



Analisis Penurunan Gabungan *Prefabricated Vertical Drain* dan *Stone Column* Untuk Perbaikan Tanah Lunak

Abdul Muis*, Sri Wulandari

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Gunadarma, Jakarta

*abdulmuis.0812@gmail.com

Received: 2 Agustus 2022 Revised: 15 September 2023 Accepted: 21 September 2023

Abstract

Soft soil is inevitable in the construction, be it road construction or building construction. Soil improvement is needed to overcome the problem of soft soil, soil improvement methods are growing and diverse. This research is focused on studying the interaction behavior of combination two soil improvement methods, namely Prefabricated Vertical Drain (PVD) and Stone Column (SC). This research was conducted using PLAXIS 2D with Mohr-Coulomb (MC) and Soft Soil (SS) material models. The results showed that the combination of PVD and SC methods provides the advantage that PVD can accelerate the consolidation time and SC can reduce the settlement that occurs in the soil. The use of SS model is greater settlement compared to using Mohr-Coulomb material model with a settlement of 1,641 m for Soft Soil and 0.463 m for Mohr-Coulomb. SC depth variation affects the settlement and settlement time, the longer the SC the smaller settlement and the shorter time, while PVD only affects the time. Combining PVD and SC results in better settlement and settlement time compared to PVD or SC alone. Variations in construction methods result in slight differences for MC material models, whereas for SS material models, construction methods 2 are greater in settlement and shorter time.

Keywords: *Soft soil, prefabricated vertical drain, stone column, settlement*

Abstrak

Tanah lunak tidak dapat dihindari keberadaannya dalam pembangunan suatu konstruksi, baik itu konstruksi jalan maupun bangunan Gedung. Perbaikan tanah dibutuhkan untuk mengatasi permasalahan tanah lunak, metode perbaikan tanah semakin berkembang dan beragam. Penelitian ini difokuskan untuk mempelajari perilaku interaksi penggabungan dua buah metode perbaikan tanah yaitu Prefabricated Vertical Drain (PVD) dan stone column (SC). Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan PLAXIS 2D dengan model material Mohr-Coulomb (MC) dan Soft Soil (SS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggabungan metode PVD dan SC memberikan keuntungan yaitu PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi dan SC dapat mengurangi penurunan yang terjadi pada tanah. Penggunaan model material SS lebih besar penurunannya dibandingkan dengan menggunakan model material Mohr-Coulomb dengan penurunan 1,641 m untuk Soft Soil dan 0,463 m untuk Mohr-Coulomb. Variasi kedalaman SC mempengaruhi penurunan dan waktu penurunan, semakin panjang SC maka semakin kecil penurunannya dan waktunya semakin singkat, sedangkan PVD hanya mempengaruhi waktu saja. Penggabungan PVD dan SC menghasilkan penurunan dan waktu penurunan lebih baik dibandingkan dengan PVD atau SC saja. Variasi metode konstruksi menghasilkan sedikit perbedaan untuk model material MC, sedangkan untuk model material SS, metode konstruksi 2 lebih besar penurunannya dan waktu yang lebih singkat.

Kata kunci: *Tanah lunak, prefabricated vertical drain, stone column, penurunan tanah.*

Pendahuluan

Tanah lunak merupakan tanah berbutir halus yang memiliki kompresibilitas yang tinggi dan daya dukung tanah yang rendah. Permasalahan yang

sering dijumpai dalam pembangunan suatu konstruksi pada tanah lunak seringkali dijumpai masalah penurunan tanah yang sangat besar dan daya dukung tanah yang sangat kecil (Lesmana & Susila, 2016), sehingga diperlukan upaya untuk

perbaikan tanah. Berkembangnya metode perbaikan tanah memberikan berbagai macam pilihan pemecahan masalah tanah lunak, penggabungan beberapa metode perbaikan tanah saat ini banyak dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih maksimal. *Preloading* merupakan teknik yang sangat sering digunakan dalam perbaikan tanah karena metode ini sangat mudah dan dapat membantu untuk mempercepat proses konsolidasi tanah lunak.

Perkembangan pendekatan metode *preloading* terhadap tanah semakin banyak mulai dari *preloading* dengan beban tambahan (Long *et al.*, 2013; Ni *et al.*, 2019), vakum *preloading* (Chai & Carter, 2013; Indraratna *et al.*, 2013; Jian, 2018), penggabungan *preloading* dengan metode lain seperti *preloading* dengan *Prefabricated Vertical Drain* atau PVD (Aspar & Fitriani, 2016), penggabungan *preloading* dengan *Stone Column* (Mokhtari & Kalantar, 2012; Singh & Sahu, 2019).

Perkembangan penggabungan metode untuk perbaikan tanah lunak sangat beragam seperti penelitian yang dilakukan oleh (Lesmana & Susila, 2016) yang menggabungkan PVD dengan *Deep Cement Mixing* (DCM) menyimpulkan bahwa penggabungan metode yang dilakukan memberikan keuntungan dari masing-masing metode perbaikan tanah tersebut, PVD untuk mempercepat waktu konsolidasi yang terjadi (Aspar & Fitriani, 2016; Indraratna *et al.*, 2011; Lilabsari *et al.*, 2018; Long *et al.*, 2013) dan DCM untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengontrol penurunan tanah (Lesmana & Susila, 2016; Liu *et al.*, 2012).

Selain PVD, adapula perbaikan tanah yang menggunakan pola pemasangan seperti PVD yaitu metode *Stone Column* (SC) (Anggraini *et al.*, 2018; Castro, 2017; Yuvaraj & Raut, 2016). *Stone Column* banyak digunakan untuk perbaikan tanah, penggunaannya dapat diaplikasikan pada pondasi suatu struktur, tangki minyak, pondasi rakit dll. Penelitian tentang *Stone Column* (Kwa *et al.*, 2018) didapatkan hasil meningkatnya kapasitas beban dan berkurangnya penurunan dengan penggunaan *geogrid* sebagai pembungkus untuk *stone column*, dan meningkatnya daya dukung ultimate sebesar 60% dibandingkan penggunaan *stone column* biasa tanpa pembungkus *geogrid*.

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisa perilaku tanah dengan menggunakan *prefabricated vertical drain* dan *stone column* secara terpisah dan gabungan. Penelitian ini dilakukan dengan bantuan software PLAXIS 2D (Anggraini *et al.*, 2018) dengan beberapa variasi penelitian. Variasi pertama dilakukan dengan memvariasikan panjang SC yang digunakan, kedua dilakukan variasi panjang

pemasangan PVD, ketiga memvariasikan metode pelaksanaan dan memvariasikan model konstitutif tanah yaitu *Mohr-Coulomb* dan *Soft Soil*. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan pemodelan yang terbaik dari penggabungan metode PVD dan SC.

Metode

Metode penelitian ini dilakukan dengan pemodelan perilaku menggunakan bantuan aplikasi komputer. Pemodelan perilaku perbaikan tanah dengan *prefabricated vertical drain* dan *stone column* dilakukan dengan menggunakan software PLAXIS 2D versi 8.6. Pemodelan tanah menggunakan dua lapis dengan kedalaman lapis pertama 10m dan lapis yang kedua 6m secara *plane strain*, dengan diberikan timbunan setinggi 8m.

Vertical drain dipasang dengan spasi 2m, sedangkan variasi kedalaman 10 dan 16 m. *Stone column* dipasang dengan spasi 2m, diameter 0,5m dan variasi kedalaman 5m, 8m dan 10m. Penelitian ini akan menggunakan dua parameter model material tanah yaitu *Mohr-Coulomb* dan *Soft Soil* (SS), variasi penggabungan PVD dan SC sebanyak 12 variasi, dan variasi metode konstruksi yang akan dilakukan untuk penggabungan adalah metode PVD dan SC

Parameter penelitian

Parameter tanah yang digunakan didapat dari penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium, sedangkan parameter *stone column* dan timbunan didapatkan dari penelitian (Elshazly *et al.*, 2008). Berikut parameter yang digunakan (Tabel 1)

Tabel 1. Parameter tanah lunak model material Mohr-Coulomb

Kedalaman	0,00-10,00	10,00-16,00
Jenis Tanah	Clay	Sandy Clay
MAT (m)	5,00	5,00
γ (kN/m ³)	16,8	15,6
Cu (kN/m ²)	17	19
ϕ (°)	25,6	24,1
Eu (kN/m ²)	3000	5000
Poisson Ratio (ν')	0,3	0,3

Tabel 2. Parameter tanah lunak model Material Soft Soil

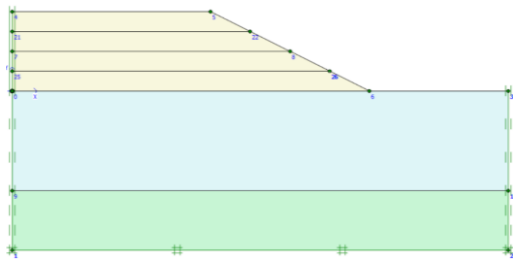
Kedalaman	0,00-10,00	10,00-16,00
Jenis Tanah	Clay	Sandy Clay
MAT (m)	5,00	5,00
γ (kN/m ³)	16,8	15,6
Cu (kN/m ²)	17	19
ϕ (°)	25,6	24,1
λ^*	0,064	0,094
κ^*	0,011	0,019

Tabel 3. Parameter stone column dan timbunan

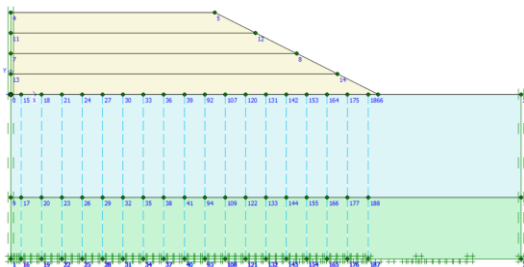
Jenis Tanah	Stone Column	Timbunan
MAT (m)	5,00	5,00
γ (kN/m ³)	21,6	19
Cu (kN/m ²)	1	1
ϕ (°)	41	30
Eu (kN/m ²)	29200	10000
Poisson Ratio (ν)	0,2	0,33

Model analisis

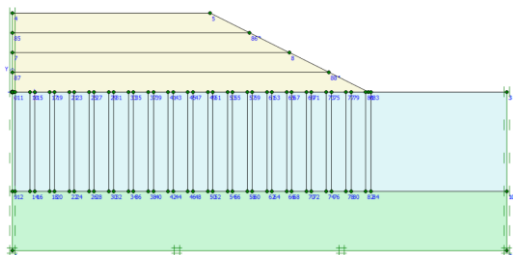
Model geometri dalam analisis dilakukan dengan kondisi tanah yang sama dengan pemodelan timbunan dan perkuatan tanah yang bervariasi. Model geometri ditunjukkan pada Gambar 1 sampai Gambar 4. Pemodelan timbunan yaitu dengan memodelkan timbunan secara bertahap setinggi 2 m setiap tahap timbunannya, dengan total tinggi timbunan 8m. Pemodelan timbunan dengan memodelkan timbunan secara bertahap tersebut ditambahkan instalasi PVD dan SC sebagai perkuatan tanah.



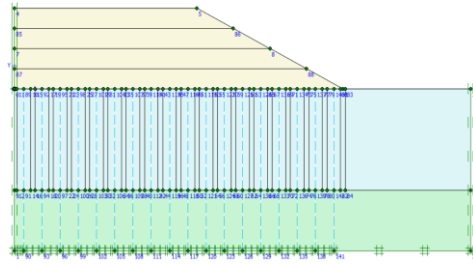
Gambar 1. Pemodelan timbunan dengan melakukan penimbunan bertahap



Gambar 2. Pemodelan timbunan dengan perkuatan prefabricated vertical drain



Gambar 3. Pemodelan timbunan dengan menggunakan perkuatan stone column



Gambar 4. Pemodelan timbunan dengan menggunakan perkuatan prefabricated vertical drain digabung dengan stone column

Variasi analisis

Analisis pada penelitian ini divariasikan dengan beberapa kondisi seperti ditunjukkan pada Tabel 4 yang merupakan variasi kedalaman PVD dan SC dengan 11 variasi. kemudian variasi metode konstruksi dalam analisis ini dilakukan dengan dua metode konstruksi yang berbeda yang disajikan dalam Tabel 5 dan Tabel 6. Selain itu divariasikan pula model material yang digunakan yaitu model material *Mohr-Coulomb* dan model material *soft soil* dengan perlakuan yang sama.

Variasi kedalaman pemasangan PVD dan SC, dengan menggunakan 2 variasi kedalaman PVD, yaitu 10 m dan 16 m, serta 3 variasi kedalaman SC yaitu 5 m, 8 m, dan 10 m.

Tabel 4. Variasi kedalaman PVD dan SC

No	Kedalaman PVD (m)	Kedalaman SC (m)
1	16	-
2	16	5
3	16	8
4	16	10
5	10	5
6	10	8
7	10	10
8	10	-
9	-	5
10	-	8
11	-	10

Tabel 5. Metode konstruksi -1

No	Langkah	Durasi (hari)
1	Instalasi PVD	2
2	Instalasi SC	2
3	Timbunan 2 m	3
4	Konsolidasi Timbunan 2 m	5
5	Timbunan 2 m	3
6	Konsolidasi Timbunan 4 m	5
7	Timbunan 2 m	3
8	Konsolidasi Timbunan 6 m	5
9	Timbunan 2 m	3
10	Konsolidasi Akhir PVD + SC	-

Metode konstruksi dengan memasang PVD dan SC secara bersamaan sebelum melakukan penimbunan pada tanah asli, kemudian melakukan timbunan secara bertahap setiap 2m, sampai mencapai ketinggian timbunan 8m, dan menunggu sampai konsolidasi tanah 90% tercapai sesuai dengan perkiraan hari yang telah dihitung.

Tabel 6. Metode konstruksi-2

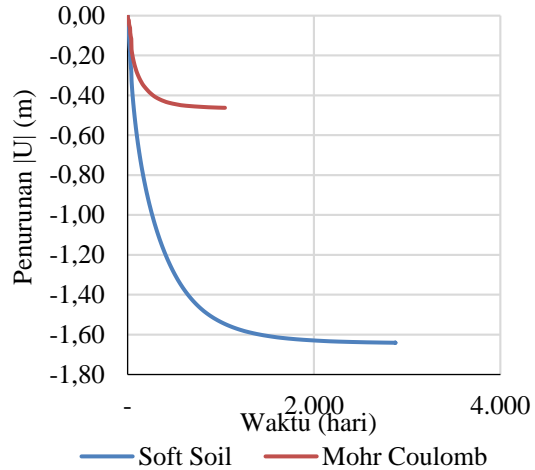
No	Langkah	Durasi (hari)
1	Instalasi PVD + timbunan 2 m	5
2	Konsolidasi timbunan 2 m	5
3	Pengangkatan timbunan 2 m	3
4	Instalasi SC	2
5	Timbunan 2 m	3
6	Konsolidasi timbunan 2 m	5
7	Timbunan 2 m	3
8	Konsolidasi timbunan 4 m	5
9	Timbunan 2 m	3
10	Konsolidasi timbunan 6 m	5
11	Timbunan 2 m	3
12	Konsolidasi akhir PVD + SC	-

Metode konstruksi dengan memasang PVD, kemudian melakukan timbunan setinggi 2m, dan setelah terkonsolidasi selama 5 hari, timbunan diangkat, lalu dipasang SC. Kemudian melakukan timbunan secara bertahap setiap 2m, sampai mencapai ketinggian timbunan 8 m, dan menunggu sampai konsolidasi tanah 90% tercapai sesuai dengan perkiraan hari yang telah dihitung.

Hasil dan Pembahasan

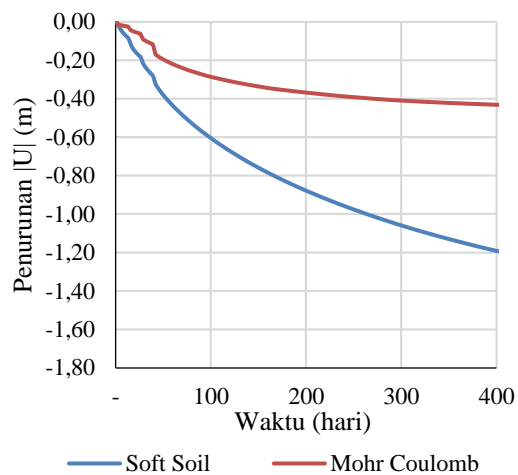
Hasil analisis diamati dari perilaku penurunan tanah terhadap waktu yang dipengaruhi beberapa variasi analisis yang dilakukan, mulai dari variasi kedalaman, metode konstruksi dan penggunaan material model yang berbeda. Penelitian dilakukan dengan melakukan metode perbaikan tanah PVD dan SC yang dilakukan masing masing dan secara gabungan, untuk mengetahui bagaimana pengaruh penggabungan metode PVD dan SC.

Grafik pada Gambar 5, menggambarkan hubungan antara penurunan tanah dengan waktu sampai mencapai tekanan air minimum yang terjadi pada tanah lunak, dengan menggunakan model material *Mohr-Coulomb* dan *Soft Soil* menunjukkan perbedaan. Perbedaan terjadi baik itu besar penurunan yang terjadi maupun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan air minimum. Penurunan yang terjadi dengan beban timbunan setinggi 8m dengan menggunakan material model *Mohr-Coulomb* adalah 0,463 m dalam waktu 1045 hari, sedangkan untuk *Soft Soil* penurunan yang terjadi sebesar 1,641 m dalam waktu 2873 hari.



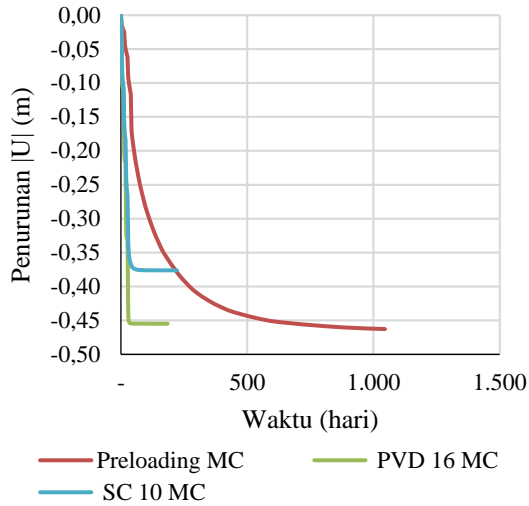
Gambar 5. Penurunan tanah dengan *preloading*

Terlihat bahwa penurunan yang terjadi dengan model material SS lebih besar dibandingkan dengan model material MC hampir 4 kali lebih besar. Perbedaan yang terjadi dikarenakan perbedaan dalam penggunaan parameter tanah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Butterfield, 1979) tanah lunak grafik fungsi $e - \log p'$ tidak dapat mengakomodir kondisi sebenarnya dari tanah lunak sehingga diajukan grafik fungsi baru $\ln(1+e) - \ln p'$ yang lebih dapat mengakomodir sifat dari tanah lunak, dari grafik tersebut didapatkan model untuk material SS.

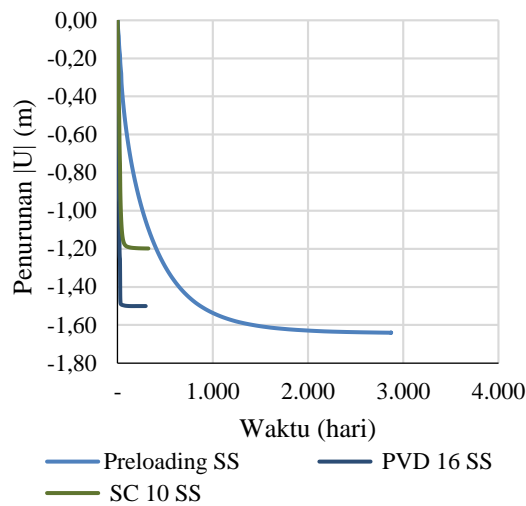


Gambar 6. Penurunan tanah dengan *preloading*

Gambar 6 menunjukkan perbedaan penurunan saat waktu mencapai 400 hari didapatkan untuk model material MC penurunannya sebesar 0,430 m atau sudah hampir 93% dari penurunan saat tekanan air minimum tercapai. Sedangkan model material SS penurunannya sebesar 1,183 m atau baru 72% dari penurunan saat tekanan air minimum tercapai, dengan perbandingan waktu dengan waktu akhir penurunan model material MC sekitar 38 % dan model material SS sekitar 14 %.



Gambar 7. Penurunan tanah Mohr Coulomb



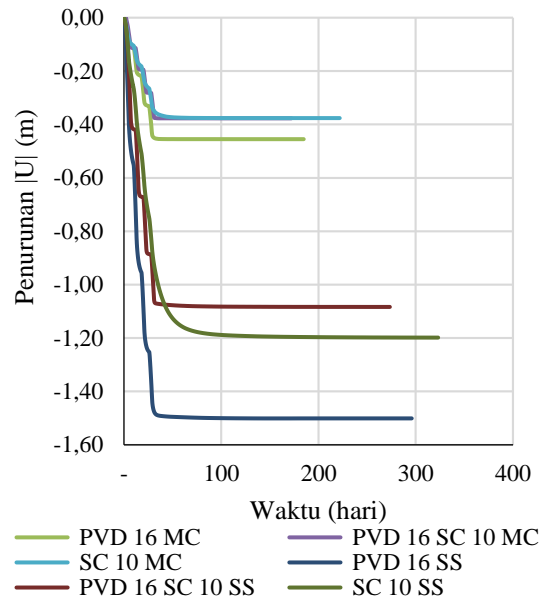
Gambar 8. Penurunan tanah soft soil

Berdasarkan grafik pada Gambar 7 dan Gambar 8 terlihat bahwa waktu penurunan yang terjadi dengan menggunakan perbaikan tanah PVD dengan kedalaman 16 m atau setara dengan kedua lapisan tanah, jauh lebih singkat dibandingkan dengan menggunakan beban preloading saja baik itu dengan material model *Mohr Coulomb* ataupun *Soft Soil* dengan penurunan tanah yang hampir sama. Sedangkan untuk perbaikan tanah menggunakan SC terlihat bahwa waktu yang sedikit lebih lama dari PVD namun dengan penurunan yang lebih kecil dari PVD maupun hanya preloading saja. Hal ini terjadi karena material batuan yang dipakai untuk SC menghambat proses penurunan tanah karena material tercampur dengan tanah saat memadat.

Percobaan penggabungan metode PVD dan SC untuk mengetahui bagaimana pengaruh kedua metode tersebut saat digunakan bersamaan. Penurunan yang terjadi dan waktu yang dibutuhkan dengan perbaikan tanah tersaji dalam Tabel 7.

Tabel 7. Penurunan tanah dan waktu penurunan dengan dan tanpa perbaikan tanah

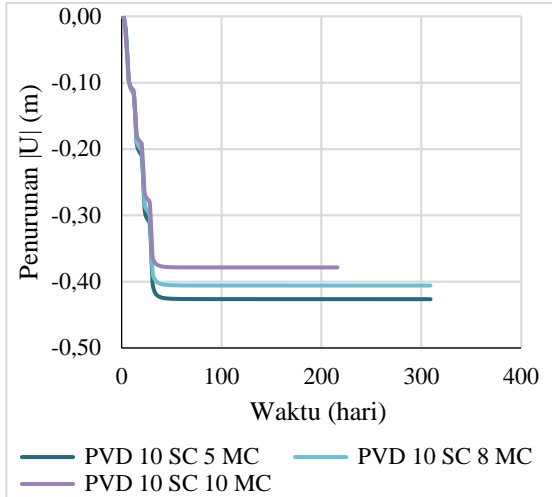
Perbaikan Tanah	Model Material	U (m)	Waktu (hari)
PVD	MC	0,455	184,79
SC	MC	0,376	221,92
PVD + SC	MC	0,377	172,23
Preloading	MC	0,463	1045
PVD	SS	1,501	295,87
SC	SS	1,198	323,22
PVD + SC	SS	1,083	273,56
Preloading	SS	1,641	2873



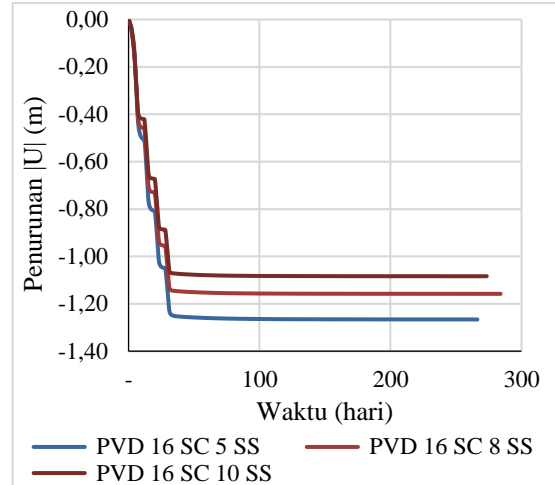
Gambar 9. Penurunan tanah PVD 16 dan SC 10

Berdasarkan grafik pada Gambar 9 terlihat bahwa penggabungan metode PVD dan SC memberikan pengaruh yang cukup signifikan, dengan menggabungkan kedua metode tersebut terlihat penurunan tanah yang terjadi lebih kecil dibandingkan metode PVD dan SC secara terpisah. Model material *Mohr Coulomb* dan *Soft Soil* memberikan hasil yang hampir sama, walaupun pada model material *Mohr Coulomb* penurunan yang terjadi hampir sama dengan penurunan menggunakan SC saja, namun waktu yang diperlukan lebih singkat jika digabungkan dengan metode PVD.

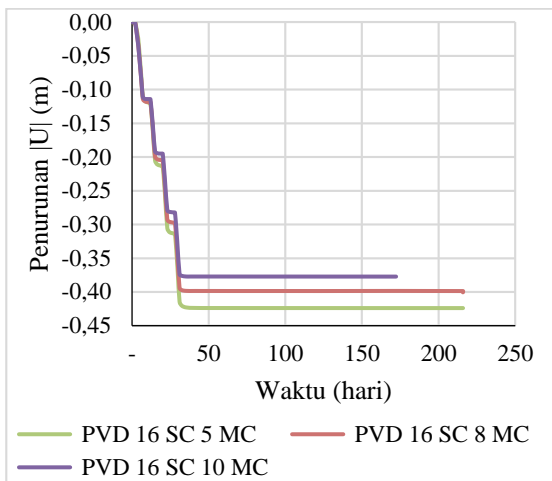
Percobaan penggabungan metode PVD dan SC dilakukan dengan memvariasikan panjang PVD menjadi 2 macam dan panjang SC menjadi 3 macam. Pemodelan dilakukan menggunakan material *Soft Soil* dengan variasi PVD dan SC yang sama. Gambar 10 sampai dengan 13 menunjukkan hubungan penurunan tanah dan waktu dengan kombinasi perbaikan PVD dan SC.



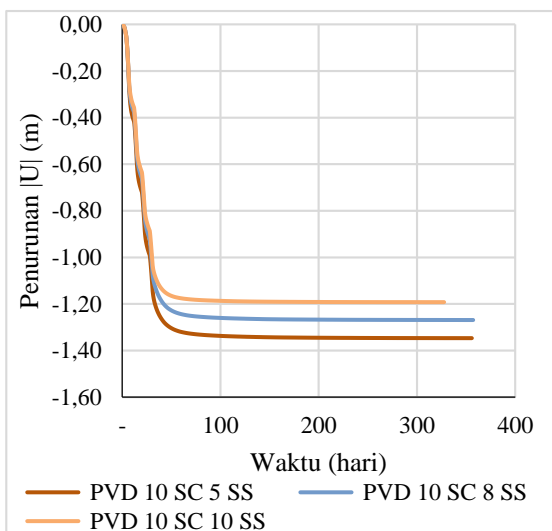
Gambar 10. Penurunan tanah PVD 10 dan variasi SC (Mohr Coulomb)



Gambar 13. Penurunan tanah PVD 16 dan variasi SC (Soft Soil)



Gambar 11. Penurunan tanah PVD 16 dan variasi SC (Mohr Coulomb)



Gambar 12. Penurunan tanah PVD 10 dan variasi SC (Soft Soil)

Model material MC terlihat waktu penurunan yang dibutuhkan pada perbaikan PVD 10 + SC 5 dan PVD 10 + SC 8 sama, begitu pula dengan PVD 16 + SC 5 dan PVD 16 + SC 8, ini dapat disimpulkan bahwa panjang SC dalam rentang panjang kurang dari kedalaman lapisan tanah tidak memberikan efek terhadap waktu penurunan, ini dipertegas lagi dengan SC10 yang digabungkan dengan PVD menghasilkan pengurangan waktu penurunan yang terjadi karena lapisan tanah pertama sedalam 10 m. Besar penurunan yang terjadi dengan kombinasi SC 10 lebih kecil dibandingkan SC 8 dan SC 5 dengan penurunan terbesar, dapat disimpulkan bahwa semakin dalam SC semakin kecil penurunannya.

Model material SS terlihat penurunan yang terjadi dengan kombinasi SC yang semakin panjang semakin memperkecil penurunan, ini sesuai dengan model material MC. Waktu penurunan yang terjadi pada model material SS terlihat sedikit berbeda dengan model material MC, jika pada model material MC besar penurunan dengan kombinasi PVD yang berbeda menghasilkan penurunan yang tidak jauh berbeda, sedangkan pada model material SS terlihat panjang PVD mempengaruhi penurunan yang terjadi, PVD yang lebih panjang memberikan penurunan yang lebih kecil.

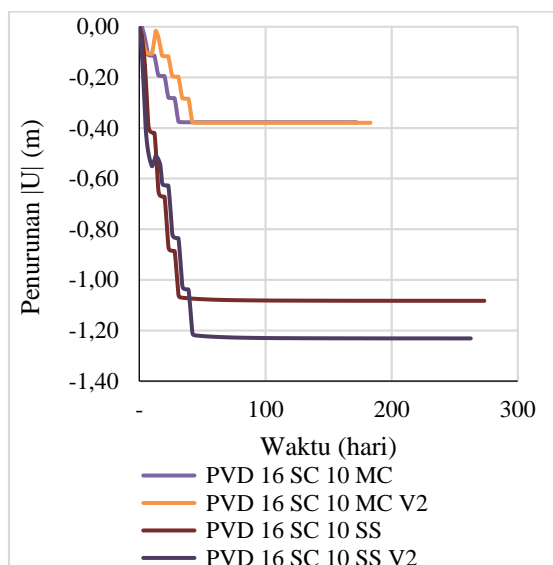
Grafik dengan PVD 16 terlihat lebih curam bagian bawahnya jika dibandingkan dengan PVD 10, yang artinya air yang keluar dari tanah lebih cepat dan partikel tanah lebih cepat memadat. PVD 10 penurunannya lebih besar jika dibandingkan dengan PVD 16. Ini dikarenakan lapis tanah kedua tidak terpasang PVD, karena hanya sampai kedalaman 10 m atau sampai lapisan pertama saja, yang berarti lapisan tanah kedua tidak mengalami percepatan pengeluaran air pori seperti lapisan pertama sehingga partikel SC tidak sampai masuk mengisi lapisan tanah kedua seperti PVD 16. Nilai

penurunan dan waktu penurunan kombinasi PVD dan SC dengan beberapa variasi kedalaman dan model material tanah tersaji pada Tabel 8.

Tabel 8. Penurunan tanah dan waktu penurunan kombinasi perbaikan tanah PVD dan SC

Perbaikan tanah	Model material	Penurunan (m)	Waktu (hari)
PVD 16 + SC 5	MC	0,424	215,91
PVD 16 + SC 8	MC	0,399	215,91
PVD 16 + SC 10	MC	0,377	172,23
PVD 10 + SC 5	MC	0,427	309,10
PVD 10 + SC 8	MC	0,406	309,10
PVD 10 + SC 10	MC	0,379	215,91
PVD 16 + SC 5	SS	1,266	266,41
PVD 16 + SC 8	SS	1,158	284,08
PVD 16 + SC 10	SS	1,083	273,56
PVD 10 + SC 5	SS	1,347	355,79
PVD 10 + SC 8	SS	1,269	357,13
PVD 10 + SC 10	SS	1,192	327,76

Perbaikan tanah dengan PVD 16 dan SC 10 dengan model material MC lebih singkat waktu penurunannya jika dibandingkan PVD atau SC saja, pada model material SS kombinasi PVD 16 dan MC 5 merupakan kombinasi dengan waktu penurunan paling singkat. Pada perbaikan tanah bukan hanya waktu penurunan saja yang penting, namun juga besar penurunan tanah juga penting karena jika penurunan terlalu besar akan lebih banyak material timbunan yang dibutuhkan untuk mencapai elevasi yang diinginkan. Penurunan tanah paling sedikit terjadi pada kombinasi perbaikan tanah PVD 16 dan SC 10 untuk kedua model material.



Gambar 14 Penurunan Tanah Variasi Metode Konstruksi

Gambar 14 merupakan grafik hubungan penurunan

tanah dengan waktu dengan kombinasi perbaikan tanah PVD dan SC menggunakan dua metode konstruksi berbeda yang dijelaskan pada Tabel 5 dan Tabel 6, dipilih salah satu kombinasi perbaikan tanah yaitu PVD 16 dan SC 10 dengan dua metode konstruksi dan dua model material seperti yang tertera pada grafik. Metode konstruksi-2 pada model material MC terlihat lebih lama waktu penurunannya dan penurunan yang hampir sama dengan metode konstruksi-1, waktu yang lebih lama dikarenakan proses pelaksanaan awalnya lebih lama. Proses pengangkatan kembali timbunan menyebabkan tambahan waktu proses penurunan tanah, terlihat garis merah pada awal grafik melengkung keatas atau penurunan tanah kembali hampir mendekati elevasi awal sebelum terjadi penurunan. Sekilas dilihat tidak ada perbedaan yang signifikan kecuali hanya waktu yang tertunda akibat penambahan proses konstruksi pada metode konstruksi-2.

Metode konstruksi-2 pada model material SS terlihat lebih besar penurunannya dan lebih singkat waktu penurunannya, padahal proses awal konstruksi lebih lama dibandingkan metode konstruksi-1. Pada grafik metode konstruksi-2 terlihat penurunannya jauh lebih besar dibandingkan metode konstruksi 1, ini dikarenakan pada metode konstruksi-1 sudah terpasang SC yang bersifat menghambat laju penurunan. Pada proses pengangkatan timbunan metode konstruksi-2 terlihat mengalami pengembangan tanah yang sedikit, kemudian setelah diberi SC penurunannya menjadi lebih sedikit daripada penurunan awal sebelum dipasang SC. Metode konstruksi-1 waktu penurunannya lebih lama dikarenakan SC menghambat laju penurunan sejak awal. Terlihat saat awal grafik penurunannya lebih sedikit dibanding metode konstruksi-2. Besar penurunan dan waktu penurunan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Penurunan tanah dan waktu penurunan kombinasi perbaikan tanah PVD dan SC dengan variasi metode konstruksi

Perbaikan tanah	Model material	Penurunan (m)	Waktu (hari)
PVD 16 + SC 10 MK 1	MC	0,377	172,23
PVD 16 + SC 10 MK 2	MC	0,380	183,23
PVD 16 + SC 10 MK 1	SS	1,083	273,56
PVD 16 + SC 10 MK 2	SS	1,232	262,80

Pengaplikasian di lapangan akan lebih cocok menggunakan metode konstruksi-1 karena lebih mudah untuk diaplikasikan dengan PVD 16 m digabungkan dengan SC10 m, dan menghasilkan

penurunan sebesar 0,377 m atau sekitar 38cm dengan timbunan setinggi 8 m, dengan waktu yang dibutuhkan 172,23 hari dengan menggunakan material *Mohr-Column*. Sedangkan untuk material *Soft Soil* pengaplikasian dengan PVD 16 m dan SC 10 m diperoleh penurunan tanah 1,083 m dengan waktu yang dibutuhkan sekitar 273,56 hari. Penggunaan Metode *Soft Soil* lebih akurat untuk dipakai pada tanah lunak dibandingkan dengan metode *Mohr-Column*, seperti penelitian yang pernah dilakukan (Lesmana & Susila, 2016) yang memodelkan dengan tiga jenis material model dan dibandingkan dengan kondisi lapangan hasil penelitian (Liu *et al.*, 2012) diperoleh hasil material model SS lebih mendekati kondisi lapangan. Aplikasi di lapangan lebih baik menggunakan PVD 16 + SC 10 dengan metode pelaksanaan pertama karena lebih mudah dalam instalasi SC dengan perbedaan waktu lebih lambat 10 hari dari metode pelaksanaan kedua namun dengan metode yang lebih mudah dilaksanakan.

Kesimpulan

Penurunan yang terjadi pada tanah lunak dengan model material SS lebih besar dibandingkan model material MC, ini dikarenakan perbedaan parameter yang digunakan untuk analisis. Variasi panjang kedalaman SC mempengaruhi penurunan dan waktu penurunan, semakin panjang SC maka waktu semakin singkat dan penurunan tanah semakin kecil, sedangkan variasi panjang pada PVD mempengaruhi waktu penurunan saja. Semakin panjang PVD maka waktu penurunan semakin singkat. Kombinasi perbaikan tanah PVD dan SC menghasilkan penurunan yang lebih kecil dan waktu yang lebih singkat jika dibandingkan dengan perbaikan tanah dengan PVD atau SC saja.

Metode konstruksi-1 akan lebih mudah untuk diaplikasikan karena tidak perlu untuk menghilangkan *preloading* dan waktu yang diperlukan juga lebih singkat. Penggabungan PVD dan SC dapat memberikan pengaruh pada penurunan tanah dan waktu yang diperlukan, penggabungan PVD 16 m dengan SC 10 m dinilai lebih baik digunakan daripada kombinasi penggabungan yang lain.

Daftar Pustaka

Anggraini, A. D., Rifa'i, A., & Faris, F. (2018). Perbaikan Tanah Dasar Jalan Tol Semarang - Demak Menggunakan Bahan Aditif dan Perkuatan Kolom Stabilisasi. *Rekayasa Sipil*, 12(1), 22–31. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil/2018.012.014>

Aspar, W. A. N., & Fitriani, E. N. (2016). Pengaruh

Jarak Dan Pola Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak = Effect of Distance and Pattern of Prefabricated Vertical Drain for Improvement of Soft Clay Soil. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 10(1), 41. <https://doi.org/10.29122/mipi.v10i1.102>

Butterfield, R. (1979). A natural compression law for soils (an advance on e-log p'). *Geotechnique*, 29(4), 469–480. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.4.469>

Castro, J. (2017). Modeling stone columns. *Materials*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/ma10070782>

Chai, J. C., & Carter, J. P. (2013). Consolidation theory for combined vacuum pressure and surcharge loading. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013*, 3, 2449–2452.

Elshazly, H., Elkasabgy, M., & Elleboudy, A. (2008). Effect of inter-column spacing on soil stresses due to vibro-installed stone columns: Interesting findings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 225–236. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9159-y>

Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S., Poulos, H., Rujikiatkamjorn, C., & Ameratunga, J. (2013). Performance and prediction of marine clay treated with vacuum and surcharge consolidation at port of brisbane. *Australian Geomechanics Journal*, 48(4), 161–180.

Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ameratunga, J., & Boyle, P. (2011). Performance and Prediction of Vacuum Combined Surcharge Consolidation at Port of Brisbane. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1009–1018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000519)

Jian, C. H. U. (2018). *Vacuum Preloading for Soil Improvement and Land Reclamation Projects Why Vacuum Preloading Why Vacuum Preloading • It can be used as either a consolidation or.*

Kwa, S. F., Kolosov, E. S., & Fattah, M. Y. (2018). Ground improvement using stone column construction encased with geogrid. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 3(66), 49–59. <https://doi.org/10.18720/CUBS.66.5>

Lesmana, A., & Susila, E. (2016). Studi Perilaku dan Mekanisme Interaksi Penggabungan

Prefabricated Vertical Drain dan Deep Cement Mixing untuk Perbaikan Tanah Lunak. *Jurnal Teknik Sipil*, 23(3), 203–212.
<https://doi.org/10.5614/jts.2016.23.3.5>

Lilabsari, Z. F., Munawir, A., Zaika, Y., & Kuswanda, W. P. (2018). *Menggunakan Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd)*. 2 (2),1–6.

Liu, S. Y., Du, Y. J., Yi, Y. L., & Puppala, 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*, 138(6), 718–727
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000625](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000625)

Long, P. V., Bergado, D. T., Nguyen, L. V., & Balasubramaniam, A. S. (2013). Design and performance of soft ground improvement using PVD with and without vacuum consolidation. *Geotechnical Engineering*, 44(4), 36–51.

Mokhtari, M., & Kalantar, B. (2012). Soft soil stabilization using stone columns-a review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17 J(September), 1659–1666.

Ni, P., Mei, G., & Zhao, Y. (2019). Surcharge preloading consolidation of reclaimed land with distributed sand caps. *Marine Georesources and Geotechnology*, 37(6), 671–682.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1482389>

Singh, I., & Sahu, A. K. (2019). A review on stone columns used for ground improvement of soft soil. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(7C2), 466–468.
<https://doi.org/10.11159/icgre19.132>

Yuvaraj, P., & Raut, P. (2016). Ground Improvement Technique-A View of Stone Column Method with the Case Study. *International Journal on Emerging Technologies (Special Issue on ICRIET-2016)*, 7(2), 86–91. www.researchtrend.net