

Pengaruh Stabilisasi Semen pada *Mudrock* Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas

The Effect of Cement Stabilization on Unconfined Compressive Strength of Mudrock

Nurza Purwa Abiyoga, Edi Hartono

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. *Clayshale* dan *siltstone* adalah jenis sedimen yang secara umum disebut *mudrock*. Istilah *mudrock* digunakan untuk merujuk kepada jenis batuan sedimen yang terbentuk dari material berbutir halus, seperti lanau atau lempung. *Mudrock* merupakan jenis batuan yang memiliki tingkat kekerasan tinggi, namun kekurangan dari *mudrock* adalah durabilitasnya terhadap paparan hidrosfer dan atmosfer yang sangat rendah. Hal ini sering kali menjadi hambatan pada saat proses konstruksi di lapangan. Stabilisasi dengan menggunakan semen merupakan salah satu cara untuk meningkatkan daya dukung dan durabilitas terhadap siklus perubahan cuaca. Selanjutnya, sebagian besar penelitian stabilisasi *mudrock* menggunakan metode campuran kering pada persiapan spesimen. Penelitian ini bertujuan untuk melihat keefektifan dari stabilisasi semen dan metode pencampuran *wet mixing* pada *clayshale* dan *siltstone*. Untuk mengetahui kuat tekan dari tanah, pengujian kuat tekan bebas dilakukan pada spesimen dengan tambahan semen sebanyak 10% dari berat volume kering. Pengujian batas-batas *Atterberg* juga dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan semen pada indeks plastisitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah dilakukan stabilisasi seluruh spesimen mengalami penurunan pada batas cair dan kenaikan pada batas plastis. Hal ini menyebabkan penurunan pada indeks plastisitas *mudrock*. Nilai kuat tekan bebas pada spesimen *clayshale* dan *siltstone* mengalami peningkatan secara signifikan. Singkatnya, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa spesimen yang dipersiapkan dengan menggunakan metode *spray mixing* memiliki nilai kuat tekan bebas yang tinggi dan modulus elastisitas yang lebih rendah dibandingkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing*.

Kata kunci: *mudrock*, stabilisasi semen, kuat tekan bebas, *dry mixing*, *spray mixing*.

Abstract. Clayshale and siltstone are types of sediment that generally defined as mudrock. It's refer to a kind of sedimentary rock that formed from fine-grained material, for instance, clay or silt. Mudrock has a high level of hardness, however, the disadvantage of mudrock is the durability of hydrosphere and atmospheric exposure that considered very low. This often becomes an obstruction during the construction process in the field. Cement stabilization is one of the ways to increase the bearing capacity and durability against weather cycle. Furthermore, most studies in the field of mudrock stabilization techniques have only focused on dry mixing. This research set out to investigate the effectiveness of cement stabilization and the wet mixing method on clayshale and siltstone. To determine the soil compressive strength, unconfined compression strength test performed using specimen with 10% amount of cement corresponding to its dry unit weight. Atterberg limit test also performed in order to identify the influence of cement addition on plasticity index. The results of this investigation show that after stabilization, all specimen have decreased on liquid limit and increased on plastic limit, which caused a decrement on mudrock plasticity index. The unconfined compression strength increased significantly on clayshale and siltstone specimen In summary, these results show that specimen prepared using spray mixing method indicate higher unconfined compression strength and lower modulus of elasticity compared to specimen prepared using dry mixing method.

Keyword: mudrock, cement stabilization, unconfined compression strength, dry mixing, spray mixing.

1. Pendahuluan

Tanah harus memiliki daya dukung yang cukup untuk menahan beban yang diaplikasikan di atasnya. Beberapa proyek yang mengalami masalah akibat jenis tanah yang kurang baik diantaranya Jalan Tol Cipularang

di Jawa Barat, Pusat Pembinaan dan Pengembangan Prestasi Olahraga Nasional Hambalang di Sentul, dan Jalan Tol Semarang-Bawen di Jawa Tengah.

Contoh tanah yang memiliki masalah pada kuat dukung diantaranya adalah *clayshale* dan *siltstone*. *Mudrock* adalah istilah secara

umum untuk sedimen yang terdiri dari partikel lanau dan lempung (Tucker, 2003). Jumlah *mudrock* diperkirakan mencapai dua pertiga dari seluruh batuan sedimen yang ada di dunia (Ilgen dkk., 2017). Menurut Alatas dkk. (2015) *clayshale* memiliki kuat geser yang tinggi apabila berada pada kondisi terlindungi dari paparan atmosfer dan hidrosfir. Ketika mengalami gangguan akibat iklim, kekuatan dari *clayshale* akan menurun secara drastis. Hal tersebut juga dialami oleh jenis-jenis *mudrock* yang lain.

Siltstone adalah jenis sedimen yang lebih dari sebagian kandungannya terdiri dari lanau dengan ukuran partikel kurang dari 1/16 mm dan lebih besar dari 1/256 mm (Tucker, 2003). *Claystone* terbentuk dari lempung (ukuran partikel kecil dari 1/256 mm) yang tersedimentasi. Apabila lempung tersebut memiliki susunan sedimen berbentuk lembaran dan memiliki bentuk pecahan pipih, maka disebut dengan *shales*.

Stabilisasi dengan menggunakan semen merupakan salah satu metode stabilisasi tanah secara kimiawi. Stabilisasi kimiawi dilakukan dengan cara mencampurkan bahan-bahan kimia dengan tanah agar terjadi reaksi antara keduanya (Muntohar, 2014). Reaksi yang terjadi diantaranya pertukaran kation, flokulasi, aglomerasi, hidrasi semen, dan reaksi pozzolanik. Pertukaran kation terjadi ketika unsur kalsium yang berasal dari semen menggantikan natrium dan kalium yang berada pada *diffuse double layer*. Lapisan ini terbentuk di antara partikel-partikel lempung yang bermuatan negatif. Jika lapisan ini semakin tebal maka tanah akan bersifat lebih plastis. Penggantian pengisi lapisan dengan unsur kalsium dapat memperkecil ketebalan dari *diffuse double layer*. Ketika ketebalan *diffuse double layer* menipis maka tanah akan berperilaku lebih getas. Proses pertukaran kation selanjutnya diikuti oleh proses flokulasi dan aglomerasi. Flokulasi dan aglomerasi menyebabkan partikel-partikel lempung saling mengikat dan membentuk butiran yang lebih besar. Proses ini dapat meningkatkan sudut gesek internal dari tanah yang distabilisasi.

Penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi hampir dapat digunakan pada semua jenis tanah. Namun, tanah dengan kandungan organik yang tinggi dan pH rendah tidak cocok

distabilisasi menggunakan semen. Menurut Robbins dan Mueller (dalam ACI, 2009) tanah dengan kadar organik lebih dari 2% dan memiliki pH kurang dari 5,3 tidak akan bereaksi dengan baik apabila dicampurkan dengan semen.

Stabilisasi kimia dengan menggunakan semen dapat dilakukan dengan dua cara: *dry mixing* atau pencampuran kering dan *wet mixing* atau pencampuran basah. Metode pencampuran ini tentunya akan mempengaruhi hasil akhir dari stabilisasi tanah. Diperlukan studi lebih lanjut untuk meneliti bagaimana pengaruh metode pencampuran tersebut terhadap kekuatan dan ketahanan tanah-semen produk stabilisasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari bagaimana pengaruh penambahan semen dan metode pencampuran *dry mixing* dan *wet mixing* terhadap indeks plastisitas, nilai kuat tekan bebas, *secant modulus*, dan *brittleness index* tanah *mudrock* berdasarkan pengujian kuat tekan bebas. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi media untuk memperluas pengetahuan mengenai stabilisasi *mudrock* dengan menggunakan semen. Pertimbangan-pertimbangan dalam pekerjaan perbaikan *mudrock* dapat menggunakan penelitian ini sebagai salah satu tinjauan pustaka dalam memilih metode perbaikan yang akan digunakan. Penelitian ini juga dapat menjadi dasar untuk penelitian-penelitian lebih lanjut terkait perbaikan pada *mudrock*.

2. Metode Penelitian

Batuan sedimen yang digunakan berasal dari Tol Semarang-Bawen Km. 441+800. Sebelum pengujian kuat tekan bebas dilakukan, perlu dipelajari terlebih dahulu karakteristik dari *mudrock* yang akan diuji. Sifat-sifat fisis diteliti sehingga dapat dilihat kolerasinya dengan perilaku tanah tersebut ketika menerima beban. Pengujian sifat fisis tersebut meliputi pengujian berat jenis, gradasi butiran, dan batas-batas konsistensi. Pemadatan dengan menggunakan *Proctor* standar juga dilakukan untuk menentukan jumlah air yang akan digunakan nantinya.

Flow cone test dilakukan pada pasta semen untuk mengetahui perbandingan air semen paling tepat yang dapat dilewatkan melalui lubang sprayer. Pemberian pasta semen



- (a) Piston penggerak,
- (b) plat perata beban,
- (c) *load cell*,
- (d) pengukur deformasi digital berketelitian 0,01 mm,
- (e) panel kontrol, dan
- (f) komputer.

Gambar 1 *Digital Unconfined Compression Test Machine*

diupayakan secara merata pada seluruh bagian adukan ketika disemprotkan melalui *sprayer*. Pasta semen yang diuji menggunakan perbandingan air semen sebesar 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0 dengan satu kali pengujian menggunakan pasta semen sebanyak 1725ml.

Metode Pencetakan Benda Uji

Pencampuran kering dilakukan dengan menambahkan air hingga kadar air optimum tanah terpenuhi, setelah sebelumnya tanah dan semen diaduk rata dalam keadaan kering. Metode *spray mixing* dilakukan dengan cara mencampurkan semen dalam bentuk pasta pada tanah yang telah berada pada kondisi kadar air optimum. Pencampuran dilakukan dengan menggunakan *sprayer*. Pasta semen yang digunakan dalam penelitian ini memiliki perbandingan air semen sebesar 0,7. Campuran antara tanah, semen, dan air sesegera mungkin dicetak dan dipadatkan sebelum mengalami kehilangan kadar air. Pemadatan dilakukan tiap tiga lapisan dengan cara ditekan. Kontrol kepadatan tanah berdasarkan berat volume tanah yang seharusnya memenuhi volume untuk cetakan berdiameter 35 mm dan tinggi 70 mm. Setelah spesimen dipadatkan, spesimen dikeluarkan dengan menggunakan *extruder*

dan disimpan dengan menggunakan plastik agar kadar air tidak banyak berkurang selama proses pemeraman. Pemeraman dilakukan di dalam ruangan tanpa paparan sinar matahari langsung selama 7 hari.

Pengujian Kuat Tekan Bebas

Spesimen yang telah berumur 7 hari diuji dengan alat pengujian kuat tekan bebas seperti pada Gambar 1. Berat dan ukuran spesimen kembali diperiksa sebelum dilakukan pembebanan. Spesimen diletakkan di atas piston penggerak tepat di bagian tengahnya. Kemudian piston dinaikkan hingga benda uji menyentuh pelat perata beban. Pengukur deformasi vertikal dan pembacaan *load cell* pada alat diatur agar berada pada posisi nol. Masukkan data-data benda uji pada perangkat lunak di komputer dan atur kecepatan alat yang digunakan. Kecepatan alat yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,72 mm/menit. Setelah spesimen mengalami keruntuhan, pengujian dihentikan. Pengujian kadar air selanjutnya dilakukan untuk mendapatkan data kadar air dari spesimen yang telah diuji. Pengujian kadar air dilakukan dengan menggunakan seluruh atau sebagian potongan spesimen dengan berat minimal 20 g.

3. Hasil

Sifat Fisis Tanah dan Pasta Semen

Data-data hasil pengujian berat jenis, gradasi butiran tanah, *Atterberg* limit, dan pematatan tanah disajikan pada Tabel 1 untuk *clayshale* dan Tabel 2 untuk *siltstone*. Pengujian dilakukan tanpa menggunakan campuran semen sebagai data awal untuk mengetahui sifat-sifat dan karakteristik tanah asli.

Tabel 1 Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisis Tanah *Clayshale*

Variabel	Hasil
Berat jenis, Gs	2,65
Pasir (%)	6,7
Lanau-lempung (%)	93,3
Batas cair, LL (%)	57,9
Batas plastis, PL (%)	28,4
Batas susut, SL (%)	10,6
Indeks plastisitas, PI (%)	29,5
Kadar air optimum, OMC (%)	19
Berat volume kering maksimum, MDD (kN/m ³)	16,33

Tabel 2 Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisis Tanah *Siltstone*

Variabel	Hasil
Berat jenis, Gs	2,58
Pasir (%)	50,9
Lanau-lempung (%)	49,1
Batas cair, LL (%)	37,5
Batas plastis, PL (%)	22,0
Batas susut, SL (%)	17,1
Indeks plastisitas, PI (%)	15,51
Kadar air optimum, OMC (%)	25
Berat volume kering maksimum, MDD (kN/m ³)	14,8

Berdasarkan data-data tersebut, dapat disimpulkan bahwa menurut USCS tanah jenis *clayshale* termasuk pada jenis tanah CH atau lempung inorganik berplastisitas tinggi. Sedangkan *siltstone* termasuk pada jenis tanah ML-OL atau lanau berlempung dengan plastisitas rendah. Berdasarkan pengujian batas

konsistensi *Atterberg*, *clayshale* memiliki indeks plastisitas yang lebih besar dibandingkan dengan *siltstone*. Indeks plastisitas tanah dipengaruhi oleh mineral lempung yang terkandung di dalamnya. Tanah lempung memiliki indeks plastisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan lanau (Hardiyatmo, 2012).

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pasta semen dengan perbandingan air semen sebesar 0,7 memberikan nilai efflux yang mendekati air. Menurut ASTM (1997) dalam standar C939-97, *efflux* adalah waktu yang dibutuhkan material grouting bervolume 1725 ml untuk mengalir habis melalui celah berdiameter 1,27 mm. Perbandingan air semen ditentukan berdasarkan kemampuan *sprayer* untuk menyemprotkan pasta yang cukup cair sehingga penyebaran semprotannya menjadi efektif.

Tabel 4 Hasil Pengujian *Flow Cone Test*

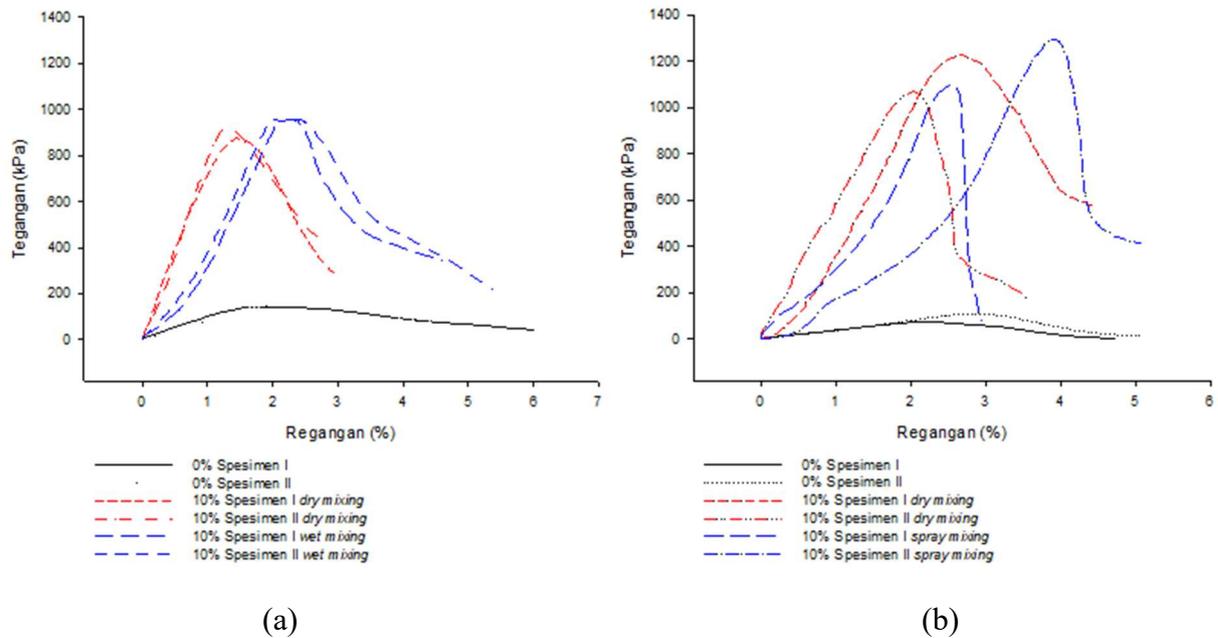
Perbandingan air semen	Efflux rata-rata (detik)	Efflux air rata-rata (detik)
0,5	17,49	8,54
0,6	9,24	7,16
0,7	8,05	7,12
0,8	8,05	6,91
0,9	7,36	6,91
1	7,24	6,91

Indeks Plastisitas

Hasil dari pengujian batas-batas konsistensi dapat dilihat pada Tabel 4. Penambahan semen sebanyak 10% dapat menurunkan batas cair dan meningkatkan batas plastis. Kedua hal tersebut terjadi pada sampel *clayshale* dan *siltstone*. *Clayshale* yang telah distabilisasi semen menurun nilai batas cairnya sebesar 15,2% dan batas plastis meningkat sebesar 9,3%. Penurunan batas cair pada spesimen *siltstone* sebesar 7,9% dan batas plastisnya meningkat sebesar 4,9%. Indeks

Tabel 3 Hasil Pengujian Batas-Batas Konsistensi Tanah

Sampel	Batas cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastisitas (PI) (%)
<i>Clayshale</i>	57,9	28,4	29,5
<i>Clayshale</i> 10% semen	42,7	37,7	5,0
<i>Siltstone</i>	47,6%	30,7%	16,9%
<i>Siltstone</i> 10% semen	39,8%	35,6%	4,2%



Gambar 2 Hubungan Tegangan dan Regangan pada (a) *Clayshale* dan (b) *Siltstone*

plastisitas dari kedua jenis *mudrock* tersebut mengalami penurunan sebesar 24,5% pada *clayshale* dan 12,7% pada *siltstone*.

Kurva Hubungan Tegangan dan Regangan

Pengujian kuat tekan bebas akan menghasilkan data hubungan antara tegangan dan regangan. Data tersebut disajikan dalam bentuk grafik yang digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan bebas dan modulus elastisitas dari spesimen. Hasil pengujian kuat tekan bebas pada *mudrock* yang distabilisasi dengan menggunakan metode *dry mixing* dan *spray mixing* ditampilkan pada Gambar 2. Setiap benda uji memiliki perilaku yang berbeda-beda. Regangan saat kuat tekan maksimum terjadi semakin menurun pada spesimen yang telah distabilisasi dengan menggunakan semen. Sejalan dengan hal tersebut, tegangan aksial yang mampu diterima juga meningkat apabila semen ditambahkan pada spesimen.

Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas didefinisikan sebagai tegangan aksial maksimum yang dapat ditahan

oleh spesimen sebelum mengalami keruntuhan atau regangan axial sebesar 15%. Kegagalan yang terjadi pada spesimen berjenis *brittle failure*, bentuk kegagalan dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai kuat tekan bebas rata-rata dari tiga spesimen yang diuji dijabarkan pada Tabel 5. Kuat tekan bebas maksimum yang dihasilkan oleh spesimen *clayshale* dengan kadar semen 10% meningkat sebesar 602% untuk metode *dry mixing* dan 640,1% untuk metode *spray mixing*. Sedangkan pada *siltstone*, kuat tekan bebas meningkat sebesar 1171,2% dengan menggunakan metode *dry mixing* dan 1226,6% untuk metode *spray mixing*. Spesimen *clayshale* yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 900,125 kPa. Sedangkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *spray mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 957,154 kPa. Spesimen *siltstone* dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 1147,476 kPa. Sedangkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *spray mixing* menghasilkan kuat tekan bebas sebesar 1197,490 kPa.

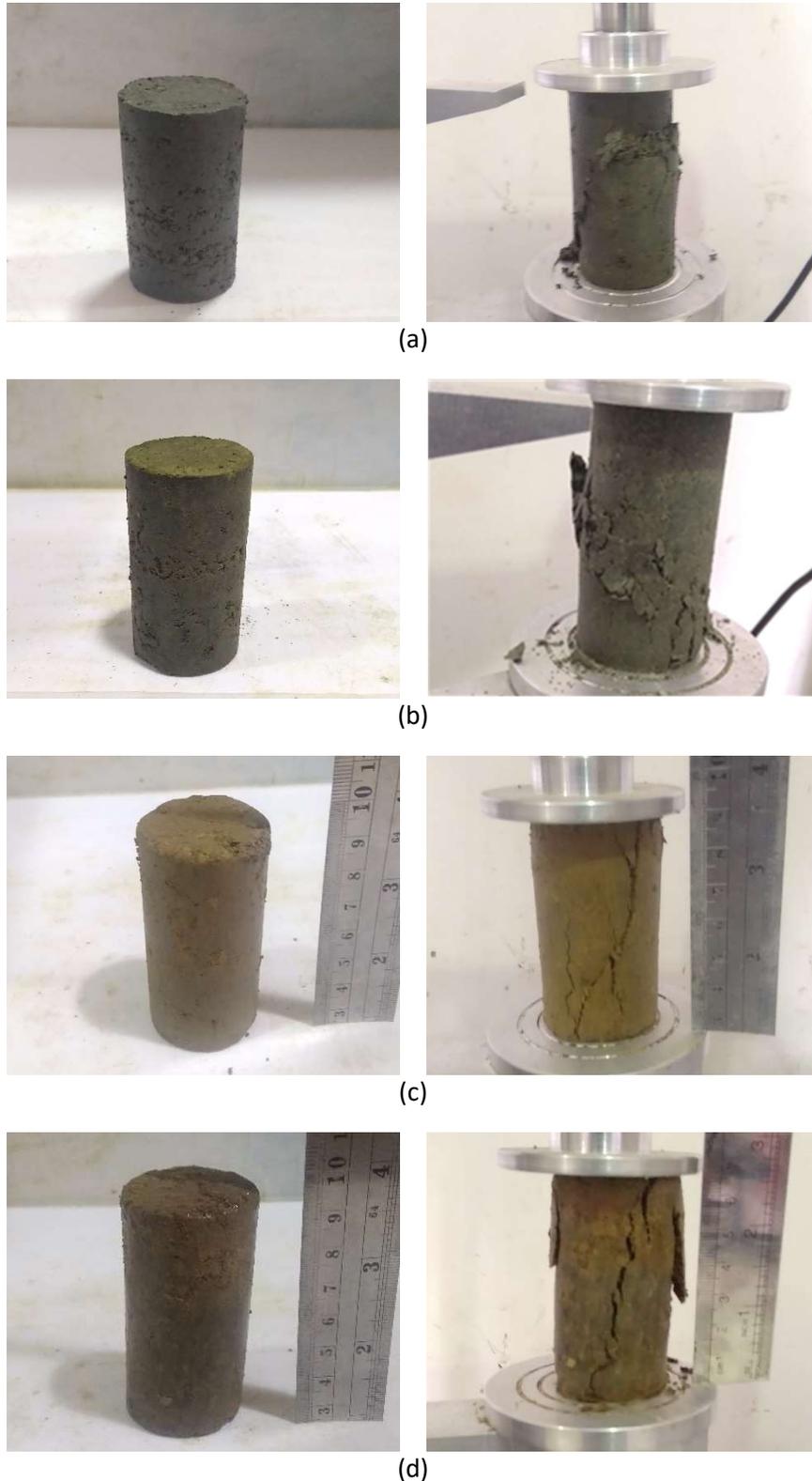
Tabel 5 Nilai Kuat Tekan Bebas Rata-Rata

Kadar Semen	Kuat Tekan Bebas (kPa)			
	<i>Clayshale</i>		<i>Siltstone</i>	
	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>
0%	149,531	149,531	90,270	90,270
10%	900,125	957,154	1147,476	1197,490

Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah parameter untuk mengidentifikasi tingkat kegetasan dari spesimen. Modulus elastisitas pada pengujian kuat tekan bebas dinyatakan dalam nilai *secant modulus*. Nilai *secant modulus* dari hasil pengujian disajikan pada Tabel 6. Pada

spesimen *clayshale* dan *siltstone*, metode *dry mixing* menghasilkan *secant modulus* yang lebih besar. Hal ini berarti dengan metode *dry mixing*, spesimen yang dihasilkan akan memiliki sifat yang lebih getas apabila dibandingkan dengan spesimen *spray mixing*.



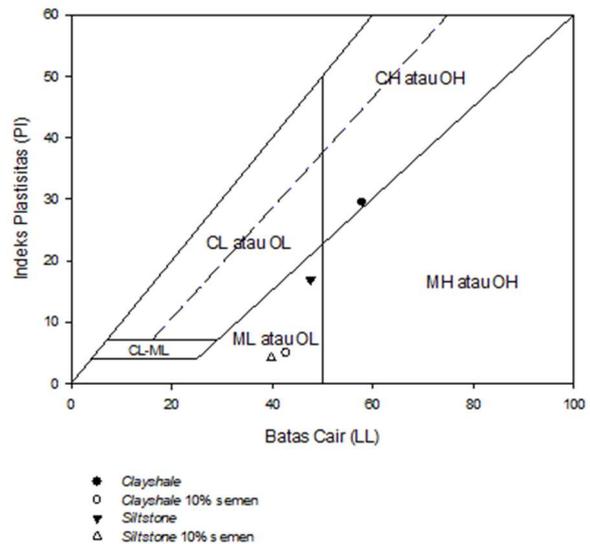
Gambar 3 Spesimen (a) *Clayshale* 0%, (b) *Clayshale* 10%, (c) *Siltstone* 0%, dan (d) *Siltstone* 10% Sebelum dan Sesudah Pengujian

4. Pembahasan

Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Indeks Plastisitas Tanah

Penambahan semen sebanyak 10% dapat menurunkan indeks plastisitas sebesar 24,5% pada *clayshale* dan 12,7% pada *siltstone*. Menurut Djelloul dkk. (2018) hal ini disebabkan oleh proses flokulasi dan aglomerasi yang terjadi antara mineral lempung dan semen. Hasil serupa juga dipaparkan oleh Athanasopoulou (2016) yang menyatakan bahwa partikel lempung dan semen mengikat satu sama lain dan semakin lama akan membentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar sehingga akan mengurangi plastisitas dari tanah. Locat dkk. (dalam Chew dkk., 2004) berpendapat bahwa salah satu penyebab kondisi ini adalah air yang terperangkap pada pori intra-agregat. Air tersebut akan tetap meningkatkan kadar air pada tanah namun keberadaannya tidak benar-benar mempengaruhi kondisi tanah.

Menurunnya indeks plastisitas dapat dilihat pengaruhnya pada klasifikasi tanah dengan metode USCS seperti pada Gambar 4. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai indeks plastisitas dan sifatnya oleh Jumikis (dalam Hardiyatmo, 2012) digolongkan menjadi beberapa jenis yang dapat dilihat sesuai dengan Tabel 7. Berdasarkan tabel tersebut, penambahan semen mengubah klasifikasi *clayshale* dari tanah berplastisitas tinggi menjadi berplastisitas rendah dan klasifikasi *siltstone* dari tanah berplastisitas sedang menjadi berplastisitas rendah.



Gambar 4 Klasifikasi Tanah Dengan Metode USCS (ASTM, 2011)

Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas

Berdasarkan hasil pengujian, penambahan semen pada *clayshale* dan *siltstone* dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas. Hasil-hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Kang dkk. (2017), Sariosseiri dan Muhunthan (2009), dan Lee dkk. (2005) juga menunjukkan bahwa penambahan semen dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas. Semakin tinggi rasio perbandingan antara semen dan tanah pada campuran, maka jumlah pori di dalamnya akan berkurang dan meningkatkan kuat tekannya (Lee dkk., 2005). Peningkatan kekuatan dari tanah yang distabilisasi dengan semen pada kondisi awal sebagian besar diakibatkan oleh reaksi hidrasi semen, sedangkan untuk peningkatan pada jangka panjang dalam kurun waktu tahunan disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara

Tabel 6 Nilai *Secant Modulus* Rata-Rata

Kadar Semen	<i>Secant Modulus</i> (MPa)			
	<i>Clayshale</i>		<i>Siltstone</i>	
	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>	<i>Dry Mixing</i>	<i>Spray mixing</i>
0%	9,495	9,495	3,742	3,742
10%	76,690	39,036	49,507	48,180

Tabel 7 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah (Jumikis dalam Hardiyatmo, 2012)

PI	Sifat	Jenis tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 - 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

mineral lempung dan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen (Ho dkk., 2017).

Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat dilihat bahwa penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi lebih efektif apabila diaplikasikan pada *siltstone* dibandingkan dengan *clayshale*. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kadar air pada *siltstone* yang lebih besar jika dibandingkan dengan *clayshale*. Kadar air yang lebih tinggi membuat reaksi hidrasi berlangsung lebih cepat dan merata. Perbandingan air pori dan jumlah semen sangat berpengaruh pada kekuatan dan karakteristik deformasi dari tanah yang distabilisasi semen, dikarenakan proses hidrasi yang terjadi merupakan hasil dari reaksi air pori dan semen ketika dilakukan pencampuran (Horpibulsuk dkk., 2005). Gartner dkk. (2002) menjelaskan bahwa hidrasi akan terus terjadi hingga tidak ada lagi air dan komponen semen untuk bereaksi atau tidak terdapat tempat untuk menempatkan produk hasil hidrasi.

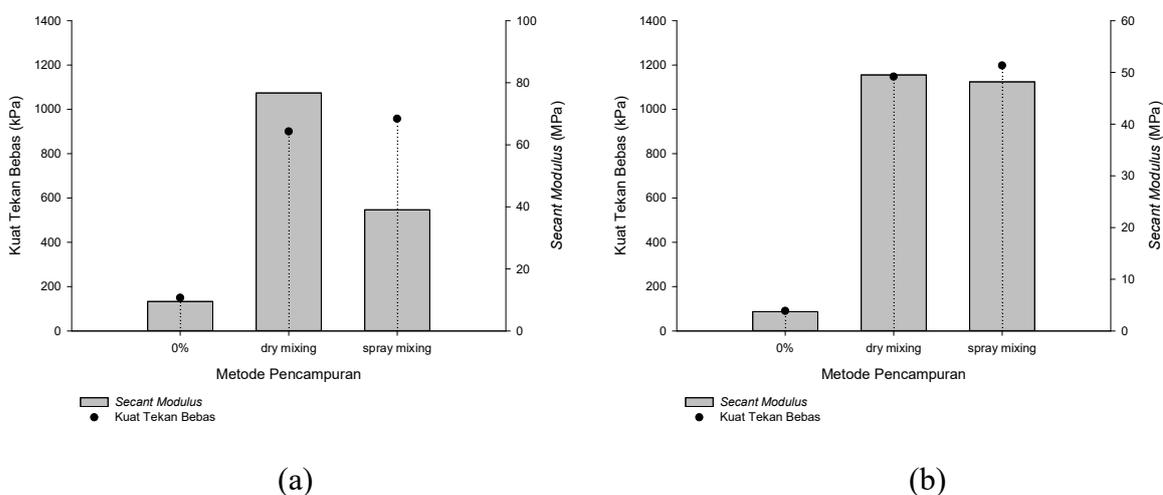
Stabilisasi tanah dengan menggunakan semen akan lebih sulit dilakukan pada tanah dengan butiran halus seperti lempung. Hal ini disebabkan tanah berbutir halus akan lebih susah untuk dicampurkan dengan semen dan dipadatkan, selain itu jumlah semen yang diperlukan untuk tanah berbutir halus juga lebih banyak sehingga kurang ekonomis (ACI, 2009). Faktor lain yang mungkin dapat mempengaruhi adalah plastisitas tanah. Berdasarkan hasil pengujian indeks plastisitas, *clayshale* memiliki plastisitas yang lebih tinggi

dibandingkan *siltstone*. Menurut Robbins dan Mueller; Dunlap dkk., dalam ACI (2009) hampir semua jenis tanah dapat distabilisasi dengan semen, kecuali tanah organik, tanah berplastisitas tinggi, dan tanah yang memiliki kadar sulfat sedang atau tinggi.

Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Secant Modulus

Gambar 5 menunjukkan spesimen yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* menghasilkan kuat tekan bebas yang lebih rendah dibandingkan dengan metode *spray mixing*. Perbedaan kuat tekan yang terjadi sebesar 57,029 kPa pada spesimen clayshale dan 50,014 kPa pada spesimen siltstone. Sebaliknya, nilai secant modulus spesimen yang dipersiapkan dengan metode *dry mixing* lebih tinggi dibandingkan dengan metode *spray mixing*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun menghasilkan sampel yang lebih getas, namun kuat tekan sampel *dry mixing* tidak sekuat sampel *spray mixing*.

Gartner dkk (2002) menjelaskan tahapan awal hidrasi berupa reaksi cepat ketika semen bertemu air, pada fase ini terjadi hidrolisis pada permukaan dan pelepasan ion pada larutan. Reaksi hidrasi melambat ketika semen dan air dalam proses pencampuran kemudian menghasilkan lapisan hidrat pada permukaan C3S. Dengan menggunakan metode *spray mixing* reaksi hidrasi tersebut dapat dioptimalkan dengan langsung mencampurkan semen dan air menjadi satu larutan (pasta



Gambar 5 Grafik Hubungan Metode Pencampuran dengan *Secant Modulus* dan Kuat Tekan Bebas pada (a) *Clayshale* dan (b) *Siltstone*

Tabel 8 Nilai Brittleness Index Benda Uji *Clayshale* dan *Siltstone*

Spesimen	Brittleness Index	
	<i>Clayshale</i>	<i>Siltstone</i>
0%	0.494	0,477
<i>Dry Mixing</i>	0.595	0,808
<i>Spray Mixing</i>	0.723	0,609

semen). Sedangkan pada metode *dry mixing* proses ini terhambat karena air pada campuran merupakan air pori dan tidak berkontak langsung dengan butiran semen. Metode pencampuran *spray mixing* juga akan menghasilkan struktur tanah-semen yang lebih homogen dikarenakan fase pencampuran yang lebih lama dan keberadaan air yang diaplikasikan pada semen (Egorova dkk., 2017).

Pengaruh Penambahan Semen Terhadap Brittleness Index

Brittleness Index adalah parameter yang dapat digunakan untuk mengukur penurunan tegangan secara tiba-tiba setelah benda uji mencapai tegangan tertinggi (Sariosseiri dan Muhunthan, 2009). Semakin kecil nilai I_B maka keruntuhan akan bersifat lebih daktail (Li dkk., 2014). Nilai I_B memiliki kolerasi dengan nilai *secant modulus*. Semakin tinggi nilai I_B maka nilai E_{50} akan semakin tinggi pula. Berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh Eskisar dkk. (2014) penambahan semen sebanyak 5% akan mengubah perilaku benda uji dari daktail menjadi getas dan penambahan sebanyak 10% akan mengubah benda uji menjadi sangat getas. Hasil perhitungan nilai I_B berdasarkan grafik hubungan tegangan dan regangan dapat dilihat pada Tabel 8.

5. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil riset yang telah dilakukan, didapat kesimpulan sebagai berikut:

- Penambahan semen dapat menurunkan Indeks plastisitas *mudrock*. Hal ini dikarenakan adanya penurunan batas cair (*liquid limit*) dan kenaikan batas plastis (*plastic limit*). Proses flokulasi dan aglomerasi adalah pengaruh utama terbentuknya butiran-butiran yang lebih besar penyebab penurunan indeks plastisitas.
- Nilai kuat tekan bebas *clayshale* yang ditambahkan dengan semen sebanyak 10%

dari berat kering akan meningkat sebesar 640,1%. Penambahan semen pada *siltstone* meningkatkan kuat tekan bebas sebesar 1126,6%.

- Metode pencampuran *spray mixing* menghasilkan kuat tekan bebas yang lebih besar dibandingkan dengan metode *dry mixing*. Namun *secant modulus* yang lebih besar dicapai dengan menggunakan metode pencampuran *dry mixing*.
- Nilai *secant modulus* akan meningkat setelah dilakukan stabilisasi dengan menggunakan semen. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan semen akan meningkatkan kuat tekan namun membuat benda uji menjadi semakin getas.
- Nilai *brittleness index* pada seluruh spesimen *mudrock* mengalami kenaikan setelah distabilisasi semen. Hal ini sejalan dengan karakteristik keruntuhan spesimen yang berubah dari daktail menjadi getas setelah produk hidrasi dan pozzolanik mengikat partikel *mudrock*.

6. Daftar Pustaka

- ACI. 2009. *Report on Soil Cement. Byulleten Eksperimentalnoi Biologii i Meditsiny* (230.1R, Vol. 76). Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Alatas, I. M., Kamaruddin, S. A., Nazir, R., Irsyam, M., & Himawan, A. 2015. Shear Strength Degradation of Semarang Bawen Clay Shale due to Weathering Process. *Jurnal Teknologi*, 77(11), 109–118.
- ASTM. 1997. C939-97: Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete. In *ASTM International*. West Conshohocken.
- ASTM. 2011. D2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). In *ASTM International*. West Conshohocken.
- Athanasopoulou, A. 2016. The role of curing

- period on the engineering characteristics of a cement-stabilized soil, *5*(4), 38–52.
- Chew, S. H., Kamruzzaman, A. H. M., & Lee, F. H. 2004. Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *130*(7), 696–706.
- Djelloul, R., Mrabent, S. A. B., Hachichi, A., & Fleureau, J. M. 2018. Effect of Cement on the Drying–Wetting Paths and on Some Engineering Properties of a Compacted Natural Clay from Oran, Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, *36*(2), 995–1010.
- Egorova, A. A., Rybak, J., Stefaniuk, D., & Zajączkowski, P. 2017. Basic Aspects of Deep Soil Mixing Technology Control. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (pp. 1–10). Prague, 12–16 Juni 2017: IOP Publishing.
- Eskisar, T., Altun, S., & Kal, İ. 2014. Assessment of strength development and freeze–thaw performance of cement treated clays at different water contents. *Cold Regions Science and Technology*, *111*, 50–59.
- Gartner, E. M., Young, J. F., Damidot, D. A., & Jawed, I. 2002. Hydration of Portland cement. In J. Bensted & P. Barnes (Eds.), *Structure and Performance of Cements* (2nd ed., pp. 57–113). London: Spon Press.
- Hardiyatmo, H. C. 2012. *Mekanika Tanah 1* (6th ed.). Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Ho, L. S., Nakarai, K., Ogawa, Y., Sasaki, T., & Morioka, M. 2017. Strength development of cement-treated soils: Effects of water content, carbonation, and pozzolanic reaction under drying curing condition. *Construction and Building Materials*, *134*, 703–712.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., & Nagaraj, T. S. 2005. Clay–Water/Cement Ratio Identity for Cement Admixed Soft Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *131*(2), 187–192.
- Ilgen, A. G., Heath, J. E., Akkutlu, I. Y., Bryndzia, L. T., Cole, D. R., Kharaka, Y. K., Suarez-Rivera, R. 2017. Shales at all scales: Exploring coupled processes in mudrocks. *Earth-Science Reviews*, *166*, 132–152.
- Kang, G., Tsuchida, T., & Kim, Y. 2017. Strength and stiffness of cement-treated marine dredged clay at various curing stages. *Construction and Building Materials*, *132*, 71–84.
- Lee, F., Lee, Y., Chew, S., & Yong, K. 2005. Strength and Modulus of Marine Clay-Cement Mixes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *131*, 178–186.
- Li, L., Shao, W., Li, Y., & Cetin, B. 2014. Effects of Climatic Factors on Mechanical Properties of Cement and Fiber Reinforced Clays. *Geotech Geol Eng*, *33*, 537–548.
- Muntohar, A. S. 2014. *Prinsip-Prinsip Perbaikan Tanah*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian, Publikasi, dan Pengabdian Masyarakat.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. 2009. Effect of Cement Treatment on Geotechnical Properties of Some Washington State Soils. *Engineering Geology*, *104*(1–2), 119–125.
- Tucker, M. E. 2003. *Sedimentary Rocks in the Field: Third Edition*. John Wiley & Sons Ltd (3rd ed.). West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.