

STABILISASI TANAH LEMPUNG MENGGUNAKAN SEMEN DAN ASPAL EMULSI TERHADAP SUBGRADE PERKERASAN JALAN

Muhammad Ernadi Ramadhan^{1,*}, Suryo Hapsoro Tri Utomo², Latif Budi Suparma³

^{1,*}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: muhammad.ernadi.r.@mail.ugm.ac.id

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: suryohapsoro@ugm.ac.id

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: lbsuparma@ugm.ac.id

ABSTRACT

Several causes can cause pavement deterioration; a weak subgrade caused one of them. If the pavement construction was built on the weak subgrade, it could damage pavement construction at the top of the subgrade. Chemical soil stabilization with cement and bitumen emulsion is one of the solutions to improve soil bearing capacity for pavement subgrade construction. The purpose of this study was to analyze the potential use of cement and bitumen emulsion as materials of chemical soil stabilization for pavement subgrade construction. In this study, soil samples were mixed by cement (3%, 6%, 9%) and bitumen emulsion (3%, 6%) and cured for 0, 3, and 7 days. The mixture of soil, cement, and bitumen emulsion was tested for soil bearing capacity and soil swelling by CBR and soil swelling test based on ASTM D 1883-99. Preliminary test results concluded that the original soil is included in class A-7-5 at the AASHTO classification system, and it is dominated by smectite clay minerals so that the original soil is expansive clay soil. The results of the compaction test reveal that soil stabilization with cement and bitumen emulsion can increase the mass of dry density of the soil. They reduce the optimum moisture content, where the variation of 6% cement and 3% bitumen emulsion can increase the mass of dry density by 1,340 gr / cm³ and reduce the optimum moisture content of 25%. The CBR and swelling test also disclose that soil stabilization with cement and bitumen emulsion increases soil bearing capacity and reduce swelling. The highest CBR values (soaked and unsoaked) are found in the variation of 9% cement and 3% bitumen emulsion cured by seven days, where the value is 56.9% (CBR Soaked) and 44.01% (CBR Unsoaked). The variation of 9% cement and 3% bitumen emulsion also can reduce soil swelling, where the value is 0,13%. CBR values at the variety of 9% cement and 3% bitumen emulsion cured by seven days have met the requirements of the road pavement subgrade based on SNI 03-1744-1989. Based on these tests, the cement and bitumen emulsion can use for soil stabilization material for subgrade pavement construction.

Keywords: Soil stabilization, clay, cement, bitumen emulsion

PENDAHULUAN

Kekuatan struktur perkerasan sangat bergantung pada kondisi tanah dasar. Banyak kerusakan jalan yang terjadi disebabkan karena kondisi fisik tanah dasar yang kurang baik. Berbagai cara dilakukan untuk meningkatkan kuat dukung tanah dasar, salah satunya yaitu melakukan stabilisasi tanah secara kimiawi. Contoh bahan kimiawi yang

umum digunakan untuk stabilisasi tanah yaitu semen dan aspal emulsi. Baik semen maupun aspal emulsi memiliki keunggulan masing-masing. Menurut RRL (1968), Semen dapat memberikan sifat kekakuan kepada tanah, sedangkan aspal emulsi dapat memberikan efek penahan air terhadap tanah. Berdasarkan hal tersebut, maka perlu dilakukan penelitian mengenai stabilisasi tanah lempung

menggunakan semen dan aspal emulsi terhadap *subgrade* perkerasan jalan.

Penelitian-penelitian sebelumnya mengenai stabilisasi tanah menggunakan semen dan aspal emulsi telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu. Baghini dkk. (2013) melakukan penelitian mengenai potensi penggunaan campuran semen portland dan aspal emulsi pada stabilisasi tanah konstruksi *base* jalan dan menyimpulkan bahwa penggunaan semen dan aspal emulsi dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas tanah dengan kadar optimum sebesar 3% semen dan 3% aspal emulsi. Susanto (2009) melakukan penelitian mengenai pengaruh stabilisasi tanah lempung dengan aspal emulsi terhadap penurunan konsolidasi dan modulus elastisitas tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilisasi tanah dengan kadar aspal emulsi optimum sebesar 6% dapat meningkatkan nilai modulus elastisitas tanah.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis pengaruh penambahan semen dan aspal emulsi terhadap nilai kuat dukung tanah sebagai *subgrade* konstruksi perkerasan jalan, sehingga didapatkan kadar terbaik campuran semen dan aspal emulsi sebagai bahan stabilisasi tanah yang dapat memenuhi standar *subgrade* perkerasan jalan yang digunakan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi eksperimental dengan melakukan percobaan langsung di Laboratorium. Penelitian utama tentang komposisi mineral tanah dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Benda uji berupa sampel tanah asli yang kemudian ditambahkan dengan variasi kadar semen dan kadar aspal emulsi yang telah ditentukan berdasarkan penelitian terdahulu.

Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian berupa sampel tanah asli yang berasal dari daerah Kreet, Kecamatan Sentolo, Kabupaten Kulonprogo, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Bahan pencampur yang digunakan pada penelitian ini menggunakan 2 bahan, yaitu semen dan aspal emulsi. Jenis semen yang digunakan pada stabilisasi tanah yaitu Semen Portland merk Semen Gresik, sedangkan jenis aspal emulsi yang digunakan pada stabilisasi tanah yaitu aspal emulsi *Cationic slow setting* (CSS-1). Hasil uji pendahuluan tanah asli dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Karakteristik Tanah Asli

No	Jenis Pengujian	Satuan	Nilai
1	<i>Specific Gravity</i> (Gs)		2,63
2	Kadar air optimum (w_{opt})	%	29,02
3	Berat volume kering tanah maksimum (γ_{dmaks})	gr/cm ³	1,29
4	Batas cair (<i>Liquid Limit</i>), LL	%	73,60
5	Batas plastis (<i>Plastic Limit</i>), PL	%	35,98
6	Indeks plastisitas (<i>Plasticity Index</i>), PI = LL - PL	%	37,62
7	Batas susut (<i>Shrinkage Limit</i>), SL	%	23,82
8	CBR <i>Unsoaked</i>	%	11
9	CBR <i>Soaked</i>	%	0,97
10	<i>Swelling</i>	%	6

Berdasarkan hasil penelitian karakteristik dan kandungan mineralogi tanah asli, dihasilkan nilai LL sebesar 73,60%, PL sebesar 35,98%, SL sebesar 23,82%, dan indeks plastisitas (PI) sebesar 37,62%. Berdasarkan klasifikasi AASHTO, sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lempung yang termasuk klasifikasi tanah A-7-5. Pengujian mineralogi sampel tanah asli menyimpulkan bahwa tanah asli memiliki kandungan *smectite* sebesar 73,25%. Dengan demikian, sampel tanah termasuk dalam jenis tanah lempung ekspansif. Hasil pengujian *grain size* dapat dilihat pada Gambar 1.

sampel sekitar 3,5 kg setiap percobaan CBR tanah untuk 1 variasi pencampuran tanah. Setelah sampel tanah CBR dipadatkan, sampel tanah diperam dengan plastik selama 0 hari, 3 hari, dan 7 hari untuk setiap pengujian CBR. Pengujian potensi pengembangan tanah dilakukan bersamaan dengan pengujian CBR *Soaked* selama 4 hari.



Gambar 2. Pengujian CBR tanah

Metode Analisis

Pengujian CBR dan *swelling* tanah dapat dilaksanakan sebagai berikut :

1. Uji CBR *soaked* dan *unsoaked*
Perhitungan untuk penetrasi 0,1 inch terhadap tekanan penetrasi standar dapat dihitung dengan Persamaan (1).

$$CBR = \frac{P_1 (psi)}{1000} \times 100 (psi) \quad (1)$$

Perhitungan untuk penetrasi 0,2 inch terhadap tekanan penetrasi standar dapat dihitung dengan Persamaan (2).

$$CBR = \frac{P_2 (psi)}{1500} \times 100 (psi) \quad (2)$$

dengan,

P1 = tekanan piston pada penetrasi 0,1 inch (psi),

P2 = tekanan piston pada penetrasi 0,2 inch (psi).

Jika nilai CBR pada penetrasi 0,1" lebih besar daripada penetrasi 0,2", maka nilai CBR yang digunakan yaitu nilai CBR penetrasi 0,1". Jika nilai CBR penetrasi 0,2" lebih besar daripada penetrasi 0,1", maka pengujian sebaiknya diulang, namun bila pengulangan pengujian

menghasilkan nilai CBR penetrasi 0,2" tetap lebih besar, maka nilai CBR tersebut digunakan untuk perancangan.

2. Uji *swelling* tanah

Perhitungan untuk mengetahui nilai *swelling* tanah dapat ditentukan dengan Persamaan (3).

$$s = \frac{(h_2 - h_1)}{h_1} \times 100\% \quad (3)$$

dengan,

s = *swelling*,

h₁ = tinggi benda uji awal (mm),

h₂ = tinggi benda uji akhir (mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

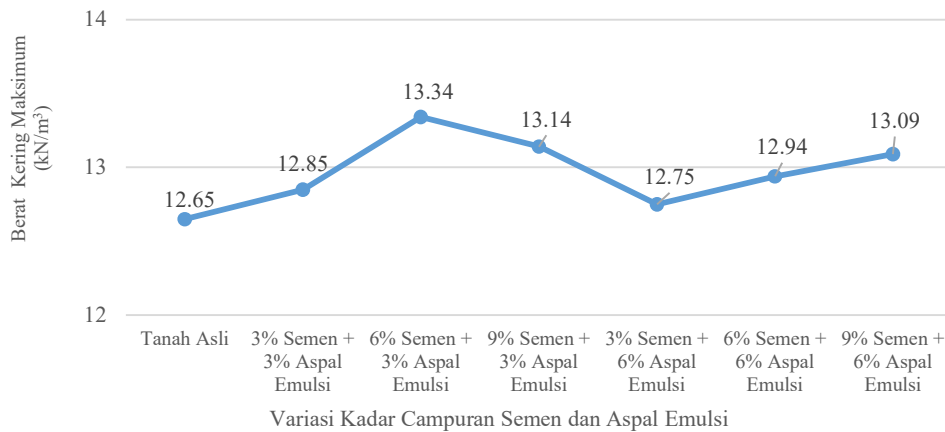
Pemadatan tanah campuran tanah, semen, dan aspal emulsi

Data kadar air optimum dan berat volume kering tanah maksimum diperoleh dari pengujian pemadatan *standard proctor*. Hasil pengujian pemadatan dapat diperoleh sebagaimana Gambar 3 dan Gambar 4.

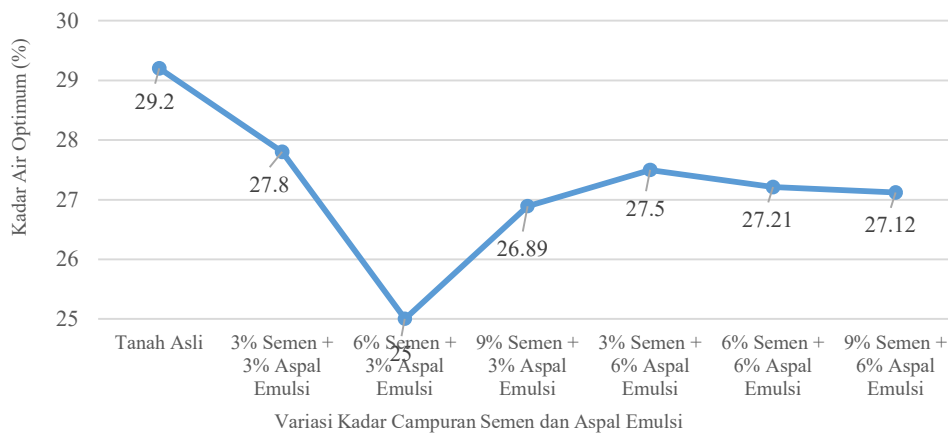
Berdasarkan hasil pengujian pemadatan *standard proctor* diketahui bahwa penambahan semen dan aspal emulsi pada tanah dapat meningkatkan nilai berat volume kering maksimum campuran terhadap nilai berat volume kering maksimum tanah asli pada setiap variasi campuran tanah dengan semen dan aspal emulsi. Peningkatan terbesar pada variasi kadar semen sebesar 6% dan kadar aspal emulsi sebesar 3% dengan nilai γ_{maks} sebesar 13,34 kN/m³. Penambahan semen dan aspal emulsi juga dapat menurunkan kadar air optimum tanah asli. Penurunan kadar air optimum terbesar terdapat pada variasi kadar semen sebesar 6% dan kadar aspal emulsi sebesar 3% dengan nilai w_{opt} sebesar 25%. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh penambahan semen sehingga dapat mereduksi rongga pori tanah yang disebabkan adanya proses primer berupa hidrasi dan proses sekunder berupa *cation exchange* dan *pozzolanic*. (Ingles dan Metcalf, 1972). Pada proses perubahan kation, ketika semen ditambahkan pada tanah,

akan terjadi reaksi antara Ca(OH)_2 dan mineral lempung. Muatan ion positif yang kuat pada kalsium yang dihasilkan oleh semen akan menggantikan ion yang lemah seperti Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , atau H^+ , sehingga akan menghasilkan lebih banyak ion kalsium bermuatan positif pada permukaan partikel tanah lempung sehingga dapat mengurangi plastisitas tanah. Reaksi pozzolanik akan menghasilkan reaksi antara Ca(OH)_2 dari

semen dengan silika dan alumina dari partikel tanah lempung sehingga akan menghasilkan gel yang tersementasi, sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan keawetan campuran tanah. Proses karbonasi dapat terjadi pada campuran tanah dengan semen jika semen bereaksi dengan karbon dioksida di atmosfer, sehingga akan menghasilkan kalsium karbonat (Zumrawi, 2015).



Gambar 3. Grafik nilai berat volume kering maksimum tanah



Gambar 4. Grafik nilai kadar air optimum

Selain itu, pengaruh penambahan aspal emulsi pada tanah dapat menyebabkan aspal emulsi mengalami proses *breaking* oleh pengaruh agregat pada tanah sehingga aspal dapat menempel pada tanah dan dapat memberikan efek penahan air pada tanah. Hal ini disebabkan karena pada umumnya agregat

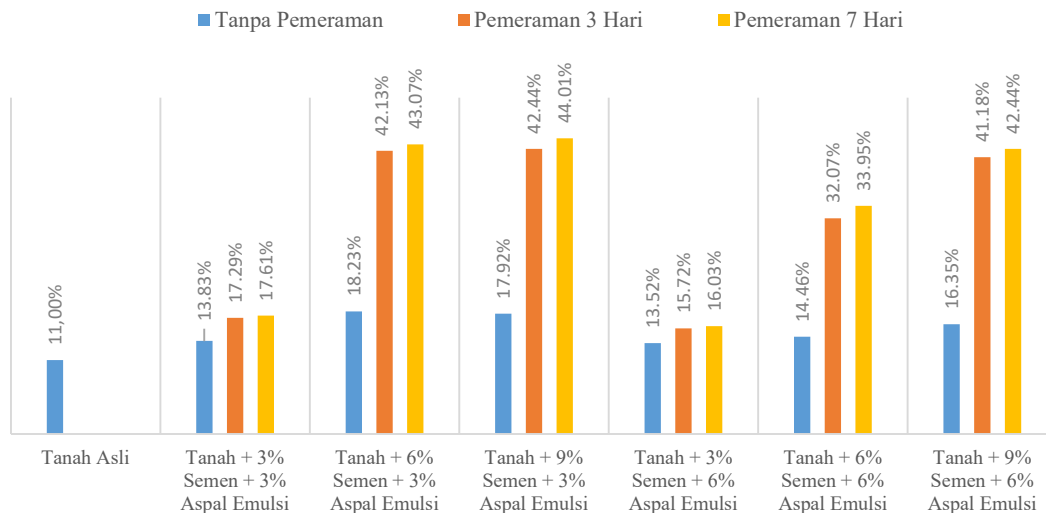
atau material tanah memiliki kandungan listrik negatif di permukaannya, sehingga ion aspal emulsi yang bersifat kationik akan tertarik oleh muatan negatif pada material tanah (Nugroho, 2003). Pada proses *breaking*, aspal akan berpisah dengan air, kemudian air dari proses *breaking* aspal emulsi akan diikat

oleh semen sebagai bagian dari proses hidrasi. Adanya proses flokulasi yang menyebabkan butiran tanah menjadi lebih besar dari pencampuran tanah, semen, dan aspal emulsi sehingga dapat meningkatkan berat volume kering tanah dan menurunkan kadar air optimum tanah. Pada pengujian pemadatan ini, nilai terbesar terdapat pada variasi 6% semen dan 3% aspal emulsi. Hal ini disebabkan karena proses sementasi yang memperkuat ikatan antar partikel tanah, semen, dan aspal menjadi sempurna membutuhkan waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan penambahan semen sebesar 9% terhadap campuran tanah, semen, dan aspal emulsi, sehingga untuk mendapatkan hasil yang memuaskan, variasi penambahan semen sebesar 9% terhadap campuran tanah, semen, dan aspal emulsi harus dilakukan pemeraman terlebih dahulu.

Namun pada variasi penambahan kadar aspal emulsi sebesar 6% cenderung dapat menurunkan berat volume kering maksimum tanah. Hal ini disebabkan karena jumlah kandungan air pada tanah menjadi berlebih akibat adanya tambahan air pada aspal emulsi, sehingga dapat mengurangi kepadatan pada tanah dan akan mengurangi berat volume kering maksimum tanah dan dapat meningkatkan kadar air optimum dalam tanah (Baghini et al, 2015).

CBR tanah campuran semen dan aspal emulsi

Pengujian CBR pada variasi campuran tanah, semen, dan aspal emulsi dilakukan pada kondisi *soaked* dan *unsoaked* dengan perlakuan pemeraman 0 hari, 3 hari, dan 7 hari. Hasil pengujian CBR untuk kondisi *soaked* dan *unsoaked* dapat dijelaskan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



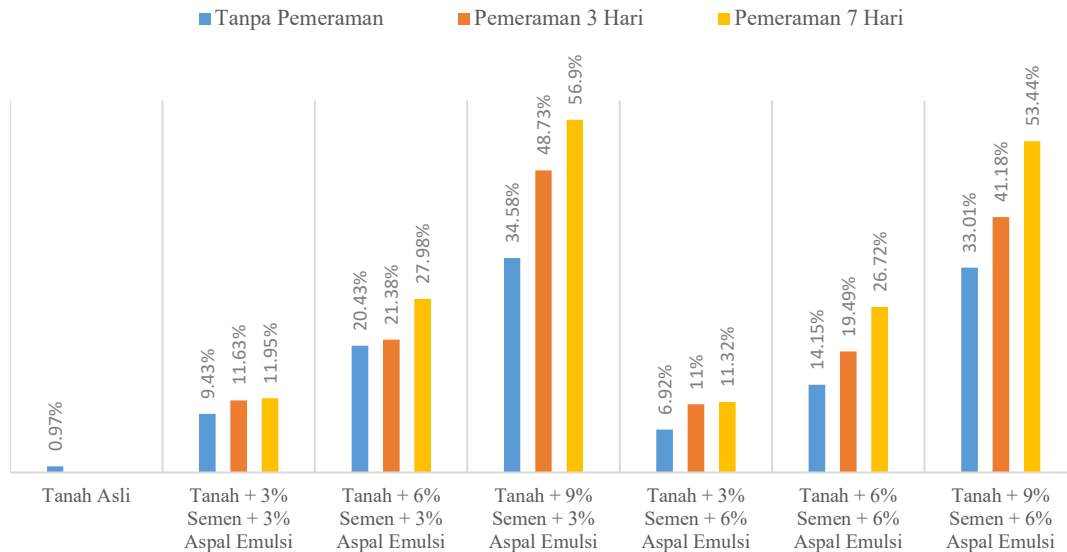
Gambar 5. Hasil pengujian CBR *unsoaked* tanah campuran semen dan aspal emulsi

Peningkatan pada nilai CBR *unsoaked* tersebut disebabkan karena adanya proses hidrasi, pertukaran kation, dan reaksi *pozzolanic* pada proses sementasi yang akan menghasilkan tobermorite yang masuk ke dalam rongga pori dan kemudian mengikat partikel tanah dan didukung dengan proses karbonasi yang akan membentuk material

tersementasi sehingga dapat meningkatkan ikatan antar butiran tanah. Selain itu, pengaruh penambahan aspal emulsi pada tanah dapat menyebabkan aspal emulsi mengalami proses *breaking* oleh pengaruh agregat pada tanah sehingga aspal dapat menempel pada tanah dan dapat memberikan efek penahan air pada tanah. Hal ini

disebabkan karena pada umumnya agregat atau material tanah memiliki kandungan listrik negatif di permukaannya, sehingga ion aspal emulsi yang bersifat kationik akan tertarik oleh muatan negatif pada material tanah (Nugroho, 2003). Pada proses *breaking*, aspal akan berpisah dengan air, kemudian air dari proses *breaking* aspal emulsi akan diikat oleh semen sebagai bagian dari proses hidrasi. Adanya proses flokulasi yang menyebabkan butiran tanah menjadi lebih besar dari pencampuran tanah, semen, dan aspal emulsi. Ketika tanah campuran semen dan aspal emulsi dipadatkan, partikel-partikel tanah akan saling mengunci, sehingga tanah akan

menjadi lebih rapat dan dapat meningkatkan nilai CBR tanah. Namun pada variasi penambahan kadar aspal emulsi sebesar 6% terhadap campuran tanah dan semen cenderung dapat menurunkan nilai CBR pada tanah. Hal ini disebabkan karena jumlah kandungan air pada tanah menjadi berlebih akibat adanya tambahan air pada aspal emulsi, sehingga *interlocking* antar partikel tanah menjadi berkurang yang menyebabkan kepadatan tanah menjadi berkurang nilainya. Nilai CBR *unsoaked* terbesar terdapat pada variasi kadar 9% semen dan 3% aspal emulsi dengan waktu pemeraman 7 hari sebesar 44,01%.



Gambar 6. Hasil pengujian CBR *soaked* tanah campuran semen dan aspal emulsi

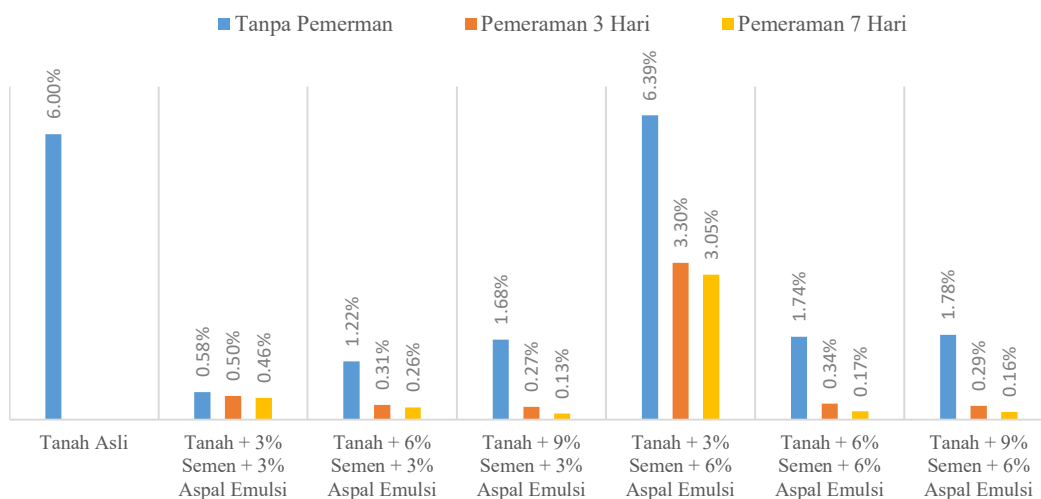
Sama halnya dengan kondisi tanpa perendaman, penambahan variasi kadar semen dan aspal emulsi dapat meningkatkan nilai CBR tanah asli, baik pada kondisi tanpa pemeraman, dengan pemeraman 3 hari, dan dengan pemeraman 7 hari. Penyebab peningkatan nilai CBR terendam sama dengan kondisi tanpa perendaman, namun yang menarik pada penelitian ini yaitu setelah dilakukan perendaman, nilai CBR pada variasi kadar 9% semen (baik dengan penambahan 3% aspal emulsi maupun 6%

aspal emulsi) lebih meningkat terutama setelah dilakukan pemeraman terlebih dahulu. Kondisi ini disebabkan karena proses hidrasi yang dialami oleh jumlah semen yang lebih banyak, kemudian diikuti dengan proses pertukaran ion, *pozzolanic* yang memicu proses flokulasi dan aglomerasi serta didukung oleh proses karbonasi dan perekatan aspal emulsi pada tanah sehingga akan memperkuat ikatan butiran tanah. Yoder dan Witzcak (1975) menyatakan bahwa campuran semen dengan tanah mendapatkan kekuatan

dalam waktu yang relatif singkat. Air tidak akan mengintrusi ke dalam butiran campuran dan mengganggu proses sementasi, namun dapat berperan dalam *curing* proses sementasi. Nilai CBR *unsoaked* terbesar terdapat pada variasi kadar 9% semen dan 3% aspal emulsi dengan waktu pemeraman 7 hari sebesar 56,97%.

Swelling tanah campuran semen dan aspal emulsi

Pengaruh penambahan variasi campuran kadar semen dan aspal emulsi terhadap tanah asli cenderung dapat menurunkan nilai pengembangan tanah asli. Namun pada kondisi tanpa pemeraman, nilai *swelling* cenderung meningkat (Gambar 7) seiring dengan penambahan semen dan aspal emulsi.



Gambar 7. Hasil pengujian *swelling* tanah campuran semen dan aspal emulsi

Hal tersebut terjadi karena belum sepenuhnya reaksi kimia yang terjadi pada campuran tanah dan semen sehingga partikel air dapat mengintrusi tanah. Selain itu, peningkatan jumlah semen akan membutuhkan air yang lebih banyak dalam proses hidrasi dan kadar aspal emulsi yang berlebihan menyebabkan nilai pengembangan tanah menjadi lebih besar. Namun pada kondisi pemeraman 3 hari dan pemeraman 7 hari, nilai *swelling* cenderung menurun.

Hal ini terjadi karena proses ikatan antar partikel tanah, semen, dan aspal menjadi sempurna selama masa pemeraman. Hal tersebut menyebabkan air menjadi sulit untuk masuk ke dalam partikel tanah sehingga volume tanah cenderung sulit berubah dan nilai *swelling* cenderung menurun. *Swelling* pada kondisi pemeraman akan lebih kecil jika dibandingkan dengan kondisi tanpa

pemeraman akibat proses sementasi yang sempurna dan proses *setting* aspal emulsi pada tanah menyebabkan ikatan antara partikel tanah, semen, dan aspal emulsi menjadi lebih kuat, sehingga sulit ditembus oleh air dan dapat menurunkan nilai *swelling* tanah. Nilai *swelling* terkecil terdapat pada variasi kadar 9% semen dan 3% aspal emulsi dengan waktu pemeraman 7 hari sebesar 0,13%.

Penentuan kadar terbaik campuran semen dan aspal emulsi

Berdasarkan pada pengujian pemadatan, CBR, dan *swelling* tanah, maka dapat disimpulkan bahwa kadar terbaik campuran semen dan aspal emulsi sebagai bahan stabilisasi tanah lempung terdapat pada variasi penambahan 9% semen dan 3% aspal emulsi dengan pemeraman 7 hari. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 Revisi 3

dalam Pratama (2018) menyatakan bahwa persyaratan nilai CBR tanah dasar sesuai dengan pengujian CBR Laboratorium adalah memiliki nilai minimal 6% setelah direndam 4 hari. Dengan demikian, nilai CBR pada variasi penambahan 9% semen dan 3% aspal emulsi telah memenuhi persyaratan *subgrade* perkerasan jalan.

KESIMPULAN

1. Penambahan campuran variasi kadar semen sebesar 3%, 6%, 9%, dan aspal emulsi sebesar 3% dan 6% dapat meningkatkan berat volume kering tanah maksimum dan menurunkan kadar air optimum pada tanah asli. Peningkatan berat volume kering tanah maksimum dan penurunan kadar air optimum terbesar terdapat pada kadar 6% semen dan 3% aspal emulsi dimana nilai berat volume kering tanah maksimum sebesar 13,34 kN/m³ dan nilai kadar air optimum sebesar 25%.
2. Penambahan campuran variasi kadar semen dan aspal emulsi cenderung meningkatkan nilai CBR *unsoaked*, CBR *soaked*, dan menurunkan nilai *swelling* pada tanah asli seiring dengan penambahan kadar semen dan aspal emulsi dalam campuran tanah. Peningkatan terbesar nilai CBR baik CBR *unsoaked* maupun CBR *soaked* serta penurunan terbesar nilai *swelling* tanah terdapat pada variasi campuran 9% semen dan 3% aspal emulsi dengan pemeraman 7 hari. Nilai CBR *unsoaked* dan CBR *soaked* masing-masing sebesar 44,01% dan 56,97%, sedangkan nilai *swelling* pada pengujian tersebut sebesar 0,13%.
3. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2010 Revisi 3 dalam Pratama (2018) menyatakan bahwa persyaratan nilai CBR tanah dasar sesuai dengan pengujian CBR laboratorium memiliki nilai minimal 6% setelah direndam 4 hari. Dengan demikian, nilai CBR pada variasi penambahan 9% semen dan 3% aspal

emulsi telah memenuhi persyaratan *subgrade* perkerasan jalan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D1883-99. (1999). "*Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*". ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM D 698-00a. (2000). "*Standard Test Method for Laboratory - Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort*". ASTM International. West Conshohocken, PA.
- Baghini, M. S., Ismail, A., dan Kheradmand, B. (2013). "The Potentials of Portland Cement and Bitumen Emulsion Mixture on Soil Stabilization in Road Base Construction". *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. Vol. 65.No.2, pp 67-72.
- Baghini, M.S., Ismail, A., dan Karim, M.R.B., (2015). "Evaluation of Cemet-Treated Mixtures with Slow Setting Bitumen Emulsion as Base Course Material for Road Pavement". *Journal of Construction and Building Materials*. Volume 94, pp 323-336.
- Ingles, O.G., and Metcalf, J.B. (1972). "*Soil Stabilization-Principles and Practice*". Sydney, Melbourne, Brisbane: Butterworths.
- Nugroho, U. (2003). "*Pengaruh Penambahan Kapur dan Aspal Emulsi Terhadap Kembang Susut dan Daya Dukung Tanah Ekspansif Sebagai Subgrade Jalan*". Tesis. Program Pascasarjana Universitas Diponegoro. Semarang Tidak dipublikasikan
- Pratama, F. (2018). "*Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Menggunakan Kapur dan Portland Composite Cement Pada Tanah Dasar Konstruksi Jalan*". Tesis. Teknik Sipil. Universitas Gadjah Mada: Tidak dipublikasikan

- Road Research Laboratory. (1968). *“Soil Mechanics for Road Engineer”*. London: H.M. Stationery Office.
- Yoder E.J dan Witzak M.W. (1975). *“Principles of Pavement Design”* Second Edition. New York: John Wiley & Son Inc.
- Zumrawi, M., (2015). “Stabilization of Pavement Subgrade by Using Fly Ash Activated by Cement”. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 3, No 6, pp 218-22.