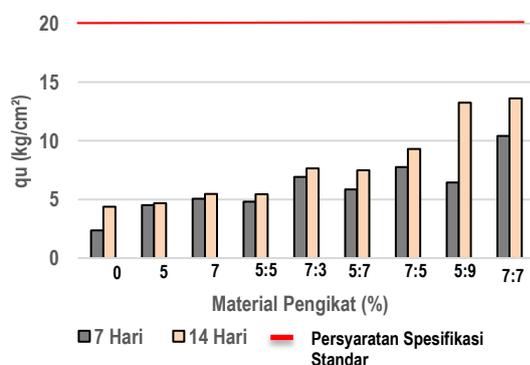
kemampuan ikat (*binding capacity*) setelah aktivasi dimana permukaan spesifik (*specific surface*) bentonit yang sangat besar menyediakan banyak titik reaksi untuk produk hidrasi dan pozzolan. Adanya zeolit dalam campuran tanah, membantu mengurangi efek ekspansi bentonit sehingga nilai CBR rendaman meningkat secara signifikan. Peningkatan ini bisa lebih tinggi dari tanah tanpa bentonit yang kurang ekspansif, karena tanah itu tidak bisa membentuk ikatan kuat sebesar bentonit yang telah distabilisasi sebagai dinyatakan oleh Chenarboni *et al.* (2021).

Unconfined compressive strength

Pengujian UCS dilakukan pada semua sampel tanah mengikuti standar pengujian SNI 3637-2012. Contoh tanah diperam selama 7 hari dan 14 hari untuk masing-masing sampel, dan pengujiannya dilakukan setiap periode pemeraman. Gambar 5a menyajikan hasil UCS terhadap campuran tanah I dan hasil uji UCS terhadap campuran tanah II dalam Gambar 5b. Pada campuran tanah I terlihat bahwa pengaruh penambahan zeolit mengakibatkan penurunan nilai UCS pada umur 7 hari namun meningkat pada umur 14 hari seiring bertambahnya persentase semen – zeolit.



Gambar 5a. Nilai UCS dari tanah I



Gambar 5b. Nilai UCS dari tanah II

Hasil pengujian ini juga terlihat fluktuatif yaitu pada pengujian 7 hari, nilai UCS menurun pada kadar material pengikat 10%; 12% yaitu pada komposisi 5%S - 5%Z dan 7%S - 3%Z; 5%S - 7%Z; 7%S -

5%Z. Fenomena ini menunjukkan bahwa kekuatan campuran tanah yang distabilisasi semen-zeolit sangat bergantung pada rasio semen - zeolit dalam campuran serta umur campuran. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5a dan 5b, pada umur campuran 14 hari kekuatan campuran terus meningkat pada semua komposisi semen-zeolit.

Pada campuran tanah II, hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilisasi semen-zeolit mengakibatkan peningkatan nilai UCS baik pada umur 7 hari maupun 14. Sekalipun nilai UCS belum mencapai standar yang ditetapkan dalam spesifikasi Bina Marga yaitu 20 kg/cm² untuk campuran tanah yang distabilisasi, namun kecenderungan peningkatan terlihat jelas pada kedua gambar ini.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya (Osman and A. Al-Tabbaa, 2009; MolaAbasi et al. 2019) nilai UCS > 20 kg/cm² nantinya akan dicapai pada umur diatas 20 hari pemeraman karena perubahan pH dalam campuran zeolit akan berhenti setelah 42 hari pengeringan pada suhu kamar. Dengan demikian, 42 hari pemeraman adalah waktu dimana perubahan reaksi hidrasi maksimum terjadi pada campuran tanah yang distabilisasi dengan semen-zeolit. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian lain yang dilaporkan oleh banyak peneliti (Chou et al., 2004; Al-Jhayyish., 2014).

Poon et al. (1999) menyatakan reaksi pozzolan zeolit meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pemeraman, dimana pada penelitian ini, persentase 10% semen-zeolit, kepadatan campuran tanah I dan tanah II melampaui nilai CBR 10% (tanpa direndam dan direndam). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan zeolit dari Minahasa cukup memadai untuk digunakan sebagai material stabilisasi tanah lempung. Penggunaan semen sebesar 5% dapat ditambahkan zeolit lebih besar yaitu 9% menghasilkan kekuatan campuran yang memadai sehingga metode stabilisasi ini dapat dijadikan pilihan untuk meningkatkan daya dukung lapisan tanah lempung untuk dijadikan tanah dasar perkerasan jalan.

Kesimpulan

Pengaruh stabilisasi semen-zeolit yaitu zeolit sebagai material tambahan semen yang berasal dari Minahasa, terhadap sifat fisik dan mekanik tanah ekspansif, lempung dari Manado, Sulawesi Utara sebagaimana terlihat pada pengujian pemadatan, CBR dan UCS adalah sebagai berikut:

Sifat fisik campuran tanah I dan tanah II yakni kepadatan campuran meningkat seiring bertambahnya persentase semen-zeolit (10%; 12% dan 14%). Peningkatan ini terjadi pada semua rasio

semen-zeolite. Sifat mekanikal (CBR tanpa direndam) dari campuran tanah I, penambahan zeolit mengakibatkan penurunan nilai CBR namun demikian nilai CBR pada setiap rasio semen-zeolit masih mencapai nilai CBR 10% dan melampaui batas spesifikasi 15% pada rasio 7%-7%. Sedangkan pada CBR rendaman, penambahan persentase semen-zeolit 10%; 12% hingga 14% mengakibatkan peningkatan nilai CBR pada semua rasio semen-zeolit hingga melampaui batas spesifikasi 15%.

Pada campuran tanah II peningkatan persentase semen-zeolit mengakibatkan peningkatan nilai CBR pada semua persentase dan rasio semen-zeolit baik untuk CBR rendaman maupun tanpa rendaman. Sifat mekanikal (UCS) dari campuran tanah I akibat penambahan zeolit terhadap semen menurun pada umur 7 hari dan meningkat pada umur 14 hari. Tapi, pada campuran tanah II UCS meningkat seiring meningkatnya persentase total semen-zeolit dan meningkatnya kadar zeolit dalam campuran.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Universitas Sam Ratulangi Manado yang telah memberikan dukungan teknis serta pendanaan melalui Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) 2024 untuk pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Abdallah, H.M., Samer R. Rabab'ah, S.R., Taamneh, M.M., Taamneh, M.O., and 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* Volume 35, Issue 5 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004710](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004710).

Abbey, S.J., Ngambi, S., Olubanwo, A.O., and Tetteh, F.K. (2018). Strength and Hydraulic Conductivity of Cement and By - Product Cementitious Materials Improved Soil. *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 10 pp. 8684-8694

ACI. (2001). *Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete* (ACI Committee 232, Report 1R-00). Farmington Hills, MI: ACI.

Al-Jhayyish, A. K., (2014). Incorporating Chemical Stabilization of the Subgrade in Pavement Design

and Construction Practices. *A thesis*, Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, USA.

Al-Swaidani, A., I. Hammoud, and A. Meziab. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 8(5), pp.714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>.

Arora S. and A.H. Aydilek. (2005). Class F Fly-Ash-Amended Soil as Highway Base Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 17, No. 6, pp. 640-649.

ASTM, C 618-93.ASTM C125. (2003). *Standart Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use as a Mineral Admixtures in Portland Cement Concrete*.

Barast, G., Razakamanantsoa, A.R., Djeran-Maigre, I., Nicholson, T., Williams, D. (2017), "Swelling properties of natural and modified bentonites by rheological description". *Applied Clay Science* Volume 142, 15 June 2017, Pages 60-68):

Bentur, A. (2002). Cementitious Material-Nine Milenia and A New Century: Past, Present and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, Vol. 14, No.1, pp.2-22.

Bentz, P., Dale, Max, A., and John, W. (2009). Early-Age Properties of Cement-Based Materials. II : Influence of Water-to-Cement Ratio. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 21, No. 9, pp.512-517.

Bina Marga Specifications. (2018). *General Specifications of Road and Bridge Construction*.

Chenarboni, H.A., Lajevardi, S.H., MolaAbasi, H., and Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *J. Construction and Building Materials*. Vol. 272, 121630 0950-0618/2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Chou, E., Fournier, L., Luo, Z., & Wielinski, J. (2004). *Structural Support of Lime or Cement Stabilized Subgrade Used with Flexible Pavements*. (No. FHWA/OH-2004/017).

Fonseca, A.V., Cruz, R.C., Consoli, N.C. (2009). Strength Properties of Sandy Soil-Cement Admixtures. *Proc of the17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt.

- Guthrie, W.S., Sebasta, S., and Scullion, T. (2002). *Selecting Optimum Cement Content for Stabilizing Aggregate Base Materials*. FHWA/TX-05/Technical Report 7-4920-2.
- Horpibulsuk, S., R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddepong. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Constr. Build. Mater.* 24 (10) 2011–2021.
- Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwai, S. and S. Chucheepsakul, 2010. "Influence of Fly Ash on unconfined Compressive Strength of Cement at High Water Content". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No.1, ASCE, pp 49-58.
- Kiattikamol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S and Chutubtim, S. (2001). A Study of Ground Coarse Fly Ashes With Different Finesses from Various Sources as Pozolanic Materials. *Cement and Concrete Composites*, 23 (2001) 335-343.
- Mola Abasi, H., Kordtabar, B., Kordnaeij, A. (2016). Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand. *Geotech. Geol. Eng.* 34 (5) 1539–1551.
- Mola Abasia, H., Saberian, M., Jie Lib. (2019). Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition. *Construction and Building Materials*, 202 (2019) 784–795.
- Nesse, W.D. 2000. *Introduction to Mineralogy* (Oxford Univ. Press, 2000) ([en.wikipedia.org][1]).
- Osman A.A.-M. and A. Al-Tabbaa. (2009). Effect of cement-zeolite grouts on the durability of stabilised clays. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 13 (8) (1999) pp. 427–432.
- Rehman, Z. U., Rauf, M., Chaozhe, J., Xu, F., Jamal, A., Rahman, A., & Iqbal, J. (2025). Clayey soil stabilization with ordinary Portland cement using the stabilized soil as a mortar. *Discover Geoscience*, 3(1), 30.
- Roy, A., Wang, L., Seals, R., and Metcalf, J. (2003). *Stabilization Techniques for Reactive Aggregate in Soil-Cement Base Course*. Louisiana Transportation Research Centre, Rep. No. 366, Baton Rouge, La.
- Sabatino, D., B., Gimeno, D., and Pace, D. (2011). Synthesis and characterization of Na-X, Na-A and Na-P zeolites and hydroxysodalite from metakaolinite. *Clay Minerals*, 46 339–354.
- Saberian, M., Li J, Thach Nguyen, B., Wang, B. (2018). Permanent deformation behaviour of pavement base and subbase containing recycle concrete aggregate, coarse and fine crumb rubber. *Constr. Build. Mater.* 178 (2018) pp. 51–58.
- ShahriarKian M.R., Kabiri. S., Bayat, M. (2020). Utilization of Zeolite to Improve the Behavior of Cement-Stabilized Soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* (2021) 7:35 <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00284-9>
- SNI 3638-2012, *Metode Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif*.
- SNI 03-1744-2012, *Metode Uji CBR laboratorim*.
- The European Cement Association. (2001). *CEMBUREAU annual report 2001*. Brussels: CEMBUREAU.
- Tsuchida, T., Hirahara, T., and Takenobu, M. (2009). Reproduction of Structure Due to Aging of Marine Clay by Addition of Small Amount of Cemen. *Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt.
- Umar, I.H., Abubakar, S., Bello, A.B., Lin, H., Hassan, J.I., Cao, R. 2025. "Stabilization of Expansive Soils Using Cement-Zeolite Mixtures: Experimental Study and Lasso Modeling". *Material Base* 18(10):2286. doi: 10.3390/ma18102286. PubMed, National Library of Medicine, National Centre for Biotechnology Information.
- Waani J.E., Sri Prabandiyani RW., 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*. Volume 3, Issue 11.