

Analisis Elemen Hingga Sistem Pelat dengan Perkuatan Kolom SiCC O-Shape pada Tanah Ekspansif

Finite Element Analysis of The Supported Plate With O-Shape SiCC Column of Expansive Soil

Novrizal, Willis Diana, Agus Setyo Muntohar

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Metode perbaikan tanah dengan teknik kolom kapur atau semen atau pozzolan merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mengurangi pengaruh tekanan pengembangan pada tanah ekspansif. Teknik kolom juga dapat berfungsi sebagai fondasi perkerasan. Pada naskah ini disajikan hasil pemodelan numerik terhadap model kolom SiCC yang digunakan sebagai sistem fondasi perkerasan kaku jalan dengan sistem pelat. Teknik kolom yang digunakan dalam penelitian ini adalah kolom dengan bentuk polos atau *O-Shape*. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mencari nilai parameter material tanah yang akan dipakai dalam pemodelan numerik dengan analisis metode elemen hingga dan mengkaji pengaruh panjang kolom terhadap beban-penurunan dan deformasi sistem fondasi perkerasan kaku jalan dengan sistem pelat. Model kolom-kolom yang menopang lapisan perkerasan kaku jalan dengan sistem pelat dimodelkan sebagai plane strain dalam ABAQUS ver. 6.11-2. Diameter kolom (D_c) yang digunakan adalah 5,08 cm dengan panjang 50 cm dan 70 cm. Penampang badan jalan yang dimodelkan berukuran $1 \times 1 \text{ m}^2$ dan kedalaman 1,2 m dengan tebal pelat 30 cm dan lapisan tanah lempung ekspansif setebal 70 cm berada di atas lapisan pasir setebal 20 cm. Penampang yang dimodelkan adalah hasil pengamatan defleksi pelat akibat beban yang dilakukan di laboratorium. Material tanah dan lapisan perkerasan jalan dimodelkan sebagai *Drucker Prager* model. Hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi vertikal tanah akibat tekanan berkurang dengan bertambahnya panjang kolom. Kolom dengan panjang 50 cm mengalami penurunan 31,91 mm dan kolom dengan panjang 70 cm mengalami penurunan 26,57 mm. Dengan demikian, semakin besar ukuran panjang kolom cenderung menghasilkan deformasi yang semakin kecil.

Kata-kata kunci : tanah ekspansif, teknik kolom, pelat kaku, defleksi, metode elemen hingga

Abstract. The method of soil improvement with lime or cement column or pozzolan technique is one of the techniques that can be used to reduce the influence of pressure development on expansive soil. The column technique can also serve as a pavement foundation. This paper presents the results of numerical modeling with finite element method of the SiCC column model used as a rigid pavement path foundation system with plate system. The column technique used in this study is a plain or *O-Shape* form. The main purpose of this study was to search soil material parameter value that will be used in modeling and examine the effect of column length on pressure and deformation of rigid pavement road foundation system with plate system. The model of columns supporting a rigid pavement with a plate system modeled as a plane strain in ABAQUS ver. 6.11-2. The diameter of the column (D_c) used is 5,08 cm with a length of 50 cm and 70 cm. The modeled section of the road body is $1 \times 1 \text{ m}^2$ in size and depth of 1,2 m with 30 cm thickness and 70 cm of expansive clay layer above the sand layer as thick as 20 cm. The modeled section is the result of plate deflection observation due to pressure done in laboratory. Soil material and pavement layers are modeled as *Drucker Prager* models. The results of the analysis showed that the vertical deformation of the soil due to pressure decreases with increasing column length. Columns with a length of 50 cm decreased 31,91 mm and columns with a length of 70 cm decreased 26,57 mm. Thus, the larger the length of the column tends to produce lesser deformation.

Keywords : expansive soil, column technique, rigid plate, deflection, finite element method

1. Pendahuluan

Tanah ekspansif adalah tanah yang mengalami perubahan volume akibat

perubahan kadar air dalam tanah. Perubahan volume ini dipengaruhi oleh meningkatnya kelembaban yang mengakibatkan

pengembangan pada tanah dan sebaliknya jika kelembaban itu berkurang, maka akan menyebabkan penyusutan (Manoppo, 2009).

Dikenal beberapa metode penanganan perilaku tanah ekspansif, yaitu dengan metode perbaikan tanah dan mitigasi ekspansif diantaranya *remove and replace* (membuang dan penggantian material tanah ekspansif), *stabilization* (memperbaiki karakteristik tanah ekspansif secara mekanis dan atau kimiawi), *drainage control (moisture control)*, dan perkuatan tanah (*soil reinforcement*) seperti kolom kapur. Teknik kolom kapur (*lime column*) telah banyak digunakan dalam metode perkuatan tanah seperti yang dilakukan oleh Budi (2003) dan Muntohar (2009).

Perbaikan tanah menggunakan kolom kapur ini lebih mengarah pada perbaikan tanah dalam atau *deep ground improvement*. Teknik perbaikan tanah dengan metode kolom kapur juga harus mampu mengurangi tekanan ekspansif dan sifat kembang susut tanah. Dalam perkembangannya metode perbaikan tanah dengan perkuatan kolom kapur telah banyak diteliti untuk mengatasi sifat ekspansif tanah. Beberapa kajian terdahulu mengenai penggunaan kolom kapur-semen telah dilakukan oleh Larsson dkk. (2012), Liu dkk. (2012), Farouk dan Shahien (2013), Khodair dan Mohti (2014), Muntohar (2014).

Secara umum hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kolom mampu menambah kapasitas beban yang dapat bekerja di atas tanah lempung serta mampu mengurangi penurunan. Penggunaan kolom mampu mengurangi penurunan dan deformasi serta menambah kekakuan kolom pada kedalaman dangkal (Liu dkk., 2012).

Kolom SiCC pada penelitian kali ini adalah kolom campuran silika (SiO_2) dan kalsium karbit (*calcium carbide/CC*) sehingga dapat terbentuk bahan sementasi (*cemented material calcium silicate hydrate (CSH)*) seperti yang telah dikaji oleh Diana dkk. (2012). Dalam beberapa analisis metode elemen hingga (FEM) baik kolom kapur/semen dan tanah liat dimodelkan sebagai *Mohr-Coulomb elastoplastic material* (Charbit, 2009), namun pada pemodelan material tanah kali ini dimodelkan sebagai

Drucker Prager model. Karena perilaku plastik dari kolom ini, kolom dimodelkan dengan *Concrete Damaged Plasticity model*. Model ini telah banyak berhasil digunakan untuk menggambarkan *cracking of concrete* (kerusakan beton) menurut Malm (2009). *Concrete Damaged Plasticity model* pada ABAQUS terdiri dari *non-associated multihardening* serta *plasticity* dan *isotropic damaged elasticity*.

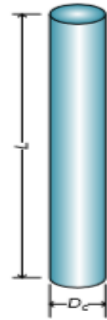
Berdasarkan hasil-hasil kajian tentang kolom kapur, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan numerik penggunaan teknik kolom sebagai fondasi tiang mini (*mini-piles*) yang memiliki fungsi seperti *floating piles* dan disebut sebagai *mini-columns* untuk mengurangi penurunan dan deformasi berlebih pada lapis perkerasan kaku jalan raya akibat sifat kembang-susut tanah lempung ekspansif. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji perilaku gaya-gaya dan deformasi pada lapis perkerasan kaku jalan raya dan tanah lempung ekspansif dengan adanya penambahan *mini-columns* sebagai fondasi lapis perkerasan kaku jalan raya pada tanah lempung ekspansif. Tiang *mini-columns* akan dimodelkan sebagai *floating piles* yang berada diantara lapis perkerasan dan tanah lempung ekspansif. Perilaku dan efektifitas *mini-columns* dianalisis dengan menggunakan model numerik metode elemen hingga 3 dimensi (3D) dengan program ABAQUS 6.11-2.

2. Metode Penelitian

Pemodelan Numerik

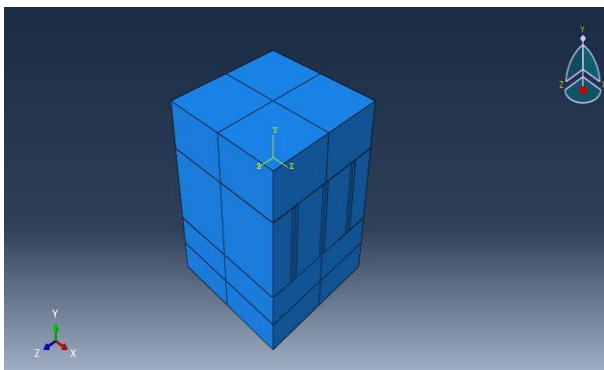
Analisis menggunakan dengan metode elemen hingga atau metode analisis numerik yang dilakukan dengan memodelkan kolom tunggal dan sistem perkerasan pelat jalan diatas tanah lempung ekspansif sebagai struktur perkerasannya. Data yang dipakai dalam pemodelan ini merupakan data penelitian dari laboratorium yang dilakukan oleh Tafalas (2016), sistem kolom SiCC dari campuran mikrokalsium dan mikrosilika untuk fondasi sistem perkerasan pelat jalan pada tanah lempung ekspansif. Kemudian data diolah

untuk digunakan dalam pemodelan numerik menggunakan metode *finite element* (Elemen Hingga). Data instrumentasi akan digunakan untuk membandingkan hasil dari pemodelan dan data laboratorium. Model tiang kolom dengan diameter (D_c) 5,08 cm dan panjang (L_{col}) 70 cm dan 50 cm (Gambar 1).



Gambar 1 Sketsa kolom *O-Shape*

Penampang jalan atau prototipe yang dimodelkan, pada potongan persegi dengan ukuran panjang sisi-sisinya 1 m, struktur perkerasan jalan terdiri dari 3 lapisan, yaitu apis fondasi bawah (*base course*) setebal 20 cm, lapis fondasi atas (*sub-base course*) setebal 70 cm, dan lapis permukaan sistem pelat (*surface course*) setebal 30 cm. Beban kendaraan truk diletakkan sesuai dengan perletakan as dan roda dengan pusat beban truk berada tepat ditengah potongan jalan (Gambar 2).



Gambar 2 Penampang jalan yang dimodelkan

Input Material

Pemodelan ini menggunakan model *Drucker Prager* untuk memodelkan material tanah dan lapis perkerasan jalan. Menurut Nugraha (2007), penggunaan model *Drucker*

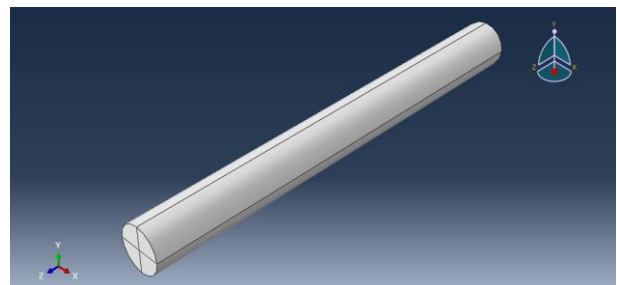
Prager merupakan pendekatan yang sudah memperhitungkan seluruh *principal stress* (tegangan utama). Dalam memodelkan kolom dibutuhkan material properties pada ABAQUS berupa material beton yang terdiri dari *Concrete Damage Plasticity*, *Compressive Behaviour*, *Concrete Compression Damage*, *Tensile Behaviour*, *Concrete Tension Damage*, *Elastic* dan *Density*. Data material yang dipakai pada kolom merupakan hasil analisis pendekatan numerik dari pengujian di laboratorium pada penelitian yang dilakukan oleh Tafalas (2016), begitu juga pada lapisan pasir untuk memodelkannya menggunakan data elastisitas pasir dan *Density* model dari pengujian laboratorium sebelumnya.

Tahapan Simulasi

Setelah memasukkan properti material pada program, tahapan simulasi dimulai dengan urutan sebagai berikut :

Pembuatan Geometri

Pembuatan geometri berada modul part dalam *software* Abaqus. Part pada kolom *O-Shape* SiCC dan perkerasan pelat dibuat pada menu ini. Setiap bagian dibuat berdasarkan geometri yang telah di rencanakan yaitu, untuk kolom SiCC berukuran 70 cm dan 50 cm dengan diameter 5,08 cm (Gambar 3). Pada susunan lapis perkerasan direncanakan berukuran 1 x 1 m² yang terdiri dari lapis fondasi bawah (*base course*) setebal 20 cm, lapis fondasi atas (*sub-base course*) setebal 70 cm, dan lapis permukaan sistem pelat (*surface course*) setebal 30 cm.

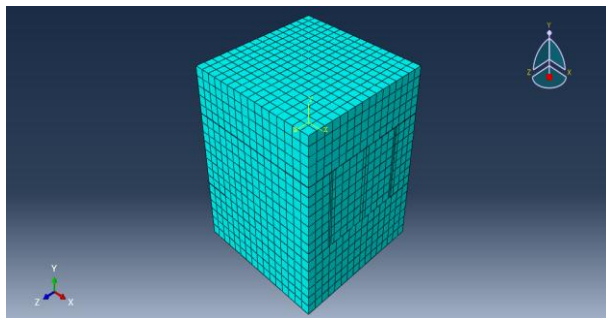


Gambar 3 Kolom *O-Shape*

Mesh

Proses *mesh* dilakukan untuk membagi model kedalam elemen-elemen lebih kecil

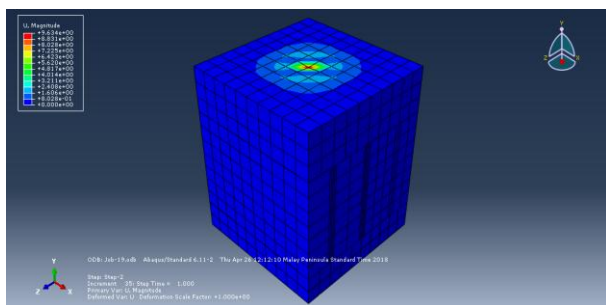
sehingga mempermudah dalam proses perhitungan. Dalam proses ini semua *part* di-*mesh* dengan cara sendiri-sendiri atau per-*part*, karena pada ABAQUS ver. 6.11-2 ini tidak dapat membuat *mesh* pada model yang telah di-*Assembly* (menyusun semua *part*) sebelumnya. Jumlah *mesh* yang digunakan dalam pemodelan ini sebanyak 500 elemen yang berbentuk persegi (Gambar 4).



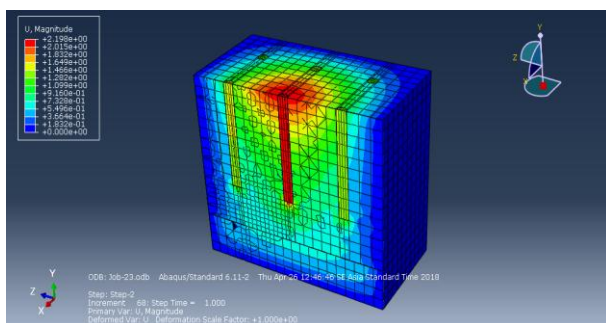
Gambar 4 Tampilan benda uji setelah di-*Mesh*

Proses Job Running

Pada proses ini akan didapatkan hasil analisa dan perhitungan terhadap benda uji yang telah dibuat. Proses *running* dapat dilakukan berkali-kali sesuai dengan *mesh* yang kita buat untuk memaksimalkan hasil yang didapat. Hasil proses *running* bisa dilihat pada Gambar 5(a) dan Gambar 5(b).



(a)



(b)

Gambar 5 Tampilan *Visualization* setelah proses *running* (a) dengan pelat beton (b) tanpa pelat beton

3. Hasil dan Pembahasan

Nilai Parameter Material

Nilai parameter material yang didapat dari uji coba (*trial and error*) pada *software* Abaqus menunjukkan perlakuan tanah yang mendekati hasil laboratorium. Analisis dilakukan untuk menentukan parameter material terhadap kekakuan tanah disekitar kolom (Muntohar, 2013). *Drucker Prager* model, *Drucker Prager Hardening* model dan elastisitas tanah pada material tanah didapatkan dengan pendekatan *trial and error*. Hal itu karena *input* material yang digunakan berdasarkan jenis tanah yang disajikan dalam pengujian di laboratorium oleh Tafalas (2016) seperti pada Tabel 1 adalah tanah hasil pengembangan. Dalam pemodelan ini model tanah yang di analisis merupakan tanah lempung ekspansif yang tidak mengalami pengembangan sebelumnya. Menurut Khodair dan Mohti (2014) erat kaitanya parameter modulus elastisitas tanah di sekitar kolom dan menunjukkan bahwa penambahan *mini-columns* di sekitar tanah mengurangi momen lentur yang diinduksi dan penurunan akibat beban lateral oleh *pile* (kolom) karena itu meningkatkan kapasitasnya untuk menahan pembebanan lateral.

Penggunaan model *Drucker Prager* merupakan pendekatan yang sudah memperhitungkan seluruh *principal stress* (tegangan utama) menurut Nugraha (2007). Dan model plastisitas *Drucker – Prager / cap* telah banyak digunakan dalam program analisis elemen hingga untuk berbagai aplikasi rekayasa geoteknik (Fattah dkk., 2015).

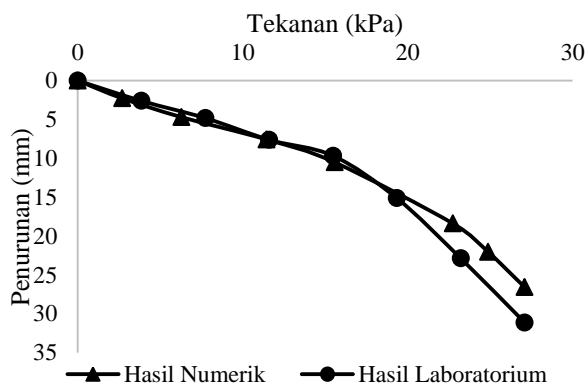
Tabel 1 Nilai Parameter Material

MATERIAL	BETON		PASIR	TANAH
	Parameter	NILAI	NILAI	NILAI
Drucker Prager Hardening	Angle of Friction			5
	Initial Tension			0,05
	Dilation angel			5
	Yield Stress (Mpa)			0,005
	Abs Plastic strain			0
Elastic	Young's Modulus (Mpa)	6646,88	5	1,25
	Poisson's Ratio	0,15	0,3	0,32
Plasticity	Dilation angle	10		
	Eccentricity	0,1		
	fb0/fc0	1,16		
	K	0,67		
	Viscosity Parameter	0,005		
Concrete Damaged Plasticity	Compressive Behaviour			
	Yield Stress (Mpa)		Inelastic Strain	Damage Parameter
	0,06		0	0
	0,12		0,008	0,05
	0,12		0,016	0,1
	0,07		0,027	0,75
	Tensile Behaviour			
	Yield Stress (Mpa)		Cracking Strain	Damage Parameter
	0,008		0	0
	0,00016		0,0245	0,99
Density		0,000015	0,000018	

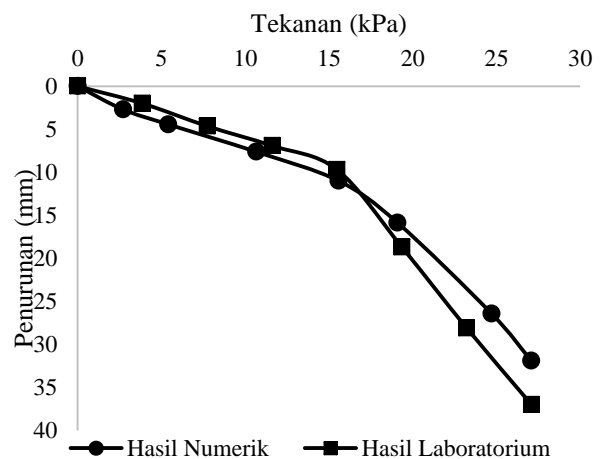
Pengaruh Ukuran Kolom O-Shape Terhadap Penurunan Tanah

Kolom O-Shape

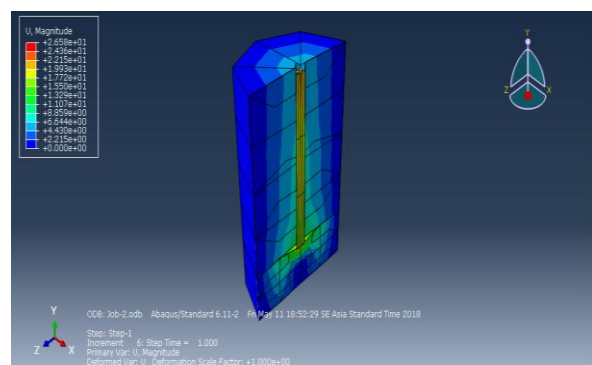
Hasil pemodelan *mini-columns O-Shape* menunjukkan penurunan yang mendekati hasil dari pengujian sebelumnya yang dilakukan di laboratorium oleh Tafalas (2016) . Pada kolom panjang 70 cm menunjukkan penurunan sebesar 26,57 mm (Gambar 6) dan pada kolom panjang 50 cm menunjukkan penurunan sebesar 31,91 mm seperti Gambar 7. Hasil reaksi pemodelan kolom *O-Shape* bisa dilihat pada Gambar 8.



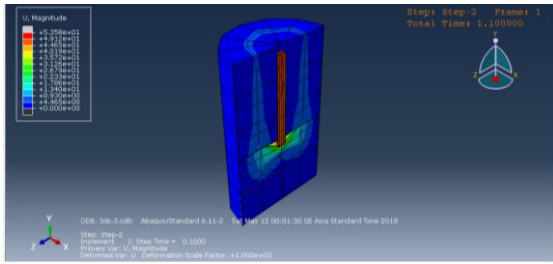
Gambar 6 Kurva hubungan tekanan terhadap penurunan kolom 70 cm



Gambar 7 Kurva hubungan tekanan terhadap penurunan kolom 50 cm



(a)



(b)

Gambar 8 Reaksi tanah terhadap kolom (a) $L_{col} = 70$ cm dan (b) $L_{col} = 50$ cm

Berdasarkan kurva hubungan beban dan penurunan disajikan bahwa kolom dengan panjang 70 cm lebih mengurangi deformasi dibandingkan kolom dengan panjang 50 cm. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kolom sebagai perkuatan tanah lempung ekspansif tidak mengurangi *settlement* dan deformasi pada arah vertikal dan horizontal, serta lebih kaku pada kedalaman dangkal menurut Liu dkk. (2012).

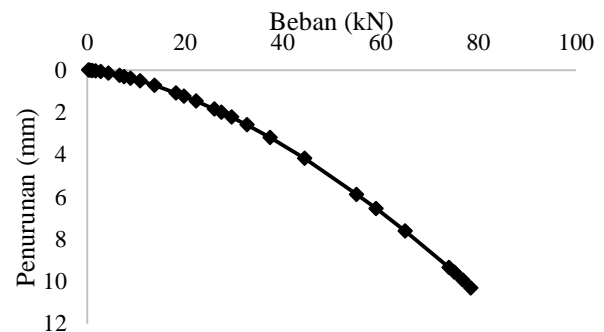
Sistem Pelat dengan Kolom O-Shape

Hasil pemodelan dengan sistem pelat menunjukkan pada kolom polos 70 cm mengalami penurunan sebesar 10,31 mm (Gambar 9) dan kolom polos 50 cm mengalami penurunan 23,25 mm seperti Gambar 10. Model pelat yang dimodelkan dengan kolom polos pada lapis perkerasan jalan dengan sistem pelat tidak mengubah pola deformasi yang terjadi akibat beban roda kendaraan yang berada di tengah pelat di atas tanah lempung ekspansif. Hal ini terjadi karena pemodelan dengan sistem pelat menggunakan *mini columns O-shape* pada lapis perkerasan jalan dimodelkan sebagai *floating piles*, dimana kolom tidak menyentuh lapisan tanah keras.

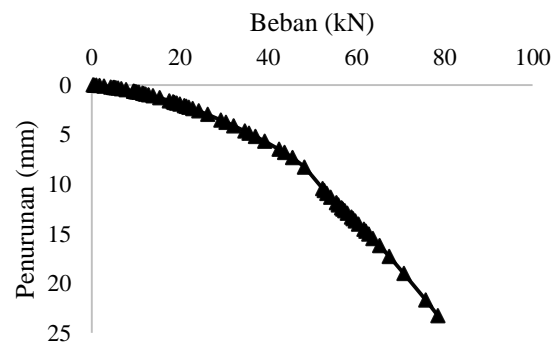
Hubungan antara panjang kolom (L_{col}) terhadap penurunan tanah pada Gambar 9 dan Gambar 10 dapat diketahui bahwa panjang kolom cenderung mengurangi penurunan tanah akibat beban yang diberikan pada kolom maupun pelat perkerasan yang dimodelkan. Penggunaan kolom panjang (L_{col}) 70 cm dapat mengurangi penurunan tanah jika dibandingkan dengan panjang (L_{col}) kolom 50 cm. Panjang kolom tidak menunjukkan perubahan yang begitu besar antara kolom dengan panjang (L_{col}) 70 cm dan panjang

(L_{col}) 50 cm yang menopang perkerasan pelat di atasnya. Hal ini mungkin disebabkan karena panjang kolom dan jumlah kolom mempengaruhi nilai *settlement* yang terjadi (Farouk dan Shanien 2013) dan kapasitas jumlah kolom yang bisa dipasang serta posisi pemasangan kolom-kolom terhadap titik beban pada saat pemodelan seperti pada Gambar 11 dan Gambar 12.

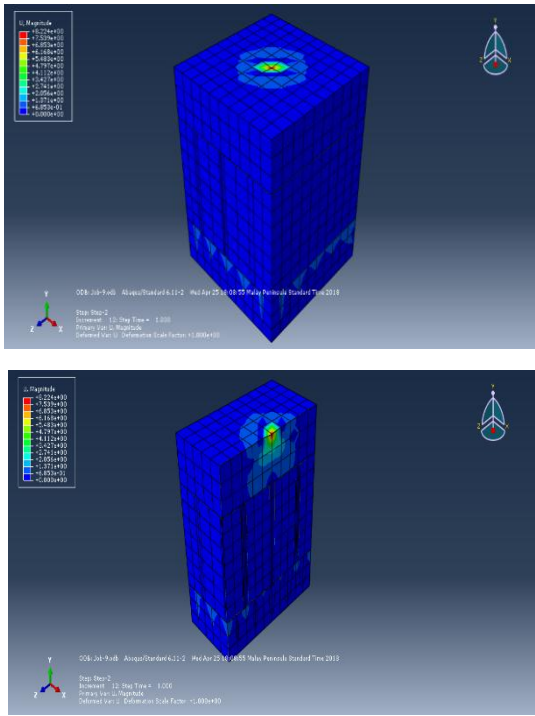
Menurut Anshorie dkk. (2016) semakin banyak jumlah kolom dan semakin panjang kolom serta mengatur penempatan kolom pada tanah dapat mengurangi *settlement* dan deformasi. Pada simulasi ini belum dapat ditentukan ukuran panjang kolom yang optimal, karena lebar kolom dicocokkan berdasarkan kesetaraan area kolom (Tan dkk., 2008) serta diameter kolom juga mempengaruhi *settlement* dan deformasi yang terjadi secara vertikal maupun horizontal pada kedalaman dangkal (Liu dkk., 2012). Untuk tujuan memperkecil *settlement* dan nilai ekonomis bisa digunakan jarak pemasangan kolom maupun ukuran panjang (L_{col}) kolom karena luas *transfer* beban lebih besar (Muntohar, 2014).



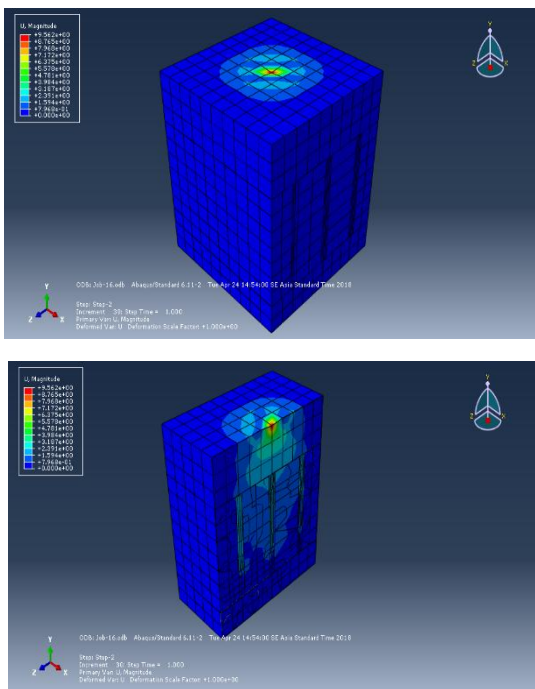
Gambar 9 Kurva hubungan beban terhadap penurunan pelat dengan kolom 70 cm



Gambar 10 Kurva hubungan beban terhadap penurunan pelat dengan kolom 50 cm



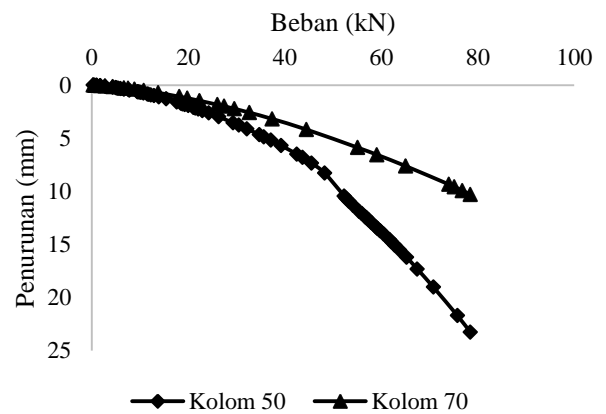
Gambar 11 Reaksi tanah untuk kolom $L_{col} = 70$ cm



Gambar 12 Reaksi tanah untuk kolom $L_{col} = 50$ cm

Kolom dengan panjang 70 cm lebih dapat mengurangi penurunan tanah akibat pembebanan di atas pelat daripada kolom dengan 50 cm. Karena semakin dalam kolom yang dipasang di dalam tanah maka sebaran dari pembebanan terhadap tanah semakin

luas, dan tegangan-regangan di dalam tanah juga akan semakin meningkat. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 13. Menurut Anshorie dkk. (2015) semakin banyak jumlah kolom dan semakin panjang kolom serta mengatur penempatan kolom pada tanah dapat mengurangi *settlement* dan deformasi. Pada simulasi ini belum dapat ditentukan ukuran panjang kolom yang optimal, karena lebar kolom dicocokkan berdasarkan kesetaraan area kolom (Tan dkk., 2008) serta diameter kolom juga mempengaruhi *settlement* dan deformasi yang terjadi secara vertikal maupun horizontal pada kedalaman dangkal (Liu dkk., 2012). Untuk tujuan memperkecil *settlement* dan nilai ekonomis bisa digunakan jarak pemasangan kolom maupun ukuran panjang (L_{col}) kolom karena luas *transfer* beban lebih besar (Muntohar, 2014).



Gambar 12 Kurva perbandingan beban-penurunan kolom $L_{col} = 70$ cm dan $L_{col} = 50$ cm

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang analisis numerik penambahan kolom-kolom untuk perkuatan lapis perkerasan jalan dengan sistem pelat pada tanah lempung ekspansif, didapat beberapa kesimpulan antara lain :

1. Nilai parameter tanah yang dihasilkan dalam pemodelan numerik ini adalah hasil pendekatan *trial and error* pada *software* Abaqus ver. 6.11-2. Nilai yang digunakan untuk memodelkan perkerasan kaku dengan sistem pelat yang diperkuat kolom

O-shape pada tanah lempung ekspansif berbeda, hal ini karena kekakuan tanah berbeda akibat penambahan kolom.

2. Penambahan kolom yang dipasang pada tanah lempung ekspansif untuk menopang perkerasan dengan sistem pelat yang mengalami tekanan beban roda kendaraan sebesar 8 ton dan diperkuat dengan kolom panjang 70 cm mengalami penurunan sebesar 10,31 mm sedangkan lapis perkerasan yang diperkuat dengan kolom panjang 50 cm mengalami penurunan sebesar 23,25 mm. Hasil menunjukkan bahwa semakin panjang ukuran kolom, maka penurunan yang terjadi semakin kecil.

5. Daftar Pustaka

- Al Anshorie, A., Zaika, Y., dan Munawir, A., 2015, Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif Di Bojonegoro dengan Metode Deep Soil Mix Tipe Single Square Diameter 3 Cm Terhadap Daya Dukung Tanah, Malang, *Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya*.
- Budi, G. S., 2003, Penyebaran Kekuatan dari Kolom yang Terbuat dari Limbah Karbit dan Kapur, *Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 5(2) : 99-102.
- Charbit, B., 2009, *Numerical Analysis of Laterally Loaded Lime/Cement Columns*, Master of Science Thesis 09/05, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Diana, W., Muntohar, A.S., dan Rahmawati, A., 2012, Kuat Tekan Bebas Tanah Lempung yang Distabilisasi dengan Limbah Karbit dan Abu Sekam Padi, Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-6 (KoNTekS 6), Universitas Trisakti Jakarta.
- Fattah, Mohammed Y., Al-Omari, Raid R., Ali, dan Haifaa A., 2015, Numerical Simulation of The Treatment of Soil Swelling Using Grid Geocell Columns, *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 23(2): 9-18.
- Farouk A., dan Shaniien, M.M., 2013, Ground Improvement Using Soil-Cement Columns: Experimental Investigation, *Alexandria Engineering Journal*, Egypt, Vol. 52, pp. 733-740.
- Khodair, Y., dan Mohti, A. A., 2014, Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction under Axial and Lateral Loads, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.8, No.3, pp.239-249.
- Larsson, S., Malm, R., Charbit B., dan Ansell, A., 2012, Finite Element Modelling of Laterally Loaded- Lime-Cement Columns Using A Damage Plasticity Model, *Computers and Geotechnics*, Vol. 44 : 48-57.
- Liu S-Y., Du Y-J., Yi Y-L., dan Puppalla A.J., 2012, Field Investigations on Performance of T-Shaped Deep Mixed Soil Cement Column-Supported Embankments over Soft Ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 27 No. 2, pp. 315-324.
- Malm, R., 2009, *Predicting Shear Type Crack Initiation and Growth in Concrete with Nonlinear Finite Element Method*, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Manoppo, F. J., 2009, Analisa Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Ekspansif, *Pasific Journal*, Vol. 3(3) : 473-476.
- Muntohar, A. S., 2009, A Laboratory test on the strength and load-settlement characteristic of improved soft soil using lime-column, *Dinamika Teknik Sipil*, Vol. 10 (3), pp. 202-207.
- Muntohar, A. S., 2014, Improvement of Expansive Subgrade Using Column Technique of Carbide Lime and Rice Husk Ash Mixtures, *Southeast Asia Conference on Soft Soils Engineering and Ground Improvement (SOFT SOILS 2014)*, Bandung, Indonesia, 20-23 Oktober 2014, pp. 14-1 – 14-6.

- Muntohar, A. S., Rahman, M. E., Hashim, R., dan Islam, M. S., A.S., 2013, A Numerical Study of Ground Improvement Technique Using Group of Soil-Column on Peat, *Science & Technology*, Vol. 21 (1): 625 – 634.
- Nugraha, A. S., 2007, Model Plastisitas Mohr Coulomb, Drucker Prager, Cam Clay, dan Cap Berdasarkan Konsep Critical State, *Jurnal Teknil Sipil*, Vol. 3(2) : 103-203.
- Tafalas, M. Y., 2016, Pengaruh Diameter Kepala Mini Kolom Terhadap Beban Dan Deformasi Pelat Flexiglass Di Atas Tanah Lempung Ekspansif, *Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*.
-
- Tan, S. A., Tjahyono S., dan Oo, K. K., 2008, Simplified Plane-Strain Modelling of Stone-Column Reinforced Ground, *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134(2), 185-194.