

ANALISIS PERBANDINGAN PERBAIKAN TANAH *DEEP MIXING* ANTARA APLIKASI *FINITE ELEMENT* DUA DIMENSI DENGAN TIGA DIMENSI

Vincentius Felix Rimbani¹, Giovanni Pranata², Ali Iskandar³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Vincentius.325180120@stu.untar.ac.id

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

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Ali.iskandar1999@gmail.com

Masuk: 24-01-2022, revisi: 21-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 22-02-2022

ABSTRACT

Soil problems that we often encounter, especially in Indonesia, are soft soils that have low bearing capacity and large displacements. Soil stabilization is needed to improve these parameters, and one way to stabilize the soil is an improvement technique using the Deep Cement Mixing method. In this era, technology is very helpful in daily activities, including for construction. Modeling of buildings, pavements, bridges, and other projects can be done visually using the finite element application. With the development of technology, there is always a more detailed finite elements applications compared to the previous versions, which simplifies modeling. This study aims to determine the accuracy of model simplification in two-dimensional finite element modeling by comparing it to three-dimensional finite element modeling. The output results of the two finite elements used to compare are the displacements value and the safety factor value. The data used for modeling in both finite elements are the same, which is soil improvement data of Deep Cement Mixing at the Coal Power Plant Project in Bangladesh. The project is located on the seafloor, so the soil is considered as soft soil. Therefore, deep soil improvement is needed and in this case using Deep Cement Mixing method.

Keywords: Soft Soil; Deep Cement Mixing; Finite Element; Displacement; Safety Factor

ABSTRAK

Permasalahan tanah yang paling sering kita temui terutama di Indonesia adalah tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah dan perpindahan yang besar. Stabilisasi tanah diperlukan untuk memperbaiki parameter tersebut, dan salah satu cara untuk stabilisasi tanah adalah teknik perbaikan tanah dengan metode *Deep Cement Mixing*. Pada era modern ini, teknologi sangat membantu dalam kegiatan sehari-hari manusia termasuk dalam bidang konstruksi. Pemodelan bangunan, perkerasan, jembatan, dan proyek lainnya dapat dilakukan secara visual dengan aplikasi *finite element*. Dengan berkembangnya teknologi, selalu hadir aplikasi *finite element* yang baru dan lebih mendetail dibandingkan *finite element* versi lalu, yang merupakan simplifikasi pemodelan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keakuratan simplifikasi model pada pemodelan *finite element* dua dimensi dengan cara membandingkannya terhadap pemodelan *finite element* tiga dimensi yang merupakan pemodelan riil. Hasil *output* dari kedua *finite element* yang digunakan untuk analisis perbandingan adalah nilai perpindahan dan faktor keamanan. Data pemodelan yang dipakai untuk kedua *finite element* adalah sama, yaitu data perbaikan tanah *Deep Cement Mixing* pada Proyek Pembangkit Tenaga Batubara di Bangladesh, India. Proyek terletak pada pinggir laut, maka dapat diketahui tanah merupakan tanah lunak sehingga diperlukan perbaikan tanah dalam dengan metode *Deep Cement Mixing*.

Kata kunci: Tanah Lunak, *Deep Cement Mixing*, Elemen Hingga, Perpindahan, Faktor Keamanan

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Teknik sipil adalah suatu disiplin dalam ilmu teknik yang memiliki hubungan terhadap desain bangunan, perencanaan konstruksi, dan pemeliharaan lingkungan baik secara fisik maupun alami. Keberadaan *civil engineer* mempermudah dalam proses pembangunan fasilitas/infrastruktur. *Civil Engineer* juga hadir dalam rangka perawatan, pemeliharaan,

dan pengelolaan berbagai fasilitas yang telah dibangun. *Civil Engineer* mampu menyediakan fasilitas dengan lebih baik dan menimbulkan rasa nyaman pada masyarakat.

Permasalahan yang sering dihadapi oleh perusahaan konstruksi dalam bidang tanah adalah tanah lunak. Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari sebagian besar butir-butir yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Sifat tanah lunak adalah gaya gesernya kecil, kemampatannya besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan mempunyai daya dukung rendah jika dibandingkan dengan tanah lempung lainnya. Daya dukung yang rendah dapat menyebabkan kerugian, mulai dari kerugian dari sisi biaya konstruksi yang semakin mahal, hingga terancamnya keselamatan konstruksi, yaitu struktur yang dibuat tidak mampu berdiri secara stabil dan bisa runtuh. Dalam menanggulangi permasalahan tersebut, maka diperlukan stabilisasi tanah.

Dalam penulisan ini, penulis akan membahas mengenai teknik perbaikan tanah yang disebut *deep cement mixing*. *Deep cement mixing* adalah metode pembuatan kolom tanah dengan pencampuran semen dan tanah yang biasanya pada lapisan tanah lunak dalam untuk menghasilkan kolom semen-tanah sehingga meningkatkan daya dukung tanah dan mengendalikan besarnya penurunan tanah setelah masa konstruksi.

Seperti yang diketahui bahwa sekarang merupakan era digital maka dengan berkembangnya teknologi, dapat dilakukan pemodelan visual dalam bidang arsitektur, planologi, dan struktural bangunan. Terdapat beberapa aplikasi *finite element* untuk pemodelan visual. Dari beberapa versi *finite element*, terdapat pemodelan dua dimensi dan tiga dimensi. Kelebihan dan kekurangan dari *finite element* dua dimensi dan *finite element* tiga dimensi. Pemodelan dua dimensi merupakan simplifikasi model. Diketahui bahwa dalam pemodelan dua dimensi, yang dimodelkan berupa potongan tanpa memodelkan hal-hal yang memasuki atau tegak lurus dengan layar. Hal tersebut disebut simplifikasi model. Dalam pemodelan tiga dimensi, yang merupakan pemodelan riil, lebih akurat karena tidak adanya simplifikasi pemodelan seperti pada *finite element* dua dimensi.

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui keakuratan simplifikasi model pada pemodelan dua dimensi bila dibandingkan dengan pemodelan riil pada pemodelan tiga dimensi, dengan cara membuat pemodelan pada kedua *finite element* untuk memperoleh output berupa nilai perpindahan (*displacement*) dan faktor keamanan (*safety factor*) dari perbaikan tanah *deep cement mixing*. Serta meneliti perbedaan *finite element* dua dimensi dengan *finite element* tiga dimensi dengan melihat pola keruntuhan pemodelan berdasarkan *sensitivity study* daya dukung *deep cement mixing*.

Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butir-butir yang sangat kecil seperti lempung dan lanau. Lapisan tanah lunak mempunyai sifat gaya geser yang rendah, kemampuan yang tinggi, koefisien permeabilitas yang rendah, dan mempunyai daya dukung yang rendah.

Menurut Hardiyatmo (1992), hal yang berperan penting dari perhitungan penelitian mekanika tanah adalah nilai *specific gravity* (Gs) dari butiran tanah atau pada umumnya disebut berat jenis tanah. Sebelum digunakan untuk penelitian tanah lainnya, untuk mencari nilai *specific gravity* perlu dilakukan penelitian di laboratorium terlebih dahulu. Berat jenis tanah tergantung pada berat partikel tanah pada saat pengukuran (Craig, 1969). Berat jenis tanah adalah perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air (Soedarmo dan Purnomo, 1993).

Dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan, nilai-nilai *specific gravity* untuk berbagai jenis tanah terdapat pada Tabel 1 Berat jenis tanah.

Tabel 1 Berat jenis tanah

Jenis Tanah	Berat Jenis
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lanau organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

(Sumber: Hardiyatmo, 1992)

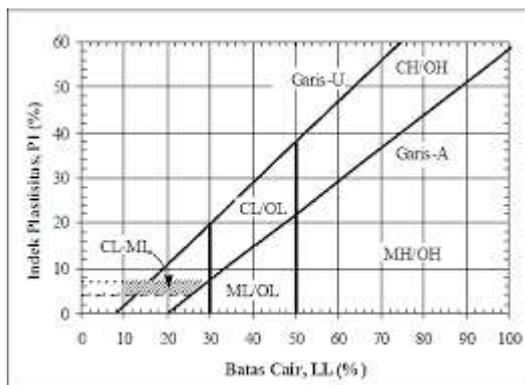
Indeks plastistas (PI) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah. Jika tanah mempunyai nilai PI tinggi, maka tanah mengandung banyak butiran lempung. Jika tanah mempunyai nilai PI rendah, seperti lanau, sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, dan jenis tanah terdapat pada Tabel 2 Indeks plastisitas tanah.

Tabel 2 Indeks plastisitas tanah

PI	Sifat	Jenis Tanah	Plastisitas	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Plastis	Non Kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Rendah	Agak Kohesif
7 – 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Sedang	Kohesif
> 17	Plastisitas tinggi	Lempung	Tinggi	Kohesif

(Sumber: Jumikis, 1962)

Tanah lempung lunak dapat dikategorikan ke dalam kelompok MH atau OH berdasarkan sistem klasifikasi *unified soil classification system* yang dikembangkan di Amerika Serikat oleh Casagrande (1948) terdapat pada Gambar 1 Grafik indeks plastisitas USCS (Sumber: Sukirman,1999). Klasifikasi didasarkan atas prosedur-prosedur di laboratorium dan di lapangan. Tanah yang menunjukkan karakteristik dari dua kelompok harus diberi klasifikasi pembatas yang ditandai simbol yang dipisahkan oleh tanda hubung.

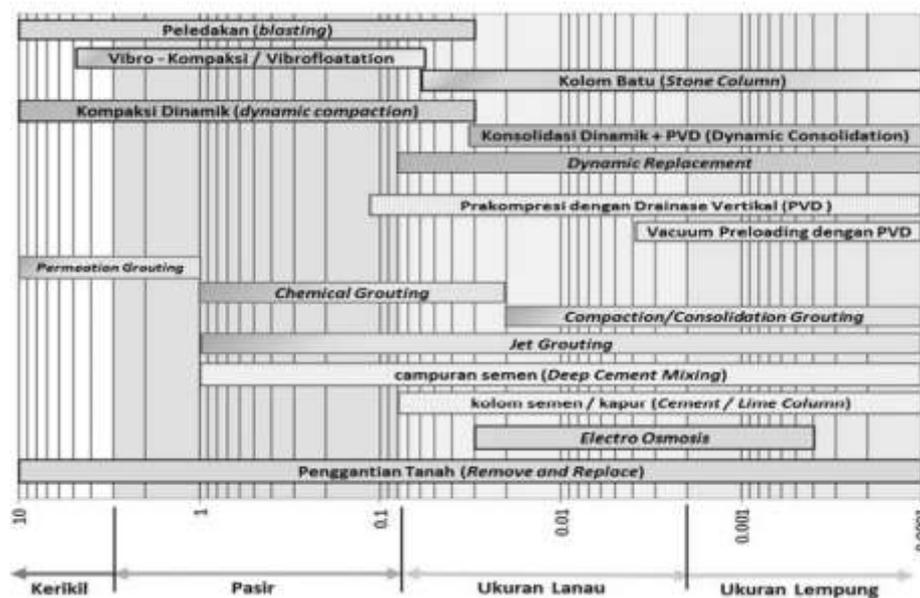


Gambar 1 Grafik indeks plastisitas USCS (Sumber: Sukirman,1999)

Perbaikan Tanah

Teknik perbaikan tanah memiliki prinsip dasar bahwa kapasitas tanah yang kurang baik dalam berbagai aspek, yang dapat diperbaiki melalui peningkatan sifat-sifat (*properties*) dari pada tanah, sesuai dengan tujuan perbaikan yang diinginkan. Jika yang diinginkan adalah peningkatan daya dukung dan kuat geser tanah, maka beberapa parameter tanah perlu diperbaiki, seperti berat volume tanah (γ), kohesi tanah (c), sudut geser dalam tanah (ϕ), dan tekanan pori dalam tanah (u) (Darwis, 2017).

Tujuan umum dari perbaikan tanah adalah sebagai berikut: meningkatkan daya dukung tanah; meningkatkan kuat geser tanah; memperkecil kompresibilitas dan penurunan tanah; memperkecil permeabilitas tanah seperti tanggul; memperbesar permeabilitas tanah seperti *dewatering* dan *sand lense*; memperkecil potensi kembang-susut pada tanah (*swelling potential*); menjamin kelestarian dan keberlanjutan sumber daya alam dan lingkungan; dan tujuan yang khusus yang melekat pada setiap perlakuan dan tindakan di dalam perbaikan tanah di kasus spesifik tertentu (Darwis, 2017). Adapula jenis-jenis perbaikan tanah yang direkomendasikan menurut kedalaman tanahnya menurut SNI 8460:2017 pada Gambar 2.



Gambar 2 Jenis-jenis metode perbaikan tanah (Sumber: SNI 8460:2017)

Deep Cement Mixing

Metode *deep cement mixing* (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.

Alat *deep cement mixing* memiliki poros berongga putar dengan alat pemotong dan bilah pencampur di atas ujungnya. Bubur pengikat dimasukkan ke dalam tanah melalui setiap poros berongga dan keluar dari nosel saat poros menembus ke dalam tanah atau ditarik. Beberapa peralatan memiliki bilah pencampur yang berputar ke arah yang berlawanan, biasa disebut pencampuran ganda, untuk meningkatkan keseragaman campuran tanah-pengikat. Metode *deep cement mixing* banyak digunakan untuk perbaikan tanah kohesif lunak, tetapi kadang-kadang digunakan untuk mengurangi permeabilitas dan mengurangi likuifaksi tanah tanpa kohesi.

Keuntungan metode *deep mixing* antara lain: berlaku untuk sebagian besar jenis tanah; dipasang pada kedalaman yang dalam; pemasangan yang relatif cepat; tingkat kebisingan dan getaran rendah; dapat berfungsi sekaligus sebagai penahan tanah dan penahan/penghalang air di lokasi dan waktu yang sama; dan lebih sedikit merusak tanah terutama untuk metode kering. Sedangkan untuk keterbatasannya antara lain: biaya mobilisasi relatif tinggi; variabilitas tinggi dalam kualitas kolom; dan kurangnya metode kontrol kualitas standar (Jie Han, 2015).

Reaksi kimia stabilisasi kapur melibatkan hidrasi pengikat, reaksi pertukaran ion, dan pembentukan produk reaksi pozzolanic. Ketika kapur tohor (CaO) dicampur dengan tanah lembab, kapur tersebut menyerap kelembaban dari tanah dan memiliki reaksi kimia seperti berikut.



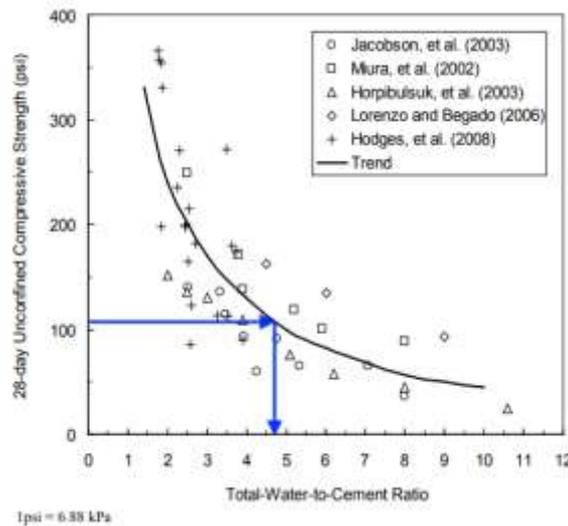
Reaksi kimia ini menghasilkan panas dan mengurangi kelembaban di dalam tanah. Pengurangan kelembaban di tanah meningkatkan kekuatan tanah. Proses kimia ini juga disebut hidrasi pengikat. Kapur terhidrasi larut ke dalam air sehingga meningkatkan konsentrasi ion kalsium, Ca^{2+} dan ion hidroksil, OH^- . Kalsium ion Ca^{2+} bertukar dengan kation di permukaan tanah liat partikel. Reaksi pertukaran ion antara pengikat dan tanah dapat mengubah sifat fisik tanah, seperti sebagai pengurangan plastisitas tanah. Di bawah konsentrasi tinggi OH^- (yaitu, lingkungan pH tinggi), silika dan aluminium dalam mineral tanah liat larut ke dalam air dan memiliki reaksi dengan kalsium untuk membentuk kalsium-silikat dan kalsium-aluminat gel, yang stabil dan tidak larut dalam air selama lingkungan pH tinggi dipertahankan. Proses reaksi ini disebut reaksi *pozzolanic* (Jie Han, 2015). Produk yang dihasilkan dari proses ini disebut produk reaksi *pozzolanic*. Produk-produk ini mengubah tanah menjadi padatan yang mengeras dengan kekuatan dan kekakuan.

Selain hidrasi pengikat, reaksi pertukaran ion, dan pembentukan produk reaksi *pozzolanic*, bahan kimia stabilisasi tanah oleh semen memiliki proses reaksi untuk membentuk produk hidrasi semen. Semen memiliki beberapa senyawa yang dapat mengalami reaksi kimia dengan air. Sebagian besar senyawa dalam semen adalah $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, yang dapat memiliki reaksi kimia berikut untuk menghasilkan produk hidrasi semen:



Apabila kadar CaO dalam campuran semen kurang, maka semen tidak akan bercampur. Produk hidrasi semen, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, sering dinyatakan sebagai $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ atau C-S-H. Selama hidrasi ini, kalsium hidroksida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dilepaskan, yang menghasilkan reaksi *pozzolanic* sebagai stabilisasi kapur. Pembentukan produk hidrasi dari waktu ke waktu menyebabkan *stiffening* (kekakuan), *setting* (pematatan), dan *hardening* (peningkatan kekuatan) (Jie Han, 2015).

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam pencampuran bahan DCM adalah rasio *water to cement* yang umumnya didapatkan setelah tes *unconfined compressive strength* di laboratorium. Gambar 3 merupakan grafik rasio *water to cement* dimana tren untuk *unconfined compressive strength* 28 hari menurun ketika rasio total *water-cement* (w:c) campuran meningkat.



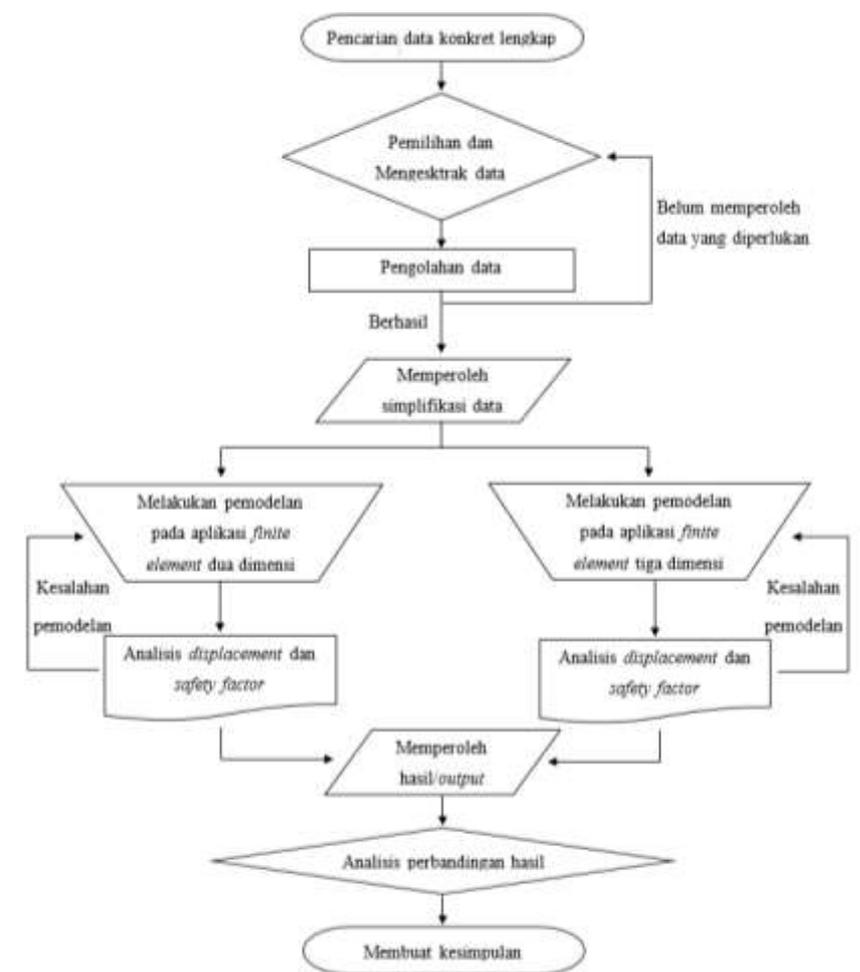
Gambar 3 Grafik rasio *water-cement* (Sumber: US FHWA, 2013)

Selain rasio *water-cement* perlu diperhitungkan juga rasio luasan DCM dengan tanah yang diperbaiki, yang akan dibandingkan dengan rasio perbedaan daya dukung sebelum dan setelah perbaikan tanah, agar luasan dan daya dukung setelah perbaikan memenuhi target yang diinginkan. Rasio luasan harus lebih besar dibandingkan dengan rasio daya dukung agar perbaikan tanah mencapai target yang diinginkan.

2. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data

Sumber data berasal dari data primer yang tidak disebutkan namanya dan studi pustaka yang berasal dari buku, jurnal, dan internet yang berhubungan dengan studi kasus yang akan dianalisis. Adapun dilakukan studi pustaka untuk dapat mengetahui teori-teori yang membantu dalam pekerjaan analisis. Data tanah yang diberikan berupa data N-SPT yang kemudian didapatkan data lainnya menggunakan korelasi. Selain data tanah, diberikan pula data proyek berupa gambar kerja *soil improvement* dan *site plan* proyek. Tahap-tahap penelitian diilustrasikan pada Gambar 4 yang merupakan diagram alir penelitian.



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan perhitungan dan korelasi dari data yang ada maka parameter-parameter lapisan tanah yang digunakan untuk pemodelan dua dimensi dan tiga dimensi ada pada Tabel 3 Parameter Lapisan Tanah, dan parameter *deep cement mixing* ada pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 3 Parameter Lapisan Tanah

Parameter	Lapisan Tanah			
	AC1	AS2	AC3	DS
N-SPT	1	12	16	84
γ unsat (kN/m ³)	15	16	15	19
γ sat (kN/m ³)	16	18	17	21
e0	1,15	0,70	0,65	0,40
Eu (Mpa)	4	24	34	62
Su (kPa)	30	80	110	205
ϕ' (°)	27.5	31	32	43.5
c' (kPa)	3	16	22	41

OCR	1,2	3	2,4	3
Cc	0,53	0,34	0,32	0,17
v'	0,4	0,3	0,3	0,3
E' (kPa)	3733	20 800	29 467	53 733

Tabel 4 Parameter *Deep Cement Mixing* untuk Pemodelan Dua Dimensi

γ unsat (kN/m ³)	γ sat (kN/m ³)	Void Ratio e	E' (kPa)	Poisson Ratio v'	Su (kPa)
16	17	0,90	72 000	0,20	300

Tabel 5 Parameter *Deep Cement Mixing* untuk Pemodelan Tiga Dimensi

Bagian	γ unsat (kN/m ³)	γ sat (kN/m ³)	Void Ratio e	Poisson Ratio v'	Su (kPa)	E' (kPa)
Tepi	16	17	0,90	0,20	480	115 200
Tengah	16	17	0,90	0,20	760	182 400

Pada saat pemodelan tiga dimensi, pertama dicoba dengan ukuran pemodelan yang sesuai data proyek, namun dikarenakan terbatasnya waktu penelitian dan lamanya pemodelan akibat ukuran yang besar serta lamanya kalkulasi karena harus *trial and error*, maka ukuran pemodelan tiga dimensi diperkecil kurang lebih dua puluh kali lipat agar penelitian dapat selesai tepat waktu. Ukuran panjang tegak lurus dengan layar yang digunakan sepanjang 31,2 meter. Panjang tersebut diambil dengan memperhatikan pola DCM bagian tengah dan pola bagian tepi yang sejajar, sekaligus memotong struktur embankment.

Setelah melakukan pemodelan dengan kedua aplikasi elemen hingga, penulis mencoba memodelkan kembali menggunakan *finite element* tiga dimensi dengan ukuran panjang (searah tegak lurus dengan layar) yang lebih besar yakni ukuran panjang sebesar 37,2; 67,2; dan 247,2 meter. Setelah perhitungan selesai, maka didapatkan hasil *output* dari setiap pemodelan yang tertulis pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil *Output* Pemodelan Dua Dimensi dan Tiga Dimensi

Pemodelan	Perpindahan (m)	Faktor Keamanan Sebelum Konsolidasi	Faktor Keamanan Setelah Konsolidasi
2D	0,7177	1,857	1,846
3D (31,2 m)	0,6726	1,884	1,895
3D (37,2 m)	0,7188	1,907	1,916
3D (67,2 m)	0,7185	1,891	1,898
3D (247,2 m)	0,7195	1,902	1,927

Untuk mengetahui keakuratan tiap pemodelan maka diperhitungkan persentase perbedaan antar setiap pemodelan, dan diperoleh hasil seperti pada Tabel 7.

Tabel 7 Persentase Perbedaan antar Pemodelan

Pemodelan	Persentase Perbedaan		
	Perpindahan	Faktor Keamanan Sebelum Konsolidasi	Faktor Keamanan Setelah Konsolidasi
2D 3D 31,2 m	6.28%	2.31%	2.69%
2D 3D 37,2 m	0.15%	2.62%	3.65%

2D	3D 67,2 m	0.11%	1.80%	2.74%
2D	3D 247,2 m	0.25%	2.37%	4.20%
3D 31,2 m	3D 37,2 m	6.43%	0.31%	0.99%
3D 31,2 m	3D 67,2 m	6.39%	0.53%	0.05%
3D 31,2 m	3D 247,2 m	6.52%	0.05%	1.56%
3D 37,2 m	3D 67,2 m	0.04%	0.84%	0.94%
3D 37,2 m	3D 247,2 m	0.10%	0.26%	0.57%
3D 67,2 m	3D 247,2 m	0.14%	0.58%	1.50%

Hasil *displacement* yang dibandingkan pada Tabel 7 merupakan *displacement* dari keseluruhan pemodelan dimana *displacement* maksimumnya terletak pada daerah timbunan pasir lepas. Dan untuk *safety factor* yang diperoleh hanya *safety factor* terkecil dari pemodelan yang terletak pada bidang miring embankment. Jadi perbandingan diatas merupakan efek keseluruhan proyek yang dimodelkan dengan menggunakan perbaikan tanah *deep cement mixing*.

Untuk *displacement* maksimum dari *deep cement mixing* sendiri pada pemodelan dua dimensi adalah sebesar 0,1433 meter dan pada pemodelan tiga dimensi adalah sebesar 0,1398 meter. Sedangkan untuk *safety factor*-nya tidak dapat diketahui pada kedua pemodelan karena seperti dikatakan sebelumnya, *safety factor* yang diperoleh hanya yang terkecil dimana pada pemodelan ini terletak pada bidang miring embankment.

Untuk mengetahui batas daya dukung perbaikan tanah *deep cement mixing* pada tanah eksisting yang dibutuhkan, maka dalam penelitian ini dilakukan *sensitivity study* untuk mencari tahu nilai *Su* pada saat tanah eksisting runtuh. *Su* desain adalah 300 kPa, maka dilakukan reduksi *Su* bertahap hingga didapatkan pola runtuh yang mencapai tanah eksisting.

Sensitivity study pertama dilakukan pada pemodelan dua dimensi dikarenakan pemodelan lebih cepat, terlebih untuk *trial and error* dimana harus melakukan perhitungan berkali-kali. Setelah dilakukan reduksi *Su* secara bertahap, yaitu dengan nilai *Su* 250 kPa, 200 kPa, 150 kPa, 100 kPa, dan terakhir 50 kPa dimana keruntuhan tanah eksisting sudah terjadi. Maka dilakukan lagi *sensitivity study* untuk mencari titik tengah dengan nilai *Su* berturut-turut 75 kPa, 70 kPa, 60 kPa, 65 kPa, 66 kPa, 67 kPa, 68 kPa, dan 69 kPa. Didapatkan nilai batas keruntuhan tanah eksisting adalah sebesar 67 kPa karena pada nilai *Su* 67 kPa tanah eksisting runtuh, sedangkan pada nilai *Su* 68 kPa dan 69 kPa pola keruntuhan masih pada bidang miring embankment. Namun keruntuhan *deep cement mixing* ada pada nilai *Su* yang sebesar 50 kPa, maka nilai *Su* yang ditetapkan sebagai nilai keruntuhan *deep cement mixing* adalah 50 kPa.

Setelah melakukannya dengan pemodelan dua dimensi, dilakukan pula pada pemodelan tiga dimensi dimana nilai *Su* direduksi dikalikan 0,75 terlebih dahulu sebelum dikonversikan menggunakan perbandingan luas seperti sebelumnya. Setelah didapatkan nilai *Su* untuk DCM yakni 70 kPa untuk pola tepi dan 110 kPa untuk pola tengah, maka dapat dilakukan pemodelan tiga dimensi dengan nilai *Su* tersebut.

Dari *sensitivity study* pemodelan dua dimensi, didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,566. Sedangkan pada pemodelan tiga dimensi didapatkan nilai *safety factor* sebesar 1,901. Ada perbedaan yang cukup antara keduanya sebesar 21,4%, dan ini dikatakan sebagai efek tiga dimensi dimana adanya keragaman keruntuhan arah tegak lurus dengan layar, dibandingkan dengan dua dimensi dimana keruntuhan arah tegak lurus dengan layar dianggap konsisten/sama. Hal ini merupakan efek dari tiga dimensi pada pemodelan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Kedua aplikasi *finite element* dapat digunakan untuk pemodelan dan perhitungan proyek perbaikan tanah *deep cement mixing* dengan memperhatikan parameter tanah yang digunakan
2. Pemodelan menggunakan *finite element* dua dimensi membutuhkan waktu lebih sedikit dibandingkan dengan menggunakan *finite element* tiga dimensi
3. Pemodelan menggunakan *finite element* dua dimensi memiliki simplifikasi perhitungan dibandingkan dengan menggunakan *finite element* tiga dimensi yang merupakan pemodelan riil
4. Persentase perbedaan *displacement* dan *safety factor* dari keseluruhan pemodelan antara *finite element* dua dimensi dengan *finite element* tiga dimensi tergolong rendah karena masih dibawah 10%

5. Dengan *sensitivity study*, nilai S_u desain DCM dimana terjadi keruntuhan pada perbaikan tanah *deep cement mixing* sebesar 50 kPa, sedangkan S_u DCM sendiri sebesar 70 kPa untuk pola tepi dan 110 kPa untuk pola tengah
6. Ada perbedaan yang cukup besar antara faktor keamanan pada kedua *finite element* dalam *sensitivity study* yang dilakukan yaitu sebesar 21,4%, dan hal ini merupakan efek dari tiga dimensi pada pemodelan.

Saran

1. Pemodelan pada *finite element* dua dimensi sebaiknya digunakan untuk pemodelan yang simpel dan tidak rumit, juga lebih efisien dibanding *finite element* tiga dimensi untuk *sensitivity study*
2. Pemodelan pada *finite element* dua dimensi baik digunakan apabila membutuhkan perhitungan dalam waktu dekat atau dibutuhkan cepat
3. Pemodelan pada *finite element* tiga dimensi digunakan untuk pemodelan yang kompleks dan apabila memiliki banyak waktu yang tersedia
4. Pemodelan pada *finite element* tiga dimensi digunakan apabila dibutuhkan perhitungan yang lebih akurat dan kritis
5. Pemodelan tiga dimensi dibutuhkan apabila kondisi model tidak memenuhi kriteria *plane strain* seperti elevasi yang tidak rata, pelapisan, geometri model yang tidak sama, dalam arah tegak lurus dengan gambar.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: BSN, 2017.
- Craig, R.F. *Mekanika Tanah*. Jakarta: Erlangga, 1989.
- Darwis, H. *Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta: Pustaka AQ, 2017.
- Federal Highway Administration. *Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*. Georgetown Pike: US Department of Transportation, 2013.
- Han, Jie. *Principles and Practice of Ground Improvement*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- Hardiyatmo, Hary Christady. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2002.
- Jumikis, Alfreds R. *Soil Mechanics*. New Jersey: D. Van Nostrand Company, 1962.
- Soedarmo, G. Djatmiko and S.J. Edy Purnomo. *Mekanika Tanah*. Malang: Kanisius, 1993.
- Sukirman, Silvia. *Dasar-dasar Perencanaan Geometrik Jalan*. Malang: NOVA, 1999.

