

PEMODELAN PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN KOMBINASI METODE VACUUM PRELOADING DAN DEEP MIXING COLUMN

Indra Noer Hamdhan¹, Randy Muhammad Akbar²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. Penghulu KH. Hasan Mustapa No.23 Bandung
indranh@itenas.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. Penghulu KH. Hasan Mustapa No.23 Bandung
randymuhammadakbar@gmail.com

Masuk: 11-10-2022, revisi: 25-10-2022, diterima untuk diterbitkan: 01-11-2022

ABSTRACT

Soft soil has high compressibility and low permeability so that the soil is at risk of consolidation settlement if the load is applied. Various soil improvement methods have been developed, one of which is by combining vacuum preloading with a deep mixing column. This study aims to understand the effect of the combined deep mixing column with vacuum preloading method on soil improvement without creating high embankment as an alternative to the deep mixing column combination preloading method. In addition, this study discusses the effect of previous soil improvement methods such as preloading, deep mixing column combination preloading, prefabricated vertical drain combination preloading and vacuum preloading based on the correlation of case study soil data in the Gedebage Bandung area with the help of Plaxis 2D software. The modeling results show that the deep mixing column combination vacuum preloading method has a reduction effectiveness of 74.23% and a reduction of 98.26% reduction time, the method is effective in reducing the amount of settlement compared to the previous methods. In terms of decreasing time, the vacuum preloading method is still more effective than the deep mixing column combination vacuum preloading method.

Keywords: Soft Soil, Preloading, Vacuum Preloading, Prefabricated Vertical Drain, Deep Mixing Column

ABSTRAK

Tanah lunak memiliki kompresibilitas tinggi dan permeabilitas rendah sehingga tanah berisiko terjadi penurunan konsolidasi jika diberikan beban. Berbagai metode perbaikan tanah telah dikembangkan salah satunya dengan mengombinasikan *vacuum preloading* dengan *deep mixing column*. Penelitian ini bertujuan untuk memahami pengaruh metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* dalam perbaikan tanah tanpa membuat timbunan tinggi sebagai alternatif dari metode *preloading* kombinasi *deep mixing column*. Selain itu, pada penelitian ini membahas pengaruh metode perbaikan tanah terdahulunya seperti *preloading*, *preloading* kombinasi *deep mixing column*, *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain* dan metode *vacuum preloading* berdasarkan korelasi data tanah studi kasus di kawasan Gedebage, Bandung dengan dibantu software Plaxis 2D. Hasil pemodelan menunjukkan metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* memiliki efektivitas reduksi penurunan sebesar 74,23% dan reduksi waktu penurunan sebesar 98,26%, metode tersebut efektif dalam mengurangi besar penurunan dibandingkan metode-metode terdahulunya. Dari segi waktu penurunan metode *vacuum preloading* masih lebih efektif dalam mereduksi waktu penurunan dari pada metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column*.

Kata kunci: Tanah Lunak, Preloading, Vacuum Preloading, Prefabricated Vertical Drain, Deep Mixing Column

1. PENDAHULUAN

Permasalahan pertumbuhan penduduk menyebabkan banyak pembangunan yang dilakukan pada daratan yang memiliki sifat tanah yang kurang baik sehingga dapat menimbulkan permasalahan yang akan membahayakan berbagai konstruksi bangunan di atasnya. Pada tanah dengan kondisi tersebut perlu dilakukan penanganan perbaikan tanah terlebih dahulu agar tanah layak digunakan sebagai material konstruksi. Salah satu metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan yaitu dengan mengombinasikan metode *vacuum preloading* dan metode *deep mixing column*, *vacuum preloading* dapat mempercepat lama waktu penurunan sedangkan *deep mixing column* dapat mengurangi besarnya penurunan.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami pengaruh perbaikan tanah metode *vacuum preloading* yang dikombinasikan dengan metode *deep mixing column* terhadap besarnya penurunan dan lama waktu penurunan sebagai metode alternatif pengganti dari metode *preloading* kombinasi *deep mixing column*. Selain itu, pada penelitian ini juga bertujuan untuk memahami pengaruh metode perbaikan tanah terdahulunya seperti metode *preloading*, *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*, *preloading* kombinasi *deep mixing column* dan *vacuum preloading* serta untuk memahami efektivitas pengaruh metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* dalam mereduksi besar dan waktu penurunan di antara metode *preloading*, *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*, *preloading* kombinasi *deep mixing column* dan *vacuum preloading*.

Pemodelan perbaikan tanah metode *preloading*, *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*, *preloading* kombinasi *deep mixing column*, *vacuum preloading*, dan *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* menggunakan Plaxis 2D 2022 dengan data yang digunakan merupakan data korelasi tanah dari hasil uji lapangan berupa N-SPT dan uji laboratorium pada studi kasus di kawasan Gedebage, Kota Bandung. Pola pemasangan *prefabricated vertical drain* dan DMC dimodelkan berbentuk persegi dengan memvariasikan spasi jarak *prefabricated vertical drain* dan *deep mixing column* sebesar 1,5D, 2,5D, 3,5D dengan D sebesar 0,8 m yang merupakan diameter dari *deep mixing column* atau spasi jarak yang digunakan sebesar 1,2 m, 2 m, 2,8 m. Pada penelitian ini menggunakan variasi kedalaman *prefabricated vertical drain* dengan *floating penetration* sebesar 50%, 80%, 90% dan *full penetration* serta variasi kedalaman *deep mixing column* dengan *floating penetration* sebesar 20%, 50%, 80% dan *full penetration* dari kedalaman tanah lunak sedalam 26 m. Adapun tinggi timbunan yang digunakan yaitu setinggi 4 m dimana tinggi tersebut diasumsikan sebagai beban sebesar 76 kPa. Untuk metode *vacuum preloading* dan *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* digunakan tinggi timbunan sebesar 0,3 m serta tekanan *vacuum* sebesar 70 kPa dimana tinggi dan tekanan *vacuum* tersebut diasumsikan sebagai beban sebesar 76 kPa. Tekanan sebesar 76 kPa merupakan beban rencana kompleks perumahan yang akan dibangun pada kawasan yang akan dilakukan pada penelitian ini.

Definisi Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang kosong di antara partikel-partikel tersebut (Das, 1995).

Tanah Lunak

Menurut Siska dan Yakin (2016) Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang sebagian besar tanahnya terdiri dari butiran partikel tanah yang sangat kecil seperti lempung dan lanau. Lapisan tanah lunak mempunyai sifat kemampuan yang tinggi, koefisien permeabilitas yang rendah, dan mempunyai daya dukung yang rendah. Menurut (Look, 2007) tanah lunak dapat diidentifikasi dengan melakukan uji *Standar Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT), konsistensi tanah lunak memiliki nilai N-SPT antara 0 hingga 5 dan memiliki nilai q_c antara 0,2 hingga 0,4 MPa.

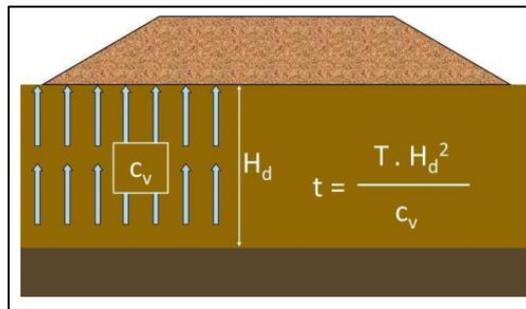
Perbaikan Tanah

Menurut Permatasari dan Hamdhan (2017) Perbaikan tanah merupakan upaya yang dilakukan untuk memperbaiki tanah dengan karakteristik teknis rendah menjadi material yang layak digunakan serta dapat digunakan untuk konstruksi. Perbaikan tanah memiliki tujuan, secara umum tujuan dari perbaikan tanah adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan daya dukung dan kuat geser tanah.
2. Mengurangi kompresibilitas.
3. Mengontrol stabilitas volume (*shrinking & swelling*).
4. Mengurangi kerentanan terhadap likuifaksi.
5. Memperbaiki kualitas material untuk bahan konstruksi.
6. Mengontrol permeabilitas dan mereduksi tekanan air pori.

Preloading

Menurut Muis dan Wulan (2019) *preloading* merupakan salah satu cara untuk mempercepat penurunan dan meningkatkan daya dukung tanah dengan memberikan beban tambahan pada tanah, pemberian beban ini akan efektif bila beban total (beban awal ditambah beban tambahan) melebihi tekanan maksimum yang pernah dialami tanah (tekanan prakonsolidasi). Dalam pelaksanaannya, metode *preloading* membutuhkan waktu yang cukup lama dalam mengeluarkan air pori pada proses perbaikan tanah.



Gambar 1. Skema perbaikan tanah dengan *preloading* (Kuswanda, 2016)

Vacuum Preloading

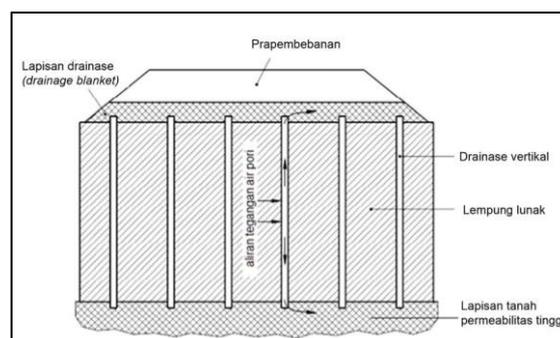
Metode *vacuum preloading* menerapkan penghisapan *vacuum* ke dalam tanah untuk mengurangi tekanan atmosfer dan tekanan air pori dari dalam tanah sehingga konsolidasi tanah dapat terjadi. Menurut Kuswanda (2016) Durasi penghisapan dilakukan sampai konsolidasi tanah dasar mencapai derajat konsolidasi yang direncanakan, Apabila derajat konsolidasi tanah dasar telah mencapai pada derajat yang direncanakan maka penghisapan dihentikan dan konstruksi dimulai pelaksanaannya. Menggunakan Sistem *vacuum*, proses konsolidasi dapat tercapai lebih cepat tanpa perlu menambahkan tinggi timbunan yang dapat mengakibatkan keruntuhan geser (Saowapakpiboon, et al., 2010).



Gambar 2. Skema perbaikan tanah dengan *vacuum preloading* (Kuswanda, 2016)

Prefabricated Vertical Drain

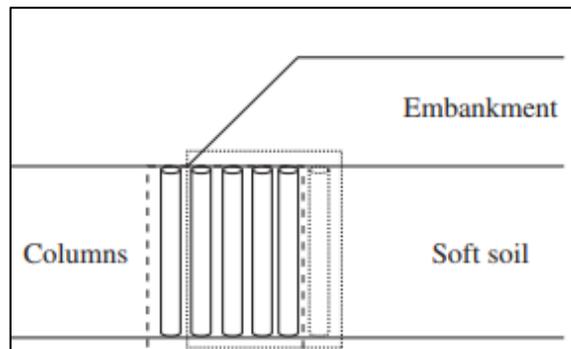
Menurut Zhafirah dan Amalia (2019) *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) merupakan elemen drainase yang terdiri dari bagian luar yaitu *filter jacket* dan *drain core* (bagian inti), fungsi filter jacket sebagai penyaring dalam membatasi masuknya butiran tanah yang akan menghalangi jalannya pengaliran air sedangkan drain core sebagai jalur aliran air. PVD dapat mempercepat penurunan, hal ini dikarenakan dengan adanya *vertical drain* air pori tanah tidak hanya mengalir keluar ke arah vertikal saja menuju lapisan tanah dengan tekanan yang lebih rendah, tetapi juga ke arah horizontal menuju arah PVD sehingga pada akhirnya air pori sampai kepada saluran drainase (Ali & Wulandari, 2020). PVD dapat dikombinasikan dengan metode perbaikan lainnya seperti kolom pasir, kompaksi dinamik dan *deep mixing* (Badan Standarisasi Nasional, 2017).



Gambar 3. Skema perbaikan dengan *prefabricated vertical drain* (Badan Standarisasi Nasional, 2017)

Deep Mixing Column

Metode *deep mixing* merupakan teknik modifikasi tanah *in situ* yang menggunakan stabilisasi untuk meningkatkan daya dukung dan mengurangi penurunan tanah lunak (Porbaha, 2015). Metode *deep mixing column* dapat diaplikasikan dalam bentuk kering yang yang disebut *dry mixing* atau dalam bentuk basah yang disebut *wet mixing* melalui poros pencampur berongga yang sering dipasang sebagai multi-sumbu auger yang dilengkapi dengan dayung pencampur (Das, 1995). *Dry mixing* diaplikasikan pada tanah dengan kadar air kurang dari 200%, sedangkan untuk *wet mixing* dapat diaplikasikan pada tanah dengan kadar air kurang dari 60% (Han, 2015).

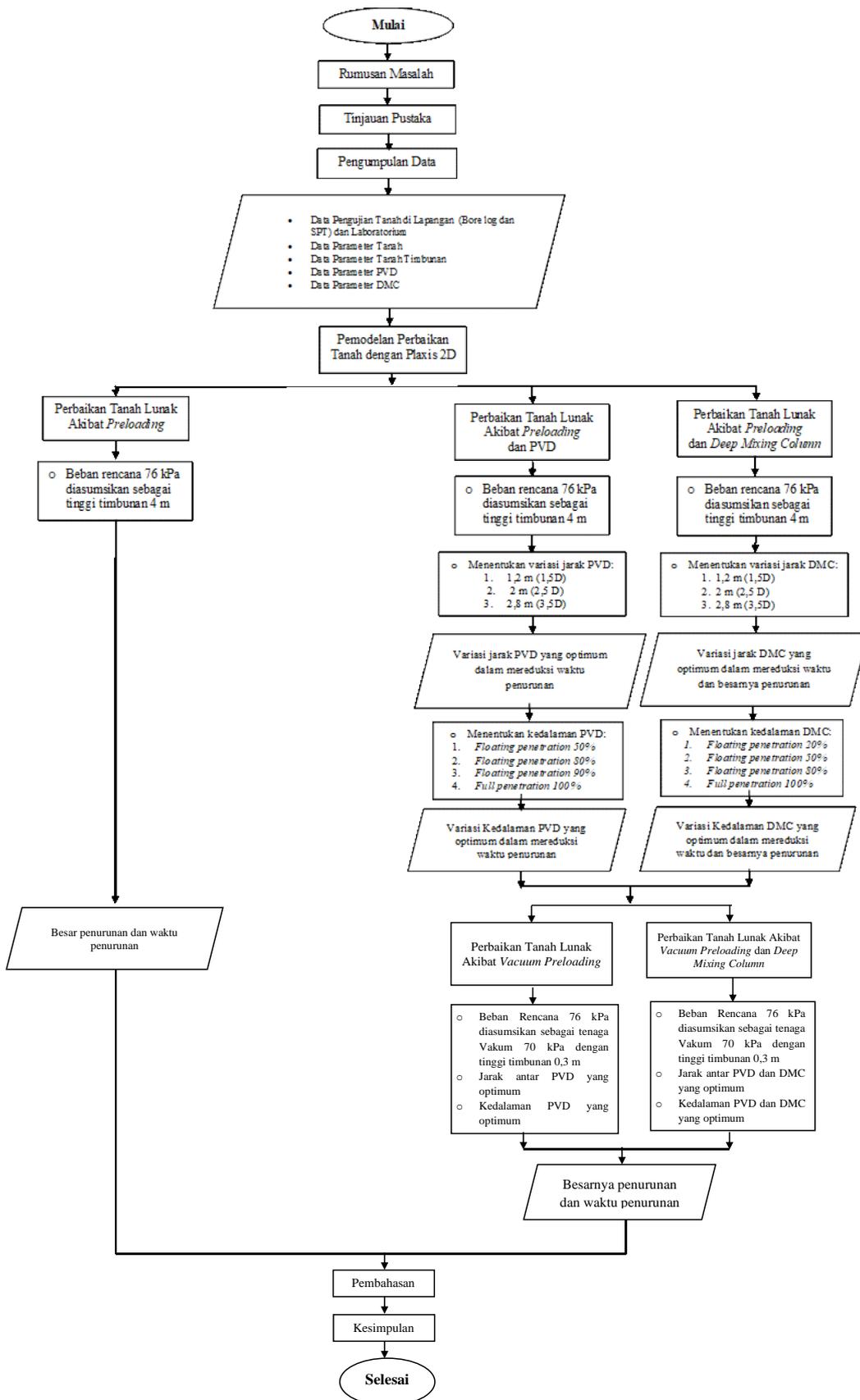


Gambar 4. Skema perbaikan dengan *Deep Mixing Column* (Han, 2015)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan mulai dari perumusan masalah, pengumpulan tinjauan Pustaka yang mencakup studi penelitian sebelumnya, website, jurnal – jurnal penelitian terdahulu, aturan – aturan, buku – buku dan paper yang sesuai dengan topik penelitian ini. Kemudian pengumpulan data yang dibutuhkan, data yang dibutuhkan pada penelitian ini meliputi data korelasi *deep mixing column* dan tanah timbunan serta data tanah kondisi eksisting yang merupakan data korelasi hasil penyelidikan tanah di lapangan yaitu dengan uji *Standar Penetration Test* (SPT) yang dilakukan di kawasan Gedebage, Bandung.

Setelah proses pengumpulan data dilakukan pemodelan menggunakan program Plaxis 2D dengan memberikan tekanan yang sama pada setiap metode perbaikan yaitu sebesar 76 kPa agar dapat mengetahui perbedaan karakteristik dari masing-masing metode dengan pemberian beban yang sama. Tekanan sebesar 76 kPa merupakan beban rencana kompleks perumahan yang akan dibangun pada kawasan yang akan dilakukan pada penelitian ini. Metode yang pertama dilakukan pemodelan pada metode *preloading* hingga mendapatkan waktu dan besar penurunan konsolidasi. Selanjutnya, memodelkan variasi jarak dan kedalaman *prefabricated vertical drain* pada metode *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*, memodelkan variasi jarak dan kedalaman *deep mixing column* pada metode *preloading* kombinasi *deep mixing column*, dari pemodelan-pemodelan tersebut didapatkan waktu dan besar penurunan hingga diperoleh hasil spasi jarak serta kedalaman *prefabricated vertical drain* dan *deep mixing column* yang optimum dalam mereduksi waktu penurunan dari beberapa variasi yang telah dimodelkan. Optimum yang dimaksud ialah optimum dari segi efektif dalam mereduksi waktu penurunan dan efisien dalam penggunaan *prefabricated vertical drain* maupun *deep mixing column*. Setelah mendapatkan hasil spasi jarak serta kedalaman *prefabricated vertical drain* dan *deep mixing column* yang optimum dilakukan pemodelan kembali dengan metode *vacuum preloading* dan *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* menggunakan tekanan yang sama dibagi kedalam tekanan vakum sebesar 70 kPa dan tekanan timbunan sebesar 6 kPa. Pada metode tersebut menggunakan spasi jarak dan kedalaman *prefabricated vertical drain* maupun *deep mixing column* yang optimum dari hasil pemodelan yang sudah dilakukan sebelumnya hingga diperoleh waktu dan besarnya penurunan konsolidasi. Kemudian dilakukan analisis dan pembahasan mengenai pengaruh beberapa metode perbaikan tanah yang telah dilakukan.



Gambar 5. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini menggunakan data tanah berdasarkan data studi kasus yang berlokasi di kawasan Gedebage, Bandung. Tanah pada kawasan tersebut dikategorikan sebagai tanah lunak yang dimana pada hasil uji lapangan *Standar Penetration Test* memiliki nilai N-SPT yang rendah dengan nilai < 5 . Data parameter *deep mixing column* dan tanah timbunan menggunakan korelasi sesuai dengan beberapa referensi yang diambil dari beberapa penelitian terdahulu. Adapun data parameter tanah, *deep mixing column* dan parameter tanah timbunan yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Parameter tanah lunak

| Korelasi Parameter | | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| Kedalaman (m) | Lapisan 1 0 - 26 | Lapisan 2 26 - 27,1 | Lapisan 3 27,1 - 30,7 | Lapisan 4 30,7 - 32 | Lapisan 5 32 - 40,5 | Unit |
| Klasifikasi Tanah | CH - Clay High Plasticity | SP - Poorly Graded Sand | CH - Clay High Plasticity | SW - Well Graded Sand | SW - Well Graded Sand | - |
| Soil Model | Hardening Soil | Hardening Soil | Hardening Soil | Hardening Soil | Hardening Soil | - |
| Drainage Type | Undrained A | Drained | Undrained A | Drained | Drained | - |
| N-SPT | 3 | 4 | 5 | 30 | 17 | - |
| Konsistensi | Soft | Loose | Medium stiff | Medium Dense | Medium Dense | - |
| Yunsat | 12 | 17 | 16 | 20 | 19 | kN/m ³ |
| Ysat | 12,5 | 18 | 17 | 21 | 20 | kN/m ³ |
| E50 ref | 1200 | 3064 | 2000 | 22980 | 13022 | kN/m ² |
| Eoed ref | 1200 | 3064 | 2000 | 22980 | 13022 | kN/m ² |
| Eur | 3600 | 9192 | 6000 | 68940 | 39066 | kN/m ² |
| c' | 5 | 1 | 5 | 1 | 1 | kN/m ² |
| Friction Angle θ' | 23,62 | 27,88 | 25 | 41,5 | 36,2 | ° |
| Kx | $8,64 \times 10^{-5}$ | $8,64 \times 10^{-3}$ | $8,64 \times 10^{-4}$ | 0,864 | 0,864 | m/day |
| Ky | $8,64 \times 10^{-5}$ | $8,64 \times 10^{-3}$ | $8,64 \times 10^{-4}$ | 0,864 | 0,864 | m/day |

Tabel 2. Parameter tanah timbunan

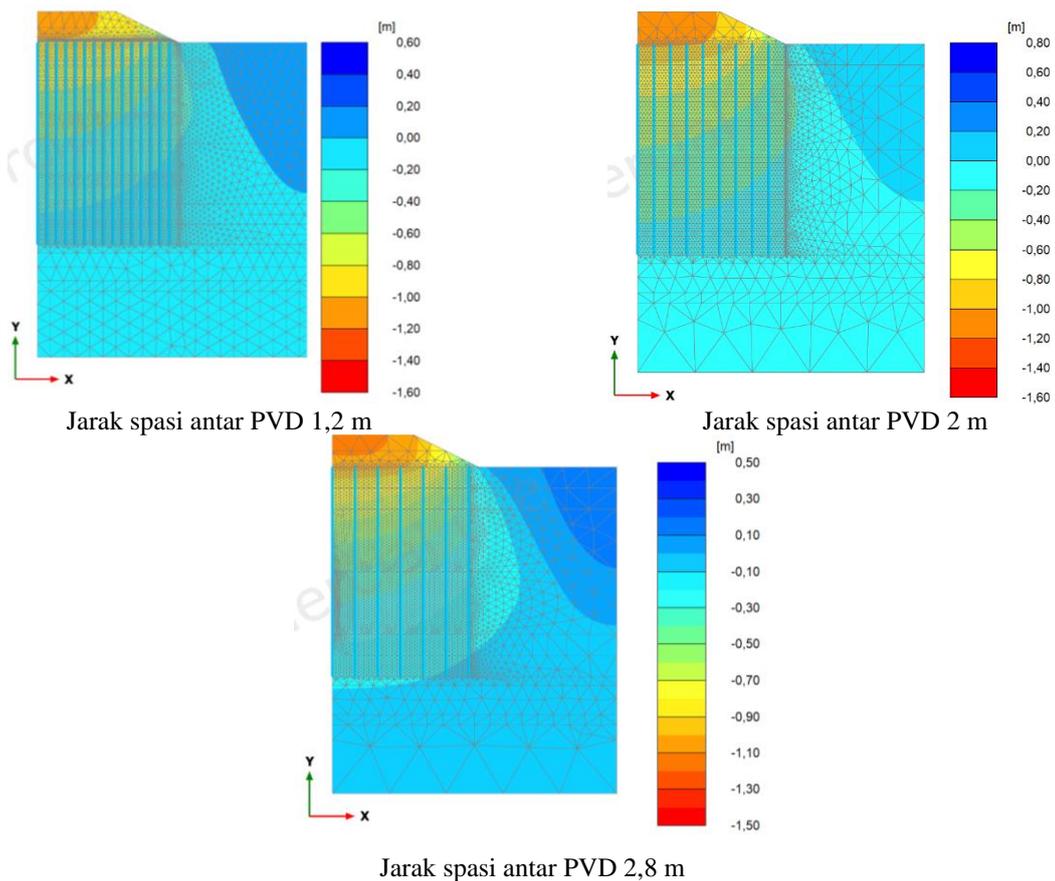
| Parameter | Embankment | Unit |
|--------------------------|----------------|-------------------|
| Model Type | Hardening soil | |
| Drainage type | Drainage | - |
| c' | 10 | kPa |
| Friction angle θ' | 35 | ° |
| Yunsat | 19 | kN/m ³ |
| Ysat | 20 | kN/m ³ |
| E50 ref | 10000 | kN/m ² |
| Eoed ref | 10000 | kN/m ² |
| Eur | 30000 | kN/m ² |
| Kx | 0,864 | m/day |
| Ky | 0,864 | m/day |

Tabel 3. Parameter *deep mixing column*

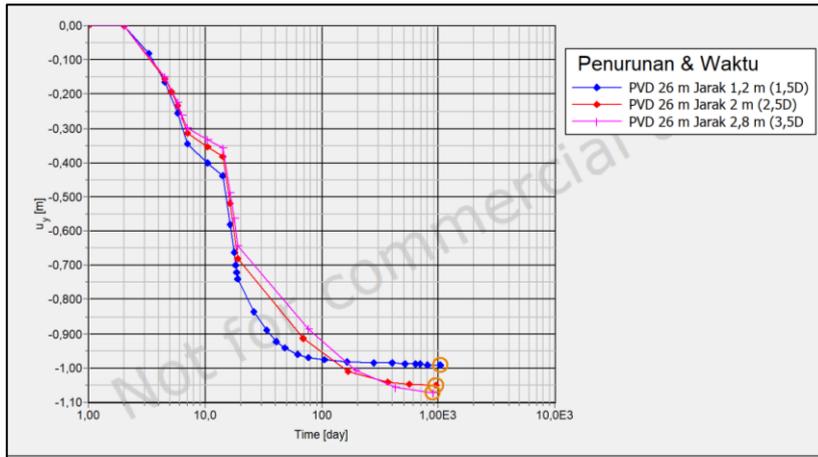
| DMC (<i>lime-cement</i>) | |
|----------------------------------|-----------------------|
| <i>Model Type</i> | <i>Linear Elastic</i> |
| <i>Drainage type</i> | <i>Non porous</i> |
| Cu | 300 |
| <i>Yunsat (kN/m³)</i> | 14,4 |
| <i>Poisson Ratio (v)</i> | 0,2 |
| <i>E ref (kN/m²)</i> | 60000 |

Hasil Pemodelan Perencanaan Spasi Jarak dan kedalaman *Prefabricated Vertical Drain*

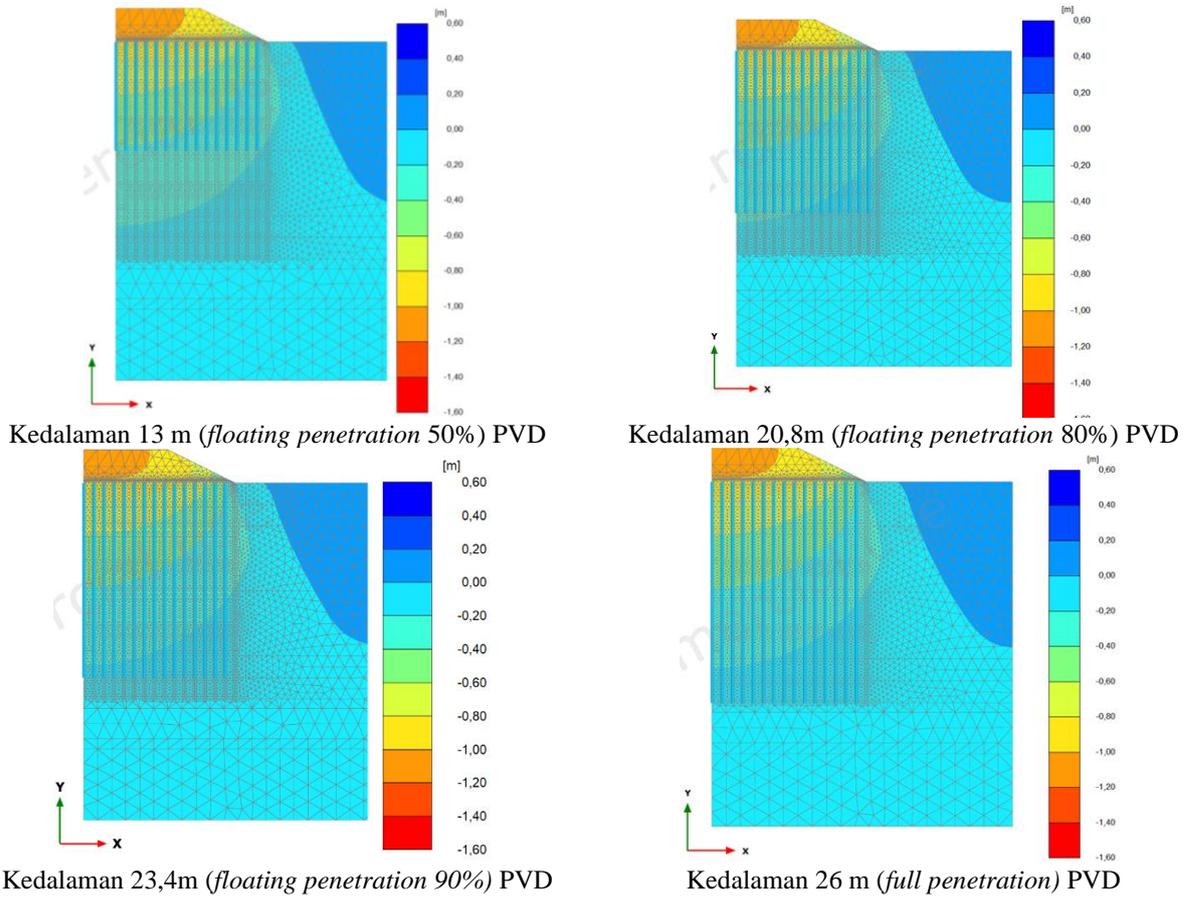
Pada tahap ini dilakukan pemodelan perencanaan variasi kedalaman dan spasi jarak antar *prefabricated vertical drain* (PVD). Variasi yang dilakukan pada kedalaman *floating penetration 50%* (13 m), *floating penetration 80%* (20,8 m), *floating penetration 90%* (23,4 m) dan *full penetration* (26 m) dari kedalaman lapisan tanah lempung lunak sedalam 26 m serta spasi jarak antar *prefabricated vertical drain* yang digunakan sebesar 1,5D, 2,5D dan 3,5D dengan D sebesar 0,8 m atau spasi jarak yang digunakan sebesar 1,2 m, 2 m, 2,8 m. Diperoleh hasil spasi jarak 1,5 D atau sebesar 1,2 m dengan kedalaman *floating penetration 80%* sebagai jarak dan kedalaman *prefabricated vertical drain* yang optimum dalam mereduksi waktu penurunan, karena pada jarak dan kedalaman tersebut *prefabricated vertical drain* efektif serta efisien dalam penggunaannya. Adapun hasil pemodelan yang telah dilakukan dapat dilihat sebagai berikut.



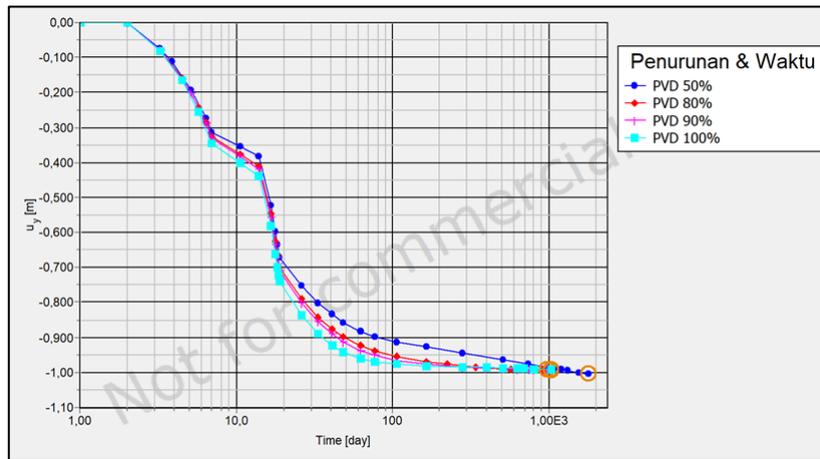
Gambar 6. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi variasi jarak PVD



Gambar 7. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi jarak PVD



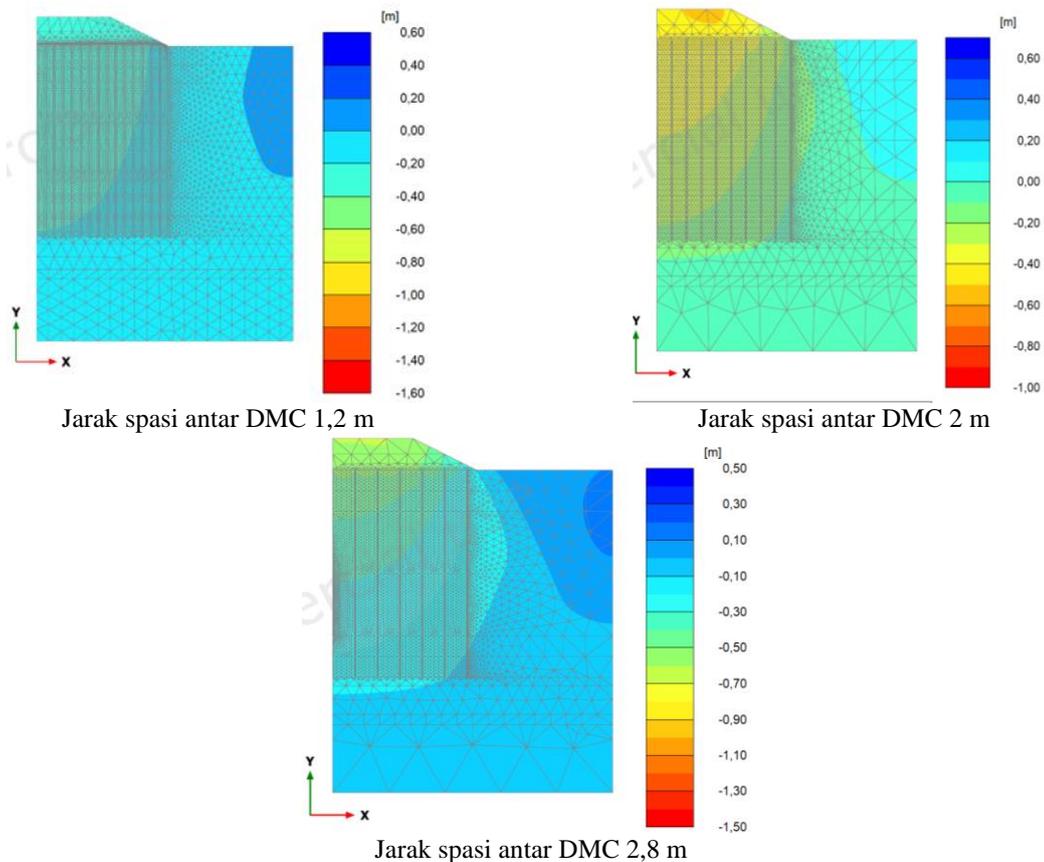
Gambar 8. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi variasi kedalaman PVD



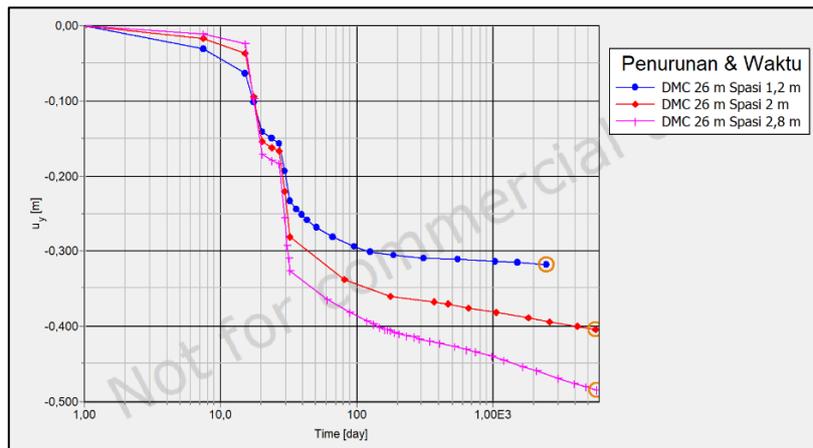
Gambar 9. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi kedalaman PVD

Hasil Pemodelan Perencanaan Spasi Jarak dan Kedalaman *Deep Mixing Column*

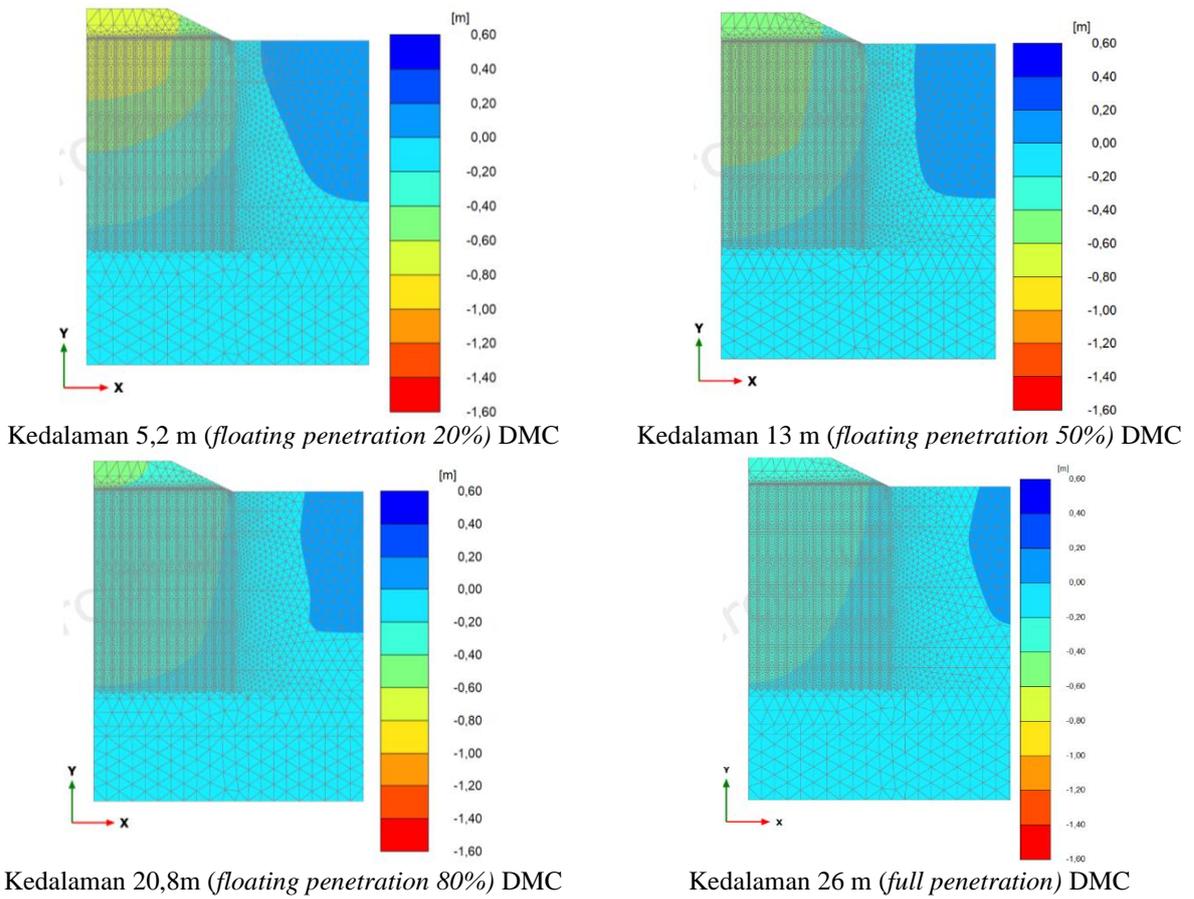
Pada tahap ini dilakukan pemodelan perencanaan variasi kedalaman dan Spasi jarak antar *deep mixing column* (DMC). Variasi yang dilakukan pada kedalaman *floating penetration* 20% (5,2 m), *floating penetration* 50% (13 m), *floating penetration* 80% (20,8 m) dan *full penetration* (26 m) dari kedalaman lapisan tanah lempung lunak sedalam 26 m serta spasi jarak antar *deep mixing column* yang digunakan sebesar 1,5D, 2,5D dan 3,5D atau spasi jarak yang digunakan sebesar 1,2 m, 2 m, 2,8 m. Diperoleh hasil spasi jarak 1,5 D atau sebesar 1,2 m dengan kedalaman *floating penetration* 80% sebagai jarak dan kedalaman *deep mixing column* yang optimum dalam mereduksi waktu dan besarnya penurunan, karena pada jarak dan kedalaman tersebut *deep mixing column* efektif serta efisien dalam penggunaannya. Adapun hasil pemodelan yang telah dilakukan dapat dilihat sebagai berikut.



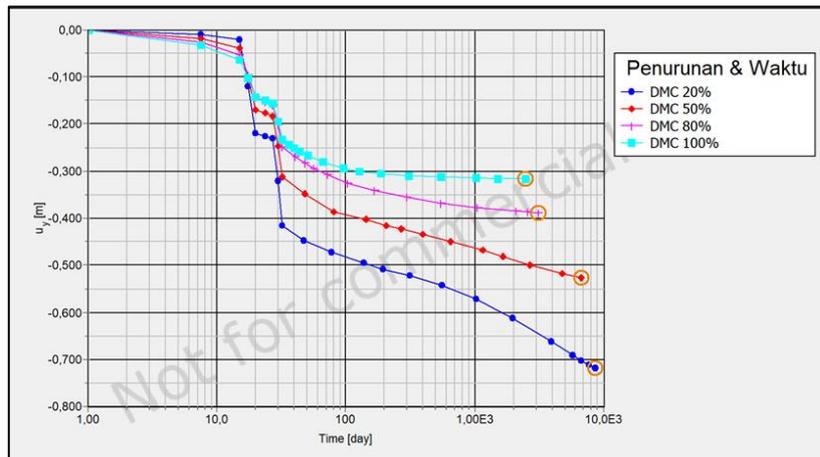
Gambar 10. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi variasi jarak DMC



Gambar 11. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi jarak DMC



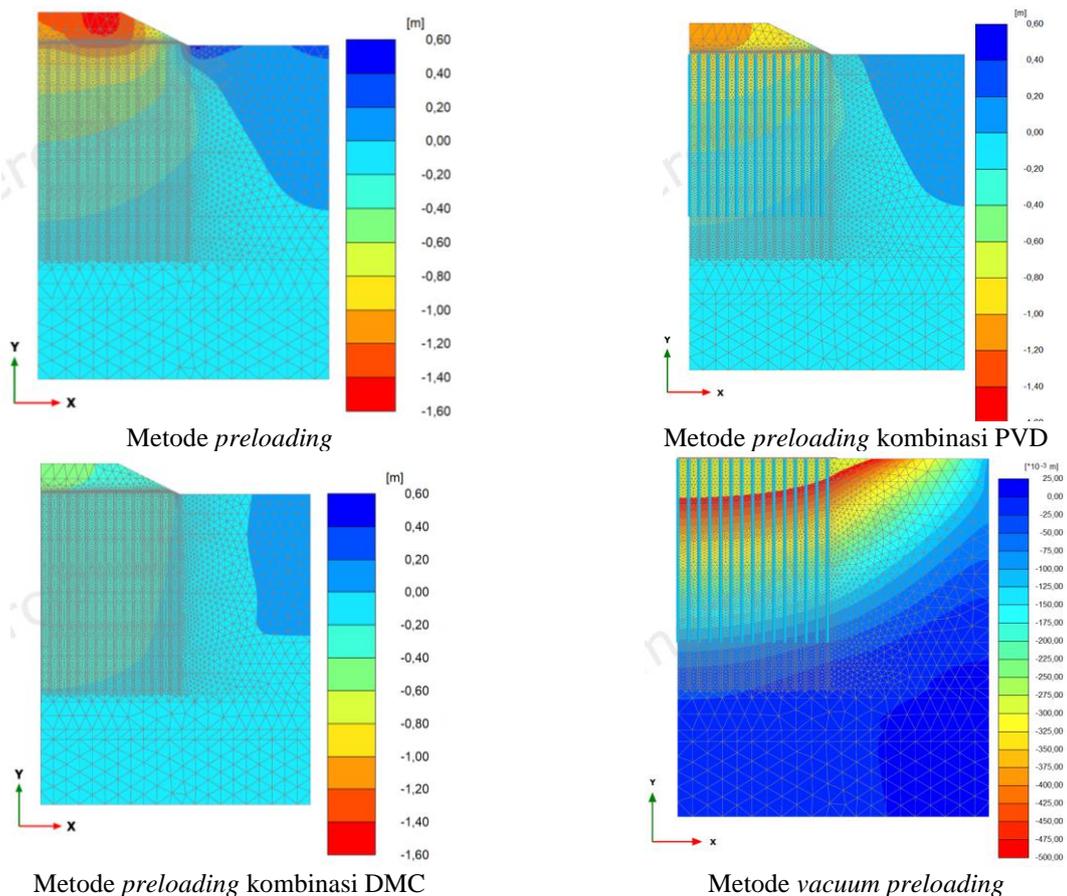
Gambar 12. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi variasi kedalaman DMC



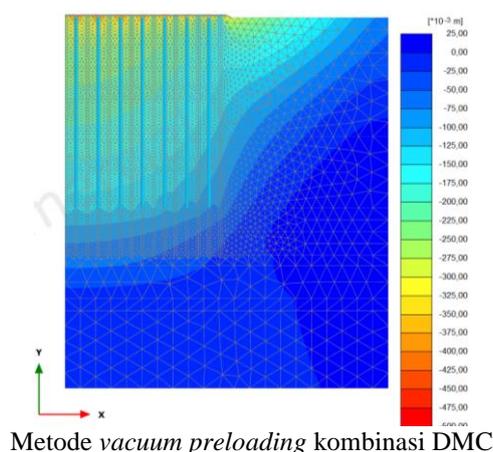
Gambar 13. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi kedalaman DMC

Hasil Perbandingan Penurunan dan Waktu dengan Beberapa Metode Perbaikan

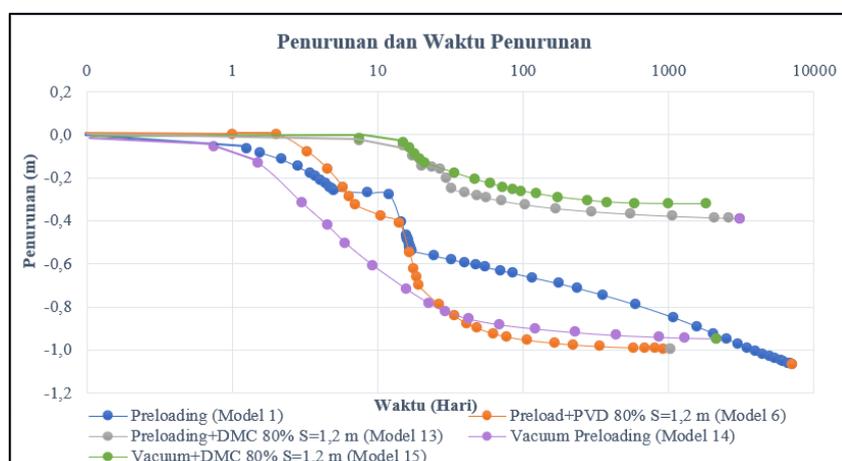
Berdasarkan hasil pemodelan perbaikan tanah dengan memberikan beban yang sama sebesar 76 kPa pada setiap metode perbaikan meliputi metode *preloading*, *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain* (PVD), *preloading* kombinasi *deep mixing Column* (DMC), *vacuum preloading* dan *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* (DMC) yang dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 14. Deformasi tanah dengan beberapa metode perbaikan tanah



Gambar 14 (lanjutan). Deformasi tanah dengan beberapa metode perbaikan tanah



Gambar 15. Grafik perbandingan hasil pemodelan dengan berbagai macam metode perbaikan tanah

Tabel 4. Rekapitulasi hasil pemodelan menggunakan Plaxis 2D

| Model | Metode | Variasi Kedalaman | Variasi Jarak D= 0,8 m | Penurunan (m) | Waktu (Hari) | Persentase Reduksi Penurunan (%) | Persentase Reduksi Waktu (%) |
|-------|---------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1 | <i>Preloading</i> | - | - | 1,066 | 7082 | - | - |
| 2 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 100%</i> | S= 1,5 D | 0,981 | 165 | 7,97% | 97,67% |
| 3 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 100%</i> | S= 2,5 D | 1,042 | 365 | 2,25% | 94,85% |
| 4 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 100%</i> | S= 3,5 D | 1,058 | 427 | 0,75% | 93,97% |
| 5 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 50%</i> | S= 1,5 D | 0,962 | 513 | 9,76% | 92,76% |
| 6 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 80%</i> | S= 1,5 D | 0,968 | 165 | 9,19% | 97,67% |
| 7 | <i>Preloading</i> dan PVD | <i>Penetration 90%</i> | S= 1,5 D | 0,977 | 165 | 8,35% | 97,67% |
| 8 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration 100%</i> | S= 1,5 D | 0,309 | 307 | 71,01% | 95,67% |
| 9 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration 100%</i> | S= 2,5 D | 0,375 | 662 | 64,82% | 90,65% |

Tabel 4 (lanjutan). Rekapitulasi hasil pemodelan menggunakan Plaxis 2D

| Model | Metode | Variasi Kedalaman | Variasi Jarak D= 0,8 m | Penurunan (m) | Waktu (Hari) | Persentase Reduksi Penurunan (%) | Persentase Reduksi Waktu (%) |
|-------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|
| 10 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration</i> 100% | S= 3,5 D | 0,438 | 919 | 58,91% | 87,02% |
| 11 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration</i> 20% | S= 1,5 D | 0,612 | 1978 | 42,59% | 72,07% |
| 12 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration</i> 50% | S= 1,5 D | 0,482 | 1664 | 54,78% | 76,50% |
| 13 | <i>Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration</i> 80% | S= 1,5 D | 0,358 | 318 | 66,14% | 94,96% |
| 14 | <i>Vacuum Preloading</i> | <i>Penetration</i> 80% | S= 1,5 D | 0,918 | 121 | 13,88% | 98,28% |
| 15 | <i>Vacuum Preloading</i> dan DMC | <i>Penetration</i> 80% | S= 1,5 D | 0,274 | 123 | 74,23% | 98,26% |

Berdasarkan grafik pada Gambar dan Tabel di atas dapat disimpulkan bahwa setelah adanya perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi PVD, *vacuum preloading*, *preloading* kombinasi DMC dan *vacuum preloading* kombinasi DMC terjadi perubahan yang cukup signifikan terhadap besar penurunan dan lama waktu penurunan yang terjadi. Metode *vacuum preloading* merupakan metode yang paling baik dalam mereduksi waktu penurunan, metode tersebut membutuhkan waktu penurunan selama 121 hari, sedangkan metode *preloading* kombinasi PVD membutuhkan waktu selama 165 hari, lalu metode *vacuum preloading* kombinasi DMC membutuhkan waktu lebih lambat dua hari dibandingkan metode *vacuum preloading* atau selama 123 hari, sedangkan untuk metode yang paling lambat dalam mereduksi waktu penurunan terdapat metode *preloading* dengan waktu penurunan selama 7082 hari. Dalam mereduksi besar penurunan metode *vacuum preloading* kombinasi DMC merupakan metode yang paling baik dibandingkan metode lainnya, karena penurunan yang terjadi hanya sebesar 0,274 m, sedangkan metode terdahulunya yaitu *preloading* kombinasi DMC penurunan yang terjadi sebesar 0,361 m, metode *preloading* kombinasi PVD terjadi penurunan sebesar 0,968 m. Metode *vacuum preloading* merupakan metode yang paling baik dalam mereduksi waktu penurunan namun masih kurang baik dalam mereduksi besarnya penurunan, metode *preloading* kombinasi DMC baik dalam mereduksi besarnya penurunan namun masih kurang baik dalam mereduksi waktu penurunan, sedangkan metode *vacuum preloading* kombinasi DMC sangat baik dalam mereduksi besarnya penurunan dari segi reduksi waktu penurunan hanya memiliki selisih 2 hari dibandingkan metode *vacuum preloading*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Setelah dilakukan penelitian perbaikan tanah lunak dengan beberapa kombinasi perbaikan tanah menggunakan *preloading*, *vacuum preloading*, *prefabricated vertical drain* dan *deep mixing column* menggunakan Plaxis 2D pada bahasan sebelumnya, diperoleh kesimpulan mengenai penelitian ini sebagai berikut:

1. Perbaikan tanah akibat *preloading* saja tidak efektif dalam memperbaiki tanah lunak karena membutuhkan waktu tempuh hingga derajat konsolidasi 90% selama 7082 hari dengan penurunan sebesar 1,066 m.
2. Setelah dilakukan pemodelan kedalaman dan jarak PVD yang paling optimum diperoleh kombinasi kedalaman *floating penetration* 80% dan jarak 1,2 m antar PVD karena pada kombinasi tersebut efektif serta efisien dalam mereduksi waktu penurunan dengan waktu tempuh penurunan selama 165 hari dengan besar penurunan sebesar 0,968 m, persentase reduksi waktu penurunan sebesar 97,67%.
3. Setelah dilakukan pemodelan kedalaman dan jarak DMC yang paling optimum diperoleh kombinasi kedalaman *floating penetration* 80% dan jarak 1,2 m antar DMC karena pada kombinasi tersebut efektif serta efisien dalam mereduksi waktu penurunan dengan waktu tempuh penurunan selama 318 hari dan besar penurunan sebesar 0,358 m, persentase reduksi besar penurunan sebesar 64,35% dan persentase waktu penurunan sebesar 95,51%.
4. Perbaikan tanah menggunakan metode *vacuum preloading* dapat mempercepat penurunan dengan waktu tempuh penurunan selama 121 hari dengan persentase reduksi waktu penurunan 98,28%.
5. Perbaikan tanah menggunakan metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* dapat mempercepat waktu serta mengurangi besar penurunan dengan waktu tempuh penurunan selama 123 hari dan besar penurunan sebesar 0,274 m dengan efektivitas dalam mereduksi besar penurunan sebesar 74,23% dan dapat mereduksi waktu penurunan sebesar 98,26%.

6. Metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column* efektif dalam mengurangi besarnya penurunan dibandingkan dengan metode *preloading*, *vacuum preloading*, *preloading* kombinasi *deep mixing column* maupun *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*. Namun jika dari segi waktu penurunan metode *vacuum preloading* masih lebih cepat dari pada metode *vacuum preloading* kombinasi *deep mixing column*.

Saran

Berikut merupakan saran mengenai penelitian penelitian ini:

1. Melakukan percobaan di lapangan agar hasilnya dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan *software*.
2. Melakukan analisis mengenai tekanan air pori *excess*.
3. Perlu mempertimbangkan efektivitas tenaga *vacuum* yang akan digunakan.
4. Perlu dilakukan pemodelan berbasis elemen hingga 3D agar hasil pemodelan yang dilakukan dapat mendekati dengan kondisi yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, R., & Wulandari, S. (2020). Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Prefabricated Vertical Drain (PVD). *Politeknologi*, 197-206.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*. <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>.
- Das, B. M. (1995). *Principles of Geotechnical Engineering*. The University of Texas.
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Kuswanda, W. P. (2016). Perbaikan Tanah Lempung Lunak Metoda Preloading Pada Pembangunan Infrastruktur Transportasi di Pulau Kalimantan. *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik 2016* (hal. 188-207). Banjarmasin: PS S1 Teknik Sipil Unlam.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation*. Taylor & Francis Group.
- Muis, A., & Wulan, A. (2019). Perbaikan Tanah dengan Kombinasi Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain Pada Daerah Sekitar Jembatan Tabalong Kalimantan Selatan. *Prosiding Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan "Inovasi & Intergrasi Dalam Perkembangan Infrastruktur"* (hal. 277-285). Jakarta: Universitas Gunadarma Kampus Graha Simaputpang.
- Permatasari, W. Y., & Hamdhan, I. N. (2017). Pemodelan 3D Pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Deep Mixing Column. *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 26-35.
- Porbaha, A. (2015). State of the art in deep mixing technology: part I. *ICE Publishing*, 81-92.
- Saowapakpiboon, J., Bergado, D. T., Youwai, S., Chai, J. C., Wanthong, P., & Voottipruex, P. (2010). Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs). *Elsevier Ltd*, 1-11.
- Siska, H. N., & Yakin, Y. A. (2016). Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanis Tanah Lunak. *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 44-55.
- Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019). Perencanaan Preloading dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang. *Potensi Jurusan Sipil Politeknik*, 10-18.