

# Pemodelan Kolom Kapur Berpola Triangular dengan Plaxis 3D Sebagai Upaya Perbaikan Tanah Lempung Lunak

**INDRA NOER HAMDHAN\*, R. FITRI VIRLIANI ANUGRAH**

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: [indranh@itenas.ac.id](mailto:indranh@itenas.ac.id)

## ABSTRAK

*Semakin berkurangnya lahan dengan tanah berdaya dukung tinggi di tengah tingginya tingkat pembangunan berakibat pada semakin seringnya perbaikan tanah bermasalah diterapkan. Salahsatu tanah bermasalah yang sering ditemui di Indonesia adalah tanah lempung lunak. Perbaikan tanah lempung lunak dapat dilakukan dengan penggunaan kolom Deep Mixing Soil bermaterial kapur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak antar kolom dan kedalaman kolom kapur berpola triangular terhadap perubahan perilaku tanah lempung lunak dengan menggunakan PLAXIS 3D. Kolom yang dimodelkan berdiameter 1m dengan variasi jarak 1,5D; 2D; 2,5D dan variasi kedalaman 4,25m; 8,5m; 10m; 12m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil jarak antar kolom kapur dan semakin dalam kolom kapur yang diaplikasikan maka penurunan yang terjadi semakin kecil serta nilai faktor keamanan akan semakin besar.*

**Kata kunci:** *deep mixing soil, kolom kapur, tanah lempung lunak, PLAXIS 3D, penurunan tanah*

## ABSTRACT

*The decrease of high bearing capacity soil in the midst of high levels of development has resulted in more frequent application of problematic soil improvements. One of the problem soils that is often encountered in Indonesia is soft clay. Soft clay soil improvement can be done by using a Deep Mixing Soil column made of lime. This study aims to determine the effect of the distance between columns and the depth of the lime column with triangular pattern on changes in the behavior of soft clay using PLAXIS 3D. The modeled column is 1m in diameter with 1.5D; 2D; 2.5D distance variation and 4.25m; 8.5m; 10m; 12m depth variation. The results showed that the smaller distance between the lime columns and the deeper lime column was applied, the smaller settlement would be and the greater value of the safety factor.*

**Keywords:** *deep mixing soil, lime column, soft clay, PLAXIS 3D, soil settlement*

## 1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, pembangunan infrastruktur serta bangunan-bangunan guna menunjang kebutuhan serta kemajuan suatu daerah semakin gencar dilakukan. Semakin terbatasnya lahan kosong maka penggunaan lahan dengan tanah bermasalah sering kali tidak dapat dihindari, salahsatunya adalah tanah lempung lunak. Perbaikan tanah yang dapat dilakukan pada jenis tanah lempung lunak salahsatunya adalah dengan penggunaan kolom kapur dengan metode Deep Mixing Column. Pola triangular merupakan pola yang paling umum digunakan dengan jarak antar kolom dan kedalaman yang bervariasi sesuai dengan kondisi tanah yang akan diperbaiki. Penelitian ini memuat mengenai hasil pemodelan kolom kapur menggunakan PLAXIS 3D dengan variasi jarak antar kolom (1,5D;2D;2,5D) dan kedalaman kolom kapur (4,25m; 8,5m; 10m;12m) dengan tujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap perilaku tanah lempung lunak.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tanah

Secara umum, tanah merupakan material yang tersusun dari butiran mineral-mineral padat yang tidak terikat secara kimia atau tersementasi satu sama lain dan berasal dari material organik hasil pelapukan disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel padat tersebut [3]. Berdasarkan kemampuan lekatannya, tanah dapat diklasifikasikan menjadi 3 kategori yaitu tanah kohesif, tanah non-kohesif, dan tanah organik.

### 2.2 Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak merupakan tanah yang tersusun dari butiran halus berukuran 0,002 mm – 0,005 mm yang mengandung partikel bersifat plastis apabila terjadi kontak dengan Tanah lempung lunak dapat teridentifikasi dengan mengetahui parameter fisik dan mekanisnya. Parameter fisik tanah yang penting untuk diketahui antara lain berat jenis tanah yang dimuat dalam **Tabel 1** dan berat isi tanah yang dimuat dalam **Tabel 2**.

Parameter lain yang perlu diketahui adalah nilai indeks plastisitas yang dimuat pada **Tabel 3**, permeabilitas tanah yang dimuat pada **Tabel 4** dan kuat tekan bebas untuk menentukan konsistensi tanah yang dimuat pada **Tabel 5**. Selain itu, tanah lempung lunak juga dapat diidentifikasi dengan melihat nilai SPT kurang dari 4 atau nilai tahanan konus kurang dari 10 kg/cm<sup>2</sup> [11].

**Tabel 1. Berat Jenis Tanah**

Macam Tanah	Berat Jenis
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Organik	2,62 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,65
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

**(Sumber: Hardiyatmo, 2002)**

**Tabel 2. Berat Isi Tanah**

Macam Tanah	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_b$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Pasir Seragam, Tidak Padat	14,3	18,9
Pasir Seragam, Padat	17,5	20,9
Pasir Campuran, Tidak Padat	15,9	19,9
Pasir Campuran, Padat	18,6	21,6
Lempung Lunak Sedikit Organik		15,8
Lempung Lunak Sangat Organik		14,3

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

**Tabel 3. Indeks Plastisitas Tanah**

Macam Tanah	Indeks Plastisitas	Sifat
Pasir	0	Non plastis
Lanau	<7	Plastisitas Rendah
Lempung Berlanau	7 – 17	Plastisitas Sedang
Lempung	>17	Plastisitas Tinggi

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

**Tabel 4. Permeabilitas Tanah**

Macam Tanah	$K$ [mm/det]
Butir Kasar	10 – 1.000
Kerikil Halus – Pasir Sedang	0,01 – 10
Pasir Halus – Lanau Longgar	0,0001 – 0,01
Lanau Padat – Lanau Berlempung	0,00001 – 0,0001
Lempung Berlanau - Lempung	0,00000001 – 0,00001

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

**Tabel 5. Kuat Tekan Bebas**

Macam Tanah	Kuat Tekan Bebas [kN/m <sup>2</sup> ]
Lempung Keras	>400
Lempung Sangat Kaku	200 – 400
Lempung Kaku	100 – 200
Lempung Sedang	50 – 100
Lempung Lunak	25 – 50
Lempung Sangat Lunak	<25

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

### 2.3 Deep Mixing Column

Deep Mixing Column dapat didefinisikan sebagai metode perbaikan tanah dengan melakukan pencampuran material tanah dengan material lain yang berfungsi sebagai pengeras pada kedalaman tertentu. Metode Deep Mixing merupakan teknik modifikasi tanah untuk meningkatkan kualitas tanah dengan stabilisasi tanah lunak yang dilakukan di lapangan [8]. Pencampuran dapat dilakukan dengan metode kering maupun metode basah [5]. Material yang digunakan dapat berupa kapur, semen, pasir, dan material lainnya. Seperti pada penelitian terdahulu yang menyebutkan bahwa kolom dengan campuran semen dapat meningkatkan kekakuan dan mengecilkan nilai penurunan [9]. Dalam perkembangannya, pada beberapa kasus diterapkan juga modifikasi kolom Deep Mixing yang dikombinasikan dengan geogrid [5]. Selain itu, kolom kapur yang dikombinasikan dengan limbah karbit dikatakan dapat meningkatkan kuat geser tanah yang signifikan pada area tepi kolom [2].

Kedalaman minimum pencampuran adalah 3 m dengan konfigurasi tertentu salahsatunya adalah pola triangular dengan material kapur sebagai salahsatu material yang cocok untuk diterapkan pada tanah lempung [1]. Berdasarkan penelitian terdahulu, disebutkan bahwa persentase kapur yang efektif adalah sebesar 8% [7]. Umumnya, perencanaan dimensi kolom Deep Mixing Soil disesuaikan dengan kapasitas mesin yang tersedia dan kebutuhan tanah yang akan diperbaiki. Di bawah ini merupakan **Tabel 6** yang memuat spesifikasi mesin Deep Mixing Soil.

**Tabel 6. Spesifikasi Mesin Deep Mixing Soil**

<b>Tipe</b>	<b>DJM1070</b>	<b>DJM2070</b>	<b>DJM2090</b>	<b>DJM2110</b>
Kedalaman Maksimum	20 m	26 m	33 m	33 m
Diameter Blade	1 m	1 m	1 m	1 – 1,3 m
Spesifikasi Tanah Lempung	N < 6	N < 6	N < 7	N < 9
Besar Distribusi Bahan Pengikat	25 – 120 kg/menit			

**(Sumber: Kitazume & Terashi, 2013)**

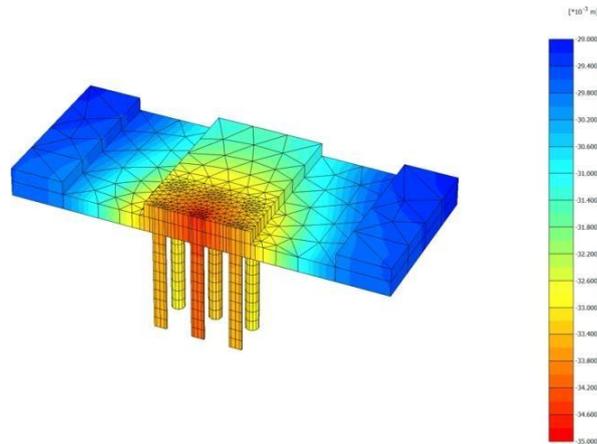
#### **2.4 Penurunan**

Penurunan yang terjadi pada suatu lapisan tanah terbagi menjadi 2 tahap utama yaitu penurunan seketika dan penurunan konsolidasi. Penurunan seketika merupakan penurunan suatu lapisan tanah yang diakibatkan oleh aktifnya beban yang menumpu pada lapisan tanah tersebut. Penurunan konsolidasi merupakan penurunan pada suatu lapisan tanah yang disebabkan oleh terdisipasinya air pori. Penurunan konsolidasi hanya terjadi pada lapisan tanah lempung jenuh.

Faktor yang mempengaruhi besarnya penurunan adalah kompresibilitas tanah, tebal tanah yang kompresibel dan besarnya tambahan tekanan efektif. Sedangkan faktor yang mempengaruhi laju atau durasi terjadinya penurunan konsolidasi adalah permeabilitas tanah, tebal lapisan kompresible dan kondisi drainase pada bagian dasar dan permukaan lapisan tanah kompresibel [10].

#### **2.5 PLAXIS 3D**

PLAXIS 3D merupakan perangkat lunak berbasis 3 dimensi yang digunakan dalam rekayasa geoteknik. Dengan menggunakan PLAXIS 3D, deformasi serta stabilitas geoteknik dalam rekayasa geoteknik dapat dianalisis dengan lebih akurat. Perhitungan pada pemodelan rekayasa geoteknik yang dilakukan dengan perangkat lunak PLAXIS 3D menggunakan metode elemen hingga atau *Finite Element Method*. Di bawah ini merupakan **Gambar 1** yang memuat contoh pemodelan dengan PLAXIS 3D.



**Gambar 1. Contoh pemodelan dengan PLAXIS 3D (Sumber: Boussidageotechnics 2016)**

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Identifikasi Risiko

Kajian jarak antar kolom kapur dan kedalaman kolom kapur terhadap perilaku tanah lempung lunak pada penelitian ini menggunakan pola triangular, diameter ( $D$ ) sebesar 1 m, 3 variasi jarak (1,5D; 2D; 2,5D) dan 4 variasi kedalaman. Dengan digunakannya variasi-variasi tersebut maka terdapat 12 kombinasi pemodelan yang perlu dilakukan. Di bawah ini merupakan **Tabel 7** yang memuat 12 kombinasi tersebut.

**Tabel 7. Kombinasi Jarak Antar Kolom dan Kedalaman Kolom**

Kombinasi	Jarak Antar Kolom [m]	Kedalaman Kolom [m]
Model 1	1,5	4,25
Model 2	1,5	8,5
Model 3	1,5	10
Model 4	1,5	11,5
Model 5	2	4,25
Model 6	2	8,5
Model 7	2	10
Model 8	2	11,5
Model 9	2,5	4,25
Model 10	2,5	8,5
Model 11	2,5	10
Model 12	2,5	11,5

Data tanah yang digunakan pada pemodelan PLAXIS 3D merupakan asumsi yang mengacu pada literatur-literatur terkait sesuai dengan klasifikasi tanah yang dimodelkan yaitu tanah lempung sangat lunak, tanah lempung lunak dan tanah lempung lunak sedang (medium). Data parameter kolom kapur yang diterapkan pada pemodelan PLAXIS 3D merupakan data yang didapatkan dari kajian literatur terkait. Kajian literatur yang digunakan memuat mengenai hasil pengujian laboratorium mengenai penggunaan kapur pada tanah bermasalah, studi kasus pada tanah bermasalah dengan Deep Mixing Soil sebagai metode perbaikan tanah serta literatur terkait lain yang dapat mendukung kelengkapan parameter kolom kapur dalam proses pemodelan PLAXIS 3D. Di bawah ini merupakan **Tabel 8** dan **Tabel 9** yang memuat data parameter tanah dan data parameter kolom kapur yang dimodelkan.

**Tabel 8. Data Parameter Tanah**

	Lempung Sangat Lunak	Lempung Lunak	Lempung Medium
Model	MC	MC	MC
Tipe Drainase	UD	UD	UD
$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	17	18
$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	17	18
$E'$ [MPa]	1.000	2.000	4.000
$v'$	0,4	0,4	0,4
$c'$	5	5	5
$k$ [m/hari]	$8,64 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$
$\phi$	20	20	20
$\varphi$	0	0	0

**Tabel 9. Data Parameter Tanah**

	Kolom Kapur 1	Kolom Kapur 2	Kolom Kapur 3
Model	Linier Elastic	Linier Elastic	Linier Elastic
Tipe Drainase	Non-porous	Non-porous	Non-porous
$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	17	18
$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	17	18
$E'$ [MPa]	15.000	45.000	10.5000
$v'$	0,2	0,2	0,2

Keterangan:

Kolom Kapur 1: Kolom kapur yang berada pada lapisan tanah lempung sangat lunak

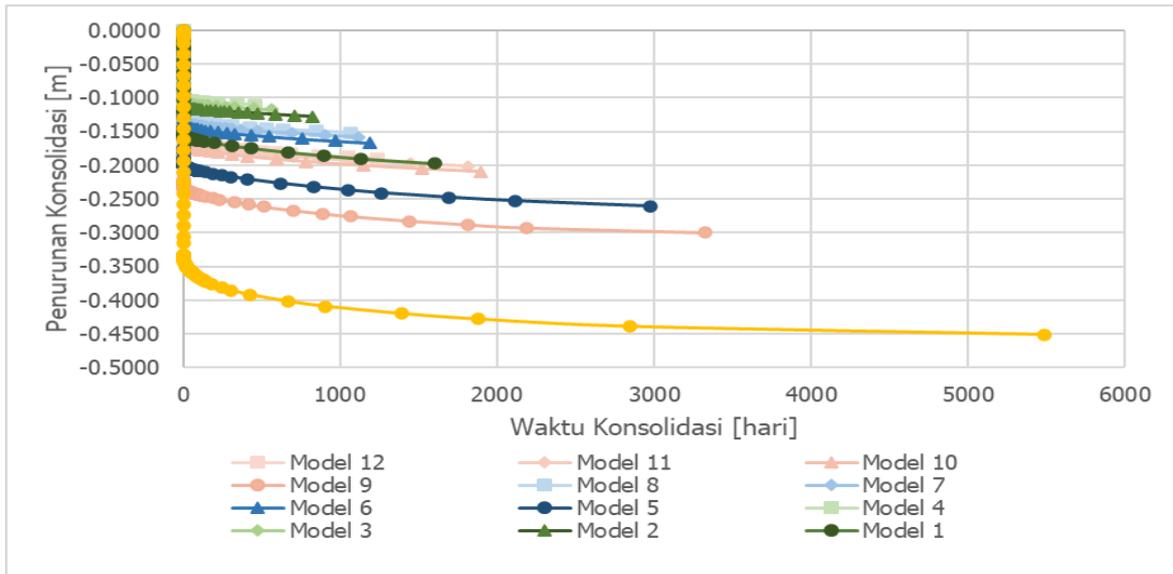
Kolom Kapur 2: Kolom kapur yang berada pada lapisan tanah lempung lunak

Kolom Kapur 3: Kolom kapur yang berada pada lapisan tanah lempung sedang

**Tabel 10. Rekapitulasi Nilai Penurunan dan Waktu Konsolidasi**

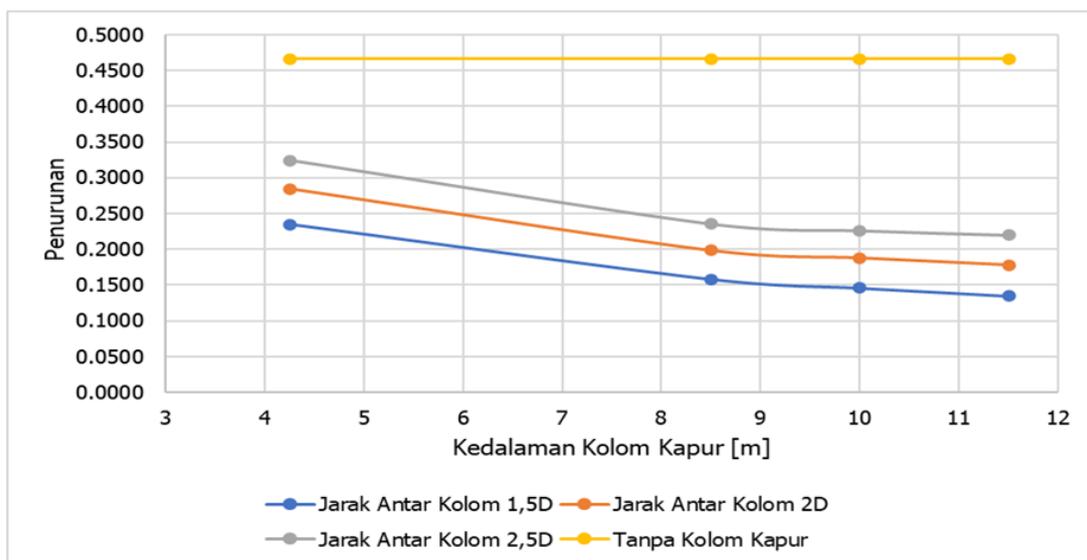
Model	Jarak Antar Kolom [m]	Kedalaman Kolom [m]	Penurunan Konsolidasi [m]	Persentase Reduksi Penurunan Konsolidasi [%]	Waktu Penurunan Konsolidasi [hari]	Persentase Reduksi Waktu Penurunan Konsolidasi [%]
Tanpa Kolom Kapur			0,455		5.483	
1	1,5	4,25	0,197	56,222	1.604	70,746
2	1,5	8,5	0,128	71,556	823	84,990
3	1,5	10	0,117	74,000	566	89,677
4	1,5	11,5	0,116	74,222	459	91,629
5	2	4,25	0,261	42,000	2.975	45,741
6	2	8,5	0,167	62,889	1.185	78,388
7	2	10	0,158	64,889	1.117	79,628
8	2	11,5	0,152	66,222	1.063	80,613
9	2,5	4,25	0,300	33,333	3.327	39,322
10	2,5	8,5	0,209	53,556	1.894	65,457
11	2,5	10	0,201	55,333	1.818	66,843
12	2,5	11,5	0,190	57,778	1.240	77,385

*Pemodelan Kolom Kapur Berpola Triangular dengan Plaxis 3D Sebagai Upaya Perbaikan Tanah Lempung Lunak*

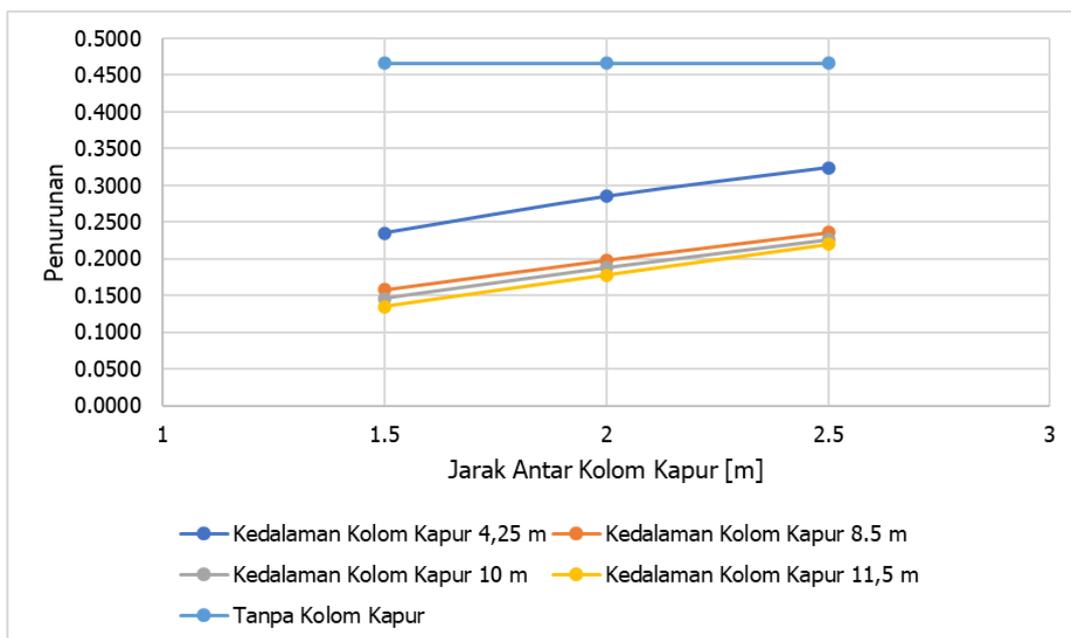


**Gambar 2. Grafik penurunan terhadap waktu konsolidasi**

Berdasarkan **Tabel 10** dan **Gambar 2** dapat terlihat bahwa seluruh model dengan pengaplikasian kolom kapur, dapat mereduksi besar penurunan yang terjadi pada tanah lempung. Persentase reduksi penurunan terkecil sebesar 33,333% dengan reduksi waktu konsolidasi sebesar 39,22% yang terjadi pada Model 9 yaitu kolom kapur berjarak 2,5 m dengan kedalaman 4,25 m. Model kolom kapur tersebut merupakan model kolom kapur dengan jarak antar kolom terjauh dan kedalaman kolom paling dangkal. Sedangkan persentase reduksi penurunan terbesar adalah 74,22% dengan reduksi waktu konsolidasi sebesar 91,63% yang terjadi pada Model 4. Model kolom kapur tersebut memiliki jarak antar kolom sebesar 1,5 m dengan kedalaman kolom 11,5 m yang mana merupakan model kolom kapur dengan jarak antar kolom terdekat dan kedalaman kolom terpanjang. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin kecil jarak antar kolom dan semakin dalam kolom kapur diaplikasikan, maka penurunan yang terjadi akan semakin kecil dan waktu konsolidasi yang diperlukan semakin singkat.



**Gambar 3. Grafik pengaruh kedalaman kolom kapur terhadap penurunan**



**Gambar 4. Grafik pengaruh kedalaman kolom kapur terhadap penurunan**

Berdasarkan **Gambar 3** yang memuat mengenai grafik pengaruh kedalaman antar kolom terhadap penurunan konsolidasi yang terjadi dapat bahwa ketiga garis yang menggambarkan penurunan pada tanah yang diperbaiki dengan kolom kapur memiliki trend garis yang cenderung sama. Trend garis tersebut menunjukkan bahwa semakin dalam kolom kapur diaplikasikan maka semakin kecil penurunan konsolidasi yang terjadi. Trend garis yang cenderung sama ini juga dapat terlihat pada **Gambar 4** yang memuat mengenai grafik pengaruh jarak antar kolom kapur terhadap penurunan konsolidasi tanah lempung. Pada grafik tersebut terlihat bahwa semakin besar jarak antar kolom kapur maka penurunan yang terjadi akan semakin besar.

Berdasarkan **Tabel 11** yang memuat mengenai rekapitulasi nilai faktor keamanan tanah lempung tanpa dan dengan peaplikasian kolom kapur, dapat terlihat bahwa peaplikasian kolom kapur dapat meningkatkan nilai *safety factor* tanah lempung yang memerlukan perbaikan tersebut. Nilai faktor keamanan terbesar terjadi pada Model 4 yang mampu meningkatkan nilai faktor keamanan sebesar 273,489% dari nilai faktor keamanan sebelum diaplikasikannya perbaikan tanah dengan kolom kapur. Model tersebut merupakan model dengan jarak antar kolom terdekat dan kedalaman kolom terpanjang. Sedangkan kenaikan nilai faktor keamanan terkecil terjadi pada Model 9 yang merupakan model dengan jarak antar kolom kapur terjauh dan kedalaman kolom terdangkal.

Berdasarkan **Gambar 5** dan **Gambar 6** dapat terlihat bahwa nilai faktor keamanan semakin meningkat seiring dengan semakin dalamnya kolom kapur dan semakin kecilnya jarak antar kolom kapur. Sehingga dapat dikatakan bahwa semakin dalam kolom kapur dan semakin kecil jarak antar kolom kapur yang diaplikasikan pada tanah lempung lunak, maka semakin besar pula persentase kenaikan nilai faktor keamanannya.

**Tabel 11. Rekapitulasi Nilai Faktor Keamanan**

<b>Model</b>	<b>Jarak Antar Kolom [m]</b>	<b>Kedalaman Kolom [m]</b>	<b>Faktor Keamanan</b>	<b>Persentase Kenaikan Nilai Faktor Keamanan [%]</b>	<b>Beban yang Dapat Dipikul [kN/m<sup>2</sup>]</b>
Tanpa Kolom Kapur			2,565		123,120
1	1,5	4,25	4,854	89,240	232,992
2	1,5	8,5	7,350	186,550	352,800
3	1,5	10	8,739	240,702	419,472
4	1,5	11,5	9,581	273,489	459,840
5	2	4,25	3,710	44,639	178,080
6	2	8,5	5,413	111,033	259,824
7	2	10	5,413	111,033	259,824
8	2	11,5	6,590	156,920	316,320
9	2,5	4,25	3,349	30,565	160,752
10	2,5	8,5	4,407	71,813	211,536
11	2,5	10	5,369	109,318	257,712
12	2,5	11,5	6,500	153,411	312,000

#### 4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil pemodelan kolom kapur berpola triangular dengan PLAXIS 3D ini adalah semakin rapat jarak antar kolom kapur dan semakin dalam kolom kapur diaplikasikan maka semakin kecil penurunan yang terjadi dan semakin singkat waktu konsolidasi yang dibutuhkan. Selain itu, semakin rapat jarak antar kolom kapur dan semakin dalam kolom kapur diaplikasikan maka semakin besar pula nilai faktor keamanannya. Sehingga dapat dikatakan bahwa penggunaan kolom kapur sebagai upaya perbaikan tanah lempung lunak dapat memperkecil nilai penurunan, mempercepat waktu konsolidasi dan meningkatkan nilai faktor keamanan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8640:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [2] Budi, G.S. (2003, September). Penyebaran Kekuatan dari Kolom yang Terbuat dari Limbah Karbit dan Kapur. *Civil Engineering Dimension Journal of Civil Engineering Science and Application*, 5(2), 99-102. doi:10.9744/ced.5.2.pp. 99-102
- [3] Das, B. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Yogyakarta: Erlangga.
- [4] Hardiyatmo, H. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University.
- [5] Kitazume, M. & Terashi, M. (2013). *The Deep Mixing Method*. Leiden: CRC Press.
- [6] Mandhyannapu, R.S. & Puppala, A.J. (2014, September). Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(9), \_\_\_-\_\_\_.
- [7] Nararatih, D. (2002). *Perubahan Parameter Penurunan dan Kuat Geser Tanah pada Penggunaan Lime Column. Tugas Akhir*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
- [8] Porbaha, A. (2000). State of the Art in Deep Mixing Technology. Part IV: Design Considerations. Ground Improvement. *Proceedings of The ICE - Ground Improvement* (pp. 111-125). Scotland: Thomas Telford Ltd.

- [9] Said, K.M., Rashid, A.S., Osouli, A., Latifi, N., Yunus, N.Z. & Ganiyu, A.A. (2019, Januari). Settlement Evaluation of Soft Soil Improved by Floating Soil-Cement Column. *International Journal of Geomechanics*, 19(1), \_\_\_-\_\_\_.
- [10] Sentosa, B. S. (1998). *Mekanika Tanah Lanjutan*. Jakarta: Penerbit Gunadarma.
- [11] Sosrodarsono. (1980). *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*. Jakarta: Erlangga.