

Analisis Kekuatan dan Stabilitas Tanah Lempung Organik Artifisial Untuk Perencanaan Jalan dengan Beban Lalu Lintas Tinggi

Verdy Ananda Upa^{1*}, Nur Hakim²

Institut Teknologi Indonesia, Serpong, Tangerang Selatan^{1,2}

Koresponden*, Email: verdy.ananda@iti.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	14 Maret 2019	<i>Organic clay is a type of clay which it has low strength and high shrinkage. Organic matter of soil over the maximum level required will reduce strength and stability of improvement process. The purpose of this research to determine volcanic ash and Portland cement addition effect of artificial organic clay strength, stability, and thickness of pavement to be used. Method of this research will be divided into 2 steps, pre-stabilization and stabilization phase. In pre-stabilization phase, organic clay mixed with 3 variations of volcanic ash, the curing for 3 days. Furthermore, in stabilization phase, soil of resulting mixture added each 5% Portland cement, then curing again for 3 days. Optimum Moisture Content (OMC) decreased from 33,696% to 29,586%, Maximum Dry Density (MDD) increased from 1,319% to 1,351%, CBR soaked increased from 2,87% to 9,77%, swelling potential decreased from 2,36% to 0,45%.</i>
Diperbaiki	13 Juli 2019	
Disetujui	24 Juli 2019	

Keywords: organic clay, volcanic ash, Portland cement, pre-stabilization, stabilization, mechanical properties.

Abstrak

Tanah lempung organik merupakan salah satu jenis tanah lempung yang memiliki daya dukung rendah dan potensi pengembangan (swelling) yang besar. Kandungan bahan organik yang melewati batas maksimum akan mereduksi kekuatan dan stabilitas dari proses stabilisasinya. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penggunaan abu vulkanik Gunung Kelud dan semen *Portland* terhadap kekuatan dan stabilitas tanah lempung organik artifisial serta tebal perkerasan rencana yang digunakan. Metode penelitian ini dibagi menjadi 2 tahapan yaitu tahap pra-stabilisasi dan tahap stabilisasi. Pada tahap pra-stabilisasi, tanah lempung organik dicampur dengan masing-masing 3 variasi kadar abu vulkanik, kemudian dilakukan pemeraman selama 3 hari. Selanjutnya, pada tahap stabilisasi, tanah hasil campuran tersebut ditambahkan masing-masing 5% semen *Portland*, lalu kembali diperam selama 3 hari. Kadar air optimum mengalami penurunan dari 33,696% menjadi 29,586%, berat volume kering mengalami peningkatan dari 1,319% menjadi 1,351%, CBR rendaman mengalami peningkatan dari 2,87% menjadi 9,77%, dan potensi pengembangan mengalami penurunan dari 2,36% menjadi 0,45%.

Kata kunci: tanah lempung organik, abu vulkanik, semen *Portland*, pra-stabilisasi, stabilisasi, sifat mekanis

1. Pendahuluan

Tanah lempung lunak merupakan jenis tanah lempung yang memiliki daya dukung rendah dan potensi pengembangan yang besar. Selain itu, jika kandungan bahan organik yang terkandung pada tanah lempung lunak melewati batas maksimum, hal ini akan mereduksi kekuatan dan stabilitas dari proses stabilisasi secara langsung antara tanah lempung lunak dengan bahan tambah. Oleh sebab itu, tanah lempung lunak dengan kandungan bahan organik >2% merupakan jenis tanah yang buruk untuk digunakan sebagai tanah dasar (*subgrade*) dalam pekerjaan konstruksi, seperti jalan raya. Karena hal tersebut akan menghasilkan suatu konstruksi yang tidak optimal (cepat rusak)[1].

Stabilisasi tanah menggunakan bahan tambah memiliki tujuan utama yaitu, memperbaiki sifat-sifat mekanis dari

tanah dasar menjadi lebih baik, seperti daya dukung dan potensi pengembangan[2]. Pada umumnya, bahan tambah yang digunakan berupa bahan tambah buatan pabrik seperti semen, kapur dan aspal, akan tetapi adapula bahan tambah yang berasal dari limbah seperti abu vulkanik (*volcanic ash*), atau abu sekam padi. Akan tetapi, untuk jenis tanah lempung lunak dengan kandungan bahan organik >2% maka stabilisasi tanah yang dilakukan secara langsung dengan menggunakan bahan tambah akan menghasilkan campuran dengan kekuatan dan stabilitas yang tidak optimal[3]. Akan tetapi, stabilisasi tanah dapat dimodifikasi dengan melakukan perlakuan awal sebelum stabilisasi tanah dilakukan. Adapun tujuan dari perlakuan awal menurut Echols dan Shadily dalam Ruktiningsih untuk menurunkan kandungan bahan organik serta memperbaiki sifat dari tanah lempung lunak sebelum dilakukan proses stabilisasi dengan menggunakan

semen. Sehingga, penelitian ini mencoba merekayasa tahanan stabilisasi tanah yang pada umumnya dilakukan akan tetapi masih menggunakan bahan tambah seperti yang telah disebutkan diatas[4].

Berdasarkan peraturan pada *Engineering and Design Soil Stabilization for Pavement Mobilization Construction* dari *Departement of the Army Corps of Engineering*, bahan tambah untuk stabilisasi tanah dasar dapat dibedakan menurut jenis tanah yang digunakan. Untuk jenis tanah lempung organik, bahan tambah yang disarankan, salah satunya adalah abu vulkanik, akan tetapi tidak cocok distabilisasi dengan cara-cara yang biasanya[5]. Menurut Das, kadar abu vulkanik yang digunakan sebagai bahan stabilisasi adalah 10-30% terhadap berat keringnya[6],[7].

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan abu vulkanik Gunung Kelud dengan kadar yang bervariasi (15, 20, dan 25%) dan penambahan 5% *semen portland* terhadap kekuatan dan stabilitas tanah lempung lunak dengan kandungan bahan organik 5%, mengetahui campuran yang paling optimum antara tanah lempung organik dengan variasi kadar abu vulkanik dan 5% *semen Portland*, serta menentukan tebal perkerasan rencana berdasarkan daya dukungnya (CBR), yang akan diaplikasikan pada perencanaan jalan baru dengan beban lalu lintas yang tinggi [8],[9],[10].

2. Metode

Penelitian ini dibagi menjadi menjadi beberapa tahapan antara lain:

- Studi literatur merupakan tahapan yang bertujuan untuk mempelajari dan memahami teori-teori yang terkait serta penelitian terdahulu yang sejenis dengan penelitian yang akan dilakukan,
- Pengambilan dan persiapan sampel, tanah lempung yang digunakan berasal dari daerah Kasongan, Bantul. Sampel tanah diambil pada kedalaman 0,5-1 meter dari permukaan tanah, setelah itu tanah lempung tersebut dicampurkan dengan pupuk kompos yang diperoleh dari Toko Tani Maju, Yogyakarta, untuk memperoleh tanah lempung lunak dengan kandungan bahan organik yang diinginkan yaitu 5%,
- Pengujian sifat mekanis awal pada tanah lempung organik, yang meliputi uji pemadatan tanah standar *Proctor* (ASTM D 698-78), uji CBR rendaman (*soaked*) (D 1883), serta uji potensi pengembangan (*swelling test*) (ASTM D 4546-1990), dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta,

- Analisis tebal perkerasan awal untuk jalan dengan beban lalu lintas tinggi menggunakan metode Analisa Komponen Departemen Pekerjaan Umum (PU), dengan data pendukung berupa nilai CBR rendaman dari tanah lempung organik,
- Tahap pra-stabilisasi merupakan pencampuran antara tanah lempung organik dengan 3 variasi kadar abu vulkanik Gunung Kelud, yaitu 15%, 20%, dan 25%, kemudian dilakukan pemeraman selama 3 hari,
- Tahap stabilisasi merupakan pencampuran tanah hasil campuran dari tahap pra-stabilisasi, kemudian ditambahkan masing-masing 5% semen *Portland*, lalu kembali dilakukan pemeraman selama 3 hari,
- Pengujian sifat mekanis akhir terhadap tanah hasil stabilisasi (tanah lempung organik +15, 20, dan 25% abu vulkanik +5% semen *Portland*) yang telah diperam selama 6 hari meliputi uji pemadatan standar *Proctor* (ASTM D 698-78), uji CBR rendaman (*soaked*) (ASTM D 1883), uji potensi pengembangan (*swelling test*) (ASTM D 4546-1990), pengujian tersebut dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta [11],
- Analisis tebal perkerasan akhir untuk jalan dengan beban lalu lintas yang tinggi menggunakan metode Analisa Komponen Departemen Pekerjaan Umum (PU), dengan data pendukung berupa nilai CBR rendaman dari tanah hasil stabilisasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, diperoleh hasil berupa sifat mekanis yang menggambarkan kekuatan dan stabilitas dari tanah lempung organik seperti yang tercantum dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil pengujian sifat mekanis tanah lempung organik

Sifat Mekanis Tanah Lempung Organik	Nilai
Kadar air optimum (OMC)	33,696%
Berat volume kering maksimum (MDD)	1,319 g/cm ³
CBR rendaman	2,87%
Potensi pengembangan (<i>Swelling potential</i>)	2,36%

Berdasarkan **Tabel 1**, hasil yang diperoleh dari uji pemadatan standar *Proctor* antara lain kadar air optimum (OMC) tanah lempung organik sebesar 33,696% dan nilai

berat volume kering maksimum (MDD) sebesar 1,319 g/cm³. Nilai OMC ini kemudian digunakan sebagai kadar air optimum untuk pembuatan benda uji CBR rendaman.

Metode yang digunakan untuk pengujian CBR adalah CBR rendaman (CBR *soaked*) dengan masa perendaman selama 96 jam (4 hari). Metode ini digunakan untuk mensimulasikan kondisi terburuk di lapangan apabila terjadi genangan dalam jangka waktu yang cukup lama. Nilai CBR rendaman tanah lempung organik sebesar 2,87%. Menurut SNI 03-1732-1989 menjelaskan bahwa syarat nilai CBR rendaman (*soaked*) tanah dasar suatu konstruksi jalan sebesar minimal 3%. Oleh sebab itu, berdasarkan hasil yang diperoleh maka tanah lempung organik ini tidak memenuhi persyaratan sebagai *subgrade* jalan.

Selain memiliki nilai CBR yang rendah, nilai potensi pengembangan dari tanah lempung organik ini dapat dikata-

kan berada dalam kategori sedang yaitu sebesar 2,36%. Sedangkan hasil analisis tebal perkerasan menggunakan metode Analisa Komponen dengan data pendukung berupa nilai CBR rendaman, diperoleh susunan perkerasan yaitu lapis Pelindung Mekanis sebesar 5 cm, Batu Pecah (CBR 50) sebesar 15 cm, dan Tanah Kepasiran (CBR 20) sebesar 20 cm. Sehingga jika tanah lempung organik akan digunakan sebagai tanah dasar (*subgrade*), perlu dilakukan stabilisasi terlebih dahulu. Stabilisasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan nilai CBR rendaman, memperkecil potensi pengembangan, dan mengurangi tebal perkerasan khususnya pada lapisan ketiga.

Hasil pengujian dari variasi campuran terhadap sifat-sifat mekanis ditampilkan pada **Tabel 2**.

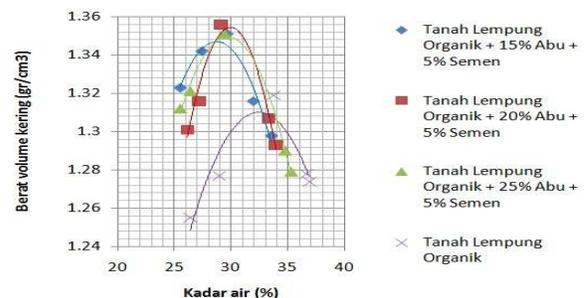
Tabel 2. Hasil pengujian sifat mekanis pada variasi campuran

No.	Variasi Campuran	Parameter			
		OMC (%)	MDD (g/cm ³)	CBR (%)	Potensi Pengembangan (%)
1.	Tanah Lempung Lunak Organik	33,696	1,319	2,87	2,36
2.	Tanah + 15% Abu vulkanik + 5% Semen	29,586	1,351	9,77	0,45
3.	Tanah + 20% Abu vulkanik + 5% Semen	29,096	1,356	8,81	0,50
4.	Tanah + 25% Abu vulkanik + 5% Semen	29,395	1,351	7,90	0,54

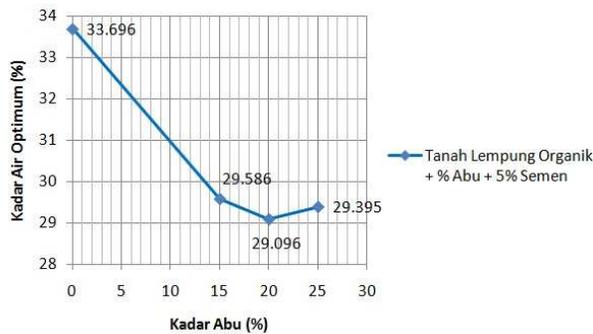
A. Pengaruh Penambahan Abu Vulkanik dan Semen Terhadap Kepadatan Tanah

Berdasarkan pengujian pemadatan tanah yang dilakukan dengan metode standar *Proctor* diperoleh nilai kadar air optimum (OMC) dan berat volume kering maksimum (MDD). Nilai berat volume kering (MDD) menunjukkan kecenderungan mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan persentase abu vulkanik. Hal tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1**. Peningkatan nilai berat volume kering maksimum (MDD) mengindikasikan bahwa nilai kohesi tanah semakin berkurang, sehingga tanah menjadi lebih rapat dan padat, dengan semakin padatnya tanah maka berat volume kering tanah semakin besar. Nilai kadar air tanah menunjukkan kecenderungan mengalami penurunan, sehingga letak grafik tanah lempung organik (**Gambar 1**), hal tersebut menandakan bahwa air yang digunakan telah bereaksi dengan abu vulkanik dan semen, oleh sebab itu

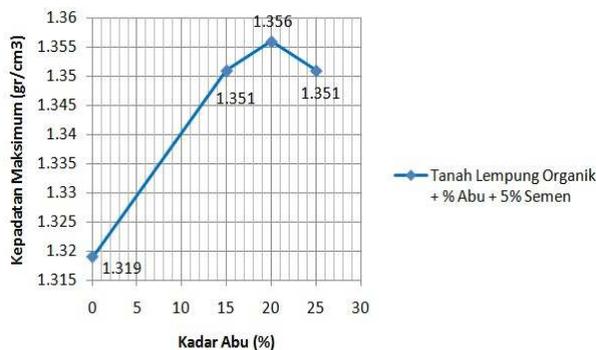
nilai kadar air optimum (OMC) berkurang. Abu vulkanik dan semen yang digunakan bereaksi dengan air menyebabkan terjadinya proses sementasi, sehingga air yang dibutuhkan cenderung berkurang. Berkurangnya kebutuhan air, maka akan diikuti dengan penurunan nilai kadar air optimum (OMC) seiring penambahan abu vulkanik dan semen.



Gambar 1. Hasil uji pemadatan standar Proctor pada beberapa variasi campuran



Gambar 2. Pengaruh penambahan persen abu vulkanik (%) dan 5% semen terhadap nilai kadar air optimum (OMC)



Gambar 3. Pengaruh penambahan persen abu vulkanik (%) dan 5% semen terhadap nilai kepadatan maksimum (MDD)

B. Pengaruh Penambahan Abu Vulkanik dan Semen Terhadap Nilai California Bearing Ratio (CBR)

Berdasarkan pengujian CBR rendaman yang telah dilakukan diperoleh nilai daya dukung dalam kondisi terburuk (terendam air). Nilai CBR rendaman (*soaked*) tanah lempung organik semula sebesar 2,87%, setelah ditambahkan 15% abu vulkanik dan 5% semen mengalami peningkatan hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 9,77%. Hal ini menunjukkan kecenderungan penurunan dari nilai CBR rendaman seiring dengan bertambahnya abu vulkanik. Penggunaan abu vulkanik dalam usaha pra-stabilisasi (*volcanic ash modification*) merupakan hal yang baru untuk dilakukan, oleh sebab itu, keanekaragaman kadar abu vulkanik yang digunakan ditentukan hanya berdasarkan pada penggunaan abu vulkanik untuk stabilisasi tanah lempung. Hal ini dikarenakan belum adanya penelitian tentang penggunaan abu vulkanik untuk pra-stabilisasi, sehingga kadar abu vulkanik dalam penelitian ini adalah 15, 20, dan 25%.

Penurunan nilai CBR kemungkinan besar disebabkan karena jumlah abu vulkanik yang digunakan melebihi dari yang dibutuhkan, sehingga ion *Ca* dan *Mg* yang tersisa akan berikatan kembali dengan hidroksida atau karbonat dan mem-

bentuk senyawa yang bersifat higroskopis (menarik air) sehingga pada saat dipadatkan air dapat keluar dan mengisi pori-pori antar butiran yang belum terisi oleh butiran lempung ataupun *silica* dan *alumina* gel[4]. Dan pada akhirnya, karena masih terdapat pori yang terisi air maka reaksi hidrasi akan berlangsung terus-menerus dan memerlukan air sehingga air dalam pori akan terserap untuk reaksi hidrasi sehingga akhirnya pori tersebut menjadi kosong yang mengakibatkan sifat kunci, gesek, dan lekatannya tidak optimum[12].

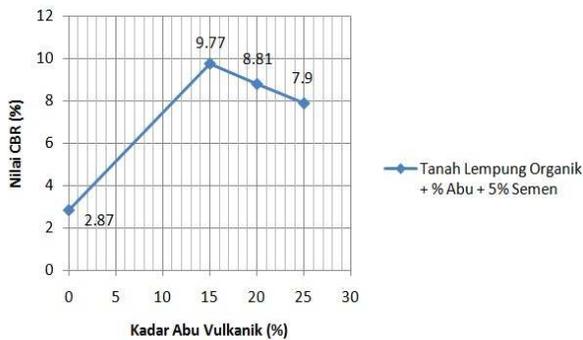
Namun demikian, secara keseluruhan nilai CBR dari masing-masing variasi kadar abu vulkanik dan 5% semen masih berada diatas nilai CBR tanah lempung organik. Tanah lempung organik semula memiliki nilai CBR rendaman (*soaked*) sebesar 2,87%, setelah dicampur dengan variasi kadar abu vulkanik dan 5% semen, nilai CBR rendaman mengalami peningkatan dan mencapai nilai tertinggi sebesar 9,77%. Berdasarkan SNI 03-1732-1989, nilai tersebut telah memenuhi persyaratan tanah yang dapat dijadikan sebagai tanah dasar (*subgrade*) yaitu nilai CBR rendaman (*soaked*) $\geq 3\%$.

Kenaikan nilai CBR rendaman tanah campuran menunjukkan bahwa abu vulkanik dan semen memiliki pengaruh terhadap nilai CBR tanah. Hal ini dikarenakan penambahan abu vulkanik terlebih dahulu pada tanah lempung organik mengakibatkan abu vulkanik tersebut akan terurai menjadi ion *Ca* dan *Mg*, hal ini disebabkan karena berdasarkan pengujian *Leaching* dengan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) pada abu vulkanik Gunung Kelud menunjukkan bahwa kandungan kimianya terdiri dari *CaO* dan *MgO*, sehingga ion *Ca* dan *Mg* tersebut akan ditarik oleh permukaan mineral tanah lempung organik yang bermuatan negatif, ikatan tersebut menyebabkan permukaan tanah lempung organik menjadi netral, sehingga keinginan untuk mengikat molekul air yang bersifat dipolar berkurang dan tarik-menarik antar mineral juga berkurang. Setelah permukaan tanah lempung organik menjadi netral, kemudian ditambahkan dengan semen dan dengan bantuan air, maka akan membentuk kalsium silikat hidrat dan aluminium silikat hidrat yang berbentuk gel dan bersifat sebagai perekat. Kalsium silika gel dan alumina silika gel akan menyelemti dan mengisi pori antar mineral lempung dan membentuk gumpalan lempung yang besar dan stabil[13].

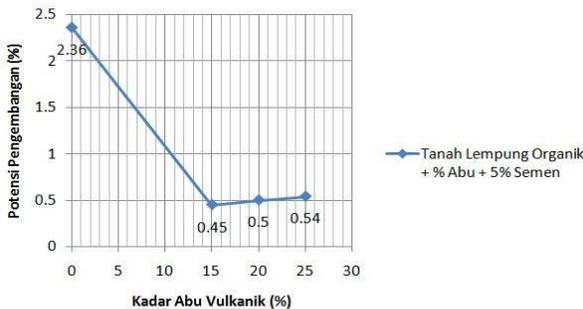
C. Pengaruh Penambahan Abu Vulkanik dan Semen Terhadap Potensi Pengembangan (*Swelling Potential*)

Berdasarkan pengujian potensi pengembangan yang telah dilakukan diperoleh nilai potensi pengembangan. Nilai potensi pengembangan tanah lempung organik berada pada kategori sedang yaitu 2,36%. Nilai potensi pengembangan

mengalami peningkatan seiring dengan penambahan persentase abu vulkanik dan 5% semen, akan tetapi potensi pengembangan tanah hasil pencampuran dengan variasi kadar abu vulkanik dan 5% semen telah mengalami penurunan yang signifikan jika dibandingkan dengan nilai potensi pengembangan tanah lempung organik. Nilai potensi pengembangan terendah dihasilkan oleh campuran tanah dengan 15% abu vulkanik dan 5% semen yaitu 0,45% dan dikategorikan sebagai tanah dengan potensi pengembangan rendah (potensi pengembangan <1,5%). Hal ini disebabkan karena kandungan mineral pada tanah lempung berupa *montmorillonite* yang sangat mudah mengembang oleh tambahan kadar air, dengan adanya penambahan abu vulkanik dan semen menyebabkan air dalam campuran tanah tersebut digunakan dalam proses (reaksi) kimia antara tanah dengan bahan tambah, sehingga rongga yang awalnya diisi oleh air setelah ditambahkan dengan abu vulkanik dan semen maka butiran-butiran abu vulkanik dan semen akan mengisi rongga kosong tersebut dan mengakibatkan penurunan dari nilai potensi pengembangan (*swelling potential*)[7],[6],[14].



Gambar 4. Pengaruh penambahan persen abu vulkanik (%) dan 5% semen terhadap nilai CBR rendaman (*soaked*)



Gambar 5. Pengaruh penambahan persen abu vulkanik (%) dan 5% semen terhadap potensi pengembangan (%)

D. Pengaruh Penambahan Abu Vulkanik dan Semen Terhadap Tebal Perkerasan dengan Beban Lalu Lintas Tinggi.

Analisis tebal perkerasan pada penelitian ini menggunakan metode Analisa Komponen Departemen Pekerjaan Umum (PU). Metode Analisa Komponen hanya berlaku untuk material yang berbutir kasar (*granuler material*)[15]. Hal ini disebabkan karena metode Analisa Komponen ini didasari oleh teori yang menganggap bahwa perkerasan harus elastis isotropis (sifat sama untuk segala arah). Dalam metode ini perlu adanya pemeliharaan perkerasan yang berkala. Perencanaan tebal perkerasan diperuntukkan untuk jalan 2 lajur dengan umur rencana 10 tahun serta besarnya perkembangan lalu lintas sebesar 8%. Jalan yang direncanakan dapat melayani beban lalu lintas tinggi dengan komposisi data kendaraan yang melintas seperti pada **Tabel 3**. [15]

Tabel 3. Data Kendaraan Rencana

Jenis kendaraan	Jumlah kendaraan
Kendaraan ringan 2 ton	1216
Bus 8 ton	365
Truk 2 as 13 ton	61
Truk 3 as 20 ton	37
Truk 5 as 30 ton	13

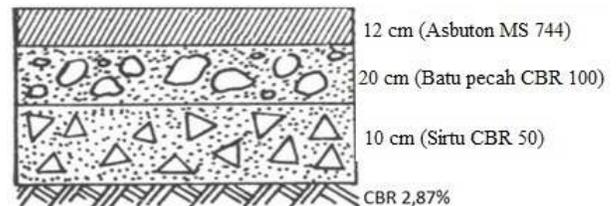
Berdasarkan analisis tebal perkerasan dengan menggunakan metode Analisa Komponen, diperoleh susunan perkerasan untuk *subgrade* berupa tanah lempung organik dengan nilai CBR 2,87% seperti pada **Gambar 6**. [16]

- Asbuton (MS 744) = 12 cm
- Batu pecah (CBR 100) = 20 cm
- Sirtu (CBR 50) = 10 cm

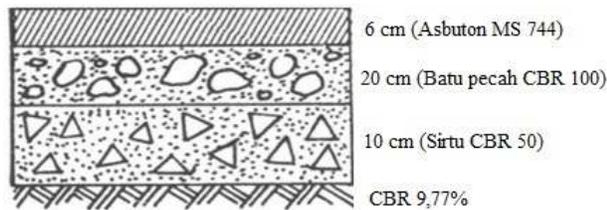
Sedangkan susunan perkerasan untuk subgrade berupa tanah lempung organik + 15% abu vulkanik + 5% semen dengan nilai CBR 9,77% seperti pada **Gambar 7**.

- Asbuton (MS 744) = 6 cm
- Batu pecah (CBR 100) = 20 cm
- Sirtu (CBR 50) = 10 cm

Berikut ini perbandingan gambar susunan perkerasan dengan nilai CBR tanah dasar (*subgrade*) 2,87% dan 9,77%.



Gambar 6. Susunan Perkerasan Lentur dengan Nilai CBR Tanah Dasar 2,87%



Gambar 7. Susunan Perkerasan Lentur dengan Nilai CBR Tanah Dasar 9,77%

4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain.

- Berat volume tanah kering maksimum (MDD) mengalami peningkatan semula sebesar 1,319 gram/cm³ menjadi 1,351 gram/cm³, sedangkan kadar air optimum (OMC) mengalami penurunan semula sebesar 33,697% menjadi 29,586% untuk variasi campuran tanah lempung organik + 15% abu vulkanik + 5% semen,
- Daya dukung (CBR) rendaman mengalami peningkatan semula sebesar 2,87% menjadi 9,77% untuk variasi campuran tanah lempung organik + 15% abu vulkanik + 5% semen,
- Nilai potensi pengembangan (*swelling potential*) mengalami penurunan semula sebesar 2,36% dan berada dalam kategori tanah dengan tingkat pengembangan sedang menjadi 0,45% dan berada dalam kategori tanah dengan tingkat pengembangan rendah untuk variasi campuran tanah lempung organik + 15% abu vulkanik + 5% semen,
- Tebal perkerasan rencana, khususnya pada lapisan permukaan (*surface course*) mengalami pengurangan semula sebesar 12 cm menjadi 6 cm untuk variasi campuran tanah lempung organik + 15% abu vulkanik + 5% semen.

Daftar Pustaka

- [1] H. C. Hardiyatmo, *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan*, Pertama. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2010.
- [2] P. Eddy, "Stabilisasi Tanah Gambut Menggunakan Gypsum dan Semen Portland," Gadjah Mada, 2000.
- [3] M. J. Ingles O, *Soil Stabilization Principles and Practice*. Melbourne, 1992.
- [4] R. Ruktiningsih, "Kajian Tahapan Pra-Stabilisasi Menggunakan Kapur Terhadap Stabilisasi Tanah Lempung dengan Semen," Gadjah Mada, 2002.
- [5] D. of T. A. and T. A. Force, *Soil Stabilization for Pavements*. Washington D.C.: Air Force AFJMAN, 1994.
- [6] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, Third. New York: Mc Graw Hill, 1994.
- [7] B. M. Das, *Advanced Soil Mechanics*. New York: Mc Graw Hill, 1983.
- [8] V. Ananda Upa, "Pengaruh Tahapan Pra-Stabilisasi

Terhadap Kekuatan dan Stabilitas Tanah Lempung dengan Kandungan Bahan Organik 5%," Gadjah Mada, 2015.

- [9] V. Ananda Upa, "Sifat Mekanis Tanah Lempung Lunak Artifisial Untuk Infrastruktur dengan Beban Lalu Lintas Rendah," *Politeknologi*, vol. 18, no. 1, pp. 85–92, 2019.
- [10] V. Ananda Upa, "Studi Perlakuan Awal dengan Abu Vulkanik (Fly Ash) Gunung Kelud Terhadap Sifat Fisis Tanah Lempung Lunak Organik," in *Seminar Nasional Teknologi*, 2018, pp. 62–68.
- [11] ASTM, *Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization*, Vol 04. Philadelphia, 2001.
- [12] K. Tjokrodinuljo, *Teknologi Beton*, Pertama. Yogyakarta: Biro Penerbit Teknik Sipil, 2007.
- [13] A. Rifa'i, *Perbaikan Tanah*. Yogyakarta, 2013.
- [14] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah I Edisi III*. Yogyakarta: Gadjah Mada University, 2002.
- [15] D. P. Umum, *Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya dengan Metode Analisa Komponen*. Jakarta, 1989.
- [16] AASHTO, *Intern Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C., 1981.