

Laju Pengembangan Dan CBR Lapukan Batuan Sedimen Yang Dipengaruhi Metode Stabilisasi

* **Edi Hartono**¹

¹Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jl. Brawijaya, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183

^{*)} edi.hartono@umy.ac.id

Abstract

Clay shale and siltstone are siliciclastic rocks resulting from the sedimentation process, where most of the constituent minerals are clay and quartz. Generally, this sedimentary rock is under a layer of soil or other rocks. Many constructions are built on this rock. Although it has high strength in its natural condition, the sedimentary rock is easily weathered when exposed to the hydrosphere and atmosphere. One of the efforts to increase the strength of soil or weathered rock is chemical stabilization using cement. This study uses the California Bearing Ratio (CBR) to analyze the increased strength of stabilized clay shale and siltstone. This stabilization was carried out by mixing the soil with cement at 2%, 5%, 7%, and 10% of the dry weight of the specimen. Dry and wet mixing methods were used. The dry mix method is done by stirring the soil and cement dry and then adding water. The wet method was done by stirring the soil while spraying cement paste. The water used in dry and wet mix methods is at Optimum Moisture Content (OMC). The results showed that the CBR of the clay shale wet method was higher than the dry mix. On the other hand, the CBR of siltstone mixed by the dry method is higher than the wet method. The test indicates that mixing methods can affect stabilization results. However, other factors have a more substantial influence, so the selection of mixing methods depends on the stabilized soil type.

Keywords: Sedimentary Rock, Stabilization, Mixing Method, CBR

Abstrak

Clay shale dan siltstone merupakan batuan siliklastik hasil proses sedimentasi yang sebagian besar mineral penyusunnya berupa lempung dan kuarsa. Pada umumnya jenis batuan sedimen ini berada di bawah lapisan tanah atau batuan lain. Banyak konstruksi yang dibangun diatas batuan ini. Walaupun memiliki kekuatan yang tinggi pada kondisi alaminya, namun batuan sedimen tersebut mudah mengalami pelapukan apabila terkena hidrosfer dan atmosfer secara langsung. Salah satu upaya untuk meningkatkan kekuatan tanah/batuan yang telah lapuk adalah dengan stabilisasi kimiawi menggunakan semen. Pada penelitian ini nilai California Bearing Ratio (CBR) digunakan sebagai parameter untuk menganalisis peningkatan kekuatan clay shale dan siltstone yang distabilisasi. Stabilisasi ini dilakukan dengan mencampur tanah dengan semen sebesar 2%, 5%, 7%, dan 10% dari berat kering spesimen. Dua metode pencampuran yang digunakan yaitu metode campuran kering dan basah. Metode campuran kering dilakukan dengan mengaduk tanah dan semen secara kering kemudian ditambahkan air. Metode basah dilakukan dengan cara mengaduk tanah sambil disemprotkan pasta semen. Air yang digunakan dalam campuran metode kering maupun basah adalah air pada kondisi Optimum Moisture Content (OMC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CBR clay shale metode basah lebih tinggi dibandingkan dengan campuran kering. Sebaliknya nilai CBR Siltstone pencampuran metode kering lebih tinggi dibandingkan dengan pencampuran metode basah. Hasil pengujian tersebut mengindikasikan bahwa metode pencampuran dapat mempengaruhi hasil dari stabilisasi, namun terdapat faktor-faktor lain yang memiliki pengaruh lebih kuat sehingga pemilihan metode pencampuran harus disesuaikan dengan jenis tanah yang distabilisasi.

Kata Kunci: Batuan Sedimen, Stabilisasi, Metode Pencampuran, CBR

PENDAHULUAN

Batuan lumpur adalah istilah yang digunakan untuk mendefinisikan batuan sedimen dengan partikel lanau dan lempung sebagai penyusun utamanya. Potter dkk., (2012) menggunakan istilah Batuan sedimen untuk merujuk pada batuan karbonat yang mengandung mineral lumpur (lanau dan lempung) dalam jumlah besar atau dapat juga disebut dengan batuan *argillaceous*. *Clay-bearing rock* merupakan istilah lain yang umum digunakan dalam pengklasifikasian jenis batuan sedimen ini.

Clay shale dan *Siltstone* yang merupakan bagian dari batuan sedimen seringkali ditemukan dalam pekerjaan-pekerjaan konstruksi atau pertambangan yang memerlukan proses penggalian. Hal ini dikarenakan jumlah Batuan sedimen tidak kurang dari dua pertiga bagian dari seluruh batuan sedimen di dunia (Ilgen dkk., 2017). Beberapa proyek konstruksi yang dilakukan di atas lapisan Batuan

sedimen jenis *clay shale* diantaranya jalan tol Cipularang di Jawa Barat, jalan tol Semarang di Jawa Tengah, jalan tol Cisumdawu di Jawa Barat, jalan tol Cipali di Jawa Barat, dan pusat pembinaan dan pengembangan prestasi olahraga nasional Hambalang di Sentul. Seluruh proyek tersebut selama pekerjaannya mengalami kendala berupa longsor pada lereng-lereng sampai dengan pergerakan tanah yang masif akibat beban dari pekerjaan konstruksi. Bahkan pada beberapa segmen ruas jalan tol Cipularang dan Semarang terjadi longsor pada lereng dan badan jalan saat masa layan (pasca konstruksi).

Clay shale terbentuk dari partikel lempung (< 1/256 mm) yang tersedimentasi dengan susunan sedimen membentuk lembaran dan memiliki orientasi bentuk pecahan pipih. Hasil pengujian XRD yang dilakukan oleh Alatas dkk., (2015) menunjukkan bahwa *clay shale* yang diambil dari wilayah Semarang memiliki kandungan mineral lempung *smectite* sebanyak 50%. Batuan dengan kandungan *smectite* dan *pyrite* secara umum dikenal dapat

terdisintegrasi dengan mudah apabila terpapar udara dan air. Selain itu, *clay shale* juga mengandung mineral karbonat *calcite* dan *siderite* sebanyak 30% dan 2%. Mineral ini merupakan mineral berkapur yang mudah larut walaupun proses pelarutannya memakan waktu yang cukup lama.

Siltstone adalah jenis batuan sedimen yang lebih dari sebagian kandungannya terdiri dari lanau dengan ukuran partikel antara 1/16 mm sampai 1/256 mm. *Siltstone* dengan butiran yang lebih kasar terbentuk melalui proses konsolidasi dan sementasi. *Siltstone* merupakan jenis batuan sedimen dengan kandungan mineral lempung yang rendah. Ukuran butir yang lebih besar, serta kandungan mineral *quartz* yang lebih tinggi membuat *Siltstone* memiliki durabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan *clay shale*. Namun, penggunaan *siltstone* sebagai material tanah dasar ataupun ketika berada pada lereng harus tetap mendapat perhatian khusus.

Permasalahan-permasalahan yang terjadi dalam pekerjaan konstruksi di atas lapisan Batuan sedimen diakibatkan oleh rendahnya daya dukung dan durabilitas batuan sedimen setelah terpapar oleh hidrosfer dan atmosfer secara langsung. Pembentukan Batuan sedimen dipengaruhi oleh tekanan *overburden* yang diterima dalam waktu yang lama. Hal ini mengindikasikan bahwa pada keadaan alaminya, batuan sedimen berada di bawah lapisan tanah atau batuan lain. Apabila material ini selama proses penggalian mengalami perubahan cuaca yang ekstrim, teroksidasi, dan mengalami kontak langsung dengan air atau bahkan hingga mencapai tingkat kejenuhan tinggi, maka hal tersebut akan menyebabkan menurunnya kekuatan geser dari Batuan sedimen secara drastis.

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menganalisis dan mengklasifikasikan daya dukung dan tingkat durabilitas batuan sedimen diantaranya oleh Erguler dan Ulusay (2009) dan Gautam dan Shakoor (2016). Batuan ini terdisintegrasi dan melapuk dengan mudah sehingga daya dukung dan kuat gesernya dapat menurun dengan drastis. Mineral batuan sedimen diselimuti oleh ikatan ion hidroksil yang dapat dengan mudah terdispersi dalam larutan ion negatif dan terflokulasi dalam larutan ion positif. Iklim dan cuaca di Indonesia menyebabkan disintegrasi secara fisik dan dekomposisi secara kimia terjadi dengan cepat.

Dalam penggunaannya sebagai tanah dasar yang menerima akan beban dari fondasi baik untuk struktur perkerasan jalan ataupun struktur bangunan lain, batuan sedimen yang telah lapuk harus distabilisasi terlebih dahulu. Pemadatan atau stabilisasi secara mekanis akan sulit dilakukan pada batuan sedimen yang mengandung mineral *smectite* dengan perilaku kembang-susut yang tinggi. Stabilisasi secara kimia dengan menggunakan semen dapat menjadi alternatif dikarenakan cakupan pengaplikasiannya yang luas. Metode stabilisasi ini dapat digunakan hampir pada semua jenis tanah. Penggunaan semen pada tanah lempung juga lebih efektif dalam kurun waktu yang panjang dibandingkan dengan kapur atau bahan stabilisasi dengan kandungan kalsium lainnya. Hal ini dikarenakan adanya proses hidrasi yang terjadi hanya pada stabilisasi dengan menggunakan semen.

Campuran tanah-semen merupakan material yang umum digunakan sebagai lapisan dasar pada

infrastruktur perkerasan jalan. Ikatan yang terbentuk antara partikel tanah dan semen merupakan jaringan yang lebih stabil apabila dibandingkan dengan ikatan *vander wall* pada mineral *smectite*. Ikatan tersebut memiliki kekuatan yang lemah sehingga menyebabkan perilaku kembang susut yang tinggi. Hal ini dikarenakan kurangnya ion negatif pada mineral tersebut sehingga air dan ion-ion lain dapat dengan mudah untuk tertarik masuk di antara partikelnya.

Agar proses stabilisasi berjalan dengan lancar, kadar pH pada tanah yang distabilisasi harus berada di atas 12.4 (Djelloul dkk., 2017). Kalsium-silikat-hidrat (C-S-H), kalsium-alumina-hidrat (C-A-H), dan kalsium-alumina-silikat-hidrat (C-A-S-H) yang terbentuk selama proses stabilisasi berlangsung dalam waktu yang lama ketika reaksi hidrasi dan pozzolanik terjadi. Selama reaksi ini berlangsung, pH dari tanah harus dijaga pada tingkat yang tinggi (Yoobanpot dkk., 2017). Keadaan tersebut akan sulit dicapai apabila tanah yang distabilisasi memiliki pH yang rendah atau kandungan organik yang tinggi. Tanah dengan kandungan organik di atas 2% dan pH di bawah 5.4 akan menghambat reaksi antara semen dengan tanah.

Stabilisasi kimia dengan menggunakan semen dapat dilakukan dengan dua cara yaitu : 1) campuran kering dengan mencampurkan tanah dan semen dalam kondisi kering, atau 2) campuran basah dengan menyemprotkan pasta semen pada tanah. Dixon dkk., (2012) menggunakan kedua metode tersebut dalam penelitiannya dan menyimpulkan bahwa metode campuran kering akan menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi. Pakbaz dan Farzi (2015) menyatakan bahwa nilai modulus elastis spesimen dengan metode pencampuran campuran kering juga memiliki nilai yang lebih tinggi. Namun pada penelitiannya nilai kuat tekan yang lebih besar dihasilkan oleh spesimen campuran basah. Efektifitas dari kedua metode ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan daya dukung dari batuan sedimen (*clay shale* dan *siltstone*) yang distabilisasi menggunakan semen dengan metode pencampuran kering dan campuran basah. Laju pengembangan (*swelling*) dan nilai CBR digunakan sebagai parameter untuk melihat peningkatan kekuatan batuan sedimen dan efektifitas dari kedua metode pencampuran yang digunakan setelah proses stabilisasi.

METODE PENELITIAN

Batuan sedimen yang digunakan diambil dari tebing di ruas jalan tol Semarang km 441+800. Uji batas-batas konsistensi Atterberg, berat jenis, dan analisis ukuran butir dilakukan untuk menentukan indeks properti dari batuan sedimen. Uji kepadatan tanah dilakukan untuk menentukan nilai *Optimum Moisture Content* (OMC) dan *Maximum Dry Density* (MDD). Kedua data ini dijadikan sebagai acuan dalam perhitungan komposisi campuran antara tanah dan semen.

Clay shale dan *siltstone* yang ditunjukkan pada Gambar 1 berasal dari lereng di sepanjang jalan tol Semarang-Bawen km 441+800. Sampel diambil dari bagian lereng yang mengalami kelongsoran. Contoh tanah (batuan sedimen yang telah lapuk) diambil dalam kondisi terganggu (*disturbed*) dalam bentuk bongkah dan serpih.

Persiapan pengujian dilakukan dengan menumbuk batuan sedimen tersebut. Proses penumbukan batuan sedimen dapat dilakukan dengan mudah pada bongkah yang telah mengalami pelapukan tinggi. Sedangkan pada bongkah dengan pelapukan sedang dapat dioven terlebih dahulu kemudian direndam dalam air dan dikeringkan kembali.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) *Siltstone* (b) *Clay shale*

Bongkah dan serpih batuan tersebut dihancurkan hingga lolos saringan no. 4 ($<0.75\text{mm}$). Pencampuran dengan metode campuran kering dilakukan pada kondisi tanah kering dan semen dalam bentuk serbuk. Setelah itu air ditambahkan hingga spesimen mencapai keadaan OMC. Metode campuran basah menggunakan sistem pneumatik untuk mencampurkan pasta semen ke tanah. Sebelum ditambahkan semen, tanah sudah diberikan air terlebih dahulu, namun belum mencapai OMC. Perbandingan antara air dan semen yang digunakan adalah 0.7. Tidak ada perbedaan pada jumlah air yang digunakan pada metode campuran kering dan basah. Kadar semen yang digunakan pada penelitian ini divariasikan dari 2%, 5%, 7%, dan 10% dari berat kering tanah. Setiap kadar semen diwakili oleh dua spesimen yang dibuat seidentik mungkin. Sebagai pembandingan diuji juga CBR tanah tanpa stabilisasi.

Campuran tanah-semen kemudian dimasukkan ke dalam silinder CBR berdiameter 152.4 mm dan tinggi 177.8 mm. Proses pencetakan dilakukan secepat mungkin

agar kadar air pada spesimen tidak berkurang dalam jumlah yang banyak sebelum dipadatkan. Dalam pembuatan spesimen, campuran tanah-semen dipadatkan secara bertahap dengan membagi proses pemadatan menjadi tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan menggunakan penumbuk modifikasi dengan tinggi beban jatuh 627 mm, diameter beban 5.1 mm, dan berat 4000 g. Tumbukan dilakukan sebanyak 25 kali untuk setiap lapisan.

Pemeraman dilakukan selama tujuh hari di dalam ruangan dengan suhu $22-27^{\circ}\text{C}$. Pada proses awal stabilisasi, terbentuk banyak pori-pori akibat dari proses flokulasi. Pada fase ini produk semen hasil reaksi hidrasi akan mengisi pori berukuran kecil ($<0.1\mu\text{m}$) dan membentuk agregat dengan ukuran yang lebih besar bersama dengan partikel tanah disekitarnya. Horpibulsuk dkk. (2010) menyatakan setelah tujuh hari pori-pori berukuran besar ($>0,1\mu\text{m}$) sudah mulai terisi oleh produk semen. Durasi pemeraman ini juga dimaksudkan untuk melihat perkembangan kekuatan di awal proses stabilisasi.

Sebelum dilakukan penetrasi, spesimen diberikan beban sebesar 4.54 kg dan direndam selama 96 jam (ASTM, 2016). Pengembangan yang terjadi pada spesimen dicatat untuk mengetahui laju penambahan volume / pengembangan pada spesimen. Setelah proses perendaman, spesimen dikeluarkan dari kontainer perendaman dan air bebas pada spesimen dialirkan selama 15 menit. Spesimen dibebani dengan kecepatan penetrasi 1.27 mm/menit menggunakan piston penetrasi berdiameter 49.63 mm sesuai ASTM D1883. Kapasitas dari alat uji CBR yang digunakan sebesar 5 Ton.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

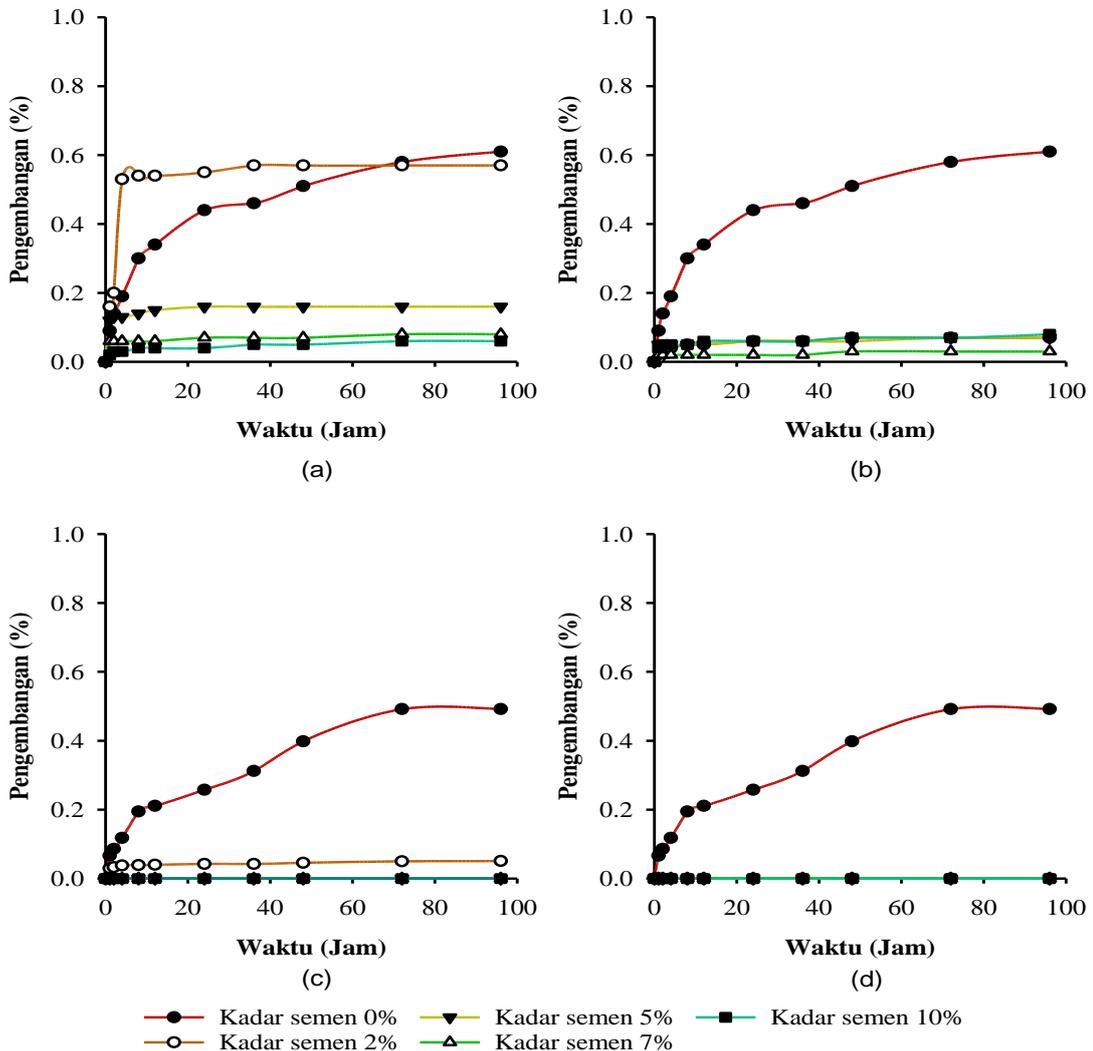
Hasil dari pengujian indeks properti pada Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa spesimen batuan yang diambil telah sesuai dengan klasifikasi Batuan. Berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS), *clay shale* dan *siltstone* termasuk pada jenis tanah CH dan ML-OL secara berurutan.

Tabel 1. Indeks Properti *Clay shale* dan *Siltstone*

Variabel	<i>Clay shale</i>	<i>Siltstone</i>
Partikel $>0.075\text{ mm}$ (%)	6.6	49.1
Partikel $<0.075\text{ mm}$ (%)	93.4	50.9
Berat jenis	2.65	2.58
Batas cair (%)	57.9	37.5
Batas plastis (%)	28.4	22.0
Batas susut (%)	10.6	17.1
Indeks plastisitas (%)	29.5	15.5
MDD (kN/m^3)	16.33	14.8
OMC (%)	19.2	25.1

Pada uji pengembangan sebelum penetrasi dilakukan, terjadi penurunan persen pengembangan pada spesimen seiring bertambahnya kadar semen seperti yang ditunjukkan Gambar 2. Hal tersebut dipengaruhi oleh terbentuknya produk semen yang meningkatkan kepadatan

spesimen. Mineral kalsium yang bereaksi dengan partikel lempung menyebabkan berkurangnya ketebalan di antara *diffused double layer* dan menyebabkan lapisan-lapisan



Gambar 2. Laju pengembangan pada spesimen a) *Clay shale* Campuran Kering, b) *Clay shale* Campuran Basah, c) *Siltstone* Campuran Kering d) *Siltstone* Campuran Basah

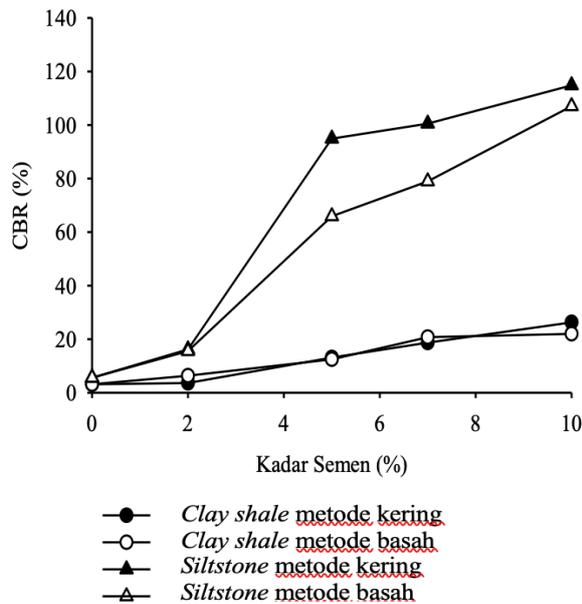
partikel lempung menjadi semakin berdekatan (Chew dkk., 2004; Horpibulsuk dkk., 2010). Proses ini yang menyebabkan partikel lempung menjadi terflokulasi dan membentuk agregat yang lebih besar, namun juga membentuk pori-pori baru. Reaksi hidrasi yang berlangsung lebih cepat dibandingkan reaksi pozzolanik menyebabkan penguraian unsur kapur berlangsung dengan cepat pula, sehingga proses flokulasi terjadi dengan cepat. Di sisi lain, reaksi pozzolanik yang menghasilkan produk CASH dan CSH berlangsung dengan lambat, sehingga proses pemenuhan pori yang sebelumnya terbentuk baru mulai terlihat setelah 7 sampai 28 hari. Hasil pengujian permeabilitas yang dilakukan oleh Chew dkk., (2004) menunjukkan bahwa permeabilitas spesimen yang berumur 7 hari lebih besar apabila dibandingkan spesimen berumur 28 hari. Penurunan permeabilitas yang berlangsung dalam jangka panjang ini bergantung pada seberapa cepat

pembentukan CASH dan CSH di sekeliling partikel yang telah bereaksi pada proses hidrasi.

Hasil uji CBR pada spesimen *clay shale* dan *siltstone* sesudah stabilisasi ditunjukkan pada

Gambar 3. Penambahan semen sebagai material stabilisasi lebih efektif apabila diaplikasikan pada *siltstone* dibandingkan dengan *clay shale*. Stabilisasi dengan menggunakan semen dengan kadar 10% dapat meningkatkan nilai CBR *siltstone* sebesar 109.3 % dengan metode campuran kering dan 101.5% dengan metode campuran basah. Sedangkan pada *clay shale*, peningkatan nilai CBR yang terjadi hanya sebesar 23.1% dan 18.8% untuk metode campuran kering dan campuran basah secara berurutan. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh kadar air awal pada *siltstone* yang lebih tinggi. Athanasopoulou (2016) menjelaskan bahwa jumlah air yang ditambahkan ke dalam campuran tanah-semen harus mencukupi untuk proses pemadatan spesimen dan untuk menghidrasi semen.

Reaksi hidrasi di awal dan reaksi pozzolanik yang berlangsung setelahnya akan bekerja secara terus menerus hingga tidak ada lagi senyawa semen dan air yang dapat bereaksi (Gartner dkk., 2002). Kadar air yang lebih tinggi menyebabkan laju hidrasi yang terjadi lebih cepat dan merata. Kekuatan dari tanah yang distabilisasi dengan semen sangat berpengaruh pada persentase air pori dan jumlah semen yang digunakan (Horpibulsuk dkk., 2010). Selain itu, tanah yang memiliki ukuran partikel halus membutuhkan jumlah semen yang lebih banyak karena sulitnya proses pencampuran antara tanah dan semen (ACI, 2009). Tanah yang berplastisitas tinggi lebih sulit untuk distabilisasi dengan menggunakan semen.



Gambar 3. Peningkatan Nilai CBR pada Spesimen yang Distabilisasi dengan Semen

Dengan menambahkan semen sebanyak 5%, reaksi antara tanah dan semen yang bekerja sudah mulai efektif. Hal ini terlihat dari kenaikan nilai CBR yang meningkat drastis terutama pada *siltstone*. Djelloul dkk., (2017) menjelaskan bahwa kadar semen sebesar 4% merupakan batasan minimum yang diperlukan untuk membuat proses stabilisasi berjalan dengan lancar.

Metode penambahan semen pada *clay shale* memiliki pengaruh yang tidak terlalu besar pada nilai CBR dari spesimen. Perbandingan nilai CBR antara spesimen dengan metode kering dan campuran basah dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Selisih nilai yang lebih besar ditunjukkan oleh spesimen *siltstone*. Metode pencampuran kering lebih cocok digunakan untuk tanah yang memiliki kadar air lebih tinggi (Egorova dkk., 2017). Kadar air *siltstone* yang lebih tinggi membuat penggunaan metode campuran kering menjadi lebih efektif. Spesimen yang distabilisasi dengan metode campuran kering juga memiliki nilai modulus elastis yang lebih besar namun selisihnya akan semakin mengecil seiring dengan bertambahnya waktu pemeraman (Pakbaz dan Farzi, 2015). Spesimen dengan metode campuran basah mengalami proses hidrasi lebih awal dikarenakan semen telah bereaksi dengan air dalam

proses pembuatan pasta. Hal ini terjadi di periode awal proses hidrasi. Setelahnya, perkembangan kekuatan dari kedua spesimen akan berlangsung pada kecepatan yang relatif sama sehingga metode pencampuran semen menjadi tidak terlalu mempengaruhi hasil akhir dari stabilisasi. Jumlah semen dan kadar air awal merupakan faktor yang lebih berpengaruh terhadap hasil stabilisasi.

Tabel 2. Nilai CBR pada Spesimen *Clay shale*

Kadar semen (%)	Campuran kering (%)	Campuran basah (%)
0	3.15	3.15
2	3.62	6.35
5	13.15	12.47
7	18.7	20.76
10	26.25	21.97

Tabel 3. Nilai CBR pada Spesimen *Siltstone*

Kadar semen (%)	Campuran kering (%)	Campuran basah (%)
0	5.58	5.58
2	16.2	15.54
5	94.94	65.92
7	100.54	78.97
10	114.84	107.07

KESIMPULAN

Metode pencampuran yang digunakan dalam penelitian ini terbukti dapat meningkatkan kekuatan batuan sedimen secara linier dengan selisih hasil yang kecil. Namun, metode pencampuran campuran kering akan lebih efektif apabila diterapkan pada tanah dengan kadar air yang tinggi. *Siltstone* dengan kadar air optimum yang lebih tinggi dari *clay shale* memiliki efektifitas penggunaan metode campuran kering pada kadar semen 5%. Pada *clay shale*, penggunaan metode pencampuran tidak memiliki pengaruh yang berarti. Jumlah semen dan kadar air awal merupakan faktor yang lebih berpengaruh pada stabilisasi batuan sedimen dengan menggunakan semen.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 230, S. C., & American Concrete Institute. (2009). Report on Soil Cement (ACI 230.1R-09). American Concrete Institute.
- ASTM. (2016). D1883-16 Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) Of Laboratory-Compacted Soils. ASTM International.

- Athanasopoulou, A. (2016). The Role of Curing Period on The Engineering Characteristics of a Cement-Stabilized Soil. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 5(1), 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.
- Dixon, P. A., Guthrie, W. S., & Eggett, D. L. (2012). Factors Affecting Strength of Road Base Stabilized with Cement Slurry or Dry Cement in Conjunction with Full-Depth Reclamation. *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board*, 2310(1), 113–120.
- Djelloul, R., Mrabent, S. A. B., Hachichi, A., & Fleureau, J.-M. (2017). 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*.
- Egorova, A. A., Rybak, J., Stefaniuk, D., & Zajączkowski, P. (2017). Basic Aspects of Deep Soil Mixing Technology Control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 022019.
- Erguler, Z. A., & Ulusay, R. (2009). Assessment of Physical Disintegration Characteristics of Clay-Bearing Rocks: Disintegration Index Test and A New Durability Classification Chart. *Engineering Geology*, 105(1–2), 11–19.
- 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). E & Fn Spon.
- Gautam, T. P., & Shakoor, A. (2016). Comparing the Slaking of Clay-Bearing Rocks Under Laboratory Conditions to Slaking Under Natural Climatic Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 19–31.
- Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddeepong, A. (2010). Analysis of Strength Development in Cement-Stabilized Silty Clay from Microstructural Considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021.
- Ilgen, A. G., Heath, J. E., Akkutlu, I. Y., Bryndzia, L. T., Cole, D. R., Kharaka, Y. K., Kneafsey, T. J., Milliken, K. L., Pyrak-Nolte, L. J., & Suarez-Rivera, R. (2017). Shales at All Scales: Exploring Coupled Processes in Batuan sediments. *Earth-Science Reviews*, 166, 132–152.
- M Alatas, I., A Kamaruddin, S., Nazir, R., Irsyam, M., & Himawan, A. (2015). Shear Strength Degradation of Semarang Bowen Clay Shale Due to Weathering Process. *Jurnal Teknologi*, 77(11).
- Pakbaz, M. S., & Farzi, M. (2015). Comparison of The Effect of Mixing Methods (Dry Vs. Wet) On Mechanical and Hydraulic Properties of Treated Soil with Cement or Lime. *Applied Clay Science*, 105–106, 156–169.
- Potter, P. E., Maynard, J. B., & Pryor, W. A. (2012). *Sedimentology of Shale: Study Guide and Reference Source*. Springer Science & Business Media.
- Yoobanpot, N., Jamsawang, P., & Horpibulsuk, S. (2017). Strength Behavior and Microstructural Characteristics of Soft Clay Stabilized with Cement Kiln Dust and Fly Ash Residue. *Applied Clay Science*, 141, 146–156.