



Pengaruh Inklusi Karet dan Semen yang Mengandung *Graphene Oxide* terhadap Perilaku Sifat Fisis dan Mekanis Tanah

Muhammad Alfian Faruqi¹, Bashar S. Mohammed², Abdullah Anwar², Dedy Dharmawansyah^{1*}, Hermansyah¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa,

²Civil and Environmental Engineering, Universiti Teknologi Petronas, Perak Darul Ridzuan

^{*)}dedy.dharmawansyah@uts.ac.id

Received: 4 Mei 2021 Revised: 18 Sptember 2023 Accepted: 25 September 2023

Abstract

Improving the physical properties of problematic soil has become fundamental consideration in various constructions, especially geotechnical engineering, to avoid failures, increase stability and strength of soil. Silty sand is one of the problematic soils and often encountered in the field where the fine gradation contained in the soil allows the soil to easily deform under pressure and lateral forces. In this study, silty sand was mixed with three variations of crumb rubber content (5, 10, and 15% based on soil weight), 6% cement (based on soil weight), and 0.05% graphene oxide (based on cement weight) to measurement and analysis of physical and mechanical properties. Soil Consistency limits, compaction testing using the Proctor Apparatus, and direct shear test were carried out for each mixed variable. The test results showed that the consistency limits and dry density decreases with increasing rubber content in the soil-cement matrix containing graphene oxide. Substitution of graphene oxide into the soil-cement matrix was able to increase in the stress and shear strength of the soil at each in variation in rubber content.

Keywords: Silty sand, crumb rubber, graphene oxide

Abstrak

Perbaikan sifat geoteknis tanah bermasalah telah menjadi hal yang mendasar dalam berbagai konstruksi khususnya geoteknik untuk menghindari kegagalan, menambah kestabilan dan kekuatan tanah. Tanah pasir berlanau merupakan salah satu tanah yang tergolong bermasalah dan sering dijumpai dilapangan, dimana kontribusi gradasi halus yang terkandung dalam tanah memungkinkan tanah mudah berdeformasi dibawah pengaruh tekanan dan gaya lateral. Dalam penelitian ini, tanah pasir berlanau dicampur dengan tiga variasi kandungan butiran karet (5, 10, dan 15% berdasarkan berat tanah), 6% semen (berdasarkan berat tanah), dan 0,05% graphene oxide (berdasarkan berat semen) untuk pengukuran dan analisis perubahan sifat fisis dan mekanis tanah. Batas-batas konsistensi tanah, pengujian pemadatan menggunakan alat Proctor, dan uji direct shear dilakukan pada setiap variabel campuran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa batas-batas konsistensi dan kepadatan kering tanah berkurang seiring dengan meningkatnya kandungan karet di dalam matriks tanah-semen mengandung graphene oxide. Substitusi graphene oxide ke dalam matriks tanah-semen mampu meningkatkan tegangan dan kekuatan geser tanah pada setiap variasi kandungan karet.

Kata-kata kunci: Pasir berlanau, butiran karet, graphene oxide

Pendahuluan

Limbah ban karet terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan bertambahnya jumlah kendaraan di seluruh dunia. Selain sangat sulit dipadatkan, limbah ban karet juga sangat sulit terdegradasi oleh

tanah. Sejumlah besar kandungan minyak bumi dan bahan kimia berbahaya lainnya di dalam ban sangat tinggi, sehingga berpotensi menyebabkan ban terbakar secara tidak disengaja. Hal ini dapat memicu masalah serius pada lingkungan dan kesehatan manusia akibat kontaminasi udara oleh

logam berat dan zat beracun yang dilepaskan dari pembakaran ban. Salah satu upaya untuk meminimalisir dampak tersebut ialah dengan mendaur ulang limbah ban untuk meningkatkan sifat geoteknik pada tanah-tanah bermasalah.

Penelitian terkait inklusi karet telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya seperti (Al-Neami, 2018) yang menunjukkan bahwa adanya peningkatan nilai CBR dari 2,3% menjadi 21,5% pada penambahan karet maksimum 8%. (Ravichandran *et al.*, 2016) menghasilkan data bahwa peningkatan persentase butiran karet menurunkan kadar air optimum (OMC) dan kepadatan kering maksimum (MDD) tanah. Nilai CBR dari sampel tanah tersebut menunjukkan peningkatan hingga substitusi 10% bubuk butiran karet dan mulai berkurang setelahnya. (Mardesic *et al.*, 2009) mengungkapkan bahwa, penambahan butiran karet dalam jumlah yang proporsional mampu memberikan regangan yang lebih tinggi dan mengurangi dilatasi. Hasil pengujian yang dilakukan oleh (Anvari *et al.*, 2017) menunjukkan bahwa kandungan optimal butiran karet yaitu 5%, mampu meningkatkan sudut geser-dalam tanah dari $35,1^\circ$ menjadi $39,2^\circ$. Penelitian oleh (Yadav & Tiwari, 2017) mengungkapkan bahwa nilai kekuatan tanah berhasil ditingkatkan sekitar 14,99% yang diperoleh dari hasil pengujian CBR. Hasil uji UCS juga menunjukkan bahwa penambahan 5% karet butiran di tanah lempung dapat meningkatkan sedikit kekuatan geser.

Dalam praktiknya, untuk merubah sifat mekanik tanah sering dilakukan dengan mencampur tanah dengan beberapa bahan seperti semen dan disertai dengan substitusi bahan aditif. Semen merupakan stabilisator tradisional yang dapat digunakan di berbagai jenis tanah bermasalah. Semen pertama kali digunakan di Amerika Serikat pada awal abad ke-20 sebagai agen penstabil tanah dalam konstruksi jalan (Gencel, 2013). Selain mampu meningkatkan sifat mekanis tanah, semen juga dapat membantu mengikat tanah dengan partikel karet. (Consoli *et al.*, 2019) dalam penelitiannya menguji berbagai campuran agregat halus ke pasir berlanau yang diolah semen. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa berat volume kering tanah (γ_d) meningkat dari 15,5 menjadi 16,5 kN/m³ dan meningkatkan modulus geser pada regangan kecil (G_0) sekitar 50% pada spesimen tanah pasir berlanau.

Berkaitan dengan pengaruh semen pada kadar air tanah, (P'kla & Ayité, 2019) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1% rasio semen di dalam tanah, dapat meningkatkan kadar air optimum 0,1% dan kepadatan maksimum 1,5%. Penerapan semen sebagai stabilisator tanah efektif

pada tanah granular dan tanah halus memang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan daya tahan jangka panjang. Namun, penggunaan kadar semen yang rendah dalam stabilisasi tanah tidak dapat menghasilkan kekuatan awal yang cukup seperti halnya pada beton. (Moon *et al.*, 2019) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa meskipun semen pada umumnya menghasilkan kekuatan awal yang cukup pada beton, namun kekuatan awal (kurang dari satu hari) pada tanah yang diberi semen jauh lebih kecil, hal ini dikarenakan kandungan semen yang relatif rendah. Oleh karena itu, guna mendukung fungsi semen sebagai stabilisator tanah dengan kekuatan yang optimal, material *graphene oxide* digunakan sebagai aditif semen.

Graphene merupakan partikel nano yang saat ini telah banyak diterapkan dalam bidang teknik material karena memiliki sifat kelistrikan, termal, dan mekanik yang sangat baik. Struktur *graphene* yang unik memberikan peningkatan pada sifat *graphene*, diantaranya mobilitas pembawa yang tinggi ($\sim 10.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), efek *Quantum Hall* pada suhu ruangan, transparansi optik yang baik (97,7%), luas permukaan spesifik (2630 m²/g), Modulus Young ($\sim 1 \text{ Tpa}$), dan konduktivitas panas yang baik ($\sim 3000 \text{ W/mK}$) (Zhang *et al.*, 2012). Dengan demikian, *graphene oxide* sangat cocok digunakan sebagai aditif semen untuk perkuatan sifat geoteknis tanah.

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian terkait dengan inklusi nanopartikel ke dalam tanah secara signifikan mempengaruhi sifat mekanis dan kekuatan tanah. Valizadeh & Choobbasti (2019) menyelidiki efek *nano-graphene* pada perilaku mekanis pasir berlempung dan menunjukkan bahwa ada peningkatan sifat mekanis dan penyembuhan diri sampel tanah. Zhou *et al.* (2017) mengungkapkan bahwa penambahan *graphene oxide* $\sim 0,08\%$ dapat meningkatkan kohesi dan potensi zeta tanah dari -17,2 menjadi -19,2 mV. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kemampuan partikel tanah dalam "menangkap" molekul air. Efek substitusi *graphene oxide sheet* (lembaran *graphene oxide*) dalam tanah berlanau yang dicampur semen menunjukkan peningkatan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) sampel tanah dari setiap periode pengeringan 7, 14, dan 28 hari (Naseri *et al.*, 2016). Berdasarkan berbagai penelitian yang telah diuraikan di atas, penelitian ini mencoba melakukan kombinasi berbagai material tambah seperti semen (S), *crumb rubber* (CR) dan juga *graphene oxide* (GO) untuk dicampurkan pada tanah pasir berlanau (*Silty clay*) melalui variasi CR 5-15%, Semen 6% dan GO sebesar 0,05%. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui komposisi yang tepat melalui penambahan material semen, *crumb rubber* maupun *graphene oxide* pada

tanah pasir berlanau yang direpresentasikan melalui parameter seperti batas-batas konsistensi, hasil pengujian *proctor*, kekuatan geser tanah (kohesi dan sudut geser) maupun perilaku pergeseran tanah. Sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif komposisi penggunaan material tambah pada tanah guna menghasilkan peningkatan sifat fisis maupun mekanis tanah yang akan berimbas pada kestabilan tanah untuk perencanaan dan pembangunan infrastruktur yang lebih baik.

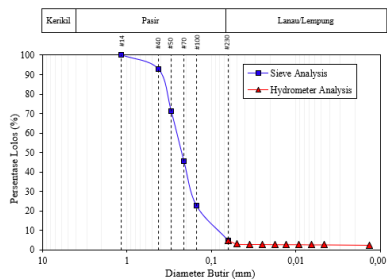
Metode

Sampel tanah

Dalam penelitian ini, jenis tanah yang digunakan berupa *disturbed samples* dari tanah pasir berlanau yang diambil pada kedalaman 0,5 m dari permukaan di Seri Iskandar, Perak, Malaysia. Kurva distribusi ukuran butiran pada tanah ini ditampilkan pada Gambar 1 dan Karakteristik tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik tanah

Parameter		Hasil
Berat jenis, G _s		2,5
Analisis ukuran butiran (%)	Kerikil	0,00
	Pasir kasar	7,30
	Pasir sedang	47,08
	Butiran halus	40,68
Lanau/lempung		5,00
Batas-batas Atterberg (%)	LL	43,958
	PL	22,813
	PI	21,146
Sistem klasifikasi	Simbol grup (AASHTO)	A-2-7
	Nama grup (AASHTO)	lempung atau kelanauan dan kerikil atau pasir
	Simbol grup USCS	SP-SC
	Nama grup USCS	Pasir bergradasi buruk dengan lanau/lempung
Koefisien keseragaman (C _u)		2,97
Koefisien gradasi (C _c)		1,26



Gambar 1 Kurva distribusi ukuran butiran

Persiapan komposit tanah/butiran karet/ semen/ graphene oxide

Tanah dicampur dengan tiga variasi butiran karet yaitu 5, 10, 15% dari berat tanah kering. Ukuran butiran karet yang digunakan adalah partikel yang lolos saringan 2 mm (Gambar 2). Karakteristik butiran karet disajikan pada Tabel 2. Dari ketiga variasi campuran karet, selanjutnya semen portland tipe 1 dari perusahaan manufaktur di Malaysia ditambahkan 6% dari berat tanah kering. *Graphene oxide* ditambahkan ke dalam campuran karet-semen dengan kadar 0,05% dari berat semen. *Graphene oxide* telah didispersikan terlebih dahulu dengan air secara mekanis menggunakan *ultrasonic processor*. Kandungan *graphene oxide* telah didispersikan yaitu 0,0625 mg/ml.



Gambar 2 Butiran karet (crumb rubber)

Tabel 2 Karakteristik butiran karet

Parameter		Hasil
Berat jenis, G _s		
Distribusi ukuran butiran	D ₁₀ (mm)	0,829
	D ₃₀ (mm)	1,272
	D ₆₀ (mm)	1,718
	Koefisien keseragaman (C _u)	2,072
	Koefisien gradasi (C _c)	1,136

Untuk tujuan perbandingan tiga spesimen dengan campuran karet-semen tidak diberikan *graphene oxide*. Massa untuk setiap bahan campuran spesimen ditentukan mengikuti Persamaan 1 sampai dengan Persamaan 5.

Massa butiran karet (m_r)
 $m_r = m_s \times \alpha_r$ (1)

Massa semen (m_c)
 $m_c = m_s \times \alpha_c \times (1 - \alpha_g)$ (2)

Massa *graphene oxide* (m_g)
 $m_g = m_c \times \alpha_g$ (3)

Massa spesimen (m_s)
 $m_s = m_s + m_r + m_c + m_g + m_w$ (4)

Massa air untuk uji *direct shear* (m_w)
 $m_w = (m_s + m_r + m_c + m_g) \times \text{OMC} \% \dots\dots (5)$

dimana m_{sp} , α_r , α_c , dan α_g adalah massa spesimen, kandungan karet butiran (berat tanah kering), konten semen (berat tanah kering), dan konten *graphene oxide* (berat semen), masing-masing massa dalam satuan gram.

Prosedur pengujian

Variasi campuran yang akan diuji pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3. Uji batas cair sampel tanah ditentukan berdasarkan *British Standards* (BS 1377-2). Pengaruh kandungan butiran karet (5, 10, dan 15%) dan dengan penambahan konsentrasi 0,05% *graphene oxide* (berdasarkan berat semen) pada batas konsistensi sampel tanah dievaluasi.

Tabel 3 Variasi campuran spesimen

Kode	Campuran
S	100% tanah
SR5	89% tanah + 5% cr + 6% semen
SR10	84% tanah + 10% cr + 6% semen
SR15	79% tanah + 15% cr + 6% semen
SR5-G5	89% tanah + 5% cr + 5.95% semen + 0.05% <i>graphene oxide</i>
SR10-G5	84% tanah + 10% cr + 5.95% semen + 0.05% <i>graphene oxide</i>
SR15-G5	79% tanah + 15% cr + 5.95% semen + 0.05% <i>graphene oxide</i>

Untuk memperkirakan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum dari sampel tanah, tes pemadatan dilakukan sesuai dengan *British Standards* (BS 1377-4). Pemadatan dilakukan sebanyak 27 kali pukulan dengan massa penumbuk 2,5 kg. Spesimen dipadatkan dalam cetakan dengan ukuran diameter 105 mm dan tinggi 115,5 mm. Uji pemadatan dilakukan untuk sampel tanah yang mengandung butiran karet 5, 10, 15% dan mengandung *graphene oxide* 0,05%.

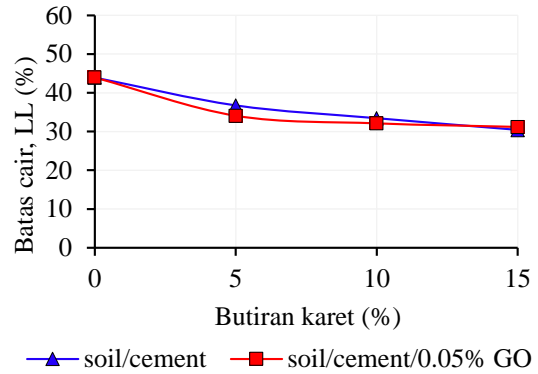
Uji *direct shear* sampel tanah juga dievaluasi menurut *British Standards* (BS 1377-7). Spesimen dipadatkan menggunakan tabung pemadatan *standard Proctor* untuk mencapai kepadatan kering maksimum yang seragam. Spesimen dicetak ulang (*remolded*) ke dalam cetakan *direct shear* dengan ukuran 10 cm x 10 cm x 2 cm. Setiap spesimen diekstraksi dari cetakan. Setelah periode pengeringan 3 hari, spesimen diterapkan tegangan normal (3,92, 5,89, dan 7,85 kPa) dan dikenakan laju perpindahan 0,0286 mm/menit dengan kondisi jenuh air (*submerged*). Nilai deformasi dicatat selama pengujian. Nilai kohesi dan sudut gesek internal sampel tanah juga ditentukan.

Hasil dan Pembahasan

Efek butiran karet dan *graphene oxide* pada batas konsistensi

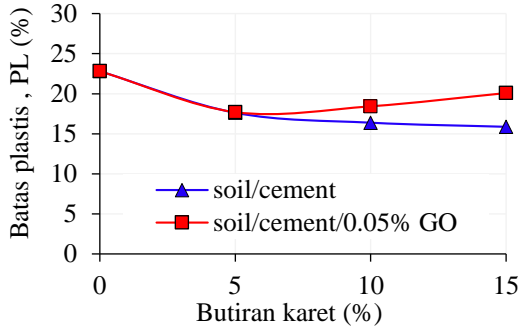
Substitusi butiran karet dan *graphene oxide* dalam sampel tanah yang dicampur semen menunjukkan perubahan perilaku konsistensi tanah. Berdasarkan hasil yang diperoleh, ditemukan bahwa peningkatan kandungan butiran karet mengakibatkan penurunan batas cair (*liquid limit*, LL) dan batas plastis (*plastic limit*, PL) sehingga berdampak pada penurunan indeks plastisitas tanah (*plasticity index*, PI).

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai LL menurun seiring dengan meningkatnya kandungan butiran karet di dalam tanah-semen. Disisi yang bersamaan, substitusi *graphene oxide* 0,05% mengakibatkan penurunan LL yang cukup jelas pada kandungan butiran karet 5% dengan selisih 2,7%.

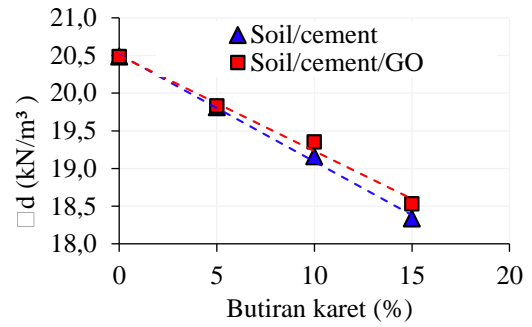


Gambar 3 Pengaruh kandungan butiran karet pada nilai LL

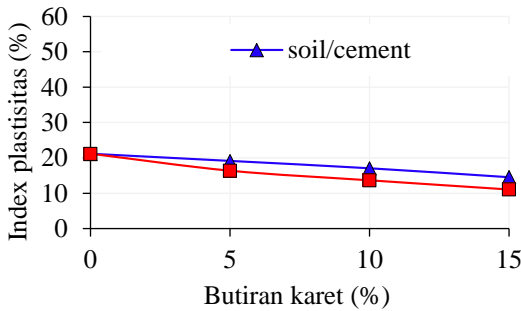
Penambahan *graphene oxide* di dalam campuran tanah-semen juga tampak mempengaruhi nilai batas plastis. Gambar 4 menunjukkan peningkatan nilai PI pada campuran tanah-semen dengan *graphene oxide* 0,05% seiring dengan ditambahkannya kandungan butiran karet bila dibandingkan dengan spesimen tanpa *graphene oxide*. Akibatnya, ketiga jenis campuran tanah-semen dengan kandungan *graphene oxide* 0,05% memiliki Indeks Plastisitas (PI) yang lebih rendah. Penurunan dapat dilihat pada spesimen dengan campuran 5% butiran karet tanpa *graphene oxide* dimana penurunan nilai PI tanah-semen sebesar 9,5% (Gambar 5). Hal ini disebabkan oleh permukaan butiran karet yang bersifat hidrofobik sehingga tanah dengan kandungan butiran karet lebih tinggi cenderung tidak menyerap lebih banyak air. Namun, dengan penambahan *graphene oxide* ke dalam tanah-semen, kemampuan bahan komposit untuk menyerap kelebihan air menjadi meningkat sehingga mengakibatkan penurunan nilai PI dengan pembentukan lapisan-lapisan yang lebih padat dari sampel tanah (Naseri *et al.*, 2016).



Gambar 4 Pengaruh kandungan butiran karet pada nilai PL



Gambar 6 Pengaruh kandungan butiran karet pada MDD tanah



Gambar 5 Pengaruh kandungan butiran karet pada nilai PI

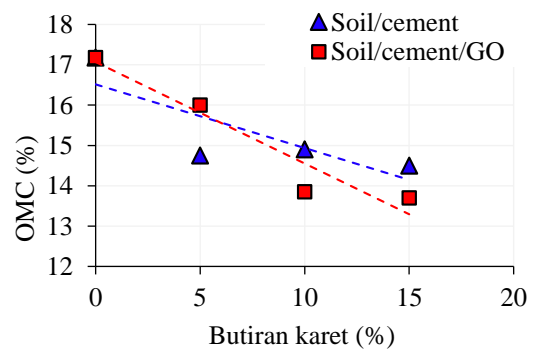
Dengan demikian, berkurangnya nilai PI dengan penambahan *graphene oxide* mengindikasikan adanya peningkatan kekuatan geser tanah. Meskipun kuantitas *graphene oxide* dalam campuran tanah terbilang rendah, namun dampak yang dihasilkan terlihat cukup signifikan.

Efek butiran karet dan *graphene oxide* pada tingkat kepadatan (*compactibility*).

Uji pemadatan *standar proctor* (Gambar 6 dan 7) menunjukkan bahwa penambahan karet ke dalam tanah-semen mengarah pada penurunan kepadatan serta OMC. Kecenderungan ini cukup linier untuk kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum pada kedua spesimen dengan dan tanpa *graphene oxide*. Kepadatan cenderung menurun karena kandungan karet meningkat dengan rasio pengurangan sekitar 1,3 kN/m³ untuk setiap kenaikan 10% karet. Hasil ini serupa dengan yang sebelumnya diamati oleh peneliti lain (Signes, *et al*, 2016 dan Ravichandran, *et al*, 2016). Penurunan berat volume kering maksimum dapat disebabkan oleh berat jenis karet lebih rendah dibandingkan tanah dan juga respons elastis butiran karet yang menggantikan nilai referensi tanah selama pemadatan dengan volume yang setara. Ketahanan butiran karet mengurangi efisiensi pemadatan, yang juga dapat menyebabkan pengurangan berat volume kering maksimum dari campuran tersebut (Yadav & Tiwari, 2018).

Spesimen dengan campuran *graphene oxide* mempunyai kepadatan kering sedikit lebih tinggi daripada spesimen tanpa campuran *graphene oxide*, hal ini disebabkan oleh keberadaan *graphene oxide* yang berperan dalam pembentukan kristal yang lebih padat dan mempunyai kecenderungan untuk mengikat antar partikel menjadi lebih rapat (Naseri, *et al*, 2016).

Demikian juga dengan kadar air optimum yang cenderung sedikit menurun seiring dengan bertambahnya kandungan karet di dalam tanah. Penurunan tersebut dikarenakan adanya perbedaan besar dalam penyerapan air antara tanah dengan partikel karet. Pada tanah-semen mengandung *graphene oxide* 0,05% mempunyai kadar air optimum lebih rendah daripada kadar air optimum spesimen tanpa *graphene oxide*. Hal ini dapat disebabkan oleh pengurangan kandungan semen di dalam tanah. Pengaruh semen sendiri dapat dikaitkan dengan pengembangan panas hidrasi dan air tambahan yang disimpan dalam flok yang dihasilkan dari fenomena flokulasi reaksi semen.

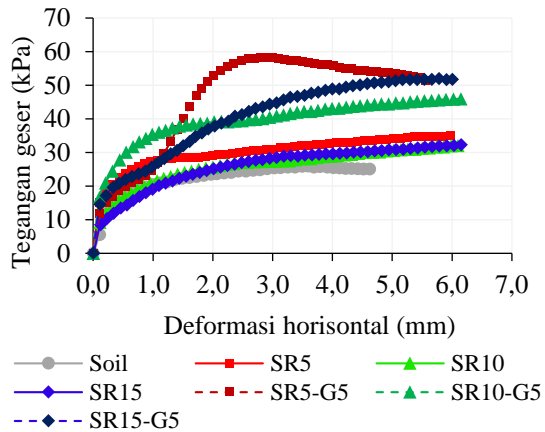


Gambar 7 Pengaruh kandungan butiran karet pada OMC tanah

Efek butiran karet dan *graphene oxide* pada perpindahan horisontal – tegangan geser.

Penambahan *graphene oxide* ke dalam tanah melalui pemberian semen dengan variasi kandungan karet secara umum menyebabkan sifat mekanis tanah menjadi berubah. Sifat mekanis

tanah yang direpresentasikan melalui hasil pengujian *direct shear* menunjukkan peningkatan ketahanan geser pada setiap penerapan gaya normal (3,92, 5,89, dan 7,85 kPa). Gambar 8 menunjukkan pengaruh tiga variasi penambahan butiran karet terhadap perilaku perpindahan horizontal–tegangan geser di bawah tegangan normal 3,92 kPa. Seperti yang dapat dilihat, bahwa nilai puncak kekuatan geser tertinggi diberikan oleh campuran spesimen SR5-G5.

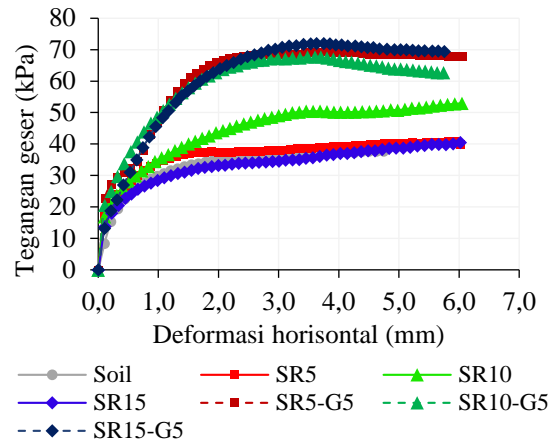


Gambar 8. Perpindahan horizontal dan tegangan geser spesimen di bawah tegangan normal 3,92

Setelah tegangan puncak tercapai, kemiringan kurva perpindahan tegangan-horisontal geser menurun dan kekuatan geser menjadi berkurang pada perpindahan horisontal sekitar 5,6 mm. Ketika berada dibawah tegangan normal 5,89 kPa, kekuatan puncak tertinggi diberikan oleh campuran SR15-G5 pada perpindahan horisontal 3,9 mm (Gambar 9). Sementara itu, saat berada dibawah tegangan normal 7,85 kPa, nilai kekuatan puncak tertinggi diberikan oleh spesimen campuran SR10-G5 (Gambar 10). Meskipun terdapat perbedaan nilai puncak pada setiap penerapan gaya normal, penambahan *graphene oxide* menyebabkan ketahanan geser spesimen menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan spesimen lainnya. Perilaku tersebut mengindikasikan adanya pengerasan regangan akibat spesimen mempunyai densitas lebih besar dan lebih kaku.

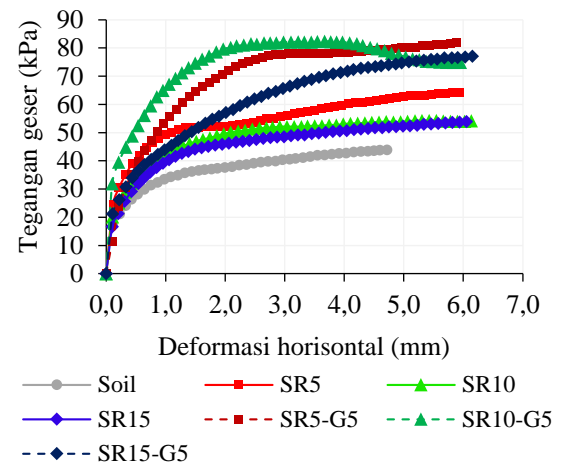
Peningkatan kekuatan yang signifikan dapat disebabkan oleh kemampuan *graphene oxide* dalam mempercepat proses hidrasi semen di dalam campuran tanah setelah periode pengeringan 3 hari. Pengisian ruang bebas yang lebih baik antara partikel tanah dan peningkatan interkoneksi antara partikel tanah dengan *graphene oxide* juga dapat menghasilkan bahan yang lebih homogen. Oleh karena itu, tanah dengan tambahan *graphene oxide* menunjukkan perilaku yang lebih kaku bila

dibandingkan dengan tanah asli dan spesimen campuran tanpa *graphene oxide*.

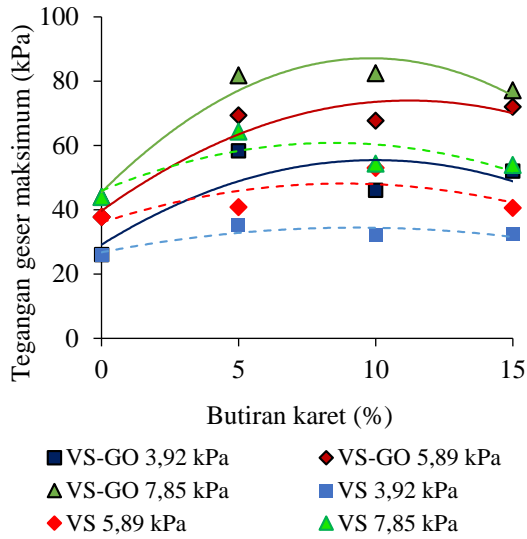


Gambar 9. Perpindahan horizontal dan tegangan geser spesimen di bawah tegangan normal 5,89 kPa

Gambar 11 menunjukkan pengaruh variasi butiran karet di dalam campuran tanah-semen terhadap kekuatan geser. Tren skala polynomial tersebut menggambarkan bahwa penambahan butiran karet menyebabkan kekuatan geser tanah meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai optimal, yaitu pada campuran 10% butiran karet dari setiap penerapan gaya normal (3,92 kPa, 5,89 kPa, dan 7,85 kPa). Kandungan karet yang lebih tinggi di dalam tanah menyebabkan efek destruktif pada kekuatan geser sampel. Hal ini dikarenakan kekuatan interaksi antara tanah dengan partikel butiran karet lebih rendah daripada antara partikel tanah itu sendiri, dengan kata lain sifat saling mengunci (*interlocking* antara tanah dengan partikel butiran karet) yang lebih buruk (Anvari, *et al.*, 2017).



Gambar 10. Perpindahan horizontal dan tegangan geser spesimen di bawah tegangan normal 7,85 kPa.



Gambar 11. Kurva tegangan geser maksimum terhadap variasi butiran karet

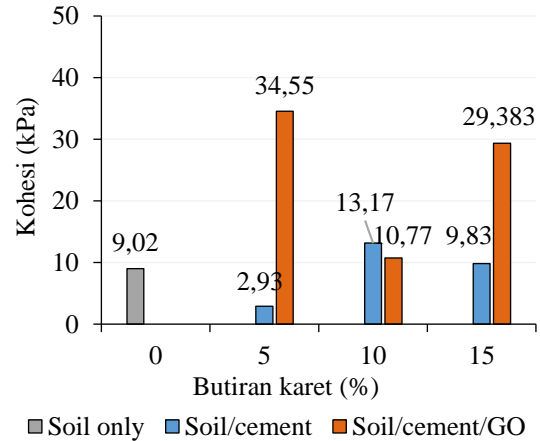
Efek butiran karet dan *graphene oxide* pada parameter kekuatan geser sampel tanah

Gambar 12 menunjukkan bahwa penambahan butiran karet mempengaruhi kohesi campuran. Sebagaimana yang dapat dilihat bahwa penambahan butiran karet hingga kadar 15% ke dalam campuran secara umum mampu meningkatkan kohesi tanah walaupun terjadi penurunan sebesar 32% pada campuran 5% butiran karet. Peningkatan nilai kohesi tersebut dapat dikaitkan dengan penurunan rongga antara partikel tanah dan pembentukan bahan kompresibel (Naseri, *et al*, 2016).

Nilai kohesi tertinggi untuk campuran tanpa *graphene oxide* diberikan oleh campuran spesimen SR10 (inklusi karet 10%) yaitu 13,17 kPa. Akan tetapi, terdapat perbedaan tren yang cukup signifikan pada berbagai kandungan karet dengan penambahan 0,05% *graphene oxide* maupun dengan yang tidak adanya penambahan *graphene oxide* ke dalam campuran tanah-semen. Perbedaan tren tersebut dapat disebabkan oleh dua kemungkinan, yaitu faktor ekstrusi spesimen (*remolded*) setelah pemadatan dan perilaku spesimen selama pengujian geser berlangsung, seperti penjelasan sebagai berikut:

Setelah pemadatan dilakukan, spesimen yang diekstrusi mesin memungkinkan kepadatan tanah berubah. Sifat tanah yang tidak kohesif menjadikan sampel tanah sangat rentan terhadap perubahan densitas (kerapatan antar partikel berkurang) ketika spesimen dipindahkan ke dalam cetakan yang berbeda. Dalam pengujian *direct shear*, nilai kekuatan geser pada dasarnya bergantung pada resistensi spesimen dalam menahan gaya lateral dan

gaya vertikal yang diberikan. Namun, ketika spesimen digeser dengan kondisi terendam air (di dalam kompartemen mesin geser), air secara bertahap memasuki ruang pori tanah dari setiap sisi spesimen hingga menyentuh seluruh permukaan partikel tanah. Hal ini menyebabkan perubahan perilaku tanah terhadap resistensi geser.



Gambar 12. Pengaruh kadar butiran karet terhadap nilai kohesi tanah

Hidrasi semen mampu mengikat partikel tanah dengan karet dan menyebabkan campuran menjadi lebih kaku dan keras setelah periode pengeringan 3 hari. Hal ini tidak terlepas dari peranan unsur SiO₂ di dalam semen yang mampu meningkatkan kepadatan partikel, mengurangi ruang pori (penurunan rembesan air ke dalam tanah) dan meningkatkan gesekan internal antar partikel padat. Disisi lain, penambahan *graphene oxide* juga membantu percepatan proses hidrasi semen di dalam tanah.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut: Batas konsistensi tanah dari hasil pengujian batas cair dan batas plastis menurun akibat substitusi butiran karet hingga kadar 15%. Penurunan indeks plastisitas tanah mengindikasikan pada kemampuan tanah dalam menahan geser menjadi lebih baik. Berdasarkan uji pemadatan *standard Proctor*, diamati bahwa kepadatan kering maksimum berkurang seiring dengan peningkatan persentase butiran karet pada kedua jenis campuran tanah (SR dan SR-G). Hal ini disebabkan oleh berat jenis karet yang lebih rendah menggantikan nilai referensi tanah dalam volume yang setara. Substitusi 0,05% *graphene oxide* ke dalam campuran tanah secara umum menunjukkan peningkatan kekuatan tegangan geser lebih tinggi bila dibandingkan dengan campuran tanpa *graphene oxide*. Substitusi butiran karet menyebabkan kekuatan geser tanah

yang dalam hal ini nilai kohesi meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai optimal, yaitu pada campuran 15%. Campuran butiran karet yang tinggi mempunyai kekuatan interaksi yang lebih rendah antara tanah dengan partikel butiran karet.

Secara umum, campuran SR5-G5 (89 % Tanah + 5% CR + 5.95% Semen + 0.05% GO) menunjukkan perpindahan horisontal yang cukup tinggi diantara sampel lainnya. Penambahan butiran karet pada tanah menyebabkan kekuatan geser tanah meningkat secara bertahap hingga campuran 10%, namun penambahan karet yang lebih tinggi membuat efek destruktif yaitu kekuatan interaksi antara tanah dengan butiran karet lebih rendah karena *interlocking* antara tanah dengan butiran karet menjadi lebih kecil.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penyusun sampaikan kepada Dr. Andy Tirta, M. Sc. selaku Rektor UTS periode 2016-2020, Nurul Izzati, S. Si., M. Sc. selaku IO UTS periode 2016-2020, Mohammad Khairul Anam Bin Che Mat selaku Mobility CSD UTP, Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Nusa Tenggara Barat (Pemprov. NTB) yang telah memberikan dukungan moral dan materi dalam mendukung terlaksananya penelitian ini.

Daftar Pustaka

AASHTO M 145-91. (2008). *Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Abbasi, N., & Mahdieh, M. (2018). Improvement of geotechnical properties of silty sand soils using natural pozzolan and lime. *International Journal of Geo-Engineering*, 1-12.

Al-Neami, M. A. (2018). Stabilization of Sandy Soil Using Recycle Waste Tire Chips. *International Journal of GEOMATE*, 15(48), 175-180.

Anvari, S. M., Shooshpasha, I., & Kutanaei, S. S. (2017). Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 936-944.

ASTM D2487. (2006). *Standard Practice For Classification Of Soils For Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bahmani, S. H., Huat, B. B., Asadi, A., & Farzadnia, N. (2014). Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 350-359.

BS 1377-1. (1995). *General requirements and sample preparation*. London: British Standards Institution.

BS 1377-2. (1996). *Classification tests*. London: British Standards Institution.

BS 1377-4. (1996). *Compaction-related tests*. London: British Standards institution.

BS 1377-7. (1996). *Shear strength tests (total stress)*. London: British Standard Institution.

Budi, G. S. (2011). *Pengujian Tanah di Laboratorium Penjelasan dan Panduan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Consoli, N. C., Carretta, M. S., Leon, H. B., Schneider, M. E., Reginato, N. C., & Carraro, J. A. (2019, Mei 10). Behaviour of Cement-Stabilised Silty Sands Subjected to Harsh Environmental Conditions. *Geotechnical Engineering*, 1-9.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principle of Geotechnical Engineering 9th Edition*. Boston, United States of America: Cengage Learning.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2019, October 7). *Soil Texture*. Retrieved from Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org>

Fuente, J. D. (2015, March 3). *Lets Learn: Understanding Graphene*. Retrieved March 15, 2019, from Graphenea: <https://www.graphenea.com/pages/graphene#.Xx0n3Z4za03>

Gencil, O. (2013). The Effect of Polymer-Cement Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils. *International Journal of Polymer Science*, 1-8.

Halsted, G. E., Adaska, W. S., & McConnell, W. T. (2008). *Guide to Cement-Modified Soil (CMS)*. Washington DC: Portland Cement Association.

Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah 1 Edisi ketiga*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press. Knappett, J. A., & Craig, R. F. (2012). *Craig's Soil Mechanics Eighth edition*. London dan New York: Spon Press.

Lee, J., Salgado, R., & Carraro, J. A. (2004). Stiffness Degradation And Shear Strength of Silty

- Sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 831-843.
- Mardesic, T., Shahin, M. A., & Nikraz, H. R. (2009). Geotechnical Properties of Red Sand Mixed With Tire Grains and Powders. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 348-351.
- Moon, S.-W., Vinoth, G., Subramanian, S., Kim, J., & Ku, T. (2019). Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand. *Granular Matter*, 1-13.
- Naseri, F., Irani, M., & Dehkhodarajabi, M. (2016). Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil. *archives of civil and mechanical engineering*, 695-701.
- P'kla, A., & Ayité, Y. M. (2019). Study of the Mechanical Behavior of Agbelouve Silty Sand Stabilized with Cement Used as a Roadway Layer in Southern Togo. *Advances in Materials*, 8(3), 127-131.
- Rahgozar, M., & Saberian, M. (2016). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips. *Geotechnical Properties of peat with waste tyre chips*, 18(03), 1-12.
- Ravichandran, P., Prasad, A. S., Krishnan, K. D., & Rajkumar, P. R. (2016, February). Effect of Addition of Waste Tyre Crumb Rubber on Weak Soil Stabilisation. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(5), 1-5.
- Signes, C. H., Roca, J. G., Fernández, P. M., Torre, M. E., & Franco, R. I. (2016). Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres. *Applied Clay Science*, 132-133.
- Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., & Liang, J. (2002). Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 128(10), 849-859.
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit KMTS FT UGM.
- Valizadeh, M., & Choobbasti, A. J. (2019). Evaluation of nano-graphene effect on mechanical behavior of clayey sand with microstructural and self-healing approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(3), 299-318.
- Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2017). Influence of crumb rubber on the geotechnical properties of clayey soil. *Environment, Development and Sustainability*, 2565-2586.
- Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2018). Influence of crumb rubber on the geotechnical properties of clayey soil. *Environment, Development and Sustainability*, 2565-2586.
- Yang, B. (2015). *Performance of bio-based soil stabilizers in transportation earthworks-laboratory investigations*. Ames, USA: Iowa State University Digital Repository.
- Zhang, T., Xue, Q., Zhang, S., & Dong, M. (2012). Theoretical approaches to graphene and graphene-based materials. *Nanotoday*, 7(3), 180-200.
- Zhou, G.-X., Zhong, J., Zhang, H., Hu, X., Wu, J., Koratkar, N., & Shi, X. (2017). Influence of releasing graphene oxide into a clayey sand: physical and mechanical properties. *Royal Society of Chemistry Advances*, 18060-18067.
- Ziadat, A. H., & Sood, E. (2014). An Environmental Impact Assessment of the open burning of scrap tires. *Journal of Applied Sciences*, 14(21), 2695-2703.