

## Studi Perilaku dan Mekanisme Interaksi Penggabungan *Prefabricated Vertical Drain* dan *Deep Cement Mixing* untuk Perbaikan Tanah Lunak

Andri Lesmana

Program Magister Rekayasa Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, Email: andri\_lesmana\_92@yahoo.com

Endra Susila

Program Magister dan Doktor Rekayasa Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi-  
Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, Email: endra@si.itb.ac.id

### Abstrak

Permasalahan geoteknik utama untuk konstruksi di atas tanah lunak adalah daya dukung tanah yang rendah dan potensi penurunan yang besar. Penelitian tentang perbaikan tanah yang berkembang saat ini memberikan alternatif-alternatif metode untuk mengatasi masalah tanah lunak. Penelitian ini difokuskan untuk mempelajari perilaku interaksi perbaikan tanah lunak dengan menggabungkan dua buah metode perbaikan tanah yaitu *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dan *Deep Cement Mixing (DCM)*. Penelitian ini dilakukan dengan memodelkan timbunan di atas tanah lunak dengan bantuan program paket program FE profesional dengan nama *PLAXIS 2D* dengan menggunakan model material tanah *Mohr – Coulomb (MC)*, *Modified Cam Clay (MCC)*, dan *Soft Soil (SS)*. Hasil studi menunjukkan dengan penggabungan kedua metode perbaikan tanah tersebut berpotensi menggabungkan keuntungan dari kedua metoda: *PVD* yang mempercepat konsolidasi yang terjadi dan *DCM* yang dapat meningkatkan daya dukung tanah dan mengontrol penurunan tanah.

**Kata-kata Kunci:** Tanah lunak, *prefabricated vertical drain*, *soil cement mixing*, penurunan tanah.

### Abstract

The main geotechnical problems for construction on soft soils are the low bearing capacity and excessive settlement. Recent research provides us with methods to address the issues of soft soils. This research focused on studying the behaviors of interaction of combination of two soil improvement methods: *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* and *Deep Cement Mixing (DCM)*. This research was performed by modeling the embankment on of soft soils by utilizing a professional finite element software, called *PLAXIS 2D*. The elastic-plastic soil model with *Mohr - Coulomb (MC)* criteria, *Modified Cam Clay (MCC)* model and the *Soft Soil (SS)* model were selected to model soils. The results show that the incorporation of both methods can potentially combine the acceleration of consolidation of *PVD* and the increase of soil bearing capacity and controlling settlement of *DCM*.

**Keywords:** *Soft soil*, *prefabricated vertical drain*, *deep cement mixing*, bearing capacity, settlement.

## 1. Pendahuluan

Pembangunan yang dilakukan di Indonesia, berhadapan dengan masalah tanah lunak yang sering kali dijumpai pada daerah pembangunan di Indonesia, berdasarkan penelitian (Guan Ye *et al.*, 2006). Permasalahan geoteknik yang ditimbulkan dalam membangun diatas tanah lunak sering berhadapan dengan daya dukung tanah yang sangat kecil sehingga tidak dapat mendukung struktur yang akan dibangun diatasnya dan juga dapat menimbulkan kelongsoran pada timbunan yang dilakukan diatas tanah lunak, selain nilai daya dukung tanah yang sangat kecil tanah lunak memiliki masalah lain yaitu nilai penurunan tanah (*settlement*) yang sangat besar.

Penelitian tentang perbaikan tanah yang berkembang saat ini memberikan kita banyak metode pilihan untuk mengatasi masalah tanah lunak yang ada di Indonesia.

Dalam prakteknya sering dilakukan penggabungan dua buah metode perbaikan tanah. Seperti metode yang diajukan (Xu *et al.*, 2006) dan (Zhang *et al.*, 2006) dengan menggabungkan metode *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing*, penggabungan kedua metoda tersebut bertujuan untuk meningkatkan efektifitas dan mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

Studi kasus yang dilakukan berupa studi kasus timbunan diatas tanah lunak dengan menggunakan perbaikan tanah berupa *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing*. Penelitian ini sudah pernah dilakukan oleh (Guan Ye *et al.*, 2013) dimana penelitian tersebut dilakukan evaluasi performa perbaikan tanah dengan metode gabungan berupa *deep mixed columns* dan *prefabricated vertical drain* dengan menggunakan *finite element method* dengan pemodelan tanah *Mohr Coulomb* menggunakan program *ABAQUS* dengan pemodelan *2D plane – strain* dan pemodelan *3D*. Penelitian kali ini diawali dengan studi perilaku interaksi tanah lunak yang diperkuat

dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing* baik secara terpisah dan digabung. Pada penelitian terakhir dilakukan studi parametrik dengan melakukan dengan beberapa variasi. Variasi pertama dilakukan dengan mengvariasikan metode konstruksi yang dilakukan, lalu variasi yang kedua dilakukan dengan mengvariasikan panjang *deep cement mixing* yang digunakan, dan yang ketiga dilakukan dengan memvariasikan jarak spasi antara *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing*. Perhitungan pada kasus ini divariasikan dengan menggunakan tiga model konstitutif tanah yaitu *Mohr Coulomb*, *Modified Cam Clay* dan *Soft Soil*, dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menemukan pemodelan terbaik yang dapat digunakan untuk memodelkan perbaikan tanah lunak menggunakan *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing*.

## 2. Studi Pemodelan Perilaku Interaksi Perbaikan Tanah

Pemodelan perilaku perbaikan tanah lunak dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing* dilakukan dengan menggunakan *software PLAXIS 2D* Versi 8.5. geometri dari pemodelan ini adalah dengan memodelkan suatu sampel tanah dengan kedalaman tanah lunak sedalam 15 meter secara *plane strain*, dengan diberikan timbunan setinggi 4 meter. *vertical drain* akan dipasang dengan pola segitiga spasi 2 meter dan sedalam 15 meter. *deep cement mixing column* akan dipasang dengan spasi 2 m dan sedalam 15 meter. Studi ini mengambil contoh dari contoh penelitian Yin, Jian-Hua (2014), dimana simulasi yang sama dilakukan melalui percobaan laboratorium sedangkan studi penulis dilakukan dengan metode perhitungan analisa numerik dengan bantuan program *PLAXIS 2D* V8.5, dimana parameter yang ada pada **Tabel 1** merupakan parameter buatan untuk menggambarkan kondisi tanah lunak dengan nilai *N-spt* 1-5, dan parameter pada **Tabel 2** dan **Tabel 3** merupakan input buatan yang digunakan untuk mensimulasikan perbaikan tanah menggunakan *prefabricated vertical drain* dan *deep cement mixing*.

**Tabel 1. Parameter tanah lunak model material Mohr Coulomb**

Parameter Tanah Mohr Coulomb		
Undrain		
gsat	kN/m <sup>3</sup>	13
gunsat	kN/m <sup>3</sup>	15
IP	%	15,27
kx	m/day	0,0003
ky	m/day	0,00015
c'	kN/m <sup>2</sup>	8
f'	°	18
E	kN/m <sup>2</sup>	5250
v		0,3

**Tabel 2. Parameter vertical drain**

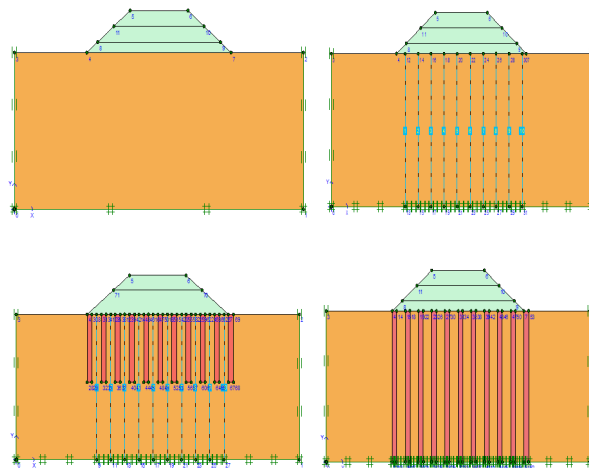
Parameter Vertical Drain	
Pola	Segitiga
Spasi	2 m
De	2,1 m
Dw	70 mm

**Tabel 3. Parameter soil mixing column**

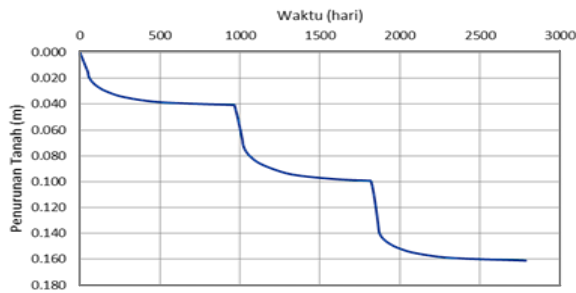
Parameter Soil Mixing Column		
Diameter	M	0,7
E	kN/m <sup>2</sup>	30.000
c'	kN/m <sup>2</sup>	150
γ <sub>sat</sub>	kN/m <sup>3</sup>	19
γ <sub>unsat</sub>	kN/m <sup>3</sup>	20
v		0,3

**Gambar 1** menunjukkan simulasi percobaan pembuatan timbunan diatas tanah lunak yang mana pada gambar dari atas kiri ke bawah kanan:

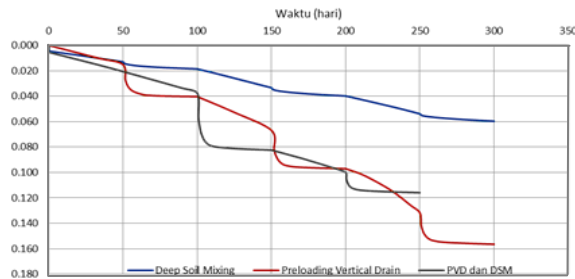
1. Pemodelan timbunan dengan melakukan penimbunan bertahap.
2. Pemodelan timbunan dengan menggunakan perkuatan *prefabricated vertical drain*.
3. Pemodelan timbunan dengan menggunakan perkuatan *deep cement mixing*.
4. Pemodelan timbunan dengan menggunakan perkuatan *prefabricated vertical drain* digabung dengan *deep cement mixing*.



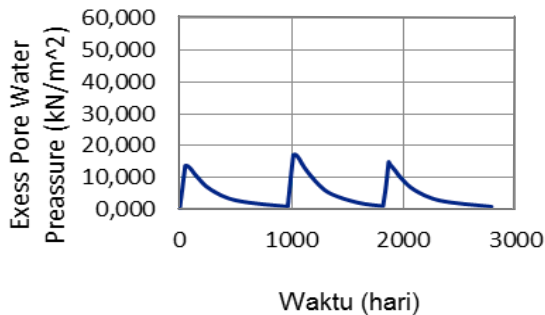
**Gambar 1. Pemodelan timbunan untuk studi pemodelan perilaku interaksi perbaikan tanah**



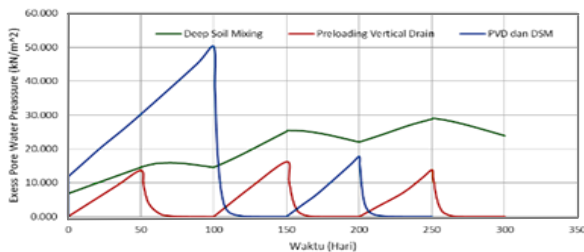
Gambar 2. Grafik hubungan penurunan tanah dengan waktu tanpa perbaikan tanah



Gambar 3. Grafik hubungan penurunan tanah dengan waktu dengan perbaikan tanah



Gambar 4. Grafik hubungan excess pore water pressure dengan waktu tanpa perbaikan tanah

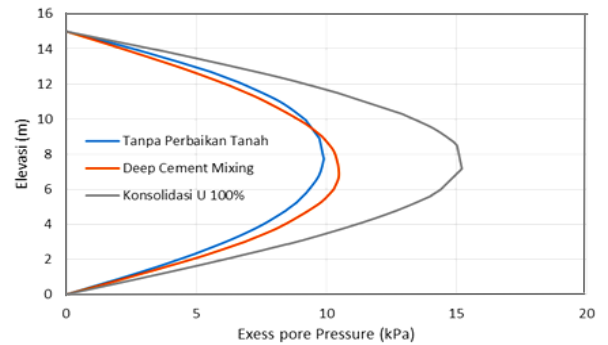


Gambar 5. Hubungan excess pore water pressure dengan waktu dengan perbaikan tanah

Pada keempat pemodelan yang dilakukan, dapat disimpulkan dengan menggunakan metode perbaikan tanah pada kasus timbunan dapat mempercepat waktu konsolidasi yang terjadi. Dapat dilihat pada Gambar 2 waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90 % sebesar 2786 hari berbeda dari hasil yang ditunjukkan pada Gambar 3 setelah dilakukan perbaikan pada tanah lunak waktu yang dibutuhkan



Gambar 6. Penurunan tanah pada konsolidasi 100 hari



Gambar 7. Excess pore pressure pada konsolidasi 100 hari

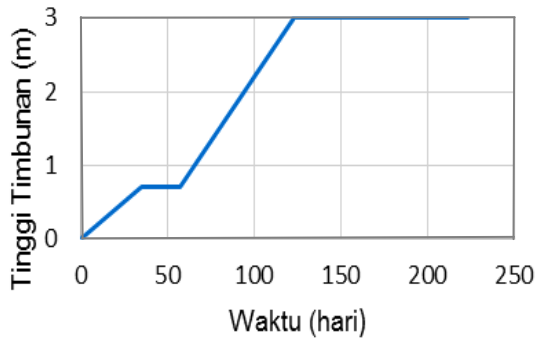
untuk mencapai derajat konsolidasi 90% menjadi kurang lebih 300 hari.

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 dijelaskan dimana untuk penggunaan *deep cement mixing* tidak terlalu mempengaruhi terhadap waktu konsolidasi dimana dengan analisa konsolidasi yang dilakukan selama 100 hari yang dilakukan terhadap pemodelan tanpa perbaikan tanah menghasilkan derajat konsolidasi sebesar 70 % dan pemodelan dengan menggunakan *deep cement mixing* menghasilkan derajat konsolidasi sebesar 71 %.

### 3. Analisis Studi Kasus : Perbaikan Tanah Lunak Dengan menggunakan PVD dan DCM Pada Kasus Timbunan

Studi kasus pemodelan perbaikan tanah lunak dengan PVD dan DSM diterapkan pada pembangunan konstruksi jembatan yang diambil dari paper Guan Ye *et al.* (2013) lokasi studi kasus berada di negara China provinsi Jiangsu. Penggunaan *DM column* bertujuan untuk meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi penurunan tanah yang terjadi akibat pemberian timbunan diatas tanah lunak, penggunaan PVD bertujuan untuk mempercepat waktu konsolidasi yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%. Perencanaan desain *DM column* dan PVD menggunakan pola pemasangan segitiga. *Column DM* yang digunakan berdiameter 0.7 m dengan panjang kedalaman pemasangan 9 m dan jarak spasi sebesar 2,5 m. *Vertical drain* yang digunakan memiliki dimensi 100 mm x 4 mm dengan panjang tertanam 25 m dan jarak spasi 2.5 m. Timbunan yang direncanakan setinggi 3 m dengan kemiringan 1.5H : 1V. Pada

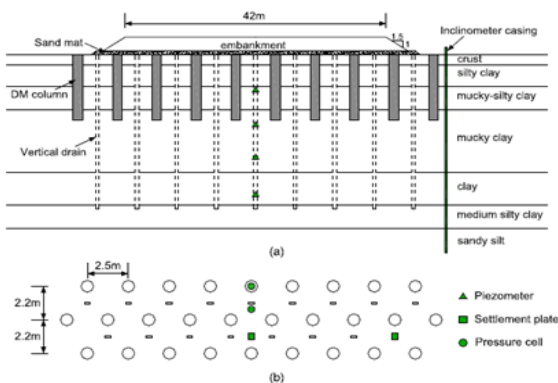
konstruksi timbunan dipasang alat monitoring berupa *piezometer*, *settlement plate*, *pressure meter* dan *inclinometer*.



Gambar 8. Sejarah pembebanan

3.1 Kondisi geoteknik

Kondisi geoteknik dari lokasi studi kasus sudah terpapar dalam bentuk hasil uji laboratorium dan statigrafi tanah. Jenis uji laboratorium yang tesaji didalam paper berupa uji *Triaxial*, uji *Plastis limit*, test *Atterberg*, uji berat jenis tanah.



Gambar 9. Skematik pemodelan timbunan

(a) cross section (b) plan view (Guan et al., 2013).

Tabel 4. Material properties (Guan et al., 2013)

Material	E' (MPa)	v	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	e0	k (m/d)	kve (m/d)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)
Crust	6.2	0.30	19.3	0.73	0.0015	0.0187	25	12
Silty Clay	5.1	0.30	18.9	0.83	0.0040	0.0251	22	8
Mucky-Silty Clay	3.6	0.30	18.5	1.1	0.0003	0.0083	20	5
Mucky-Clay	2.1	0.30	16.8	1.39	0.0007	0.0137	18	5
Clay	3.0	0.30	17.6	1.14	0.0004	0.0100	20	10
Medium Clay	7.0	0.30	19.5	0.72	0.0060	0.0280	28	10
Sand Silt	12.3	0.30	18.7	0.84	0.0060	-	32	5
Embankment Fill	35.0	0.30	20.0	-	-	-	35	8
DM Column	30.0	0.30	20.0	-	-	-	-	150

Tabel 5. Parameter model material Modified Cam Clay

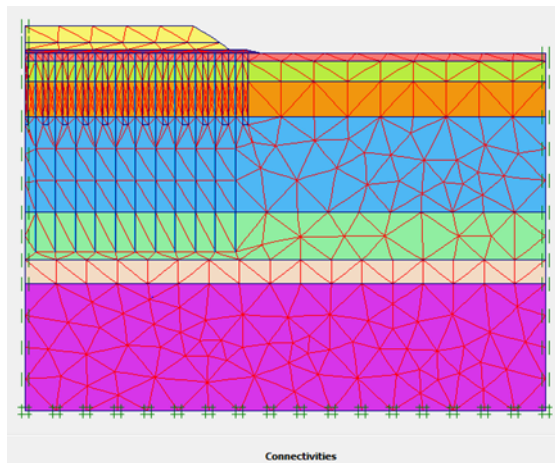
	LL (%)	Cc	$\lambda$	$\kappa$	M	OCR
Silty Clay	37.75	0.25	0.109	0.073	0.86	1
Mucky Silty Clay	34.65	0.222	0.096	0.064	0.77	1
Mucky Clay	42.72	0.294	0.128	0.085	0.69	1
Clay	38.32	0.255	0.111	0.074	0.77	1
Medium clay	35.23	0.227	0.099	0.066	1.11	1

Tabel 6. Parameter model material Soft Soil.

$\lambda^*$	$\kappa^*$
0.05956	0.02057
0.04571	0.01836
0.05356	0.16875
0.05187	0.02111
0.05756	0.01872

3.2 Model analisis

Model geometri pada program PLAXIS 2D ditunjukkan oleh gambar-gambar di bawah.



Gambar 10. Geometri model dan meshing

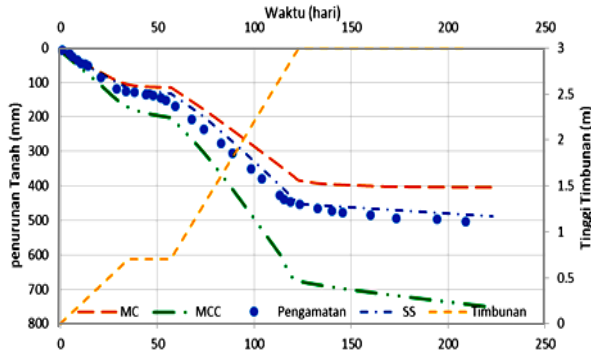
Pemodelan studi kasus menggunakan program PLAXIS 2D V 8.5 dengan pemodelan *plain strain* dengan kepadatan *mesh medium*.

3.3 Hasil analisis

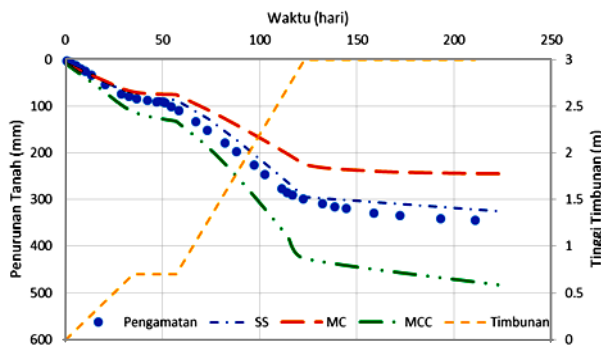
Pembahasan analisa dibagi menjadi dua yaitu pengamatan penurunan tanah dan *excess pore water pressure* yang terjadi selama pembebanan oleh timbunan dan selama konsolidasi berlangsung. Perbandingan antara pengukuran dilapangan dengan hasil analisa dengan menggunakan metode *Mohr Coulomb* dan *Modified Cam Clay* dilakukan dengan membandingkan antara grafik penurunan tanah dengan waktu dan grafik *excess pore water pressure* dengan waktu di titik – titik yang ditinjau.

Dari hasil analisa yang dilakukan model MC, model MCC, dan model SS dapat memperlihatkan perilaku umum penurunan tanah akibat pembebanan diatasnya dengan baik. Bila dilihat dari grafik penurunan tanah vs waktu model MCC memiliki nilai deformasi yang lebih besar (753 mm), model MC (406 mm), model SS (489 mm) dan dari hasil analisa ketidak sesuaian (penurunan tanah yang terjadi lebih besar) diperlihatkan antara

model analisa yang dilakukan dengan model material MCC dengan pengukuran dilapangan,

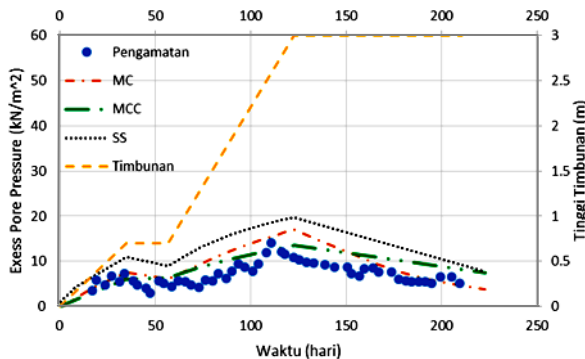


Gambar 11. Penurunan tanah vs. waktu pada tengah – tengah dasar timbunan



Gambar 12. Penurunan tanah vs. waktu pada ujung dasar timbunan

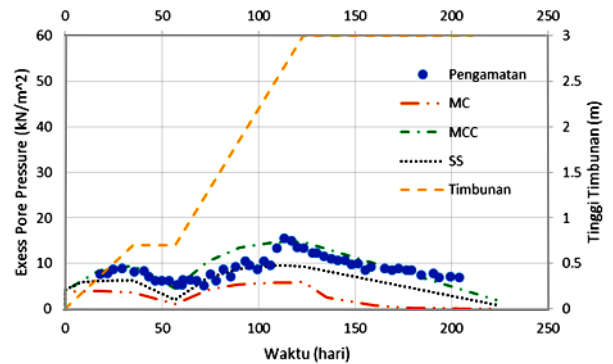
sedangkan analisa yang dilakukan dengan model MC memperlihatkan ketidak sesuaian (penurunan tanah yang terjadi lebih kecil) nilai penurunan tanah dengan pengamatan yang dilakukan dilapangan, untuk analisa yang dilakukan dengan model SS memperlihatkan nilai penurunan tanah yang hampir mendekati dengan pengamatan yang dilakukan dilapangan.



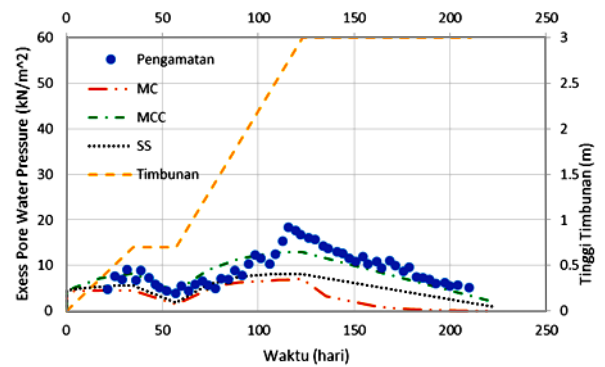
Gambar 13. Excess pore pressure vs waktu yang diamati pada kedalaman 4,5 meter

Pada gambar diatas menunjukkan kurva perubahan excess pore pressure akibat konstruksi timbunan. Titik tinjauan yang dilakukan berada ditengah – tengah timbunan pada kedalaman 4,5m, 9m dan 13m. dari analisa pemodelan yang dilakukan baik menggunakan

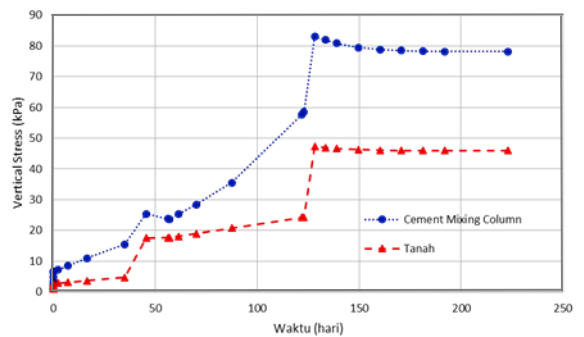
model MC, model MCC dan model SS dapat menghasilkan perilaku umum perubahan excess pore pressure akibat pembebanan dengan baik. Walaupun demikian, terdapat perbedaan antara hasil analisa dan hasil pengamatan yang dilakukan di lapangan. Untuk pengamatan pada titik kedalaman 4,5 meter dan 9 meter perbedaan terjadi pada saat dilakukan konsolidasi tahap ke dua, untuk pengamatan pada titik kedalaman 13 meter perbedaan terjadi dari awal tahap penimbunan hingga konsolidasi tahap kedua.



Gambar 14. Excess pore pressure vs. waktu yang diamati pada kedalaman 9 meter



Gambar 15. Excess pore pressure vs waktu yang diamati pada kedalaman 13 meter



Gambar 16. Pengukuran vertical stress pada tanah dasar dan ujung column cement mixing

Gambar 16 memperlihatkan vertical stress yang diterima oleh tanah dasar dan cement mixing column akibat timbunan di atasnya. Pada grafik diatas dapat terlihat bahwa cement mixing column mengalami vertical stress



yang lebih besar dari pada yang dialami oleh tanah dasar hal tersebut pada analisa kasus ini *stress ratio* yang terjadi sebesar 1,67. Perbedaan *stress ratio* yang terjadi dikarenakan perbedaan antara modulus *cement mixing column* dan tanah dimana *cement mixing column* memiliki modulus yang lebih besar dibandingkan tanah, selain itu terjadi *arching effect* sehingga menyebabkan *stress* yang diterima *cement mixing column* lebih besar dibandingkan tanah dasar.

#### 4. Analisis Studi Parametrik : Perbaikan Tanah Lunak Dengan menggunakan PVD dan DCM Pada Kasus Timbunan

Studi parametrik yang akan dilakukan dengan melakukan variasi terhadap:

1. Metode Konstruksi.
2. Panjang kedalaman *deep cement mixing*
3. Jarak Spasi antara *cement mixing column* dan *vertical drain*.

Data tanah yang digunakan disamakan dengan data tanah pada studi kasus.

##### 4.1 Metode konstruksi

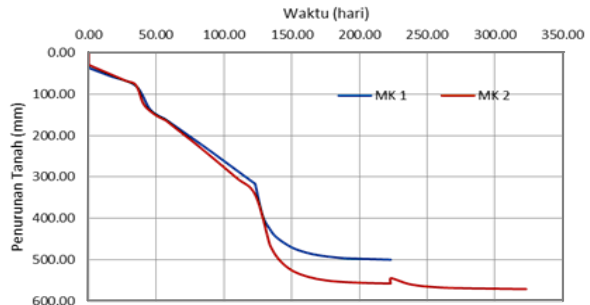
Variasi metode konstruksi akan dilakukan dalam analisa perbaikan tanah dengan menggunakan *deep cement mixing* dan *prefabricated vertical drain*. Pada studi parametrik ini akan dibandingkan antara metode yang dilakukan pada studi kasus pada bab sebelumnya dengan metode konstruksi yang lain yaitu:

1. Pemasangan *vertical drain*.
2. Beban *preloading* setinggi 0,7 meter.
3. Konsolidasi selama 22 hari.
4. Beban *preloading* setinggi 2,3 meter.
5. Konsolidasi selama 100 hari.
6. Pengangkatan beban *preloading*.
7. Pemasangan *cement mixing column*.
8. Pemasangan timbunan setinggi 3 meter.
9. Konsolidasi selama 100 hari.

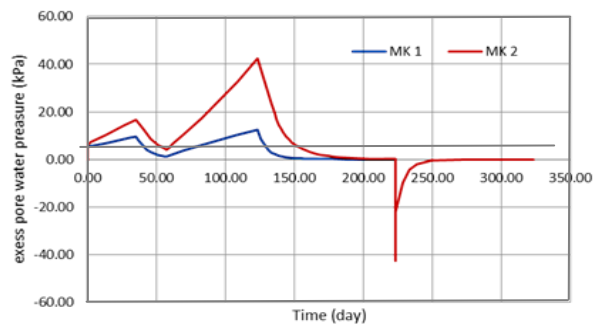
Dari studi parametrik dengan memvariasikan metode konstruksi didapatkan hasil.

Dari **Gambar 17** diketahui bahwa metode konstruksi satu yaitu metode konstruksi yang dilakukan pada studi kasus memiliki nilai penurunan tanah yang lebih kecil (501 mm) dibandingkan dengan metode konstruksi dua (571 mm). *Excess pore pressure* yang terjadi berdasarkan **Gambar 18** menunjukkan bahwa

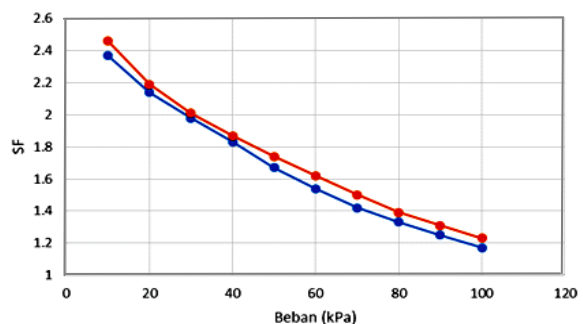
nilai *excess pore pressure* pada metode konstruksi dua lebih besar dibandingkan pada metode konstruksi satu, terjadi nilai *excess pore pressure* yang bernilai negatif pada metode konstruksi kedua disebabkan karena terjadinya *unloading* pada tanah dasar. *Bearing capacity* yang terjadi pada tanah lempung lunak yang ditunjukkan pada **Gambar 19** menunjukkan pada metode konstruksi dua memiliki angka faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konstruksi yang pertama.



**Gambar 17.** Penurunan tanah yang terjadi di tengah – tengah timbunan



**Gambar 18.** Excess pore pressure vs waktu yang diamati pada kedalaman 4,5 m.



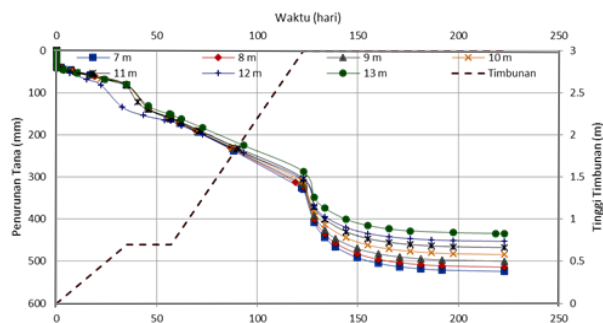
**Gambar 19.** Bearing capacity.

##### 4.2 Variasi panjang kedalaman *cement mixing column*

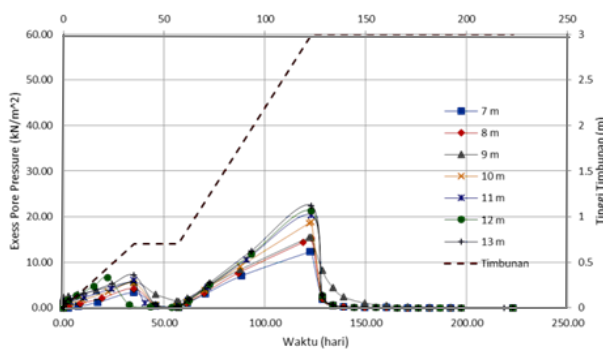
Pada studi parametrik kali ini variasi yang dilakukan adalah variasi terhadap panjang kedalaman *cement mixing column* yang dibuat. Variasi panjang kedalaman *cement mixing column* yang direncanakan antara adalah 7 m hingga 13 m.

Studi parametrik yang dilakukan dengan memvariasikan

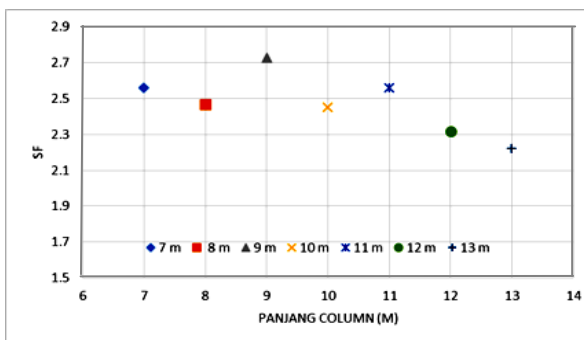
panjang kedalaman *cement mixing column* menunjukkan bahwa pada **Gambar 20** dan penurunan tanah yang terjadi terpengaruh oleh panjang *cement mixing column*, dimana semakin panjang *cement mixing column* yang terpasang maka nilai penurunan tanah yang dihasilkan akibat konsolidasi semakin kecil. Nilai *excess pore pressure* yang terjadi berdasarkan **Gambar 21** memperlihatkan bahwa semakin panjang *cement mixing column* yang digunakan maka nilai maximum *excess pore pressure* yang terjadi akan semakin besar bearing capacity yang dihasilkan dari analisa studi parametrik dengan memvariasikan panjang *cement mixing column* yang terlihat pada **Gambar 22** menunjukkan bahwa tanah lempung lunak mengalami kenaikan bearing capacity terbesar pada panjang *cement mixing column* 9 meter hal tersebut menunjukkan bahwa panjang *cement mixing column* mempunyai panjang efektif untuk memaksimalkan fungsi dari perbaikan tanah dengan metode *deep cement mixing*.



**Gambar 20.** Penurunan tanah yang terjadi di tengah – tengah timbunan



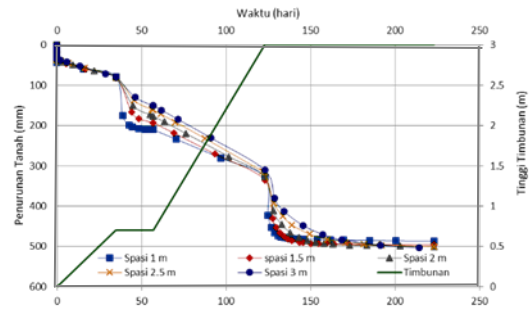
**Gambar 21.** Excess pore pressure vs. waktu yang diamati pada kedalaman 4.5 m.



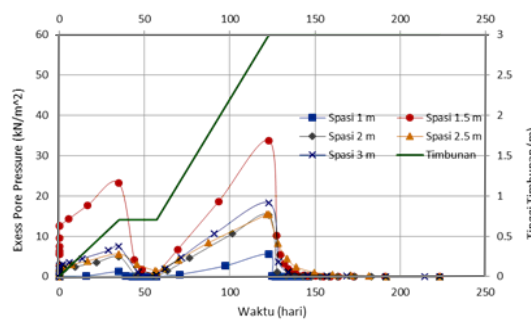
**Gambar 22.** Bearing capacity vs. panjang column.

### 4.3 Variasi spasi antara *cement mixing column* dan *vertical drain*

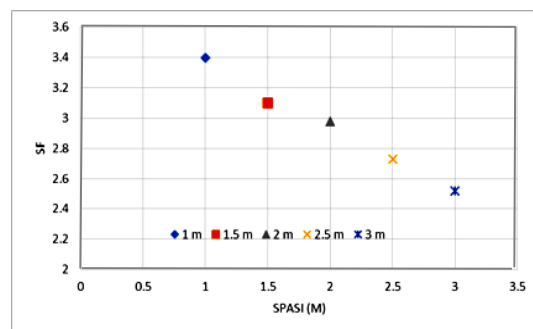
Pada studi parametrik kali ini variasi yang dilakukan adalah variasi terhadap spasi antara *cement mixing column* dan *vertical drain*. Variasi spasi yang direncanakan antara adalah 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m, dan 3 m.



**Gambar 23.** Penurunan tanah yang terjadi di tengah – tengah timbunan



**Gambar 24.** Excess pore pressure vs. waktu yang diamati pada kedalaman 4.5 m



**Gambar 25.** Bearing capacity vs spasi column.

Studi parametrik yang dilakukan dengan melakukan variasi terhadap spasi antara *cement mixing column* dengan *vertical drain* pada **Gambar 23** menunjukkan semakin rapat jarak spasi antara *cement mixing column* dan *vertical drain* konsolidasi yang terjadi akan semakin cepat mencapai derajat konsolidasi 90 %. **Gambar 24** menunjukkan semakin rapat jarak spasi antara *cement mixing column* dan *vertical drain* maximum *excess pore pressure* yang terjadi juga semakin besar. **Gambar 25** menunjukkan nilai bearing capacity terbesar berada saat analisa dilakukan dengan

spasi 1 m, sedangkan pada spasi 1.5 m sampai 3 m berurutan mengalami penurunan nilai *bearing capacity*.

## 5. Kesimpulan

Dari penelitian di atas dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Untuk pemodelan analisa perbaikan tanah lunak dengan menggunakan metode *deep soil mixing* yang digabungkan dengan *prefabricated vertical drain* pemodelan yang dilakukan dengan model material *Mohr Coulomb* menghasilkan deformasi yang lebih kecil hasil pengamatan di lapangan, sedangkan untuk pemodelan dengan menggunakan model material *Modified Cam Clay* menghasilkan deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan pengukuran di lapangan, dilain pihak pemodelan dengan menggunakan model material *Soft Soil* memberikan nilai deformasi yang paling mendekati dengan hasil pengamatan lapangan. Berdasarkan analisis studi kasus pemancangan tiang yang telah dilakukan, model HSS lebih menunjukkan hasil yang realistis, dibandingkan dengan model MC yang cenderung lebih besar daripada pengukuran lapangan. Deformasi yang dihasilkan oleh model material MCC lebih besar dari perhitungan model material MC dan SS dikarenakan pada perhitungan deformasi lapisan tanah yang memiliki sifat *lighty* OC dianalisa dengan sifat NC pada perhitungan dengan model material MCC, sedangkan untuk model material SS berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Butterfield (1979) tanah lunak grafik fungsi  $e - \log p'$  tidak dapat mengakomodir kondisi sebenarnya dari tanah lunak sehingga diajukan grafik fungsi baru dari  $\ln(1+e) - \ln p'$  yang lebih dapat mengakomodir sifat dari tanah lunak, dari grafik tersebut didapatkan parameter untuk model material SS sehingga dari analisa yang dilakukan terlihat pemodelan tanah dengan model material SS yang memiliki nilai penurunan tanah yang menyerupai hasil pengamatan di lapangan.
2. Penggunaan *deep cement mixing* dan *prefabricated vertical drain* sebagai instrument yang digunakan untuk perbaikan tanah lunak memiliki interaksi yang berbeda dengan tanah lunak. Untuk *deep cement mixing* terbukti berhasil meningkatkan stabilitas tanah lunak sehingga dapat menerima beban *preloading* dengan tinggi timbunan 2,3 meter dalam satu kali tahap penimbunan, selain itu *deep cement mixing* dapat membantu untuk mengontrol besarnya penurunan tanah yang terjadi sehingga menunjukkan penurunan tanah yang didapat dengan menggunakan *Deep Cement Mixing* menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tidak menggunakan *deep cement mixing* akan tetapi penggunaan *deep cement mixing* tidak dapat mempercepat waktu konsolidasi yang terjadi. Sementara penggunaan *vertical drain* dapat membantu mempercepat konsolidasi yang terjadi ditambah dengan besarnya beban *preloading* yang dapat diterima karena di kombinasikan dengan *deep cement mixing* sehingga dapat lebih mempercepat waktu

konsolidasi yang terjadi.

3. Pada saat perhitungan *bearing capacity* pada saat akhir masa konstruksi penggunaan *deep cement mixing* dan *prefabricated vertical drain* Menghasilkan kenaikan nilai *bearing capacity* yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan *deep cement mixing* dan *prefabricated vertical drain* secara Terpisah seperti yang terlihat pada *point* 4.2. Hal tersebut terjadi karena dengan menggabungkan kedua metode perbaikan tanah kenaikan nilai *shear strength* tanah yang terjadi akibat konsolidasi dapat meningkatkan nilai *bearing capacity* dan dengan selain terjadi kenaikan *shear strength* akibat konsolidasi nilai *bearing capacity* juga meningkat akibat penggunaan *deep cement mixing*.
4. Dalam studi parametrik yang dilakukan dengan memvariasikan metode konstruksi menyimpulkan bahwa MK satu menghasilkan penurunan tanah yang lebih kecil dibandingkan dengan MK dua. Dilain pihak MK dua menghasilkan kenaikan *bearing capacity* yang lebih besar dibandingkan dengan MK satu.
5. Dalam studi parametrik yang dilakukan dengan memvariasikan panjang kedalaman *cement mixing column* dengan menggunakan geometri dan data tanah yang sama menyimpulkan semakin dalam panjang *cement mixing column* yang direncanakan menghasilkan nilai penurunan tanah yang semakin kecil, hal ini terjadi disebabkan *arching effect* yang terjadi sehingga *cement mixing column* menerima *vertical stress* yang lebih besar dibandingkan tanah dasar timbunan. Dilain pihak kenaikan *bearing capacity* yang terjadi pada setiap pemodelan menyimpulkan bahwa panjang *cement column* memiliki panjang efektif untuk menaikkan nilai *bearing capacity* pada tanah.

## Daftar Pustaka

- Ye, Guan., Xu, C.A., & Gao, Y., 2006, Improving Soft Soil Using Combined Cement Deep Mixing Column and Preloading Vertical Drain, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Xu, C., Ye, G.-B., Jiang, Z.-S., and Zhou, Q.-Z., 2006, Research on mechanism of combined improvement of soft soils based on field monitoring: Chin, J. *Geotech. Eng.*
- Zhang, D.-W., Liu, S.-Y., and Hong, Z.-S., 2006, Consolidation calculation method of soft ground improved by DJM – PVD combined method *Proc., GeoShanghai Conf., Geotechnical Special Publication 152*, ASCE.
- Ye, Guan., Zhang, Z., Han, J., Xing, H.F., Huang, M.S., & Xiang, P. L., 2013, Performance Evaluation of an Embankment on Soft Soil Improved by Deep Mixed Columns and Prefabricated Vertical Drains, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.



Yin, Jian-Hua., 2014, Physical Model Test Study of Soft Soils Improved by Deep Cement Mixed Soil Columns And Vertical Drains With Preloading, *Soft Soil Conference*.

Butterfield., 1979, R. A Natural Compression Law For Soils an Advance on  $e$ - $\log p'$ , *Jurnal Geotechnique*.

