

EVALUASI PENURUNAN TERHADAP IMPLEMENTASI ELEMEN PENGAKU BETON PADA METODE PERBAIKAN TANAH *DEEP CEMENT MIXING*

Robert Antony¹ dan Ali Iskandar²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
rantony364@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
aliiskandar@ft.untar.ac.id

Masuk: 29-12-2023, revisi: 13-01-2024, diterima untuk diterbitkan: dd-mm-yyyy

ABSTRACT

When working in construction problems with soil quality can be encounter. Soil improvement can be carried out for various types of soil without the need to replace the soil in the field with new soil. One soil improvement method that can be used is the deep cement mixing (DCM) soil improvement method. DCM uses a mixture of dry or wet cement mixed with field soil so that the soil's bearing capacity will increase. Implementation of concrete stiffening element to the DCM or stiffened deep cement mixing (SDCM) can strengthen the DCM and increase the bearing capacity of the soil. By using a finite element program, a simulation of the implementation of stiffening elements in the deep cement mixing soil improvement method can be carried out. The solid method is a modeling method in a finite element program where DCM pile and stiffeners are created in the program along with the surrounding soil. Apart from the solid method, you can also use the composite method to make modeling easier. The composite method is a method that combines the average values of soil parameters and DCM parameters so that there is no need to model DCM in a finite element program. In this research, stiffening elements were added to the DCM in a finite element program using solid and composite methods that were subjected to static loads. The reduction in settlement that occurred in DCM and SDCM using the solid method was 67.87%, while in DCM and SDCM the composite method was 81.09%.

Keywords: Soil improvement; deep cement mixing; stiffener element; composite method; finite element program

ABSTRAK

Pekerjaan dalam bidang konstruksi dapat menemukan masalah pada kualitas tanah. Perbaikan tanah dapat dilakukan untuk berbagai macam jenis tanah tanpa perlu menggantikan tanah pada lapangan dengan tanah yang baru. Salah satu metode perbaikan tanah yang dapat digunakan adalah metode perbaikan tanah *deep cement mixing* (DCM). DCM menggunakan campuran semen kering ataupun basah yang dicampur dengan tanah lapangan sehingga daya dukung tanah akan meningkat. Penambahan material pengaku beton pada DCM atau *stiffened deep cement mixing* SDCM dapat memperkuat DCM dan menaikkan daya dukung tanah. Dengan menggunakan program elemen hingga maka simulasi implementasi elemen pengaku pada metode perbaikan tanah *deep cement mixing* dapat dilakukan. Metode *solid* merupakan metode pemodelan dalam program elemen hingga dimana tiang DCM dan pengaku dibuat dalam program beserta dengan tanah sekitarnya. Selain metode *solid* dapat juga dapat menggunakan metode komposit untuk mempermudah pemodelan. Metode komposit merupakan metode dimana menggabungkan nilai rata-rata parameter tanah dan parameter DCM sehingga tidak perlu memodelkan DCM dalam program elemen hingga. Pada penelitian ini dilakukan penambahan elemen pengaku pada DCM dalam program elemen hingga menggunakan metode *solid* dan komposit yang diberi beban statik. Pengurangan penurunan yang terjadi pada DCM dan SDCM yang menggunakan metode *solid* sebesar 67,87%, sedangkan pada DCM dan SDCM metode komposit sebesar 81,09%.

Kata kunci: Perbaikan tanah; *deep cement mixing*; elemen pengaku; metode komposit; program elemen hingga

1. PENDAHULUAN

Tanah adalah kumpulan mineral alami butir-butir yang dapat dipisahkan dengan mekanis yang begitu lembut seperti agitasi dalam air. Sedangkan batu adalah agregat alami dari mineral yang dihubungkan oleh kuat dan kekuatan kohesif permanen (Terzaghi et al., 1996). Tanah yang lemah atau kurang stabil menghadirkan tantangan besar dalam proyek konstruksi banyak lokasi pembangunan, baik perkotaan maupun pedesaan, menghadapi masalah dengan tanah yang memiliki daya dukung yang buruk, penyerapan air yang tinggi atau pemadatan yang lambat. Tanah seperti itu dapat menyebabkan penurunan permukaan tanah, retakan pada struktur, dan bahkan kerusakan struktural dalam jangka panjang. Oleh karena itu, perbaikan tanah menjadi bagian penting dari teknik sipil untuk menjamin keberhasilan dan

keandalan proyek konstruksi. Diperlukan Teknik perbaikan tanah khusus untuk itu meminimalisir penurunan tanah (Das, 2011). Tujuan utama dari perbaikan tanah merupakan untuk meningkatkan kepadatan tanah, kuat geser tanah, dan/atau ketahanan tanah terhadap likuifaksi, serta untuk mengurangi: kompresibilitas, permeabilitas, dan penurunan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Metode *soil improvement* telah digunakan untuk mengatasi dan memecahkan masalah banyak kondisi tanah dan meningkatkan sifat teknis tanah yang diinginkan dari tanah yang ada atau tersedia. Selain itu, *Soil improvement* sering memberikan pilihan yang lebih ekonomis dan bertanggung jawab terhadap lingkungan dibandingkan dengan pendekatan yang lebih tradisional. Metode umum perbaikan tanah meliputi *deep cement mixing* (DCM), *stone column*, *vibro compaction* dan *jet grouting*.

Soil improvement dengan teknik DCM, telah banyak digunakan untuk meningkatkan sifat tanah untuk lapisan tanah liat lunak. Tiang DCM dapat secara efektif mengurangi penurunan tanah timbunan. Proses DCM dilakukan dengan menggunakan bor khusus atau auger yang dibor ke dalam tanah. Saat auger ditarik keluar tanah, campuran tanah dan semen secara bersamaan dipompa ke dalam tanah. Bahan pengikat yang berbeda selain semen telah digunakan untuk *deep mixing*. Campuran tanah dan semen ini mengisi ruang dan menggantikan tanah yang longgar, membentuk kolom yang memperkuat dan memperbaiki tanah di sekitarnya. DCM bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah, serta mengurangi kemungkinan settlement yang berlebihan, sehingga menciptakan dasar fondasi yang kuat dan stabil selama dan setelah proses konstruksi.

Stiffened deep cement mixing (SDCM) *piles* adalah salah satu metode perbaikan tanah yang digunakan untuk meningkatkan daya dukung dan stabilitas tanah lemah atau tidak stabil sebelum proses konstruksi di atasnya. Metode ini merupakan peningkatan dari metode perbaikan tanah DCM yang dilakukan dengan mencampurkan tanah dengan semen menggunakan mesin auger. SDCM *piles* menambahkan metode DCM dengan elemen tambahan berupa elemen pengaku. Dalam konteks tiang SDCM, elemen pengaku biasanya berupa bahan yang memiliki sifat kaku dan kuat, seperti besi atau baja (Vootipruex et al., 2011). Selama proses SDCM, campuran tanah dan semen diinjeksikan ke dalam tanah untuk membentuk kolom, sedangkan elemen pengaku dimasukkan ke dalam kolom DCM untuk menambah kekuatan dan daya dukung beban.

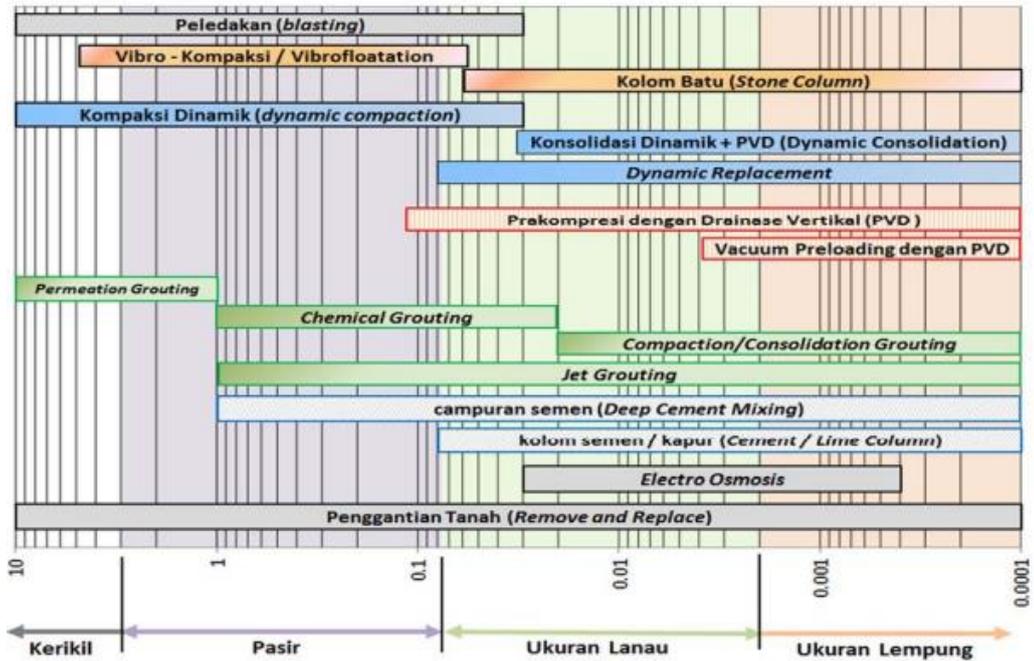
Program elemen hingga dapat digunakan untuk memodelkan implementasi elemen pengaku beton pada metode perbaikan tanah *deep cement mixing*. Metode *solid* dapat digunakan untuk membuat simulasi dimana DCM akan diberi elemen pengaku beton dalam intinya. Selain metode *solid* pemodelan menggunakan program elemen hingga juga dapat menggunakan metode komposit. Berbeda dengan metode *solid* pada metode komposit nilai rata-rata parameter tanah dan nilai rata-rata DCM akan digabungkan menjadi satu kesatuan atau komposit sehingga yang dimodelkan hanya elemen pengaku beserta tanah sekitarnya.

Soil improvement

Soil improvement atau metode perbaikan tanah merupakan cara untuk menaikkan nilai teknis tanah tanpa perlu menggantinya dengan tanah lain. Dengan jenis perbaikan tanah tertentu parameter tanah dapat dinaikan seperti nilai kohesi, daya dukung, dan kepadatannya sehingga tanah akan bisa menopang beban lebih besar dari sebelumnya. Tergantung pada jenis tanah yang akan diperbaiki metode perbaikan tanah memiliki banyak jenis perbaikan untuk tanah lempung hingga tanah granular.

Lapisan tanah berjenis lempung lunak yang jenuh sering ditemui pada kedalaman dangkal di bawah pondasi bangunan. Tergantung pada beban yang diberikan oleh struktur dan kedalaman lapisan tanah tersebut, penurunan konsolidasi yang tidak biasa dapat terjadi pada fondasi tersebut. Diperlukan Teknik perbaikan tanah khusus untuk meminimalisir penurunan tanah (Das, 2011). Tujuan utama dari perbaikan tanah merupakan untuk meningkatkan kepadatan tanah, kuat geser tanah, dan/atau ketahanan tanah terhadap likuifaksi, serta untuk mengurangi: kompresibilitas, permeabilitas, dan penurunan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah pendahuluan yang sudah dilakukan, secara garis besar jenis perbaikan tanah yang tepat untuk bangunan atau infrastruktur yang akan didirikan dapat ditentukan dengan Gambar 1 (Badan Standardisasi Nasional, 2017).



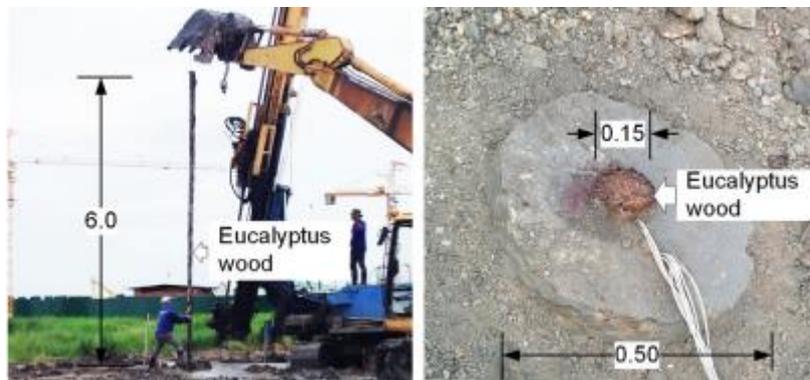
Gambar 1. Tipe perbaikan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Deep cement mixing (DCM)

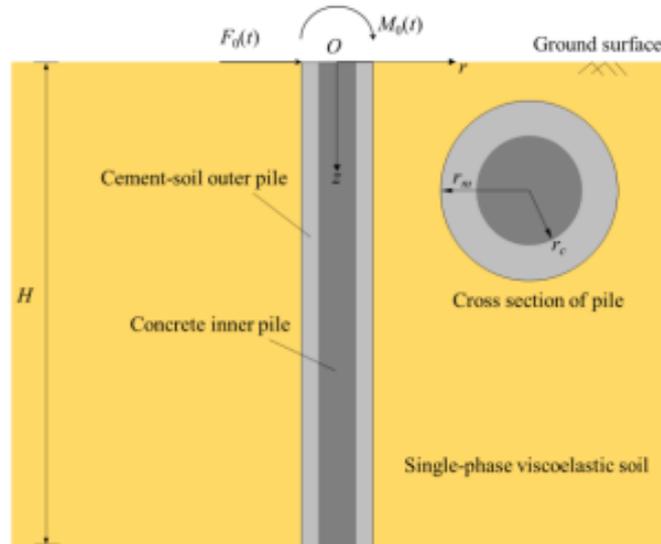
Metode DCM adalah metode perbaikan tanah secara kimiawi dengan mencampur tanah di lokasi dengan bahan pengeras semen pada kedalaman dengan menggunakan alat auger. Pencampuran dalam dapat dilakukan dengan metode basah (*wet method*) atau kering (*dry method*). Metode basah menggunakan pengikat dalam bentuk bubuk, sedangkan metode kering menggunakan pengikat dalam bentuk bubuk (Rimbani et al., 2022). Kolom *deep cement mixing* biasanya dapat disusun dalam empat pola yang berbeda, yaitu, pola individual, pola blok, pola dinding, dan pola *grid*. Tiap pola yang digunakan dalam teknik *deep cement mixing* memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Maka dari itu perlunya pengetahuan tanah pada lokasi proyek agar dapat menggunakan pola yang optimal.

Elemen pengaku

Elemen pengaku pada SDCM mengacu pada komponen tambahan yang ditempatkan di bagian inti DCM untuk meningkatkan kekakuan dan stabilitas tumpukan tersebut. Dalam konteks tiang SDCM, elemen pengaku biasanya berupa bahan yang memiliki sifat kaku dan kuat, seperti besi atau baja (Wonglert et al., 2018). Terdapat beberapa jenis *stiffener* yang dapat digunakan dalam Teknik *stiffened deep cement mixing piles*, termasuk besi *H-pile*, balok *precast* beton, dan jenis kayu tertentu seperti pada Gambar 2. Pada Gambar 3 Merupakan ilustrasi tiang SDCM dengan elemen pengaku beton.



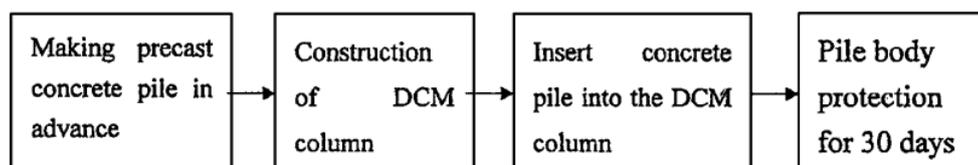
Gambar 2. Tiang SDCM dengan inti kayu (Wonglert et al., 2018)



Gambar 3. Tiang SDCM dengan inti beton (Su et al., 2023)

Elemen pengaku bertujuan untuk bekerja saat kolom SDCM mengalami kompresi dan menahan beban dari struktur. Tiang beton *precast* bisa digunakan sebagai tiang dalam karena kekuatan dan modulus tekannya yang termasuk tinggi. Tiang beton *precast* juga memiliki harga lebih murah dibandingkan pipa baja atau H-pile dan lebih mudah untuk diproduksi menjadi bentuk dan panjang yang diinginkan. Untuk mendapatkan kapasitas perpindahan beban dari *stiffener* ke elemen sekitarnya yang lebih baik namun tidak melewati bagian bawah kolom *deep cement mixing*, tiang beton *precast* dapat dibuat panjangnya sekitar 5-10% lebih pendek dari panjang tiang *deep cement mixing* (Dong et al., 2004).

Dalam proses pemasangan *stiffened deep cement mixing pile*, pertama diperlukan untuk membuat tiang beton *precast* terlebih dahulu di lokasi atau bisa dengan membeli beton *precast*, lalu membuat tiang *deep cement mixing* pada lokasi yang diinginkan. Ketika tiang *deep cement mixing* sudah selesai dibuat tiang beton *precast* dan dimasukkan kedalam campuran tanah dan semen yang masih belum mengeras. Setelah tiang beton *precast* selesai dimasukkan diperlukan perlindungan terhadap tiang *stiffened deep cement mixing* agar kekuatannya tetap terjaga. Gambar 4 merupakan urutan pemasangan tiang SDCM.



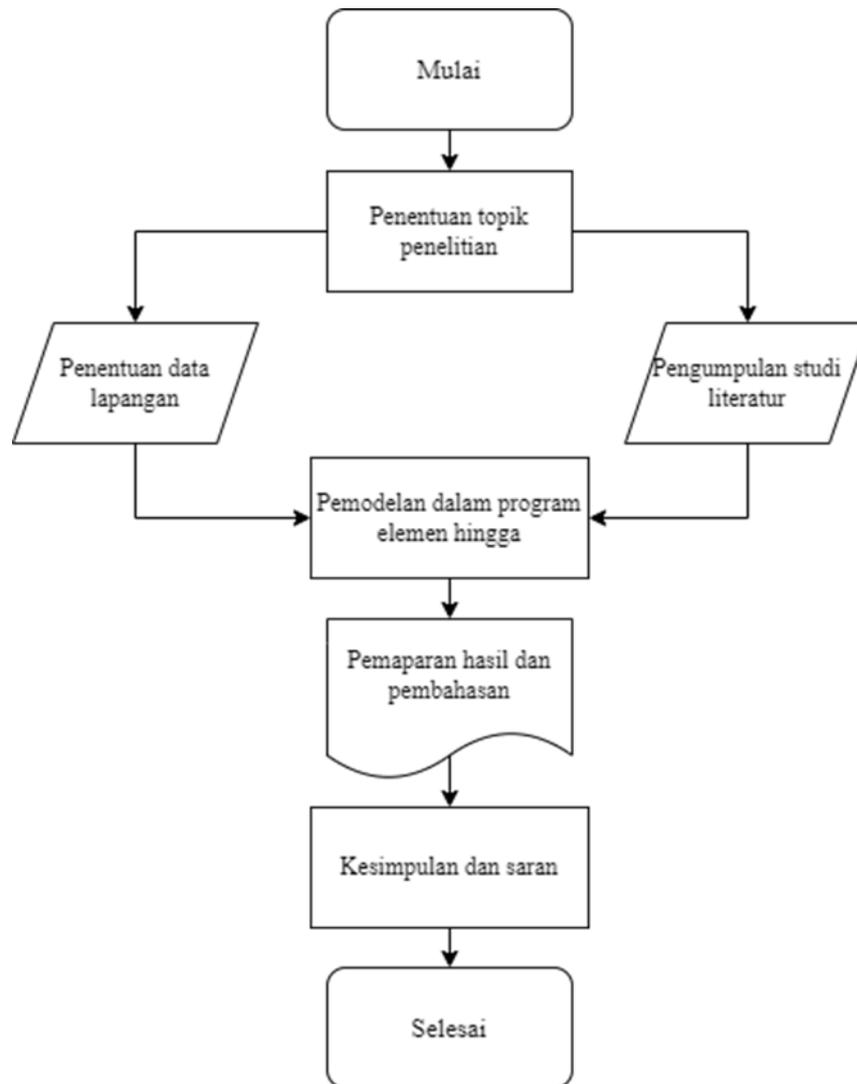
Gambar 4. Urutan pembuatan tiang SDCM (Han, 2015)

2. METODOLOGI PENELITIAN

Batasan penelitian

Penelitian ini memiliki batasan-batasan tertentu yang terdiri dari beberapa pokok pembahasan. Pertama, tipe fondasi yang akan dimodelkan dalam aplikasi program elemen hingga adalah fondasi tipe *raft* bentuk persegi dengan ketebalan 0,7 m. Selanjutnya, tiang *stiffened deep cement mixing* dan fondasi *raft* akan dibatasi oleh *cushion* atau bantalan berupa tanah yang dicampur dengan semen sebanyak 9%, dengan ketebalan 0,5 m. Beban yang diberikan pada fondasi terdiri dari beban statik dengan variasi sebesar 50 kN/m², 100 kN/m², 150 kN/m², 200 kN/m², 250 kN/m², dan 300 kN/m². Jenis perbaikan tanah yang diterapkan adalah *stiffened deep cement mixing piles* dengan DCM berdiameter 0,7 m dan spasi antar tiang sejauh 0,8 m. Elemen pengaku yang ditambahkan berupa beton *precast* dengan kekuatan tekan f_c' sebesar 40 MPa dan berdiameter 0,5 m. Metode *deep cement mixing* yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode basah. Fokus analisis pada penelitian ini adalah penurunan *raft*, dan program elemen hingga yang dipakai adalah Midas GTS NX.

Keseluruhan dari langkah kerja yang akan dilaksanakan dalam penelitian ini dapat dilihat melalui kerangka berpikir pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data dan pemodelan

Pemodelan dalam program Midas GTS NX memiliki tahap awal yaitu membuat geometri dari material yang akan di simulasi. Pemodelan dalam program Midas GTS NX berisikan geometri berupa *raft*, *cushion*, lapisan tanah *fill*, lapisan tanah *fat clay*, DCM, dan elemen pengaku.

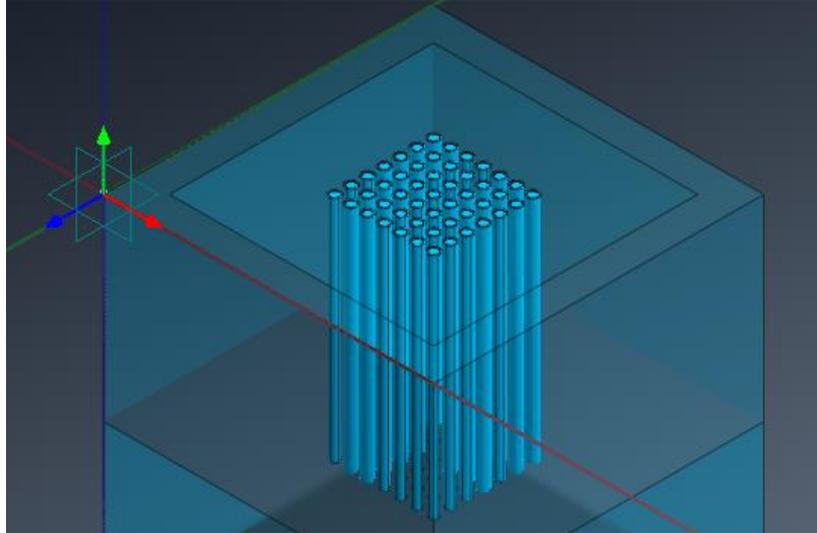
Pemodelan Fondasi *raft* merupakan lapisan geometri paling atas berupa bujur sangkar dengan luas 6,25x6,25m dengan tebal 0,7m, pada area ini akan dibebani dengan beban statik dengan variasi berbeda serta beban dinamik yang berasal dari getaran mesin.

Pemodelan *cushion* merupakan lapisan kedua yang berada di bawah lapisan *raft*. Lapisan *cushion* berupa geometri bujur sangkar dengan luas 16x16m dengan tebal 0.5m, lapisan ini bukan hanya tanah biasa melainkan tanah yang sudah dicampur dengan semen sebesar 9%. Lapisan *cushion* akan berhubungan dengan lapisan tanah *fill* dan DCM dibawahnya.

Pemodelan lapisan tanah *fill* berupa bujur sangkar dengan luas 20x20m setebal 12m, pemodelan lapisan tanah *fat clay* berupa bujur sangkar dengan luas 20x20m setebal 10m, Kedua lapisan tanah ini akan memiliki model DCM di tengahnya yang akan berhubungan dengan lapisan *cushion*.

Geometri *deep cement mixing* merupakan kolom berbentuk lingkaran dengan tinggi 14m dengan konfigurasi 7 x 7 yang menempel dengan geometri *cushion*, serta elemen pengaku yang berada di bagian tengah DCM. Pada Gambar 6 merupakan geometri yang akan dimodelkan dalam program Midas GTS NX.

Data parameter material yang akan dimodelkan dalam program Midas GTS NX berasal dari data proyek seperti pada Tabel 1.



Gambar 6. Pemodelan geometri pada program Midas GTS NX

Tabel 1. Parameter geometri untuk pemodelan

Parameter	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
<i>Raft</i>	24	-	0,15	20000000	-	-
<i>Cushion</i>	18	19	0,28	50000	100	30
DCM	17	18	0,22	180000	753,6410	28
<i>Fill</i>	16,5	17,5	0,3	40000	200	-
<i>Fat Clay</i>	15	16	0,3	3000	15	-
Beton	24	-	0,15	29725400	-	-

Pemodelan metode komposit

Pemodelan metode komposit dalam program Midas GTS NX memiliki tahap awal yaitu membuat geometri dari material yang akan di simulasi. Pemodelan dalam program Midas GTS NX berisikan geometri berupa *raft*, *cushion*, lapisan tanah *fill*, lapisan tanah *fat clay*, dan elemen pengaku.

Pemodelan menggunakan metode komposit merupakan cara untuk menggabungkan nilai rata-rata parameter tanah dengan parameter kolom *deep cement mixing*. Dengan metode ini pemodelan hanya menggunakan geometri tanah tanpa geometri *deep cement mixing* dengan parameter dari nilai rata-rata parameter tanah dan parameter *deep cement mixing*. Pemasukan pengaturan untuk pemodelan metode komposit memiliki urutan yang sama dengan metode *solid* yang membedakan hanya metode komposit tidak memiliki kolom *deep cement mixing*. Perhitungan parameter lapisan tanah dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$X_k = \frac{X_n \times A_n + X_{DCM} \times n_{DCM} \times A_{DCM}}{A_n + A_{DCM}} \quad (1)$$

dengan X_n = data parameter lapisan tanah ke-n, A_n = luas total lapisan tanah ke-n (m²), X_{DCM} = data parameter *deep cement mixing*, n_{DCM} = jumlah kolom *deep cement mixing*, A_{DCM} = luas permukaan *deep cement mixing* (m²), X_k = data parameter komposit.

Tabel 2 merupakan hasil parameter baru untuk lapisan tanah *fill* dan lapisan tanah *fat clay*.

Tabel 2. Parameter baru tanah *fill* dan tanah *fat clay*

Parameter	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	n	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
<i>Raft</i>	24	-	0,15	20000000	-	-
<i>Cushion</i>	18	19	0,28	50000	100	30
<i>Fill</i>	15,841	16,8905	0,3108	11905,679	52,2871	-
<i>Fat Clay</i>	17,3410	17,3905	0,3108	48905,679	237,2871	-

Perbandingan hasil

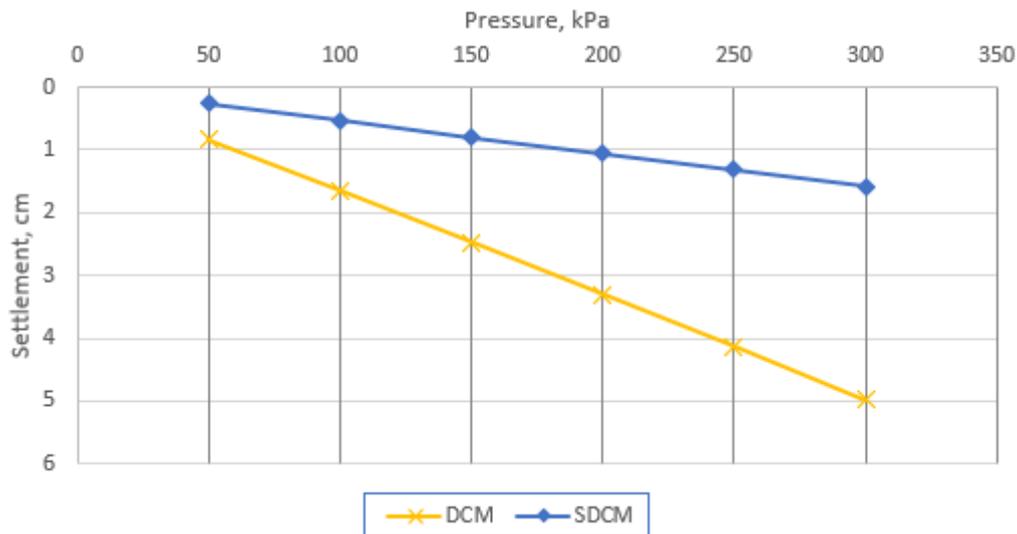
Pada Tabel 3 merupakan hasil penurunan yang terjadi pada *raft* dalam satuan sentimeter untuk perbaikan tanah DCM dan SDCM metode *solid*. Pada Gambar 7 merupakan grafik beban vs. penurunan untuk perbaikan tanah DCM dan SDCM metode *solid*. Berdasarkan hasil modeling penambahan elemen pengaku pada metode perbaikan tanah DCM dapat mengurangi penurunan terhadap *raft*, pada beban 50 kN/m² sebesar 67,47%, 100 kN/m² sebesar 67,88%, 150 kN/m² sebesar 67,74%, 200 kN/m² sebesar 67,88%, 250 kN/m² sebesar 68,04%, 300 kN/m² sebesar 68,21%.

Tabel 3. Hasil penurunan (sentimeter) pada *raft* untuk DCM dan SDCM metode *solid*

Tipe <i>soil improvement</i>	Beban (kN/m ²)					
	50	100	150	200	250	300
DCM	0,83	1,165	2,48	3,3	4,13	4,97
SDCM	0,27	0,53	0,8	1,06	1,32	1,58

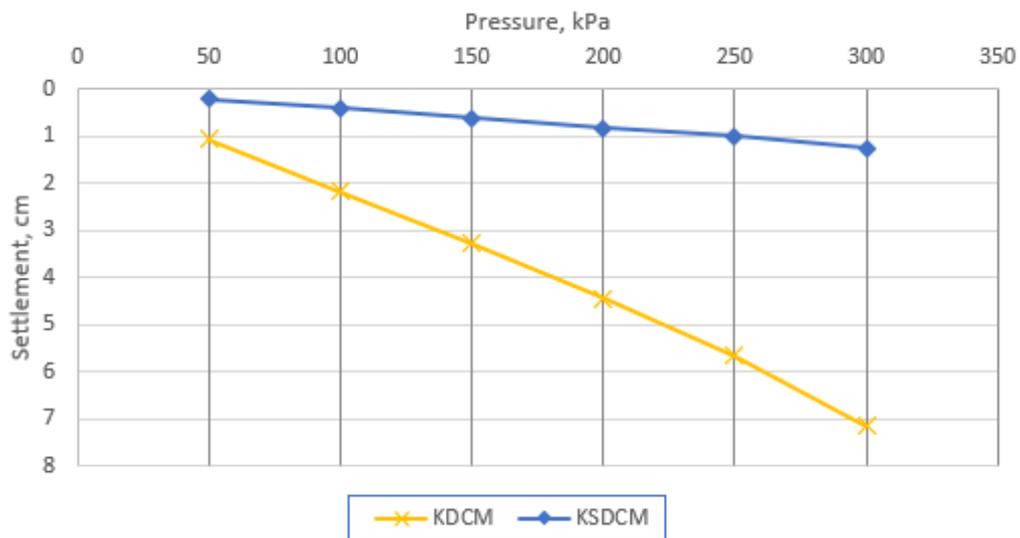
Tabel 4. Hasil penurunan (sentimeter) pada *raft* untuk DCM dan SDCM metode komposit

Tipe <i>soil improvement</i>	Beban (kN/m ²)					
	50	100	150	200	250	300
DCM	1,08	2,17	3,28	4,44	5,65	7,15
SDCM	0,22	0,42	0,63	0,84	1,015	1,26



Gambar 7. Grafik beban vs. penurunan DCM dan SDCM *solid*

Berikut merupakan perbandingan hasil dari pemodelan perbaikan tanah menggunakan DCM metode komposit dan SDCM metode komposit. Pada Tabel 4. Merupakan hasil penurunan yang terjadi pada *raft* dalam satuan sentimeter untuk perbaikan tanah DCM metode komposit dan SDCM metode komposit. Pada Gambar 8 merupakan grafik beban vs. penurunan untuk perbaikan tanah DCM metode komposit dan SDCM metode komposit. Berdasarkan hasil modeling penambahan elemen pengaku pada metode perbaikan tanah DCM dapat mengurangi penurunan terhadap *raft*, pada beban 50 kN/m² sebesar 79,63%, 100 kN/m² sebesar 80,65%, 150 kN/m² sebesar 80,79%, 200 kN/m² sebesar 81,08%, 250 kN/m² sebesar 82,04%, 300 kN/m² sebesar 82,38%.



Gambar 8. Grafik beban vs. penurunan DCM dan SDCM metode komposit

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil yang didapat dapat disimpulkan penambahan elemen pengaku pada metode perbaikan tanah DCM dapat mengurangi penurunan yang terjadi pada fondasi di atasnya.
2. Hasil penurunan maksimum pada *raft* untuk perbaikan tanah dengan DCM metode *solid* akibat beban statik 300 kN/m² sebesar 4,97 cm dan penurunan maksimum pada *raft* untuk perbaikan tanah dengan SDCM metode *solid* akibat beban statik 300 kN/m² sebesar 1,58 cm.
3. Hasil penurunan maksimum pada *raft* untuk perbaikan tanah dengan DCM metode komposit akibat beban statik 300 kN/m² sebesar 7,15 cm dan penurunan maksimum pada *raft* untuk perbaikan tanah dengan SDCM metode komposit akibat beban statik 300 kN/m² sebesar 1,26 cm.
4. Rata-rata untuk pengurangan penurunan *raft* akibat penambahan elemen pengaku metode *solid* dengan beban yang bervariasi adalah 67,87 %.
5. Rata-rata untuk pengurangan penurunan *raft* akibat penambahan elemen pengaku metode komposit dengan beban yang bervariasi adalah 81,09 %.

Saran

1. Pemodelan dapat dikembangkan dengan cara menambah variasi terhadap diameter DCM ataupun diameter elemen pengaku.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut terhadap pengaruh elemen pengaku pada perbaikan tanah DCM untuk beban lateral.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik (SNI 8460:2017)*
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering*. Global Engineering.
- Dong, P., Qin, R., & Chen, Z. (2004). Bearing capacity and settlement of concrete-cored DCM pile in soft ground. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22, 105-119. <https://doi.org/10.1023/B:GEGE.0000013994.73567.cc>
- Han, J. (2015). *Principles and practices of ground*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rimbani, V. F., Pranata, G., & Iskandar, A. (2022). Analisis perbandingan perbaikan tanah deep mixing antara aplikasi finite element dua dimensi dengan tiga dimensi. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(2), 415-424. <https://doi.org/https://doi.org/10.24912/jmts.v5i2.16960>
- Su, G., Liu, H., Dai, G., Chen, X., & Deng, Y. (2023). Dynamic analysis of a concrete-cored deep cement mixing pile under horizontal dynamic loads. *Buildings*, 13(6), 1378. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13061378>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc.

- Voottipruex, P., Bergado, D. T., Suksawat, T., Jamsawang, P., & Cheang, W. (2011). Behavior and simulation of deep cement mixing (DCM) and stiffened deep cement mixing (SDCM) piles under full scale loading. *Soils and Foundations*, 51(2), 307-320. <https://doi.org/https://doi.org/10.3208/sandf.51.307>
- Wonglert, A., Jongpradist, P., Jamsawang, P., & Larsson, S. (2018). Bearing capacity and failure behaviors of floating stiffened deep cement mixing columns under axial load. *Soils and Foundations*, 58(2), 446-461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.012>

