

Analisis Elemen Hingga Sistem Pelat dengan Perkuatan Kolom SiCC Bentuk T pada Tanah Ekspansif

Finite Element Analysis of the Supported Plate with T-Shape SiCC Column of Expansive Soil

Desy Rahmawati, Willis Diana, Agus Setyo Muntohar

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Tanah ekspansif merupakan lempung yang memiliki nilai kembang susut yang tinggi. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan pada infrastruktur yang berada di atasnya. Teknik kolom kapur atau semen atau kapur-semen dapat dilakukan sebagai metode perbaikan pada tanah ekspansif. Kolom SiCC merupakan kolom yang terbuat dari campuran mikrokalsium dan mikrosilika yang digunakan sebagai salah satu metode dalam perbaikan tanah ekspansif. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan parameter pemodelan dan besar penurunan sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan diameter kepala kolom 15,24 cm dengan variasi panjang kolom 70 cm dan 50 cm dengan beban 8 ton. Pemodelan dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Abaqus 6.11 dengan analisis keruntuhan tanah menggunakan model *Drucker-Prager*. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang 50 cm mengalami penurunan sebesar 10,76 mm. Sedangkan sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang 70 cm mengalami penurunan sebesar 7,04 mm. Hasil yang diperoleh juga menunjukkan bahwa dengan perbedaan panjang kolom, kekakuan tanah akan berbeda sehingga nilai parameter yang digunakan juga berbeda.

Kata-kata kunci : Analisis Elemen Hingga, Sistem Pelat, Kolom SiCC Bentuk T

Abstract. Expansive soils are clay that has high swells and shrinks value, that can cause in damage to the infrastructure on it. The technique of lime or cement or lime-cement columns can be performed as a method of improvement on expansive soil. SiCC columns are columns made of a mixture of microcalcium and microsilica used as one method of expansive soil improvement. This study aims to determine the parameter values and the deformation of plate system with rigid pavement on expansive soil reinforced with SiCC column T-shape with head column diameter 15,24 cm with variation of column length 70 cm and 50 cm with load 8 tons. The analysis was done by finite element method using Abaqus 6.11 software with ground collapse analysis using *Drucker-Prager* model. The modeling results show that plate system with rigid pavement on expansive soils reinforced with SiCC column T-shape with length 50 cm have deformation value 10,76 mm. While the plate system with rigid pavement on expansive soil reinforced with SiCC column T-shape with a length of 70 cm have deformation value 7,04 mm. The results obtained also show that with the difference in column length, soil stiffness will be different so that the parameter values used are also different.

Keywords : Finite element analysis, plate system, T-shape SiCC column

1. Pendahuluan

Beberapa daerah di Indonesia memiliki jenis tanah lempung ekspansif. Tanah ekspansif merupakan tanah yang memiliki ciri-ciri kembang susut yang besar (Muntohar, 2014). Karena kembang susut yang besar, ditambah dengan beban yang terjadi di atas lapis perkerasan jalan, maka sering ditemukan permukaan jalan yang bergelombang. Apabila

kondisi kembang susut ini terjadi terus menerus, struktur jalan dapat mengalami retak akibat deformasi dan pembebanan di atas struktur jalan raya. Selain itu, tanah ekspansif memiliki daya dukung yang rendah sehingga perlu dilakukan perbaikan untuk meningkatkan kekuatan tanah ekspansif.

Beberapa metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan berupa stabilisasi fisik dan kimia, mengganti material tanah ekspansif,

manajemen drainase baik vertikal maupun horizontal, maupun dengan menggunakan teknik kolom (Diana, dkk., 2017). Muntohar (2015) menyebutkan beberapa metode perbaikan tanah ekspansif yang dapat dilakukan antara lain dengan cara mengganti atau mencampur tanah, pemakaian cerucuk bambu, mengubah sifat kimiawi tanah, dan penggunaan geosintetik. Namun, metode tersebut dianggap masih belum efektif karena kurang praktis dan membutuhkan biaya yang mahal.

Muntohar (2014) mengungkapkan bahwa pemilihan kapur merupakan metode yang cepat dan ekonomis untuk memperbaiki sifat-sifat tanah lempung dalam kondisi basah sehingga dapat digunakan untuk perkerasan jalan. Reaksi *physicochemical* kapur-lempung terjadi akibat pertukaran kation (Abiodun dan Nalbantoglu, 2015).

Metode lain yang cukup efektif untuk mengurangi *settlement* dan deformasi pada tanah ekspansif yaitu dengan menggunakan teknik kolom kapur. Prinsip penerapan metode ini adalah reaksi modifikasi yang berlangsung cepat dan reaksi stabilisasi yang berlangsung dalam jangka waktu yang lama. Perbaikan tanah dengan menggunakan sistem kolom kapur telah dilakukan oleh Buossida dan Porbaha (2004), Larsson dkk. (2009), Charbit (2009), Muntohar dkk. (2013), Liu dkk. (2013), Farouk dan Shahien (2013), Carvajal dkk. (2013), serta Malekpoor dan Poorebrahim (2014). Hasil penelitian secara umum menunjukkan bahwa perbaikan tanah ekspansif dengan menggunakan teknik kolom kapur dapat mengurangi deformasi dan *settlement* pada tanah ekspansif. Aplikasi teknik kolom kapur merupakan metode yang efektif untuk modifikasi jangka panjang pada perbaikan tanah dasar untuk berbagai masalah tanah seperti tanah ekspansif, lempung lunak, *sensitive clay*, dan lain-lain (Larsson dkk., 2009). Bahan yang digunakan untuk membuat kolom kapur atau kolom semen atau kolom kapur-semen akan menyebar melalui pori-pori tanah sehingga terjadi reaksi sementasi dengan tanah di sekitar kolom, sehingga teknik ini dapat meningkatkan kuat dukung tanah dan mengurangi deformasi pada tanah (Muntohar, 2016). Reaksi *physicochemical* kapur-lempung terjadi akibat pertukaran kation (Abiodun dan Nalbantoglu, 2015).

Pemodelan numerik telah banyak dilakukan di bidang teknik sipil karena dapat memberikan pendekatan numerik terhadap sistem yang sangat kompleks (Gray, 2013). Pemodelan numeris perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih kompleks. Berdasarkan hasil pemodelan numerik untuk perbaikan tanah dengan sistem kolom telah dilakukan Charbit (2009), Larsson dkk. (2012), Khodair dan Mohti (2013), Muntohar dkk. (2013), Muntohar dan Nugraha (2015), Fattah dkk. (2015), dan Chenary (2017), analisis numerik dapat menunjukkan hasil penurunan tanah dengan ketelitian yang tinggi dan mendekati nilai pengujian laboratorium.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan pemodelan numerik dengan penggunaan teknik kolom kapur untuk mengurangi deformasi pada sistem pelat akibat pembebanan yang terjadi pada tanah ekspansif. Penelitian ini difokuskan untuk mencari nilai parameter pemodelan tanah yang diperkuat kolom SiCC berbentuk T dengan panjang 50 cm dan 70 cm. Kemudian, nilai parameter yang diperoleh digunakan untuk mengkaji pengaruh pembebanan terhadap penurunan pelat pada tanah ekspansif yang diberi penambahan kolom kapur sebagai fondasi lapis perkerasan kaku. Tiang yang dimodelkan berupa *floating piles* yang berada di antara sistem pelat dengan tanah ekspansif. Penurunan pelat pada tanah yang diperkuat dengan kolom SiCC berbentuk T dianalisis dengan menggunakan metode elemen hingga 3 dimensi dengan program Abaqus 6.11.

Tanah dimodelkan dengan model *undrained Hardening Soil (HS)* dan pelat serta kolom dimodelkan dalam *linear-elastic model*. Model *Drucker Prager* telah diperkenalkan oleh Drucker dan Prager pada 1952 (Jiang dan Wu, 2012) dan telah digunakan secara luas untuk analisis elemen hingga dibidang geoteknik (Fattah dkk., 2015). *Drucker Prager* dapat mendeskripsikan dengan baik pada tekanan dan sensitivitas material seperti batuan, tanah, dan beton. Selain itu, model pada *strain-hardening Drucker-Prager* dapat mendeskripsikan perilaku penggeseran tanah dengan baik (Liu dan Chen, 2017). *Drucker Prager* digunakan untuk simulasi material geologi dengan memperlihatkan hasil yang tergantung pada tekanan yang terjadi (Fattah

dkk., 2015). Pada pemodelan *Drucker Prager* dibutuhkan nilai *friction angle*, *plastic dilation*, dan kohesi (Jiang dan Fei-Wu, 2012). Penggunaan *Drucker Prager* dalam analisa juga diharapkan dapat meningkatkan tingkat akurasi pada hasil yang diperoleh (Charbit, 2009).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mencari nilai parameter yang diperlukan pada pemodelan numeris dan digunakan untuk menentukan besar penurunan dalam pemodelan sistem pelat dengan perbaikan kolom SiCC berbentuk T pada tanah ekspansif.

2. Metode Penelitian

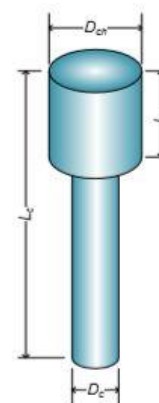
Parameter Material

Analisis keruntuhan yang digunakan pada pemodelan ini adalah *Drucker Prager*. Tanah dimodelkan dengan model *undrained Hardening Soil (HS)* dan pelat serta kolom dimodelkan dalam *linear-elastic model*. *Drucker prager* digunakan untuk simulasi material geologi dengan memperlihatkan hasil yang tergantung pada tekanan yang terjadi (Fattah, 2015). Material yang digunakan dalam pemodelan ini antara lain tanah, pasir, dan beton. Parameter yang diperlukan dalam pemodelan ini untuk analisis *drucker prager*, antara lain :

1. Material tanah
Model material tanah menggunakan *elasto-plastic Drucker Prager*, dengan material yang dibutuhkan antara lain *angle of friction*, *initial tension*, *dilation angle*, *yield stress*, *abs plastic strain*, *young's modulus*, dan *poisson's ratio*.
2. Material pasir
Material pasir dimodelkan dalam *linear elastic model*, dengan parameter material yang dibutuhkan antara lain *density*, *young's modulus*, dan *poisson's ratio*.
3. Material beton
Material kolom SiCC dimodelkan sebagai material beton dengan perlakuan sebagai *linear elastic model*. Parameter yang dibutuhkan dalam material ini, antara lain *density*, *young's modulus*, *concrete damage plasticity*, *compressive behaviour*, *compressive damage parameters*, *tensile behaviour*, dan *concrete tension damage*.

Pemodelan Pendahuluan

Pemodelan ini dilakukan model kolom tunggal untuk mencari nilai parameter yang diperlukan untuk mensimulasikan hasil pengujian laboratorium pada masing-masing bentuk kolom. Benda uji dimodelkan dalam bentuk silinder dengan model kolom berbentuk T berdiameter (D_{ch}) 15,24 cm dengan variasi panjang kolom 50 cm dan 70 cm ditunjukkan pada Gambar 1. Beban sebesar 140 kg diletakkan tengah kolom. Hasil analisis numerik kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium.



Gambar 1 Model kolom SiCC bentuk T (Muntohar dkk., 2016).

Pemodelan pada Sistem Pelat

Parameter yang diperoleh pada penelitian pendahuluan kemudian digunakan untuk melakukan pemodelan pada sistem pelat. Pemodelan ini dilakukan pemodelan pelat perkerasan berukuran 1 m x 1 m x 1,2 m dengan beban kendaraan sebesar 8 ton dengan menggunakan program Abaqus 6.11.

3. Hasil dan Pembahasan

Parameter Geoteknik dan Mekanik pada Model Kolom Bentuk T dengan Panjang 50 cm dan 70 cm

Berdasarkan hasil pemodelan, penggunaan analisis *elasto-plastic Drucker Prager* dapat diaplikasikan dalam pemodelan sistem pelat pada tanah ekspansif dengan perbaikan kolom SiCC. Parameter yang digunakan dalam pemodelan numerik kolom bentuk T dengan panjang kolom 50 cm berbeda

dengan panjang kolom 70 cm. Perbedaan nilai parameter antara hasil analisis numerik pada kolom dengan panjang 50 cm dan 70 cm disebabkan oleh perilaku tanah pada masing-masing kolom berbeda.

Perilaku tanah pada masing-masing kolom berbeda dikarenakan oleh perbedaan pengaruh kapur yang terjadi. Muntohar (2009) menjelaskan bahwa ion kapur pada kolom kapur akan bermigrasi ke sekitarnya dan akan bereaksi dengan tanah sehingga kondisi tanah menjadi alkalin. Kondisi ini menimbulkan reaksi Alumino-Silikat yang kemudian terhidrasi yang mengakibatkan sementasi pada tanah sehingga tanah menjadi lebih kaku.

Hal ini menyebabkan nilai parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan numerik sistem pelat dengan perkuatan kolom bentuk T dengan panjang kolom 50 cm berbeda

dengan nilai parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan numerik sistem pelat dengan perkuatan kolom panjang kolom 70 cm. Selain itu, proses stabilisasi yang terjadi dapat menghasilkan kekakuan tanah dan mengurangi deformasi (Pooorooshasb dan Meyerhof, (dalam Muntohar, 2013). Sehingga, hasil analisis numerik dipengaruhi oleh besar nilai kekakuan dari masing-masing material. Perbedaan nilai parameter tanah yang digunakan untuk pemodelan tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang kolom 50 cm dan 70 cm ditunjukkan pada Tabel 1. Sedangkan nilai parameter pada material pasir dan beton dianggap sama yang ditunjukkan pada Table 2 dan Table 3. Kurva perbandingan hasil pengujian laboratorium dan analisis numerik serta reaksi yang terjadi ditunjukkan oleh Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, dan Gambar 7.

Tabel 1 Data parameter material tanah

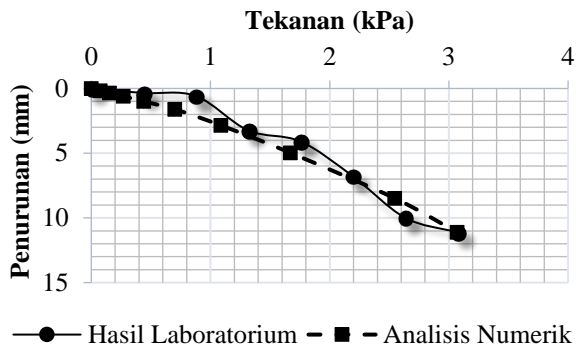
Material	Tanah		
	Parameter	Diperkuat Kolom 50 cm	Diperkuat Kolom 70 cm
<i>Drucker Prager Hardening</i>	<i>Angle of Friction (°)</i>	2	5
	<i>Initial Tension</i>	5×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-2}$
	<i>Dilation Angel (°)</i>	2	5
	<i>Yield Stress (MPa)</i>	5×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-2}$
	<i>Abs Plastic Strain</i>	0	0
	<i>Elastic</i>	<i>Young's Modulus (MPa)</i>	1,25
<i>Poisson's Ratio</i>		$3,2 \times 10^{-1}$	$3,2 \times 10^{-1}$

Tabel 2 Data parameter material pasir

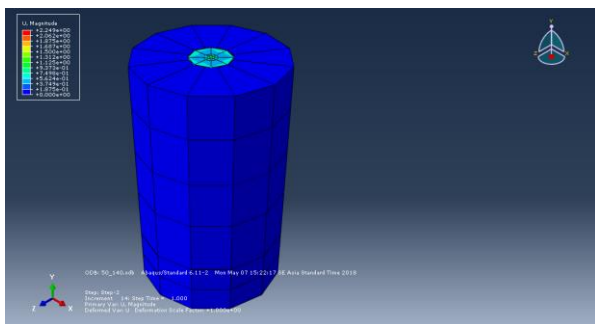
Material	Pasir	
	Parameter	Nilai
<i>Elastic</i>	<i>Young's Modulus (MPa)</i>	5
	<i>Poisson's Ratio</i>	3×10^{-1}

Tabel 3 Data parameter material beton

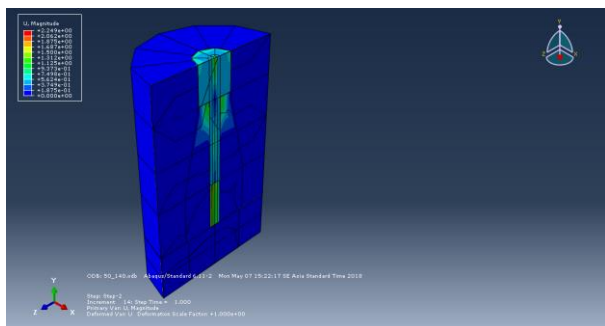
Material	Beton		
	Parameter	Nilai	
<i>Density</i> (kg/m^3)		$1,5 \times 10^{-5}$	
<i>Elastic</i>	<i>Young's Modulus</i> (MPa)	$6,65 \times 10^4$	
	<i>Poisson's Ratio</i>	$1,5 \times 10^{-1}$	
<i>Plasticity</i>	<i>Dilatation Angle</i> ($^\circ$)	1	
	<i>Eccentricity</i>	1	
	<i>Fb0/fc0</i>	1.16	
	<i>K</i>	$6,7 \times 10^{-1}$	
	<i>Viscosity</i> <i>Parameter</i>	5×10^{-3}	
<i>Tensile Behaviour</i>			
	<i>Yield Stress</i> (MPa)	<i>Cracking Strain</i>	<i>Damage Parameter</i>
	8×10^{-3}	0	0
	$1,6 \times 10^{-4}$	$2,45 \times 10^{-2}$	$9,9 \times 10^{-1}$
<i>Concrete Tension Damage</i>			
<i>Concrete Damaged Plasticity</i>	<i>Damage Parameter</i>	<i>Cracking Strain</i>	
	0	0	
	$9,9 \times 10^{-1}$	$2,45 \times 10^{-2}$	
<i>Compressive Behavior</i>			
	<i>Yield Stress</i> (MPa)	<i>Inelastic Strain</i>	
	$3,87 \times 10^{-3}$	0	
	$7,74 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	
	$1,16 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	
	$1,55 \times 10^{-3}$	$3,43 \times 10^{-3}$	
	$1,94 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	
	$2,32 \times 10^{-3}$	$8,47 \times 10^{-3}$	
	$2,71 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$	
	7×10^{-2}	$2,7 \times 10^{-2}$	
<i>Concrete Compressive Damage</i>			
	<i>Damage Parameter</i>	<i>Inelastic Strain</i>	
	0	0	
	5×10^{-2}	8×10^{-3}	
	1×10^{-1}	$1,6 \times 10^{-2}$	
	$7,5 \times 10^{-1}$	$2,7 \times 10^{-2}$	



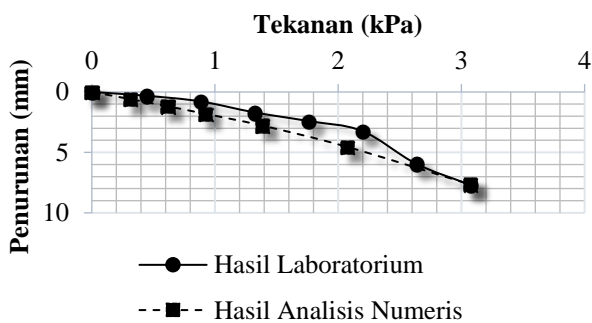
Gambar 2 Kurva hubungan tekanan dan penurunan pada hasil laboratorium dan analisis numerik pada perkuatan kolom T-50 cm.



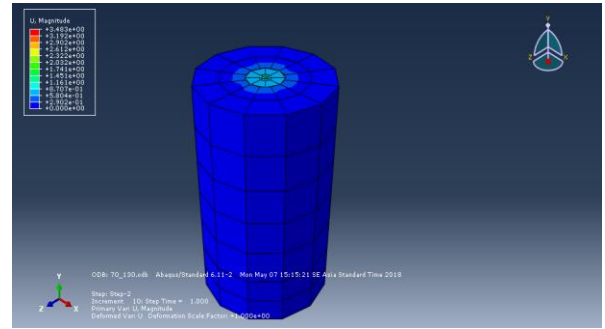
Gambar 3 Hasil analisis numerik pada perkuatan kolom T-50 cm.



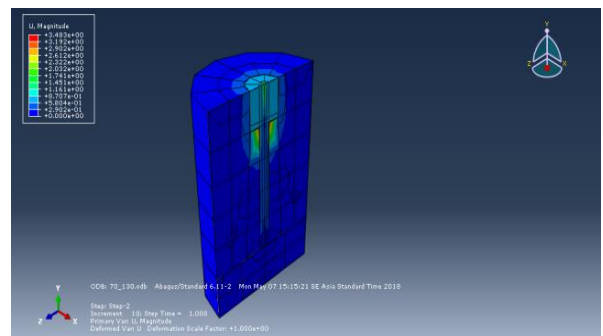
Gambar 4 Reaksi tanah pada analisis numerik pada perkuatan kolom T-50 cm.



Gambar 5 Kurva perbandingan hasil laboratorium dan analisis numerik pada perkuatan kolom T-70 cm.



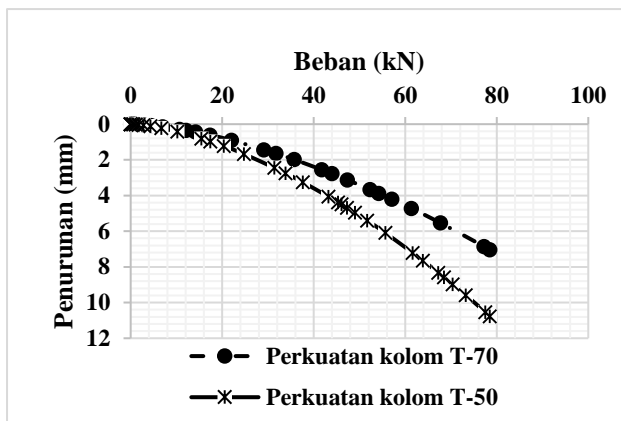
Gambar 6 Hasil analisis numerik pada perkuatan kolom T-70 cm.



Gambar 7 Reaksi tanah pada analisis numerik pada perkuatan kolom T-70 cm.

Pemodelan Sistem Pelat Perkerasan Kaku dengan Perbaikan Kolom SiCC Bentuk T dengan Panjang 50 cm dan 70 cm

Berdasarkan analisis numerik, penurunan pada kolom bentuk T dengan panjang 70 cm lebih kecil dari 50 cm yaitu 7,04 mm dan 10,76 mm pada beban 8 ton, yang ditunjukkan pada Gambar 8. Hal ini menunjukkan bahwa semakin panjang kolom, maka penurunan semakin kecil. Penggunaan kolom T-shape mampu mengurangi *settlement* dan deformasi arah vertikal, dikarenakan semakin besar diameter kolom, maka *transfer area* beban semakin besar (Liu dkk., 2012). Intensitas beban ultimat kolom bertambah akibat *undrained shear strength* meningkat yang disebabkan oleh bertambahnya panjang kolom (Hasan dan Samadhiya, 2016). Kolom dimodelkan sebagai *floating piles* yang tidak menyentuh lapisan tanah keras. Pada kondisi ini, beban dari roda kendaraan akan dilawan oleh gesekan (*friction*) yang terjadi pada kolom sehingga mampu mengurangi penurunan yang terjadi pada perkerasan kaku.



Gambar 8 Kurva perbandingan penurunan tanah yang diperkuat kolom SiCC bentuk T dengan panjang 50 cm dan 70 cm.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang analisis elemen hingga sistem pelat dengan perkuatan kolom SiCC bentuk T pada tanah ekspansif, dapat ditarik kesimpulan, antara lain :

1. Nilai parameter tanah yang digunakan untuk memodelkan sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang 50 cm dan 70 cm berbeda. Hal ini disebabkan oleh kekakuan tanah yang berbeda.
2. Sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang 50 cm mengalami penurunan sebesar 12,57 mm pada beban 8 ton. Sedangkan sistem pelat dengan perkerasan kaku pada tanah ekspansif yang diperkuat dengan kolom SiCC bentuk T dengan panjang 70 cm mengalami penurunan sebesar 7,7 mm pada beban 8 ton. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin panjang ukuran kolom, maka penurunan yang terjadi semakin kecil.

5. Daftar Pustaka

Buoassida, M., dan Porbaha, A., 2004, Ultimate Bearing Capacity of Soft Clays Reinforced By A Group of Columns-Application To A Deep Mixing Technique, *Soils and Foundation, Japanese Geotechnical Society*, 44 (3), 91-101.

Carvajal, E., Vukotic G., Sagaseta, C., Wehr W., 2013, Column Supported Embankments for Transportation Infrastructures : Influence of Column Stiffness, Consolidation Effects and Cyclic Loading, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris.

Charbit, B., 2009, Numerical Analysis of Laterally Loaded Lime/Cement Columns, master's Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Departement of Civil and Architerctural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.

Chenari, J.R., Fard, M.K., Chenari, M.J., dan Sosahab, J.S., 2017, Physical and Numerical Modeling of Stone Column Behavior in Loose Sand, *International Journal Civil Engineering*, 3, 1-14.

Diana, W., Hardyatmo, H.C., dan Suhendro, B., 2017, Effect of Pile Connections on the Performance of the Nailed Slab System on teh Expansive Soil, *International Journal of Geomate*, 12 (32), 134-141.

Farouk, A., dan Sahien, M.M., 2013, Ground Improvement Using Soil-Cement Columns : Experimental Investigation, *Alexandria Engineering Journal*, 52, 733-740.

Fattah, M.Y., Al Omari, R.R., Ali, H.A., 2015, Numerical Simulation of the Treatment of Soil Swelling Using Grid Geocell Columns, *Slovak Journal of Civil Engineering*, 23 (2), 9-18.

Gray, M., 2013, Analysis Geothermal Pile Foundations Under Combined Axial and Moment Loading, Master's Thesis, Washington State University.

Hasan, M., dan Samadhiya, N.K., 2016, Experimental and Numerical Analysis of Geosynthetic-Reinforced Floating Granular in Soft Clays, *International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering*, 2 (22), 1-13.

Jiang, J.F., dan Wu, Y.F., 2012, Identified of

- Material Parameters for Drucker-Prager Plasticity Model for FRP Confined Circular Concrete Columns, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 445-456.
- Khodair, Y., dan Mohti, A.A., 2013, Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction Under Axial and Lateral Loads, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8 (3), 239-249.
- Larsson, S., Malm, R., Charbit, B., Ansell, A., 2012, Finite Element Modelling of Laterally Loaded Lime-Cement Columns Using A Damage Plasticity Model, *Computers and Geotechnics Journal*, 44, 48-57.
- Larsson, S., Rothhamel, M., Jacks, G., 2009, A Laboratory Study on Strength Loss in Kaolin Surrounding Lime-Cement Columns, *Applied Clay Science*, 44, 116-126.
- Liu, SY., Du, YJ., Yi, YL, dan Puppala, A.J., 2012, Field Investigation on Performance of T-Shaped deep Mixed Soil Cement Column-Supported Embankments over Soft Ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138, 718-727.
- Malekpoor, M. R., dan Poorebrahim, Gh. R., 2014, Behaviour of Compacted Lime-Soil Columns, *International Journal Engineering*, 27 (2), 315-324.
- Muntohar, A.S., Rahma, N.M.E., Hashim, R., and Islam, M.S., 2013, A Numerical Study of Ground Improvement Technique Using Group of Soil-Column on Peat, *Pertanika Journal Science and Technology*, 21 (1), 625-634.
- Muntohar, A.S., 2009, A Laboratory Test on The Strength and Load-Settlement Characteristic of Improved Soft Soil Using Lime-Column, *Dinamika Teknik Sipil*, 10 (3), 202-207.
- Muntohar, A.S., dan Nugraha, R.A., 2015, Pengaruh Pembesaran Kepala Kolom Bentuk *T-Shape* pada Sistem Fondasi Jalan Raya Terhadap Deformasi Akibat Pengembangan Tanah Ekspansif, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XI-2015, Institut Teknologi Surakarta, Surakarta*, 28 Januari 2015.
- Muntohar, A.S., Rahmawati, A., dan Nursetiawan, 2016, Sistem Kolom dari Campuran Mikrokalsium dan Mikrosilika untuk Fondasi Perkerasan Lentur Jalan pada Tanah Ekspansif, Proposal Penelitian Strategis Nasional (Lanjutan Tahun ke-2), Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- Tafalas, M.Y., 2016, Pengaruh Diameter Kepala Mini Kolom Terhadap Beban dan Deformasi Pelat *Flexiglass* Di Atas Tanah Lempung Ekspansif, Tugas Akhir, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.