

PEMODELAN PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN *PRELOADING*, *DEEP MIXING COLUMN*, DAN *STONE COLUMN*

Indra Noer Hamdhan^{1*} dan Muchamad Ansharie Raasyid¹

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

Masuk: 02-07-2025, revisi: 18-08-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-08-2025

ABSTRACT

Soft soil is one of the soils with low bearing capacity and high compressibility. One of the soft soil improvement methods that can be used is Deep Mixing Column and Stone Column. This study combines preloading with Deep Mixing Column and Stone Column, which aims to determine the most effective repair method in reducing settlement and consolidation time. As well as knowing the effect of depth and distance between rectangular patterned columns on settlement and consolidation time using Plaxis 2D. The modeled column is 0.8 m in diameter with variation of distance 1D; 2D; 5D; and 10D and variation of depth 25%; 50%; 75%; and 100% of the soft soil thickness. The results showed that the Deep Mixing Column was more effective in reducing the settlement, with an effectiveness of 38%-80%. Meanwhile, Stone Column is more effective in reducing consolidation time, with an effectiveness of 53%-99%. The deeper and more closely spaced the Deep Mixing Column and Stone Column are applied, then the smaller the decline and the shorter the consolidation time.

Keywords: Soft Soil; Deep Mixing Column; Stone Column; Preloading; Consolidation

ABSTRAK

Tanah lunak merupakan salah satu tanah dengan daya dukung rendah dan memiliki pemampatan yang besar. Metode perbaikan tanah lunak yang dapat digunakan salah satunya *Deep Mixing Column* dan *Stone Column*. Penelitian ini mengkombinasikan *preloading* dengan *Deep Mixing Column* maupun *Stone Column*, yang bertujuan untuk mengetahui metode perbaikan yang paling efektif dalam mereduksi penurunan dan waktu konsolidasi. Serta mengetahui pengaruh kedalaman dan jarak antar kolom berpola *rectangular* terhadap penurunan dan waktu konsolidasi dengan menggunakan Plaxis 2D. Kolom yang dimodelkan berdiameter 0,8 m dengan variasi jarak 1D; 2D; 5D; dan 10D serta variasi kedalaman 25%; 50%; 75%; dan 100% dari tebal tanah lunaknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Deep Mixing Column* lebih efektif dalam mereduksi penurunan, dengan efektifitas 38%-80%. Sedangkan *Stone Column* lebih efektif dalam mereduksi waktu konsolidasi, dengan efektifitas 53%-99%. Semakin dalam dan rapat spasi *Deep Mixing Column* maupun *Stone Column* yang diaplikasikan, maka penurunan semakin kecil serta waktu konsolidasi semakin singkat.

Kata kunci: Tanah Lunak; *Deep Mixing Column*; *Stone Column*; *Preloading*; Konsolidasi

1. PENDAHULUAN

Tanah lunak merupakan salah satu jenis tanah bermasalah yang memiliki daya dukung rendah dan karakteristik pemampatan yang tinggi (Firmansyah et al., 2024). Permasalahan utama yang kerap terjadi pada tanah lunak adalah penurunan (*settlement*) yang signifikan saat tanah dibebani, yang berpotensi mengganggu stabilitas dan keamanan struktur bangunan di atasnya. Oleh karena itu, sebelum pelaksanaan konstruksi, perlu dilakukan perbaikan tanah untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi deformasi.

Beberapa metode perbaikan tanah telah dikembangkan, di antaranya adalah metode *Deep Mixing Column* (DMC) dan *Stone Column* (SC). Kedua teknik ini berfungsi untuk meningkatkan kekuatan geser tanah dan mempercepat proses konsolidasi. Dalam penelitian ini, dilakukan pemodelan perbaikan tanah yang mengombinasikan metode *preloading* dengan DMC dan SC menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dengan pendekatan elemen hingga.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh variasi kedalaman dan jarak antar kolom DMC dan SC terhadap penurunan tanah serta waktu konsolidasi. Dengan memahami kinerja dari setiap variasi, diharapkan dapat diperoleh metode perbaikan tanah yang paling efektif dalam mengurangi penurunan dan mempercepat proses konsolidasi.

Lingkup penelitian ini mencakup pemodelan perbaikan tanah menggunakan *preloading*, *preloading* dikombinasikan dengan DMC, serta *preloading* dikombinasikan dengan SC. Kolom-kolom yang dimodelkan memiliki diameter 0,8 m dengan variasi spasi 1D, 2D, 5D, dan 10D, serta kedalaman 25%, 50%, 75%, dan 100% dari tebal tanah lunak. Pola pemasangan kolom mengikuti susunan *rectangular* dan dianalisis menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D.

Tanah lempung lunak

Tanah lempung lunak termasuk dalam kategori tanah kohesif yang memiliki ukuran butir halus dan permeabilitas rendah (Hamzah, 2023). Karakteristik utama dari jenis tanah ini antara lain adalah tingginya kenaikan kapiler, potensi kembang susut yang signifikan, serta proses konsolidasi yang berlangsung lambat (Hardiyatmo, 2012). Sifat-sifat ini menjadikan tanah lempung lunak tidak stabil bila langsung digunakan sebagai dasar konstruksi tanpa perbaikan terlebih dahulu.

Penurunan tanah

Ketika suatu lapisan tanah menerima beban tambahan, baik dari struktur bangunan maupun timbunan, tanah akan mengalami pemampatan atau kompresi. Pemampatan ini terjadi akibat peningkatan tegangan efektif yang mendorong air pori keluar dari struktur tanah. Pengurangan volume akibat keluarnya air pori tersebut menyebabkan penurunan permukaan tanah atau *settlement*. Tingkat dan laju penurunan sangat bergantung pada karakteristik tanah dan besar beban yang diterapkan.

Preloading

Preloading atau pembebanan awal adalah metode perbaikan tanah yang dilakukan dengan memberikan beban sementara pada permukaan tanah sebelum konstruksi utama dimulai (Setiawan et al., 2023). Tujuannya adalah untuk mempercepat konsolidasi dan mengurangi potensi penurunan yang dapat terjadi setelah struktur dibangun. Beban *preloading* biasanya disesuaikan dengan beban permanen yang akan ditanggung tanah pada masa operasional, dan diaplikasikan dalam jangka waktu tertentu hingga derajat konsolidasi yang diinginkan tercapai.

Deep mixing column

Deep Mixing Column merupakan metode perbaikan tanah yang dilakukan dengan mencampurkan tanah asli dengan bahan pengikat seperti semen atau kapur hingga kedalaman tertentu (Gupta & Kumar, 2023). Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah, serta mengurangi besarnya penurunan. Pencampuran dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu metode kering (*dry method*) dan metode basah (*wet method*) (Kitazume & Terashi, 2013). Metode kering menggunakan pengikat dalam bentuk bubuk, sedangkan metode basah menggunakan campuran cair (*slurry*). Diameter kolom biasanya berkisar antara 0,6 hingga 2,5 meter tergantung metode dan kondisi tanah, dan kedalamannya dapat mencapai hingga 40 meter (Han, 2015). Bahan pengikat berdasarkan jenis tanah menurut SNI 8460:2017 terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Bahan pengikat berdasarkan jenis tanah (SNI 8460:2017)

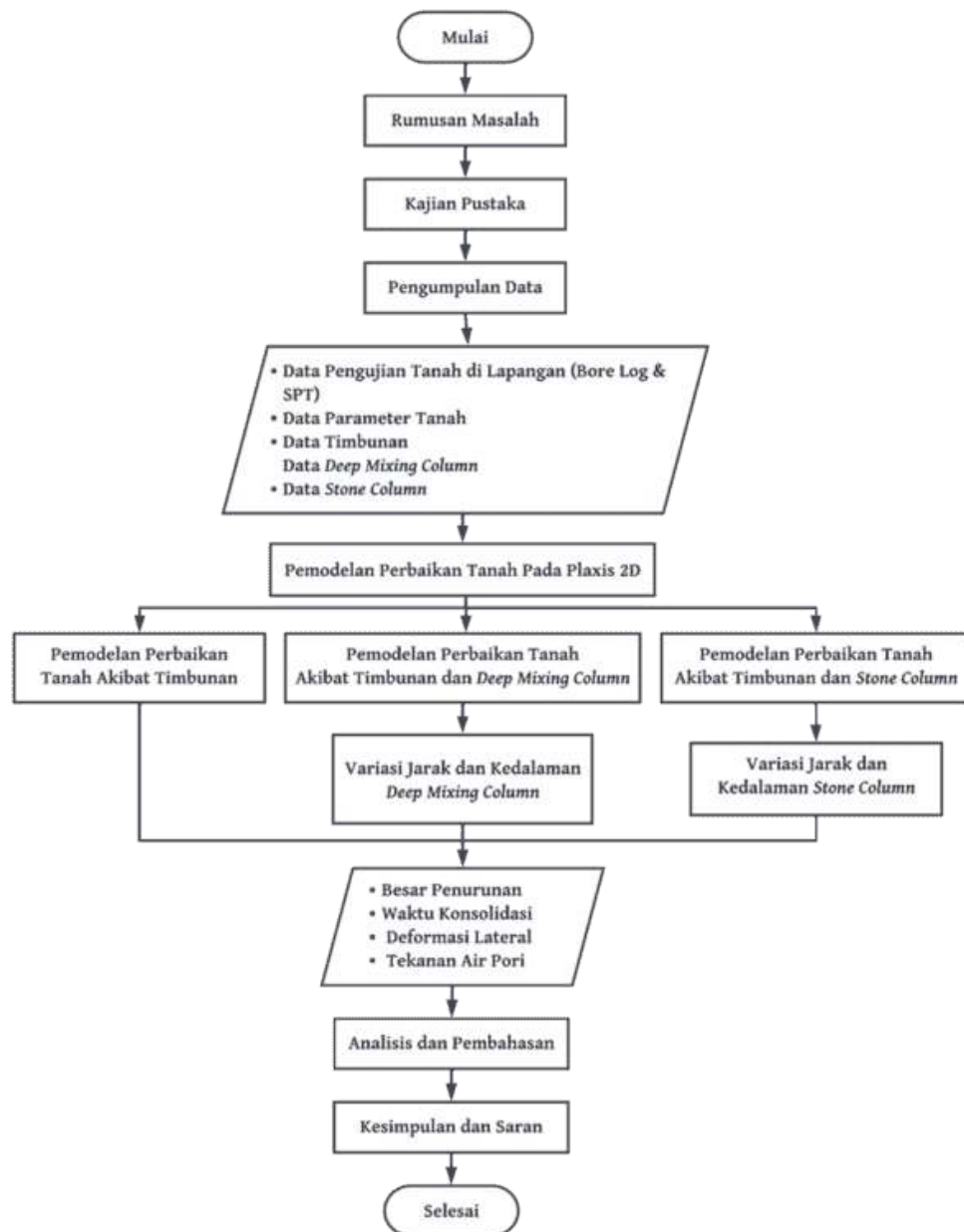
Jenis Tanah	Bahan Pengikat
Lempung	Kapur (<i>quicklime</i>) atau campuran kapur dan semen
Lempung sangat sensitif	Kapur atau campuran kapur dan semen
Lempung organik	Kapur dan semen / semen dan slag/ kapur dan <i>gypsum</i>
Gambut	Semen/semen dan slag/kapur, <i>gypsum</i> , semen
Tanah mengandung sulfat	Semen / semen dan slag
Lanau	Kapur dan semen / semen

Stone Column

Stone Column adalah metode perbaikan tanah dengan memasukkan kolom vertikal dari batu kerikil ke dalam tanah lunak (Gomes & Darjanto, 2022). Kolom ini tidak menggunakan bahan pengikat, melainkan mengandalkan pemadatan melalui getaran untuk menciptakan sistem material komposit antara kolom dan tanah di sekitarnya (Greenwood, 1970). Tujuan dari metode ini adalah meningkatkan kekuatan geser tanah, mengurangi penurunan, serta mempercepat waktu konsolidasi. Selain itu, *Stone Column* juga dapat berfungsi sebagai perkuatan untuk lereng dan timbunan serta mengurangi potensi likuifaksi (Etezzad et al., 2015). Dalam perencanaannya, beberapa faktor penting yang harus diperhatikan antara lain: diameter kolom, rasio area pengganti (*area replacement ratio*), jarak antar kolom, serta zona gangguan (*smear zone*) (Iskandar & Hamdhan, 2016).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis untuk mengevaluasi efektivitas metode perbaikan tanah lunak menggunakan kombinasi *preloading*, *Deep Mixing Column* (DMC), dan *Stone Column* (SC). Tahapan-tahapan yang dilaksanakan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data geoteknik yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil investigasi tanah di kawasan Gedebage, Bandung, Jawa Barat. Data tersebut mencakup log bor, nilai SPT, serta parameter teknis untuk tanah timbunan, *Deep Mixing Column* (DMC), dan *Stone Column* (SC). Parameter-parameter ini digunakan sebagai input dalam pemodelan numerik menggunakan Plaxis 2D. Berikut data parameter tanah, *deep mixing column*, *stone column*, dan parameter tanah timbunan yang dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 2. Parameter tanah lunak

Korelasi Parameter						Unit
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	
Klasifikasi Tanah	CH - Clay High Plasticity	SP - Poorly Graded Sand Hardening	CH - Clay High Plasticity	SW - Well Graded Sand	SW - Well Graded Sand	-
Soil Model	Hardening Soil	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	13	19	16	22	20	kN/m ³
Ysat	14	20	17	23	21	kN/m ³
E50 ref	1200	2451,2	2000	18384	10417,6	kN/m ²
Eoed ref	1200	2451,2	2000	18384	10417,6	kN/m ²
Eur	3600	7353,6	6000	55152	31252,8	kN/m ²
c'	5	1	5	1	1	kN/m ²
Friction Angle ϕ'	26,8	27,85	28,77	41,49	36,18	°
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 3. Parameter tanah timbunan

Parameter	Embankment	Unit
Model Type	Hardening soil	
Drainage type	Drained	-
c'	10	kPa
Friction angle ϕ'	30	°
Yunsat	20	kN/m ³
Ysat	21	kN/m ³
E50 ref	22000	kN/m ²
Eoed ref	22000	kN/m ²
Eur	66000	kN/m ²
Kx	0,864	m/day
Ky	0,864	m/day

Tabel 4. Parameter *deep mixing column*

Model Type	Linear Elastic
Drainage type	Non porous
Cu	300
Yunsat (kN/m ³)	13
Poisson Ratio (ν)	0,2
E ref (kN/m ²)	54000

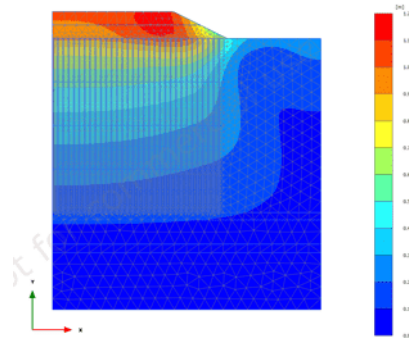
Tabel 5. Parameter *stone column*

Model Type	Hardening soil
Drainage type	Drained
c'	1
Friction angle ϕ'	42
Yunsat (kN/m ³)	20
Ysat	21
E50 ref	54000
Eoed ref	54000
Eur	162000
Kx	8,64

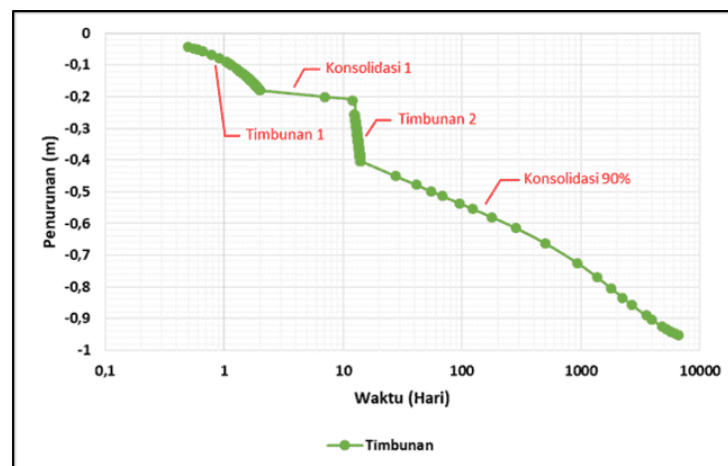
K_y	8,64
-------	------

Hasil pemodelan perbaikan tanah dengan *Preloading*

Pada tahap ini dilakukan penimbunan pertama selama 2 hari, lalu dilakukan konsolidasi pertama selama 10 hari, kemudian tahap penimbunan kedua selama 2 hari, selanjutnya dikonsolidasikan hingga mencapai derajat konsolidasi 90%. Berikut ini hasil pemodelan yang telah dilakukan terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading*

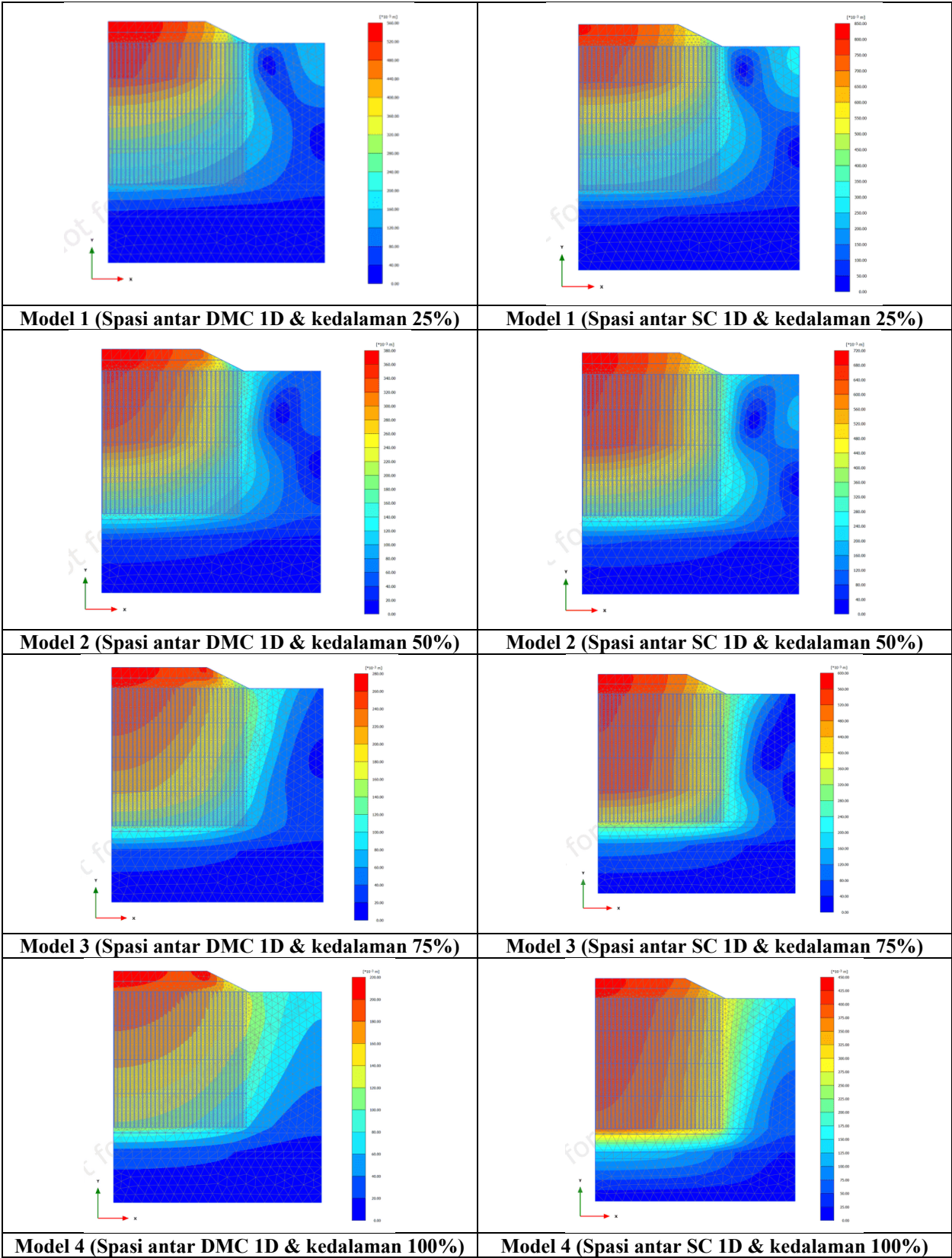


Gambar 3. Grafik hubungan penurunan dan waktu konsolidasi perbaikan tanah dengan metode *preloading*

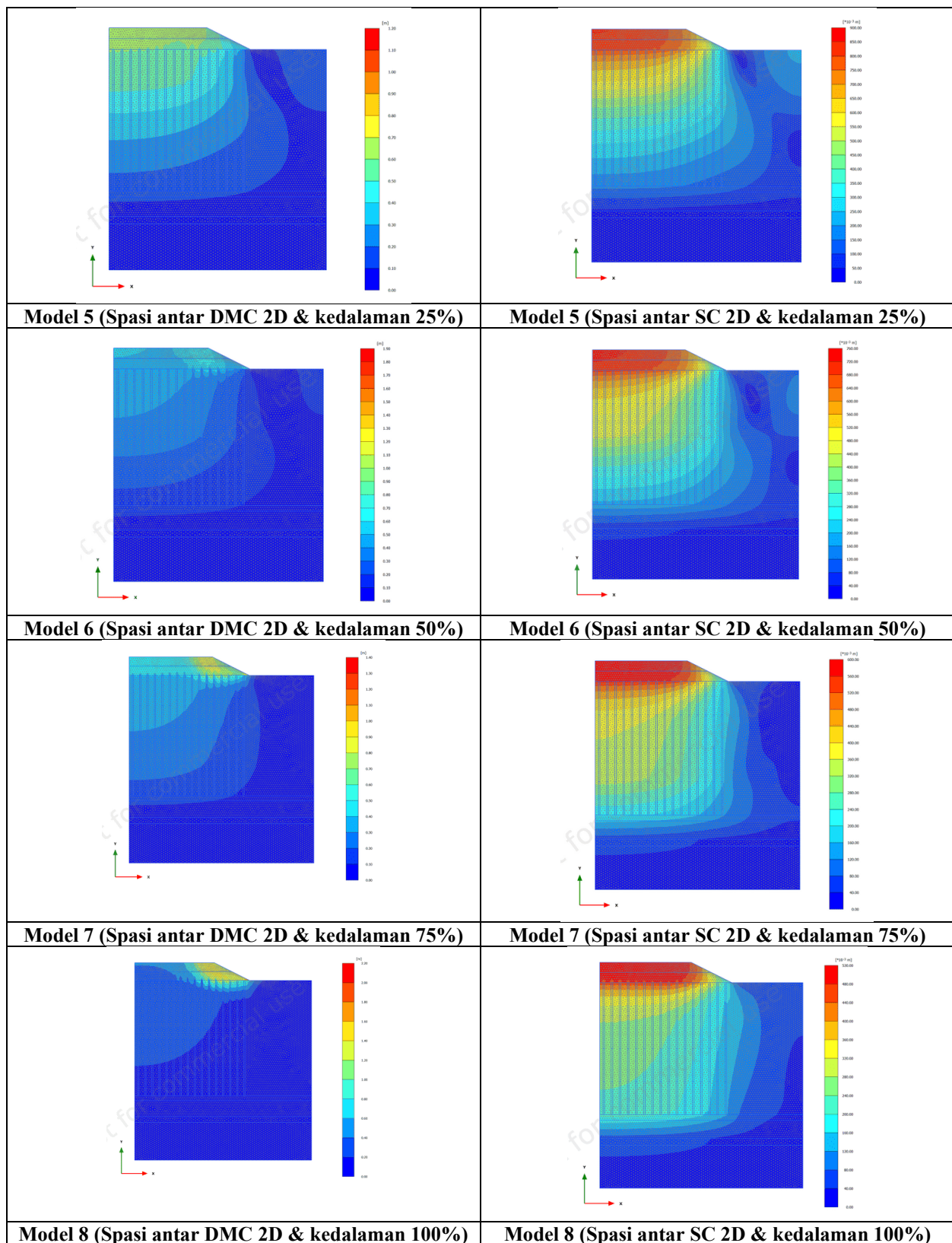
Berdasarkan grafik pada Gambar 3 ketika penimbunan pertama dilakukan terjadi penurunan seketika sebesar 0,19 m. Kemudian timbunan tersebut dibiarkan selama 10 hari dan terjadi konsolidasi dengan penurunan sebesar 0,02 m. Selanjutnya dilakukan penimbunan tahap kedua selama 2 hari, sehingga terjadi penurunan seketika kembali sebesar 0,2 m. Kemudian tanah tersebut dibiarkan hingga tercapai derajat konsolidasi 90%. Berdasarkan grafik pada Gambar 3 tersebut diperoleh penurunan akhir mencapai 0,951 m dengan waktu mencapai 6578 hari.

Hasil pemodelan variasi spasi jarak dan kedalaman *Deep Mixing Column* dan *Stone Column*

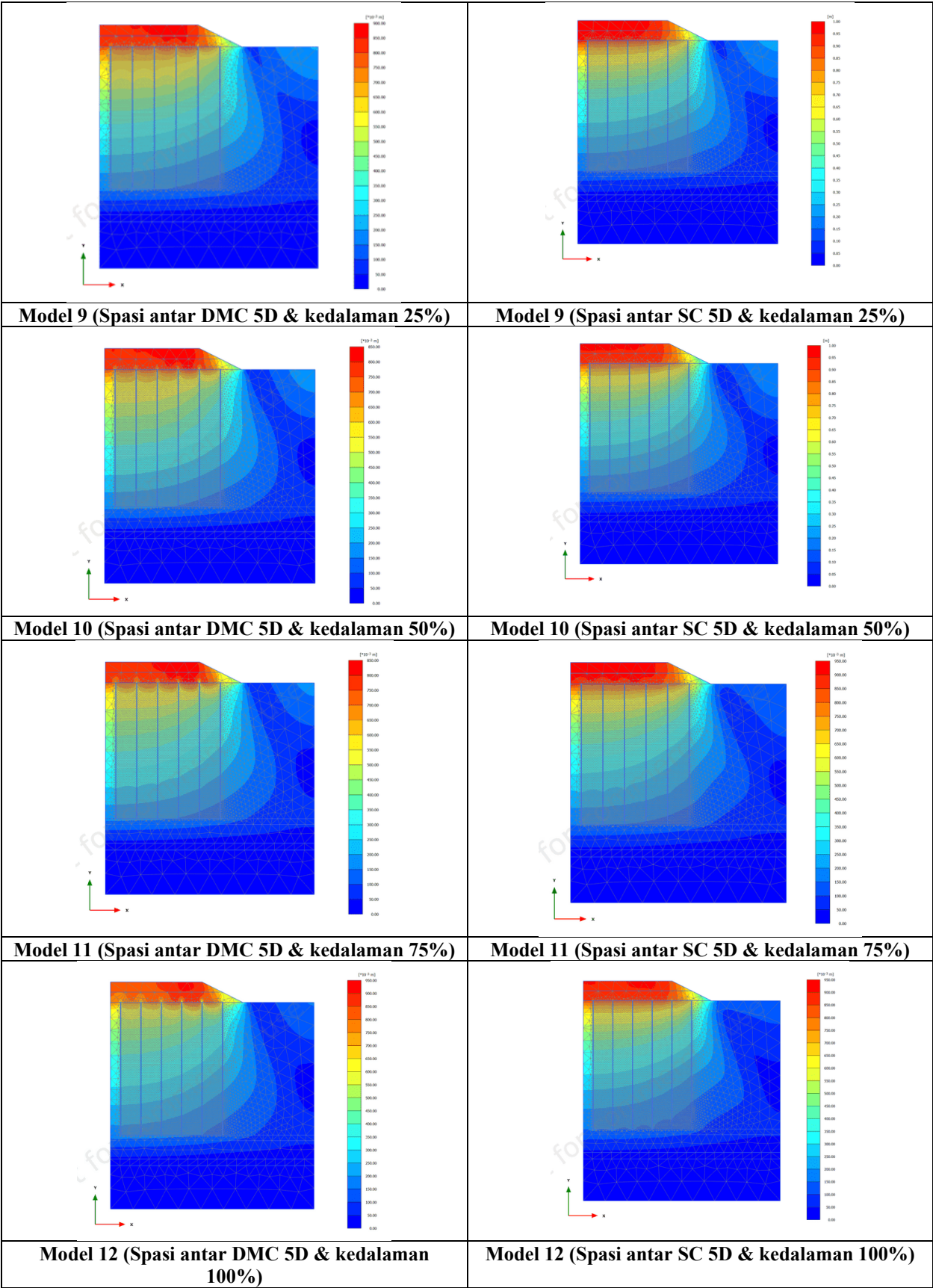
Dalam pemodelan diterapkan variasi kedalaman dan jarak antar *deep mixing column* (DMC) maupun *stone column*. Kedalaman bervariasi mulai dari 25% (6,5 m), 50% (13 m), 75% (19,5 m), dan 100% (26 m) dari kedalaman lapisan tanah lempung lunak. Jarak antar *deep mixing column* maupun *stone column* yang diterapkan yakni 1D (0,8 m), 2D (1,6 m), 5D (4 m), dan 10D (8 m). Berikut ini hasil pemodelan yang telah dilakukan.



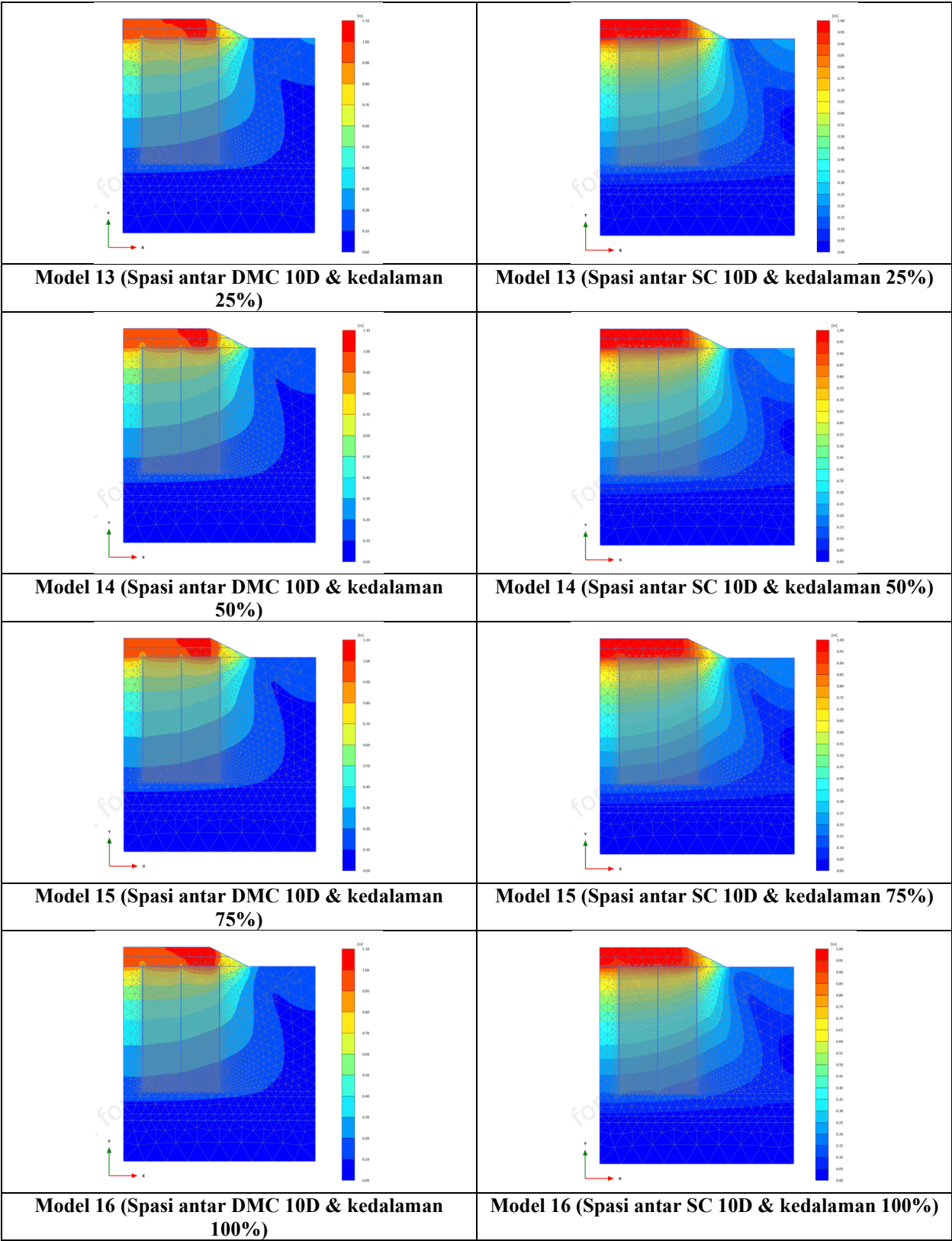
Gambar 4. Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* dan *deep mixing column* serta *preloading* dengan *stone column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman



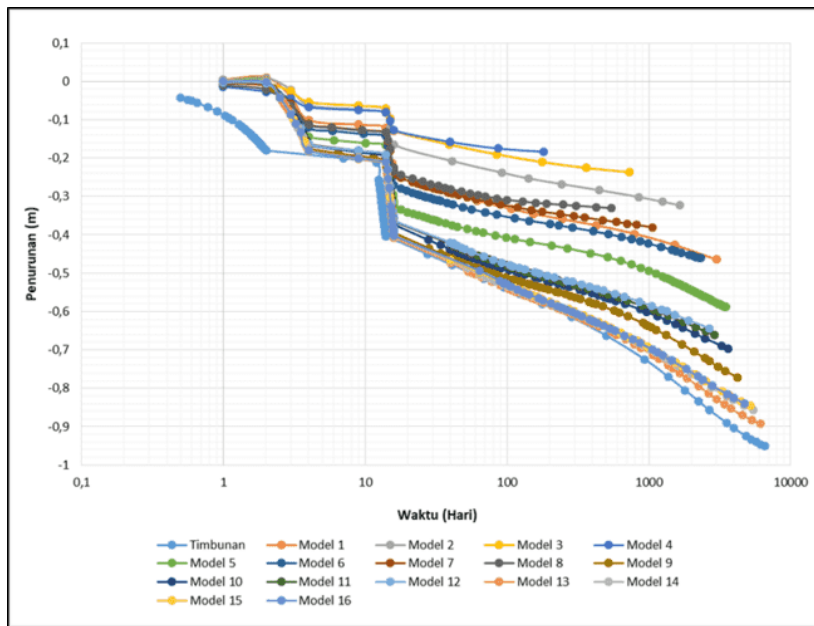
Gambar 4 (lanjutan). Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* dan *deep mixing column* serta *preloading* dengan *stone column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman



Gambar 4 (lanjutan). Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* dan *deep mixing column* serta *preloading* dengan *stone column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman

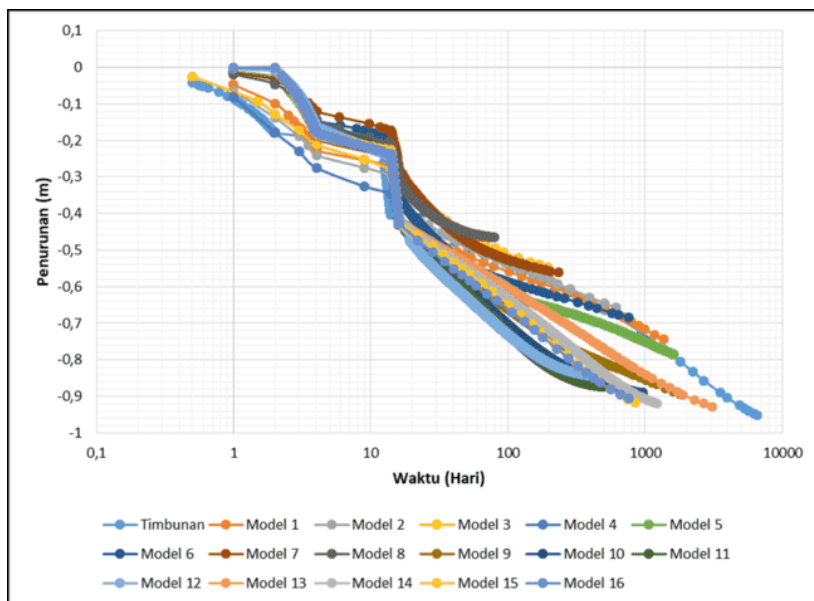


Gambar 4 (lanjutan). Deformasi perbaikan tanah dengan metode *preloading* dan *deep mixing column* serta *preloading* dengan *stone column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman



Gambar 5. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi spasi dan kedalaman *deep mixing column*

Pada Gambar 5 menunjukkan grafik durasi konsolidasi dan besarnya penurunan hasil pemodelan dengan berbagai variasi. Dalam pemodelan ini tahap yang dilakukan berupa penimbunan selama 2 hari, kemudian dikonsolidasikan selama 10 hari, selanjutnya dilakukan penimbunan kedua selama 2 hari, lalu dikonsolidasikan hingga tercapai derajat konsolidasi 90%. Saat pemodelan hanya dengan timbunan saja, penurunan yang terjadi paling besar yakni 0,951 m serta membutuhkan durasi paling lama yakni 6578 hari jika dibandingkan dengan pemodelan yang dikombinasikan dengan *deep mixing column*. Sementara itu untuk pemodelan yang mengkombinasikan timbunan dengan *deep mixing column*, trends grafik secara umum menunjukkan terdapat perubahan pada durasi konsolidasi yang menjadi lebih singkat, serta besarnya penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan pemodelan yang hanya menggunakan timbunan saja. Pada variasi model 2,3,4,7, dan 8, durasi konsolidasi berkurang cukup signifikan yakni menjadi 181 hari hingga 1651 hari. Sedangkan terkait besarnya penurunan terdapat perubahan yang cukup signifikan pada variasi model 2,3,4,7, dan 8, yakni menjadi 0,184 m hingga 0,38 m.



Gambar 6. Grafik perbandingan hasil pemodelan variasi spasi dan kedalaman *stone column*

Pada Gambar 6 menunjukkan grafik durasi konsolidasi dan besarnya penurunan hasil pemodelan dengan berbagai variasi. Dalam pemodelan ini tahap yang dilakukan berupa penimbunan selama 2 hari, kemudian dikonsolidasikan

selama 10 hari, selanjutnya dilakukan penimbunan kedua selama 2 hari, lalu dikonsolidasikan hingga tercapai derajat konsolidasi 90%. Saat pemodelan hanya dengan timbunan saja, penurunan yang terjadi paling besar yakni 0,951 m serta membutuhkan durasi paling lama yakni 6578 hari jika dibandingkan dengan pemodelan yang dikombinasikan dengan *stone column*. Sementara itu untuk pemodelan yang mengkombinasikan timbunan dengan *stone column*, trends grafik secara umum menunjukkan terdapat perubahan pada durasi konsolidasi yang menjadi lebih singkat, serta besarnya penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan pemodelan yang hanya menggunakan timbunan saja. Pada variasi model 3,4,7,8 dan 12, durasi konsolidasi berkurang cukup signifikan yakni menjadi 29 hari hingga 436 hari. Sedangkan terkait besarnya penurunan terdapat perubahan yang cukup signifikan pada variasi model 3,4,7, dan 8, yakni menjadi 0,41 m hingga 0,562 m.

Perbandingan penurunan dan waktu dengan metode perbaikan yang bervariasi

Berdasarkan pemodelan dengan kombinasi *preloading* dan *deep mixing column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman, maka diperoleh hasil perbaikan tanah tersebut terhadap waktu dan besarnya penurunan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi hasil pemodelan perbaikan tanah dengan *preloading* dan *deep mixing column*

Model	Metode	Variasi Jarak D= 0,8 m	Variasi Kedalaman	Penurunan (m)	Waktu (Hari)	Persentase Reduksi Penurunan (%)	Persentase Reduksi Waktu (%)
	<i>Preloading</i>	-	-	0,951	6578	-	-
1	<i>Preloading</i> + DMC	S= 1 D	25%	0,465	2992	51,10	54,52
2	<i>Preloading</i> + DMC	S= 1 D	50%	0,323	1651	66,04	74,90
3	<i>Preloading</i> + DMC	S= 1 D	75%	0,237	729	75,08	88,92
4	<i>Preloading</i> + DMC	S= 1 D	100%	0,184	181	80,65	97,25
5	<i>Preloading</i> + DMC	S= 2 D	25%	0,589	3486	38,07	47,01
6	<i>Preloading</i> + DMC	S= 2 D	50%	0,461	2325	51,52	64,65
7	<i>Preloading</i> + DMC	S= 2 D	75%	0,38	1060	60,04	83,89
8	<i>Preloading</i> + DMC	S= 2 D	100%	0,33	547	65,30	91,68
9	<i>Preloading</i> + DMC	S= 5 D	25%	0,772	4222	18,82	35,82
10	<i>Preloading</i> + DMC	S= 5 D	50%	0,697	3629	26,71	44,83
11	<i>Preloading</i> + DMC	S= 5 D	75%	0,662	2893	30,39	56,02
12	<i>Preloading</i> + DMC	S= 5 D	100%	0,643	2668	32,39	59,44
13	<i>Preloading</i> + DMC	S= 10 D	25%	0,893	6118	6,10	6,99
14	<i>Preloading</i> + DMC	S= 10 D	50%	0,857	5458	9,88	17,03
15	<i>Preloading</i> + DMC	S= 10 D	75%	0,846	5215	11,04	20,72
16	<i>Preloading</i> + DMC	S= 10 D	100%	0,84	4726	11,67	28,15

Berdasarkan hasil pemodelan perbaikan tanah dengan kombinasi *preloading* dan *stone column* dengan beberapa variasi spasi dan kedalaman, maka diperoleh hasil perbaikan tanah tersebut terhadap waktu dan besarnya penurunan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi hasil pemodelan perbaikan tanah dengan *preloading* dan *stone column*

Model	Metode	Variasi Jarak D= 0,8 m	Variasi Kedalaman	Penurunan (m)	Waktu (Hari)	Persentase Reduksi Penurunan (%)	Persentase Reduksi Waktu (%)
	<i>Preloading</i>	-	-	0,951	6578	-	-
1	<i>Preloading</i> + SC	S= 1 D	25%	0,744	1368	21,77	79,20
2	<i>Preloading</i> + SC	S= 1 D	50%	0,657	610	30,91	90,73
3	<i>Preloading</i> + SC	S= 1 D	75%	0,547	196	42,48	97,02
4	<i>Preloading</i> + SC	S= 1 D	100%	0,41	29	56,89	99,56
5	<i>Preloading</i> + SC	S= 2 D	25%	0,785	1607	17,46	75,57
6	<i>Preloading</i> + SC	S= 2 D	50%	0,685	762	27,97	88,42
7	<i>Preloading</i> + SC	S= 2 D	75%	0,562	233	40,90	96,46
8	<i>Preloading</i> + SC	S= 2 D	100%	0,466	80	51,00	98,78

Tabel 7 (lanjutan). Rekapitulasi hasil pemodelan perbaikan tanah dengan *preloading* dan *stone column*

Model	Metode	Variasi Jarak D= 0,8 m	Variasi Kedalaman	Penurunan (m)	Waktu (Hari)	Persentase Reduksi Penurunan (%)	Persentase Reduksi Waktu (%)
9	<i>Preloading</i> + SC	S= 5 D	25%	0,894	1795	5,99	72,71
10	<i>Preloading</i> + SC	S= 5 D	50%	0,89	960	6,41	85,41
11	<i>Preloading</i> + SC	S= 5 D	75%	0,875	523	7,99	92,05
12	<i>Preloading</i> + SC	S= 5 D	100%	0,846	436	11,04	93,37
13	<i>Preloading</i> + SC	S= 10 D	25%	0,928	3055	2,42	53,56
14	<i>Preloading</i> + SC	S= 10 D	50%	0,92	1216	3,26	81,51
15	<i>Preloading</i> + SC	S= 10 D	75%	0,917	847	3,58	87,12
16	<i>Preloading</i> + SC	S= 10 D	100%	0,905	759	4,84	88,46

Berdasarkan hasil pemodelan tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan penggunaan metode *Deep Mixing Column* dan *Stone Column* terdapat perubahan yang signifikan pada besarnya penurunan dan waktu konsolidasi. Penggunaan *Deep Mixing Column* merupakan metode yang paling efektif dalam mereduksi besarnya penurunan, yakni mencapai 80,65% apabila hanya dibandingkan dengan metode *preloading* saja. Sedangkan dengan penggunaan *Stone Column* hanya mampu mereduksi hingga 56,89% apabila hanya dibandingkan dengan metode *preloading* saja. Dalam mereduksi waktu konsolidasi penggunaan *Stone Column* merupakan metode yang paling efektif, yakni mencapai 99,56% jika dibandingkan dengan penggunaan metode *preloading* saja. Sedangkan dengan metode *Deep Mixing Column* sedikit lebih kecil yakni 97,25%.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian perbaikan tanah lunak dengan metode *preloading*, *deep mixing column*, dan *stone column* menggunakan Plaxis 2D, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan penggunaan metode *preloading* saja tidak efektif dalam memperbaiki tanah lunak karena penurunan yang terjadi sebesar 0,951 m serta membutuhkan waktu 6578 hari untuk mencapai derajat konsolidasi 90%.
2. Setiap penambahan 25% kedalaman *deep mixing column*, maka persentase reduksi penurunan akan bertambah sekitar 2%-14%, sedangkan persentase reduksi waktu akan bertambah sekitar 7%-20%. Setiap penambahan spasi secara bertahap dari 1D, 2D, 5D, hingga 10D, maka persentase reduksi penurunan akan berkurang sekitar 14%-26%, sedangkan persentase reduksi waktu akan berkurang sekitar 7%-35%.
3. Setiap penambahan 25% kedalaman *stone column*, maka persentase reduksi penurunan akan bertambah sekitar 3%-14%, sedangkan persentase reduksi waktu akan bertambah sekitar 2%-12%. Setiap penambahan spasi secara bertahap dari 1D, 2D, 5D, hingga 10D, maka persentase reduksi penurunan akan berkurang sekitar 4%-25%, sedangkan persentase reduksi waktu akan berkurang sekitar 3%-4%.
4. *Deep mixing column* lebih efektif dalam mereduksi penurunan dengan persentase reduksi berkisar 51,1%-80,65%, sedangkan *stone column* lebih efektif dalam mereduksi waktu konsolidasi dengan persentase reduksi berkisar 75,57%-99,56%.
5. Perbaikan tanah yang paling efektif dalam mereduksi penurunan dan waktu, dan deformasi lateral adalah model 8 yakni *preloading* dan *stone column* dengan spasi 2D (1,6 m) serta kedalaman 100% dari tebal tanah lunak (*full penetration*). Penurunan tanah yang terjadi sebesar 0,47 m selama 80 hari untuk mencapai derajat konsolidasi 90%. Atau dengan persentase reduksi penurunan sebesar 51% serta persentase reduksi waktu sebesar 98,78%. Sedangkan deformasi lateral yang terjadi sebesar 0,15 m atau dengan persentase reduksi sebesar 77,27% dibandingkan dengan hanya menggunakan *preloading* saja.

Saran

Berikut saran untuk penelitian ini:

1. Menggunakan Plaxis 3D untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih tinggi mendekati keadaan yang sebenarnya.
2. Dilakukan variasi terhadap diameter *deep mixing column* dan *stone column*.
3. Diperlukan adanya perbandingan efektifitas reduksi penurunan dan waktu konsolidasi dari beberapa pola pemasangan *deep mixing column* maupun *stone column*.

4. Diperlukan analisa biaya untuk dijadikan pertimbangan dalam penentuan metode perbaikan yang paling efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460-2017). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Etezad, M., Hanna, A. M., & Ayadat, T. (2015). Bearing capacity of a group of stone columns in soft soil. *International Journal of Geomechanics*, 15 (2), 04014043.
- Firmansyah, D. A., Somantri, A. K., Sihombing, A. V. R., Mase, L. Z., & Sundara, A. (2024). Mechanical properties of soft clay soil improved with nanomaterials and chitosan biopolymer. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 55(2), 31-37.
- Gomes, R., & Darjanto, H. (2022). Soil improvement using the stone column method at the International Port of Tibar, Timor-Leste. *International Journal of Transportation and Infrastructure*, 6(1), 34-38.
- Greenwood, D. A. (1970). Mechanical improvement of soils below ground surface. *Ground engineering* (pp. 11–22). Thomas Telford Publishing.
- Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), 129.
- Hamzah, Y. S. (2023). Analisis Waktu Penurunan pada konsolidasi tanah menggunakan kombinasi metode preloading dan prefabricated vertical drain (PVD) pada pekerjaan perbaikan tanah. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 102-108.
- Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika Tanah 2 Edisi V*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta, Indonesia.
- Iskandar, F. F., & Hamdhan, I. N. (2016). Pemodelan numerik pada perbaikan tanah menggunakan stone column di tanah lempung lunak di bawah tanah timbunan. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 107-118.
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*. Leiden: CRC Press.
- Setiawan, B., Chrismaningwang, G., & Denaldi, D. A. (2023). Analisis percepatan konsolidasi tanah lunak dengan metode preloading menggunakan software GeoStudio 2018 R2. *Matriks Teknik Sipil*. 11(3), 245-253.

