

Received 7th February 2022
Accepted 20th May 2022
Published 31st July 2022

Open Access

Analisis Nilai Penurunan dan Faktor Keamanan pada Perbaikan Tanah Dasar Metode *Deep Cement Mixing*

M Wahyu Nugraha^a, Erdina Tyagita Utami^a, Julita Hayati^a

^a Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

* Korresponden E-mail: mwahyu.21117106@student.itera.ac.id

Abstract: Construction in Indonesia, which is often found on soft soil, has a problem, namely settlement. This condition requires improvement due to poor soil conditions. There are many methods for improving soft soil one of which is the deep cement mixing method. The main function of this method is to reduce settlement under the embankment. Soil improvement in deep cement mixing is carried out by mixing chemicals in the form of cement into the soil using an auger mixing machine with the ultimate goal of increasing the bearing capacity of the existing soil. There are various patterns of using deep cement mixing. However, a square pattern was used modeled. The analysis was conducted using a 2D Finite Element Program. Deep cement mixing modeling was conducted with various types of distance variations 1.5 m; 2.0 m and 2.5 m and the percentage of cement mixture 2.5%; 5.0%; 7.5%; 10.0%; 12.5%; 15.0% which is loaded with coal pile as high as 18 meters which are assumed to be a uniform load. Modeling using the 2D finite element method without using deep cement mixing resulted in a decrease of 3.11 meters with a consolidation time of 8,787 days. The results of modeling that have been conducted using a finite element program show that the improvement of deep cement mixing can reduce the settlement from 17.04% to 97.41% and the consolidation time from 2.64% to 89.64%. The most optimum variation of deep cement mixing repair is at a distance of 1.5 meters with a percentage of cement mixture of 7.5% with a decrease of 96.90% in the decline and 88.82% at the time of consolidation where the decrease that occurs is only 0.10 meters with a consolidation time of 982 days.

Keywords: *soft soil, settlement, soil improvement, deep cement mixing*

Abstrak: Konstruksi di Indonesia yang sering dijumpai berada di atas tanah lunak memiliki masalah yaitu penurunan. Kondisi tersebut mengharuskan dilakukannya perbaikan karena kondisi tanah yang kurang baik. banyak metode perbaikan tanah lunak yang bisa dilakukan, salah satunya ialah metode *deep cement mixing*. Fungsi utama dari penggunaan perbaikan metode ini ialah mengurangi penurunan di bawah timbunan. Perbaikan tanah *deep cement mixing* dilakukan dengan mencampurkan bahan kimia berupa semen kedalam tanah menggunakan *auger mixing machine* dengan tujuan akhir untuk menaikkan daya dukung tanah yang ada. Ada berbagai macam pola penggunaan *deep cement mixing*, namun pola yang digunakan dalam penelitian ini ialah pola persegi. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan Program Elemen Hingga 2D. Pemodelan *deep cement mixing* dilakukan dengan berbagai jenis variasi jarak 1,5 m; 2,0 m dan 2,5 m dan persentase campuran semen 2,5%; 5,0%; 7,5%; 10,0%; 12,5%; 15,0% yang diberi beban timbunan batubara setinggi 18 meter yang diasumsikan berbentuk beban merata. Pemodelan menggunakan metode elemen hingga 2D tanpa perbaikan menghasilkan nilai penurunan sebesar 3,11 meter dengan waktu konsolidasi 8.787 hari. Hasil pemodelan yang telah dilakukan menggunakan program elemen hingga menunjukkan bahwa perbaikan *deep cement mixing* dapat mengurangi penurunan dari 17,04% hingga 97,41% serta waktu konsolidasi dari 2,64% hingga 89,64%. Variasi perbaikan *deep cement mixing* yang paling optimal berada pada variasi jarak 1,5 meter dengan persentase campuran semen 7,5% dengan pengurangan yang terjadi sebesar 96,90% pada penurunan dan 88,82% pada waktu konsolidasi dimana penurunan yang terjadi hanya sebesar 0,10 meter dengan waktu konsolidasi 982 hari.

Kata Kunci: *tanah lunak, penurunan, perbaikan tanah, deep cement mixing*

Pendahuluan

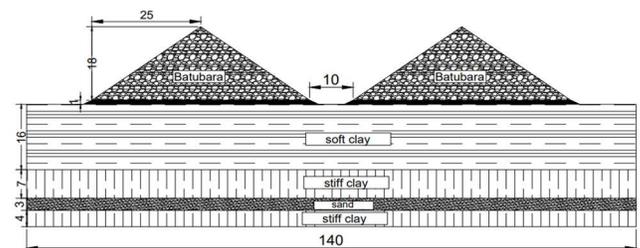
Deep Cement Mixing (DCM) adalah perlakuan in situ di mana tanah asli atau bahan pengisi dicampur dengan bahan semen dan/atau bahan lainnya, biasanya disebut sebagai pengikat. Dibandingkan dengan tanah asli atau timbunan, material tanah yang telah dicampur bahan komposit telah membuat peningkatan *engineering properties* seperti peningkatan kekuatan, permeabilitas yang lebih rendah, dan penurunan kompresibilitas [1]. Beberapa peneliti yang telah menganalisis DCM yaitu, Andri Lesmana [2] menganalisis Studi Perilaku dan Mekanisme Interaksi Penggabungan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan *Deep Cement Mixing* (DCM) untuk perbaikan tanah lunak, hasil dari penelitian ini menunjukkan DCM menjadi solusi dalam pengontrolan besaran penurunan tanah yang ada sampai menunjukkan suatu penurunan yang lebih kecil dibanding sebelumnya, tetapi penggunaan DCM tidak bisa meningkatkan percepatan waktu konsolidasi yang ada. Sedangkan, penggunaan PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi yang ada, dan juga besarnya beban preloading yang diterima. Oleh sebab itu, pengkombinasian PVD dan DCM dapat lebih mempercepat waktu dan mengurangi besarnya penurunan yang ada. Widya [3] juga menganalisis Pemodelan 3D pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode *Deep Mixed Column*. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin besarnya diameter dan kerapatan *column*, penurunan yang terjadi akan lebih kecil dengan waktu konsolidasi yang lebih cepat. Perbaikan yang paling efisien dalam pemodelan ini yaitu dengan diameter *column* 0,4 m serta jarak 2 m, karena proporsi campuran untuk pengikat lebih sedikit, tetapi tetap bisa mengurangi penurunan yang terjadi pada tanah lunak. Banyak penelitian mengenai perbaikan tanah menggunakan metode DCM, hanya saja variasi yang digunakan hanya berupa variasi jarak dan diameter kolom dari perbaikan tanah metode DCM. Sedangkan untuk penelitian yang menganalisis mengenai variasi jarak dan persentase campuran semen masih sangat sedikit. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi pemilihan variasi persentase banyaknya campuran semen dalam menghasilkan perbaikan DCM yang efektif dan aman serta memenuhi kriteria perencanaan sesuai dengan standar yang berlaku.

Penelitian ini mengambil sampel data pada area penumpukan batubara di Muara Gembong, Muara Bakti, Bekasi yang memiliki tanah lunak dengan ketebalan 16 meter di bawah permukaan, dengan muka air tanah berada pada permukaan tanah asli. Pada penelitian ini beban timbunan batubara direncanakan setinggi 18 meter yang diasumsikan beban berbentuk beban merata. Prinsip tanah lunak apabila diberikan pembebanan yang besar akan mengalami

penurunan yang besar. Penurunan tersebut diakibatkan oleh nilai daya dukung tanah yang rendah. Dikarenakan daya dukung tanah lunak yang rendah perlu dilakukannya perbaikan tanah untuk meningkatkan besaran daya dukung pada tanah lunak. Oleh karena itu, analisis perbaikan tanah metode *deep cement mixing* perlu dilakukan sebagai upaya perbaikan tanah untuk mengurangi nilai penurunan yang diakibatkan beban yang besar tersebut.

Metode

Analisis perbaikan tanah metode *deep cement mixing* (DCM) dilakukan dengan perangkat lunak berbasis elemen hingga 2D. Parameter tanah yang didapat dari pengujian tanah dasar pada area penumpukan batubara di Muara Gembong, Muara Bakti, Bekasi. Lapisan tanah dasar yang dimiliki ialah 16 m tanah lunak, 7 m lempung kaku, 3 m pasir dan 4 m lempung kaku. Di atas tanah dasar tersebut diberi tanah timbunan dengan isian pasir (*sand fill*) Setebal 1 m. selanjutnya di atas timbunan pasir diberi suatu beban yang dalam hal ini direncanakan sesudah proses perbaikan tanah berlangsung dengan beban yang ada berupa timbunan batubara.



Gambar 1. Stratifikasi Tanah

Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan rangkuman parameter tanah dasar dan parameter tanah yang telah diberi perbaikan DCM. yang berupa berat jenis tak jenuh (γ_{unsat}), berat jenis jenuh (γ_{sat}), sudut geser efektif (ϕ'), kohesi efektif (c'), dan koefisien permeabilitas (k). Untuk parameter DCM menggunakan data sampel optimal yang telah berumur 28 hari. Dimana sampel tersebut dikatakan optimal karena perkiraan konservatif dari peningkatan kekuatan dengan waktu untuk perawatan semen dan terak semen, kecuali untuk beberapa tanah yang sangat organik. Nilai E_u didapatkan dari korelasi terhadap nilai q_u sesuai nilai E_u berkisar antara 300-1000 q_u [4].

Tabel 1. Data Parameter Tanah

Jenis Tanah	Timbunan	Tanah dasar
Kedalaman tanah (m)	+1	0 s.d 16
Kondisi	<i>Drained</i>	<i>Undrained</i>
Metode	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Soft Soil</i>
N_{SPT}	-	0 s.d 4
Jenis Tanah	<i>Sand Loose</i>	<i>Soft Clay</i>
angka pori	0,5	1,95

Jenis Tanah	Timbunan	Tanah dasar
γ_{unsat}	17 kN/m ³	14,94kN/m ³
γ_{sat}	20 kN/m ³	16,68 kN/m ³
γ_{air}	10 kN/m ³	10 kN/m ³
Cu	-	12,317 kN/m ²
C'	1	1,275
ϕ_T	30°	24°
E	13.000 kN/m ²	-
Angka poisson ratio (u)	0,3	0,45
$K_v=k_h$	10	$0,49 \times 10^{-3}$
C _c	-	1,0125
C _s	-	0,075
λ^*	-	0,149
κ^*	-	0,022

Tabel 2. Parameter Material Setelah Perbaikan DCM

Parameter	Kadar Semen (%)						Satuan
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	
γ_{sat}	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	kN/m ³
γ_{dry}	1,01	1,05	1,07	1,10	1,12	1,14	kN/m ³
e ₀	1,59	1,53	1,50	1,46	1,43	1,41	-
qu	53,94	239,28	350,1	446,2	583,5	724,7	kN/m ²
Su	21,576	95,71	140,04	178,48	233,40	289,88	kN/m ²
E _u	16.182	71.784	105.030	133.860	175.050	217.260	kN/m ²

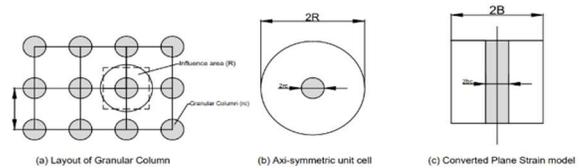
Pada penelitian ini dilakukan pemodelan menggunakan metode elemen hingga 2D berupa pemodelan tanpa perbaikan DCM dan pemodelan dengan perbaikan tanah DCM. Pada perbaikan dengan menggunakan DCM digunakan diameter kolom perbaikan sebesar 1 meter dengan tiga variasi jarak perbaikan, yaitu jarak 1,5 meter, 2,0 meter, 2,5 meter serta variasi persentase nilai campuran semen pada perbaikan *deep cement mixing* berupa 2,5%; 5,0%; 7,5%; 10,0%; 12,5% dan 15,0% .

Pada pemodelan *Plane Strain* metode elemen hingga 2D menunjukkan pemodelan secara menerus memanjang sedangkan pada keadaan sebenarnya dilapangan perbaikan yang dilakukan berupa tiang yang berdiri memiliki spasi jarak. Oleh karena itu untuk analisis menggunakan pemodelan *Plane Strain* digunakan reduksi besar diameter perbaikan tanah dikarenakan adanya perbedaan pada pelaksanaan atau pemodelan secara *Axysimmetric*. [5] Dalam metode ini model *Plane Strain* mengacu pada pemodelan kolom granular, dikarenakan pengaplikasian pada aplikasi metode elemen hingga serupa, kolom granular disimulasikan dengan dinding regangan bidang ekuivalen di mana setengah dari lebar kolom ditentukan oleh

$$b_c = B \frac{r_c^2}{R^2} \tag{1}$$

$$R = 1,13B \tag{2}$$

Hubungan antara R dan B diberikan oleh persamaan berdasarkan luas total yang setara dan pola kolom sebagai berikut.



Gambar 2. Hubungan Pemodelan *Axysimmetric* dan *Plane Strain*

Untuk kolom *design* yang digunakan pada pemodelan dengan diameter kolom DCM rencana sebesar 1,5 meter, 2,0 meter dan 2,5 meter berdasarkan pers. 1 dan pers. 2 dapat dilihat pada Tabel 3.

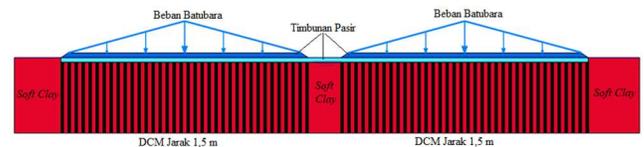
Tabel 3. Data Pemodelan pada *Plane Strain*

Diameter DCM (m)	Jarak (m)	r_c (m)	B	R (m)	b_c (m)	Kolom pada pemodelan (m)
1	1,5	0,5	0,75	0,846	0,262	0,524
	2		1	1,128	0,196	0,393
	2,5		1,25	1,410	0,157	0,314

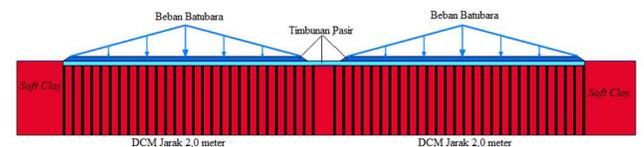
Pemodelan pada program elemen hingga 2D menggunakan jenis pemodelan *plane strain* dengan data sesuai pada Tabel 3. dapat dilihat pada Gambar 3. sampai dengan Gambar 6.



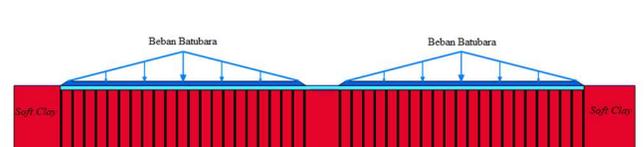
Gambar 3. Pemodelan Tanpa Perbaikan



Gambar 4. Perbaikan dengan Jarak Perbaikan 1,5 m



Gambar 5.. Perbaikan dengan Jarak Perbaikan 2,0 m



Gambar 6. Perbaikan dengan Jarak Perbaikan 2,5 m

Besarnya beban batubara pada analisis kali ini diasumsikan beban merata berbentuk segitiga yang ditentukan terlebih dahulu. Berdasarkan sifat fisik dari batubara yaitu berat jenis (*specific gravity*) batubara berkisar dari 1,25 g/cm³ sampai 1,70 g/cm³, pertambahannya sesuai dengan peningkatan derajat batubaranya. Tetapi berat jenis batubara turun sedikit dari lignit (1,5 g/cm³) sampai batubara bituminous (1,25 g/cm³), kemudian naik lagi menjadi 1,5 g/cm³ untuk antrasit sampai grafit (2,2 g/cm³). Pada kasus ini, batubara digunakan dalam PLTU, dikarenakan hal itu batubara yang umum digunakan dalam PLTU adalah batubara jenis bitumen, berdasarkan massa jenis batubara bitumen dalam keadaan padat adalah 1346 kg/m³ dan tinggi maksimum dari timbunan batubara setinggi 18 m dengan luasan tertentu maka didapatkan beban tertinggi yaitu:

$$q_0 = \gamma \times H \tag{3}$$

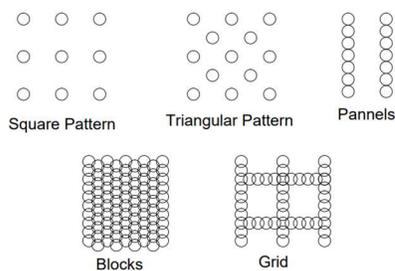
$$q_0 = 13,2 \text{ kN/m}^3 \times 18 \text{ m} = 237,6 \text{ kN/m/m}$$

$$\Delta P = q \cdot l \tag{4}$$

$$\Delta P = 237,6 \times 0,32$$

$$\Delta P = 76,032 \text{ kN/m/m}$$

Pada DCM ada beberapa pola yang biasanya diaplikasikan seperti; *square pattern*, *blocks pattern*, *panel pattern*, *triangular pattern* serta *grid pattern*. Untuk formasi yang telah disebutkan di atas dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pola umum penerapan DCM [2]

[1] Dalam pola *square pattern* memiliki nilai kolom terisolasi. Di mana nilai dari kolom terisolasi tersebut berupa rasio penggantian area pada tanah. Nilai rasio pada pola *square pattern* disebut dengan $\alpha_{s,center}$. Nilai $\alpha_{s,center}$ berkisar dari 0,2 hingga 0,4. Untuk nilai minimum $\alpha_{s,center}$ bisa dihitung melalui persamaan 5.

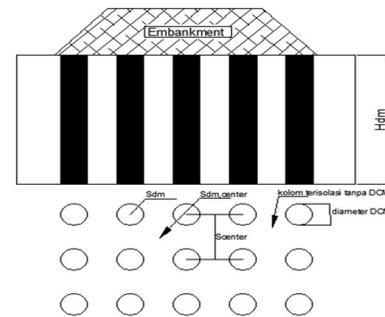
$$\alpha_{s,center} = \frac{\pi d^2}{4(S_{center})^2} \tag{5}$$

di mana:

$\alpha_{s,center}$ = Rasio penggantian area di bawah bagian tengah dari timbunan

d = diameter DCM

S_{center} = Jarak antar DCM



Gambar 8. Ilustrasi Perbaikan Tanah DCM [1]

Analisis stabilitas lereng harus dilakukan untuk menentukan permukaan keruntuhan kritis dan faktor keamanan yang sesuai. Permukaan geser potensial dapat melewati seluruhnya di bawah atau seluruhnya di atas dinding geser campuran dalam, melalui dinding geser campuran dalam, atau sebagian melalui dan sebagian di bawah dinding geser campuran dalam. Kuat geser komposit dari zona campuran di bawah timbunan harus ditetapkan. Di mana besaran kuat geser komposit dari zona campuran tersebut disebut dengan $S_{dm,center}$ yang dapat dihitung melalui persamaan 6.

$$S_{dm,center} = \max\{\alpha_{s,center}(S_{dcm}) + (1 - \alpha_{s,center})S_{soil}; S_{soil}\} \tag{6}$$

di mana:

$S_{dm,center}$ = kuat geser komposit dari zona campuran dalam di bawah bagian tengah timbunan (kN/m²)

S_{soil} = kuat geser tanah (kN/m²)

Penentuan kuat geser komposit memerlukan besaran nilai dari kuat geser perbaikan tanah *deep mixing*. Dalam penentuan kuat geser tanah campuran ini perlu penetapan nilai properti dari *deep mixing*. Nilai desain untuk kuat geser tanah campuran dalam (S_{dm}) diperkirakan dari kuat tekan tak terkekang yang akan ditentukan ($q_{dm,spec}$), dengan mempertimbangkan f_c dan perbedaan antara puncak tak terkekang dan kuat regangan besar terkekang (f_r). Untuk besaran S_{dm} dapat dihitung melalui persamaan 7.

$$S_{dm} = \frac{1}{2} f_r f_c q_{dm} \tag{7}$$

Di mana:

S_{dm} = kuat geser tanah campuran dalam (kN/m²)

f_r = *strain strengths factor*

f_c = *curing factor*

Strain strengths factor berkisar antara 0,65 - 0,9 untuk timbunan *strain strengths factor* yang disarankan adalah bernilai 0,8. *Curing factor* merupakan faktor umur dari pencampuran untuk umur campuran berkisar antara 28 hari

sampai dengan 365 hari dengan *curing factor* berkisar antara 1,00 – 1,48.

Berdasarkan pers. 6 sampai pers. 7 dengan besar nilai S_{soil} merupakan nilai C_u dari tanah dasar asli, maka nilai $S_{dm,center}$ tanah setelah perbaikan ditampilkan pada Tabel 4

Tabel 4. Nilai $S_{dm,center}$ Tanah setelah Perbaikan

Jarak (m)	Campuran Semen (%)	S_{dcm} (kN/m ²)	$\alpha_{s,center}$	$S_{dm,center}$ (kN/m ²)
1,5	2,5	21,6	0,349	15,549
	5	95,7		41,427
	7,5	140,0		56,900
	10	178,5		70,319
	12,5	233,4		89,489
	15	289,9		109,204
2,0	2,5	21,6	0,196	14,135
	5	95,7		28,691
	7,5	140,0		37,395
	10	178,5		44,943
	12,5	233,4		55,726
	15	289,9		66,816
2,5	2,5	21,6	0,126	13,480
	5	95,7		22,796
	7,5	140,0		28,367
	10	178,5		33,197
	12,5	233,4		40,099
	15	289,9		47,196

Hasil dan Diskusi

Analisis Penurunan Pada Tanah Lempung Tanpa Perbaikan DCM

Besarnya penurunan yang diakibatkan oleh beban batubara dan timbunan pasir yang diberikan pada tanah *soft clay* berupa besarnya penurunan yang diakibatkan oleh konsolidasi yang dalam hal ini disebut dengan penurunan konsolidasi dan penurunan segera yang diakibatkan pembebanan secara langsung. Pada kasus ini pembebanan batubara diasumsikan sebagai beban merata segitiga sebesar 76,032 kN/m/m. Untuk besaran " ΔP " yang digunakan pada perhitungan adalah jumlah dari keseluruhan beban yang ada berupa beban merata segitiga dari batubara dan beban timbunan pasir sebanyak 2 meter. Dengan titik tinjau yang berada pada kedalaman 8,5 meter nilai P'_0 dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$P'_0 = \gamma' \cdot H \quad (8)$$

$$P'_0 = (16,68-10) \text{ kN/m}^3 \cdot 8,5 \text{ m}$$

$$P'_0 = 56,78 \text{ kN/m}^2$$

Dikarenakan tanah *soft clay* yang ada berjenis NC maka nilai penurunan konsolidasi dapat dicari dengan persamaan berikut ini:

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (9)$$

$$S_c = \frac{1,0125 \times 15}{1 + 1,95} \log \frac{56,78 + 107,86}{56,78}$$

$$S_c = 2,380 \text{ m}$$

Tanah yang diberi beban akan mengalami penurunan segera. Penurunan segera merupakan penurunan yang dihasilkan oleh distorsi massa tanah yang tertekan dan terjadi pada volume konstan. Dengan lebar timbunan batubara selebar 50 m dan beban keseluruhan (" ΔP ") sebesar 107,86 kN/m² nilai penurunan segera yang diakibatkan oleh beban tersebut dapat dihitung melalui persamaan berikut ini:

$$S_i = \frac{\Delta P \cdot B}{E} (1 - \mu_s^2) I_p \quad (10)$$

$$S_i = \frac{107,86 \times 50}{5000} (1 - 0,45^2) 1$$

$$S_i = 0,86 \text{ meter}$$

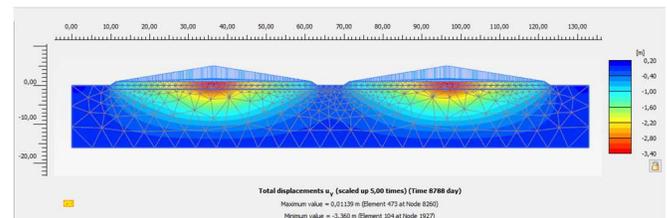
Dari 2 hasil penurunan di atas yaitu penurunan segera dan penurunan konsolidasi, maka dapat dihitung penurunan total dengan persamaan berikut:

$$S_t = S_i + S_c \quad (11)$$

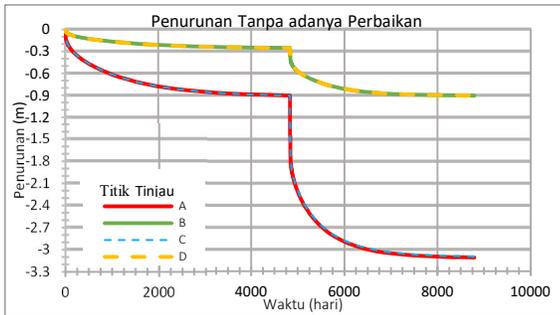
$$S_t = (0,86 + 2,38) \text{ meter}$$

$$S_t = 3,24 \text{ meter}$$

Dalam perhitungan didapatkan hasil penurunan total sebesar 3,24 meter. Berdasarkan analisis menggunakan program elemen hingga 2D seperti pada Gambar 3. untuk tanah tanpa adanya perbaikan, besaran penurunan yang dihasilkan memiliki nilai maksimum sebesar 3,360 m dapat dilihat pada Gambar 9. serta grafik penurunan berdasarkan titik tinjau yang berada tepat dibawah beban tertinggi timbunan pada Gambar 10.



Gambar 9. Penurunan Tanpa dilakukannya Perbaikan DCM

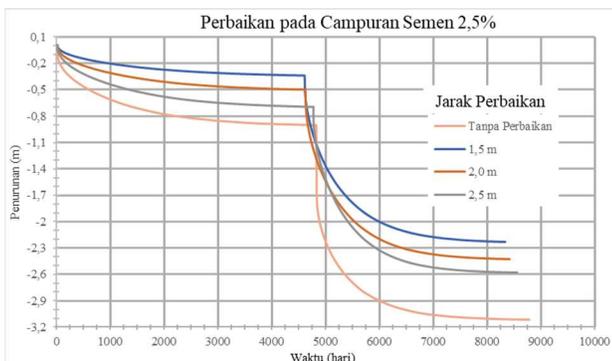


Gambar 10. Penurunan Tanpa Menggunakan Perbaikan DCM

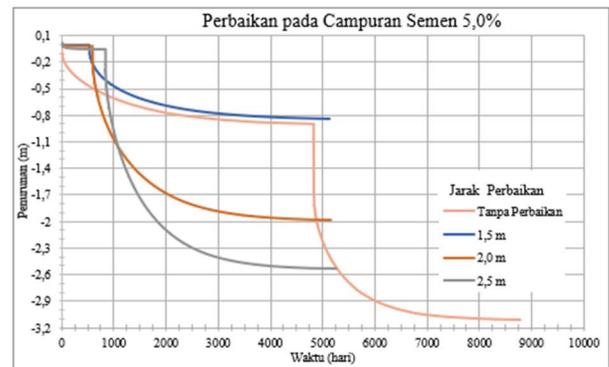
Titik A berada pada tanah asli tepat di bawah titik tertinggi dari beban batubara pertama. Titik B berada pada tanah asli tepat di bawah titik puncak beban batubara pertama juga tetapi pada kedalaman 8,5 meter dari permukaan. Titik C dan D posisinya sama dengan titik A dan B tetapi berada pada beban batubara yang kedua. Dari gambar grafik di atas ditunjukkan bahwa tanah asli tanpa perbaikan memiliki nilai penurunan maksimum sebesar 3,144 meter pada titik A dan C dengan lama waktu konsolidasi hingga 8.787 hari atau 24 tahun. Pada titik B dan D terjadi penurunan sebesar 0,902 meter dengan waktu konsolidasi yang sama.

Penurunan Pada Tanah Lempung dengan Perbaikan DCM

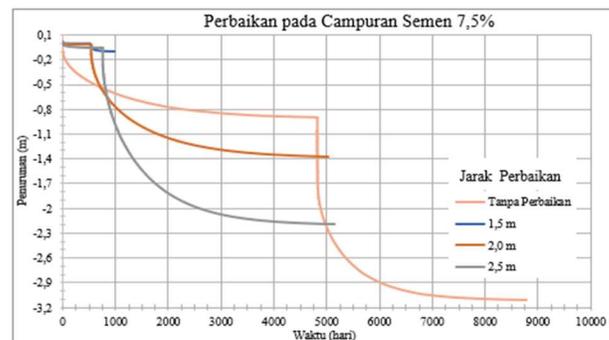
Tujuan utama dari perbaikan DCM yaitu mengurangi besarnya penurunan pada tanah dasar yang diakibatkan oleh pembebanan. Berdasarkan tujuan tersebut dilakukan pemodelan menggunakan aplikasi berbasis metode elemen hingga 2D dengan pemodelan seperti pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5. Dari pemodelan yang telah dilakukan dengan propertis tanah dasar dan propertis tanah setelah dilakukannya perbaikan menggunakan metode DCM pada Tabel 1. dan Tabel 2. nilai penurunan dari perbaikan DCM apabila ditinjau dari perbandingan variasi jarak dapat dilihat pada Gambar 11. sampai Gambar 16.



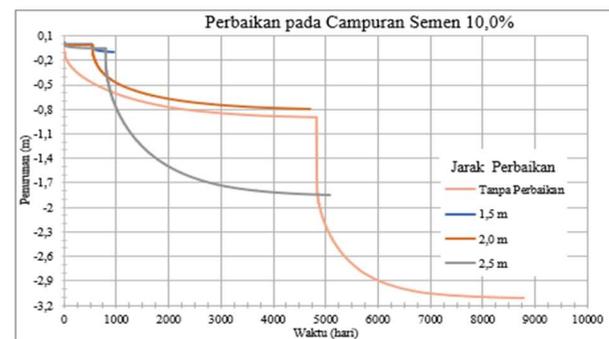
Gambar 11. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 2,5%



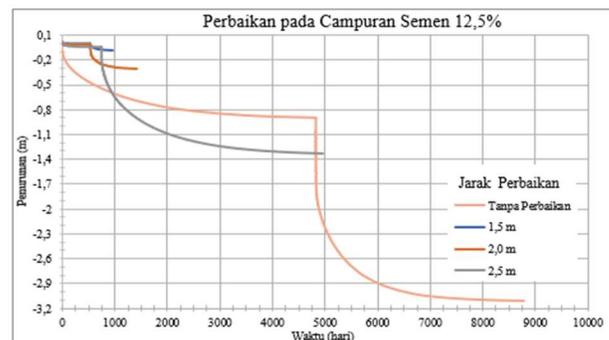
Gambar 12. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 5,0%



Gambar 13. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 7,5%



Gambar 14. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 10,0%



Gambar 15. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 12,5%

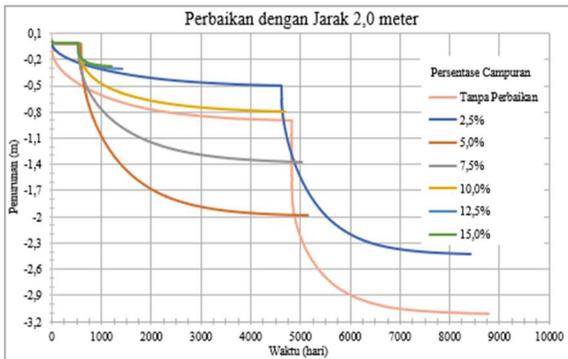


Gambar 16. Penurunan dengan Perbaikan Campuran 15,0%

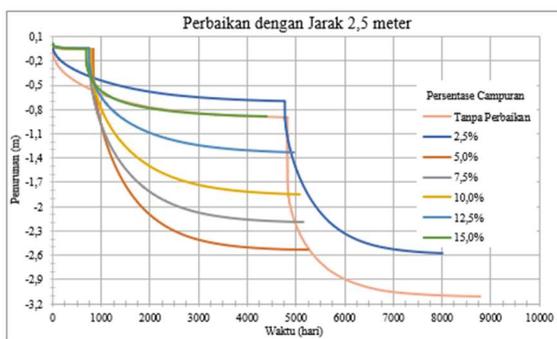
Nilai penurunan dari perbaikan DCM apabila ditinjau dari perbandingan variasi persentase campuran semen yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 17. sampai Gambar 19.



Gambar 17. Penurunan dengan Jarak Perbaikan 1,5 meter



Gambar 18. Penurunan dengan Jarak Perbaikan 2,0 meter



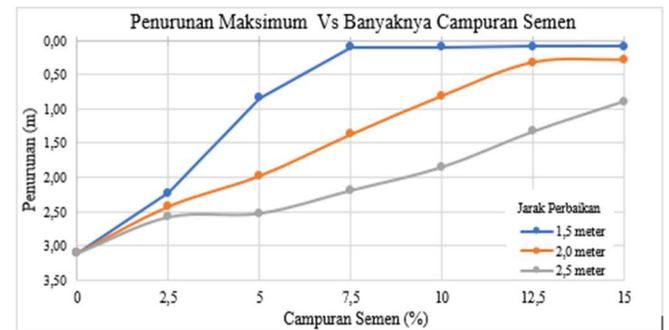
Gambar 19. Penurunan dengan Jarak Perbaikan 2,5 meter

Dari Gambar 11. sampai dengan Gambar 19. Jarak dan persentase campuran semen sangat berpengaruh sekali terhadap metode perbaikan DCM. Semakin rapat jarak perbaikan DCM, maka semakin kecil pula nilai penurunannya begitu pula dengan nilai persentase campuran semen semakin besar persentase campuran semen pada perbaikan DCM, maka semakin kecil nilai penurunannya, hal ini diakibatkan oleh peningkatan daya dukung *ultimate* dari tanah tersebut yang akan meningkat apabila dilakukannya perbaikan. Dari segi waktu konsolidasi perbaikan DCM juga berpengaruh walaupun pada persentase campuran semen yang kecil sangat sedikit pengaruhnya. Secara keseluruhan besarnya penurunan dan waktu konsolidasi yang diakibatkan oleh timbunan batubara dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Besar Penurunan Tanah dan Waktu Konsolidasi

Kondisi		Penurunan maksimum (m)	Waktu Konsolidasi (hari)	Persentase pengurangan penurunan	Persentase pengurangan waktu konsolidasi
Jarak	Campuran Semen (%)				
Tanpa Perbaikan		3,11	8787,69	-	-
1,5	2,5	2,23	8332,58	28,46%	5,18%
	5	0,84	5132,06	73,17%	41,60%
	7,5	0,10	982,82	96,90%	88,82%
	10	0,09	950,11	97,06%	89,19%
	12,5	0,08	927,93	97,34%	89,44%
	15	0,08	910,02	97,41%	89,64%
2	2,5	2,43	8426,48	22,07%	4,11%
	5	1,98	5153,27	36,48%	41,36%
	7,5	1,37	5038,88	56,00%	42,66%
	10	0,80	4698,18	74,24%	46,54%
	12,5	0,31	1408,74	90,06%	83,97%
	15	0,27	1209,93	91,24%	86,23%
2,5	2,5	2,58	8556,04	17,04%	2,64%
	5	2,53	5256,09	18,78%	40,19%
	7,5	2,19	5154,56	29,57%	41,34%
	10	1,85	5084,53	40,56%	42,14%
	12,5	1,33	4952,81	57,31%	43,64%
	15	0,89	4397,91	71,52%	49,95%

Untuk perbedaan penurunan maksimum berdasarkan campuran semen secara keseluruhan data sesuai dengan Tabel 5. dapat dilihat pada Gambar 20.



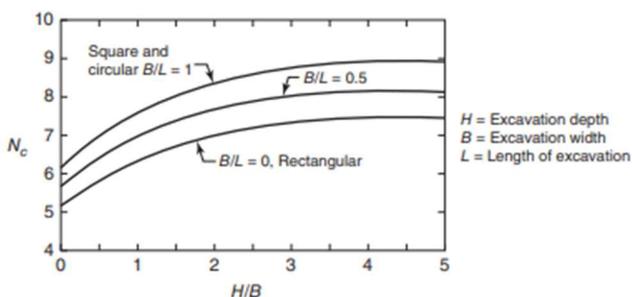
Gambar 20. Penurunan Maksimum berdasarkan Campuran Semen

Dari data gambar tersebut bisa dilihat bahwa semakin besar jarak perbaikan maka semakin besar juga nilai penurunan yang ada. Sedangkan untuk campuran semen sendiri semakin besar nilai persentase campuran semen pada perbaikan tanah DCM maka semakin kecil nilai penurunannya. Dari hal tersebut dapat dilihat bahwasanya pada jarak 1,5 meter campuran yang paling efektif adalah >7,5% karena penurunan yang di dapatkan ≤ 10 cm dan sudah berada hampir dititik konstan penurunan minimum. Pada jarak 2,0 meter campuran paling efektif adalah dengan persentase campuran semen 12,5% dan 15,0% karena penurunan yang dihasilkan sudah berada di titik konstan dan dapat mengurangi nilai penurunan hingga lebih dari 90%. Untuk jarak 2,5 meter campuran paling optimum adalah 15% atau berada pada persentase campuran semen paling besar.

Dalam penelitian ini dapat dilihat bahwa campuran yang paling optimum pada jarak 1,5 meter adalah persentase campuran 7,5% dan pada jarak 2,0 meter berada pada persentase campuran 12,5% dikarenakan penurunan yang kurang dari 0,5 meter. Apabila penurunan lebih dari 0,5 meter maka batubara terlalu banyak yang terendam air, karena muka air tanah terletak pada elevasi 0 meter.

Analisis Daya Dukung dan Faktor Keamanan pada Perbaikan DCM

Nilai faktor keamanan pada penelitian ini ditinjau dari kemampuan tanah menopang beban. Beban yang ada berupa beban dari timbunan batubara dan juga timbunan pasir. Besaran beban tertinggi yang diberikan pada penelitian ini adalah sebesar 107,86 kN/m/m. Nilai faktor keamanan berdasarkan kemampuan tanah menopang beban dihitung berdasarkan perbandingan besar daya dukung *ultimate* pada titik tengah tanah perbaikan. Besarnya daya dukung *ultimate* pada tanah setelah dilakukannya perbaikan DCM didapatkan dari besar nilai $S_{dcm,center}$ pada tanah setelah perbaikan dikalikan dengan nilai N_c . Nilai N_c pada penelitian ini ialah sebesar 5,14 dimana nilai tersebut didapatkan dari *bearing capacity factor for base stability* dengan besaran $B/L = 0$ pada Gambar 21.



Gambar 21. Bearing Capacity Factor For Base Stability

Nilai faktor keamanan berdasarkan faktor keamanan terhadap penghancuran tanah campuran di ujung kaki DCM dan juga faktor keamanan terhadap geser pada bidang vertikal pada zona DCM, adalah 1,3 [1]. Nilai faktor keamanan pada tanah setelah dilakukannya perbaikan menggunakan metode *deep cement mixing* dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Nilai Daya Dukung Tanah setelah Perbaikan

Jarak (m)	Campuran Semen (%)	$S_{dcm,center}$ (kN/m ²)	Daya dukung <i>ultimate</i> (kN/m ²)	Faktor Keamanan
1,5	2,5	15,549	79,92	0,74
	5	41,427	212,93	1,97
	7,5	56,900	292,47	2,71
	10	70,319	361,44	3,35
	12,5	89,489	459,97	4,26
2	15	109,204	561,31	5,20
	2,5	14,135	72,65	0,67
	5	28,691	147,47	1,37
	7,5	37,395	192,21	1,78
	10	44,943	231,01	2,14
2,5	12,5	55,726	286,43	2,66
	15	66,816	343,43	3,18
	2,5	13,480	69,29	0,64
	5	22,796	117,17	1,09
	7,5	28,367	145,80	1,35
2,5	10	33,197	170,63	1,58
	12,5	40,099	206,11	1,91
	15	47,196	242,59	2,25

Dari Tabel 6. dapat dilihat bahwa kenaikan daya dukung yang dihasilkan pada campuran 2,5% hanya 9% pada jarak 2,5 meter, meningkat sebesar 15% pada jarak 2,0 meter dan meningkat sebesar 26% pada jarak 1,5 meter serta pada jarak 2,5 meter campuran 5% kenaikannya 85%. Berbeda sekali dengan campuran yang lain nilai kenaikan daya dukungnya sudah melebihi 100%. Hal tersebut dikarenakan besar dari $S_{dcm,center}$ pada campuran tersebut masih rendah.

Nilai faktor keamanan berdasarkan Tabel 6. dapat dilihat bahwasanya nilai faktor keamanan berkisar antara 0,64 pada tanah menggunakan perbaikan DCM pada jarak 2,5 meter dan persentase campuran semen 2,5% dan 5,20 pada tanah yang dilakukan perbaikan DCM dengan jarak 1,5 meter dan persentase campuran 15%. Nilai-nilai yang memenuhi persyaratan sesuai dengan faktor keamanan [1] adalah pada tanah yang dilakukan perbaikan tanah DCM dengan variasi jarak 1,5 meter dengan persentase campuran 5%; 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15%, variasi jarak 2,0 meter dengan persentase campuran 5%; 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15% serta variasi jarak 2,5 meter dengan persentase campuran semen 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15%.

Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis nilai penurunan dan faktor keamanan pada perbaikan tanah dasar metode *deep cement mixing*, kesimpulan yang dapat dihasilkan adalah sebagai berikut:

1. Besarnya penurunan yang didapat tanpa perbaikan DCM adalah 3,11 meter dan setelah dilakukannya perbaikan tanah metode DCM dengan diameter 1,0 meter dan jarak 1,5 meter; 2,0 meter dan 2,5 meter serta variasi campuran semen 2,5%; 5,0%; 7,5%; 10,0%; 12,5% dan 15% berada pada rentan 0,0798 meter sampai dengan 2,580 meter, perbaikan DCM ini dapat mengurangi penurunan dari 17,04% hingga 97,41%.
2. Waktu konsolidasi yang didapat tanpa perbaikan DCM adalah 8.787 hari dan setelah dilakukannya perbaikan tanah metode DCM dengan diameter 1,0 meter dan jarak 1,5 meter; 2,0 meter dan 2,5 meter serta variasi campuran semen 2,5%; 5,0%; 7,5%; 10,0%; 12,5% dan 15% mengurangi waktu konsolidasi hingga 89,64% menjadi 910 hari pada variasi jarak 1,5 meter dengan persentase campuran 15%.
3. Perbaikan DCM sangat berpengaruh dalam mengatasi penurunan, variasi dari DCM apabila semakin kecil jarak antar kolom DCM maka semakin kecil penurunan yang ditimbulkan dan semakin besar nilai persentase campuran semen yang dicampurkan pada tiang perbaikan tanah DCM maka semakin kecil pula nilai penurunannya.
4. Nilai faktor keamanan yang memenuhi [1] pada konstruksi timbunan batubara adalah pada perbaikan tanah metode DCM pada variasi jarak 1,5 meter dengan persentase campuran 5%; 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15%, variasi jarak 2,0 meter dengan persentase campuran 5%; 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15% serta variasi jarak 2,5 meter dengan persentase campuran semen 7,5%; 10%; 12,5%; dan 15% dengan nilai lebih dari 1,3.
5. Perbaikan tanah metode DCM yang paling efektif dilakukan adalah dengan jarak 1,5 meter dengan kandungan campuran semen sebanyak 7,5% dengan nilai faktor keamanan 2,71 dan penurunan 0,1 meter selama 982 hari, serta pada jarak 2,0 meter dengan kandungan campuran semen sebanyak 12,5% dengan nilai faktor keamanan 2,66 dan penurunan 0,31 meter selama 1408 hari, karena penurunannya kurang dari setengah meter.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada semua pihak yang berperan dalam membantu penelitian ini.

Referensi

- [1] Springfield, Virginia. (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- [2] L. Andri., and E. Susila. (2016). "Studi Perilaku dan Mekanisme Interaksi Penggabungan Prefabricated Vertical Drain dan Deep Cement Mixing untuk Perbaikan Tanah Lunak", Jurnal Teknik Sipil, Vol. 23 No. 3. ISSN 0853 2982.
- [3] W. Permatasari., dkk. (2017). "Pemodelan 3D pada Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Deep Mixed Column", Jurnal Teknik Sipil, Vol. 3 No. 2, Juni 2017.
- [4] Springfield, Virginia. (2005). An Introducing to The Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Application. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- [5] Hosseinpour, Iman., dkk. (2017). "Verification of A Plane Strain Model for The Analysis of Encased Granular Columns", Journal of Geo Engineering, Universitas Brawijaya, Malang, Vol. 12, No. 4, pp. 137-145, Desember 2017.
- [6] M. Xiao, D. Barreto. *Geotechnical Engineering Design*. West Sussex, John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- [7] Bowles, J.E. (1985). Sifat Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) Edisi Kedua. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [8] Das, M. Braja. (1993). Mekanika Tanah (Prinsip prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [9] Dr. Ir. H. Darwis. (2017). M.Sc. Dasar – Dasar Teknik Perbaikan Tanah. Yogyakarta: Penerbit Pustaka AQ YLJK2.
- [10] Han, Jie. (1964). Principles and Practice of Ground Improvement. Canada: Wiley.