

PENGARUH PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN *DEEP MIXING* TERHADAP BESARNYA PENURUNAN

Mega Dwi Arthaning Tyas¹, Isnaniati² dan Dio Alif Hutama³

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Jl. Sutorejo No.59, Surabaya 60113
Email korespondensi: megadwitys17@gmail.com

²Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Jl. Sutorejo No.59, Surabaya 60113
Email : isnaniati@ft.um-surabaya.ac.id

³Prodi Teknik Lingkungan, Universitas Airlangga, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno, Mulyorejo, Surabaya, 60115
Email : d.alif.hutama@fst.unair.ac.id

ABSTRAK

Kondisi tanah dasar yang lunak sering menjadi permasalahan pada konstruksi pembangunan suatu bangunan, sehingga apabila tidak dilakukan perbaikan tanah terlebih dahulu, maka tanah dasar akan mengalami penurunan yang relatif besar. Dalam penelitian ini menggunakan metode *deep mixing* yang dimodelkan sebagai plat untuk meningkatkan stabilitas tanah. Berdasarkan laporan investigasi tanah, lokasi penelitian di kota Banjarmasin termasuk jenis tanah lempung lunak yang berada tepat di tepi sungai Barito didominasi oleh tanah rawa dengan muka air tanah -0,25 m. Penelitian ini bertujuan membandingkan hasil perhitungan penurunannya sebelum dilakukan perbaikan tanah dengan *deep mixing* dan penurunan setelah perbaikan tanah menggunakan *deep mixing* dengan memberikan variasi modulus elastis *deep mixing*. Dalam penelitian ini digunakan beban timbunan setinggi 5 m dengan variasi modulus elastis ($E = 50000$ kPa; 100000 kPa; 200000 kPa), diameter *deep mixing* 0,6 m; spasi 2,5 m dan total kedalaman yang diperbaiki 17,5m. Hasil penelitian sebelum adanya *deep mixing* cara analitis diperoleh penurunan konsolidasi (S_c) sebesar 1.99 m dan waktu penurunan (t) sebesar 22.328 tahun pada derajat konsolidasi 90% (U_{90}). Kemudian setelah adanya perbaikan tanah dengan *deep mixing* pada $E = 200000$ kPa; diameter 0.6 m; jarak 2.5 m, dengan menggunakan Plaxis 8.6 2D diperoleh penurunan konsolidasi (S_c) sebesar 1.54 m dan waktu penurunan (t) sebesar 0.23 tahun pada derajat konsolidasi 90% (U_{90}). Pemberian modulus elastis (E) yang semakin besar dapat menurunkan nilai penurunan tanah (S), dan pola keruntuhan yang dihasilkan pada analisis dengan plaxis 8.6 terlihat mengalami deformasi pada sekitar daerah timbunan.

Kata Kunci: Tanah Lunak, *Deep Mixing*, Penurunan, Modulus Elastisitas Tanah

ABSTRACT

Soft subgrade conditions are often a problem in the construction of a building, so if the soil is not repaired first, the subgrade will experience a relatively large decline. In this study, a deep mixing method was used which was modelled as a plate to increase soil stability. Based on the soil investigation report, the research location in the city of Banjarmasin is a type of soft clay soil that is right on the banks of the Barito river, dominated by swamp land with a groundwater level of 0.25 m. This study aims to provide the results of the calculation of the settlement before the soil improvement with deep mixing is carried out and compare the settlement after the soil improvement using deep mixing with a given variation of the elastic modulus of deep mixing. In this research, embankment loads as high as 5 m were used with variations in elastic modulus ($E = 50000$ kPa; 100000 kPa; 200000 kPa), inside diameter of 0.6 m deep mixing; spacing of 2.5 m and a total repaired depth of 17.5m. The results of the study before the deep mixing analytical method obtained a consolidation settlement (S_c) of 1.99 m and a settlement time (t) of 22.328 years at a consolidation degree of 90% (U_{90}). Then after land improvement with deep mixing at $E = 200000$ kPa; diameter 0.6m; a distance of 2.5 m, using Plaxis 8.6 2D obtained consolidation settlement (S_c) of 1.54 m and settlement time (t) of 0.23 years at a degree of consolidation of 90% (U_{90}). Giving a greater elastic modulus (E) can reduce the value of soil

settlement (S), and the resulting failure pattern in the analysis with plaxis 8.6 appears to be deformed around the embankment area.

Keywords: *Soft Soil, Deep Mixing, Settlement, Soil Elastic Modulus*

1. PENDAHULUAN

Salah satu lokasi dimana dapat dijumpai tanah lunak adalah di Banjarmasin, Kalimantan Selatan sebagaimana yang akan menjadi lokasi penelitian ini. Kemiringan tanah di Banjarmasin antara 0,13% dengan susunan geologi terutama bagian bawahnya didominasi oleh lempung dengan sisipan pasir halus dan endapan alluvium yang terdiri dari lempung hitam keabuan dan lunak [16]. Oleh karena itu dibutuhkan metode perbaikan tanah lunak di Banjarmasin. Secara umum, terdapat beberapa metode perbaikan tanah lunak yang diterapkan di Indonesia untuk meningkatkan daya dukung tanah lunak antara lain PVD (*Prefabricated Vertical Drain*), *preloading*, *vacuum consolidation*, *dynamic deep compaction*, *stone column*, dan *deep mixing* [5].

Dalam penelitian ini akan dibahas metode perbaikan tanah menggunakan *deep mixing*. Prinsip dari metode *deep mixing* adalah untuk memperbaiki kekuatan tanah dengan menggunakan bahan pengikat. *Deep mixing* adalah teknologi modifikasi tanah in-situ dimana pengikat basah atau kering disuntikkan ke dalam tanah dan dicampur secara in-situ dengan tanah lunak (lempung, gambut atau tanah organik) dengan cara mekanis atau dengan alat pencampuran berupa *rotary mixing tool* [6], [15]. Kedalaman metode *deep mixing* bisa mencapai 20 untuk *dry method* dan 30 m untuk *wet method* [11]. Secara umum ada dua jenis metode pada teknologi *Deep Soil Mixing* berdasarkan jenis campuran. *Wet Deep Soil Mixing* merupakan perbaikan tanah yang mencampurkan tanah asli dengan binder berupa bubur *slurry* (bubur), sedangkan apabila binder yang digunakan dalam keadaan kering disebut *dry Deep Soil Mixing*. *Wet Deep Soil Mixing* cocok

digunakan pada perbaikan tanah lempung lunak, lanau, dan pasir halus yang memiliki kadar air rendah. Sedangkan untuk tanah berkadar air tinggi direkomendasikan menggunakan *dry Deep Soil Mixing* [9]. [1]. Selain itu metode *Deep Soil Mixing* juga dapat digunakan pada tanah gambut atau lumpur, namun perlu adanya dengan penyesuaian material binder yang digunakan serta penyesuaian prosedur pelaksanaan [10]. Kelebihan metode *deep mixing* ini tak hanya meningkatkan daya dukung tanah, tetapi juga mampu mengurangi besar penurunan tanah pasca konstruksi yang mungkin terjadi [7].

Dari latar belakang diatas perlunya upaya perbaikan tanah untuk mengurangi besar penurunan dan mengetahui besar daya dukung tanah. Lokasi di Banjarmasin ini tepat di tepi sungai Barito yang didominasi oleh tanah rawa yang merupakan tanah lunak dengan MAT -0,25. Tanah lunak tersebut terdiri dari lempung dan tanah lanau dengan rata-rata nilai SPT hasil borlog ditinjau pada kedalaman 1-35m. Dalam penelitian ini dilakukan analisis numerik perbaikan tanah lunak menggunakan metode *deep mixing* dengan menggunakan beberapa parameter yaitu kedalaman, spasi, dan diameter. Analisis numerik akan dilakukan menggunakan program *Plaxis 2D* [4] dengan lokasi studi di Kota Banjarmasin, Kalimantan Selatan.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan data sekunder berupa laporan penyelidikan tanah yang berlokasi di kota Banjarmasin. Data sekunder merupakan data instansi atau sumber-sumber lain yang sudah tervalidasi. Data sekunder tersebut meliputi:

- a. Data penyelidikan tanah CPT, terdapat 18 titik,

- b. Data penyelidikan tanah N-SPT, terdapat 19 titik,
- c. Data laboratorium, dan
- d. Data corebox.

Variabel penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah modulus elastis (E) dengan rentang 50000 kPa, 100000 kPa, dan 200000 kPa. Sementara itu untuk diameter menggunakan 0,6 m dan spasi 2,5 m.

Teknik analisis data

- a. Perhitungan Manual
Perhitungan manual untuk menghitung penurunan tanah sebelum dilakukan perbaikan tanah dengan metode *deep mixing*. Penurunan yang akan dihitung berupa penurunan primer [8].
- b. Analisis Numerik
Analisis numerik menggunakan Plaxis 2D yang bertujuan untuk mengetahui penurunan sebelum dan sesudah perbaikan. Perhitungan dengan menggunakan metode *deep mixing* yang menggunakan parameter kedalaman 17,5 m, modulus elastis, spasi, dan diameter [4].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan tegangan overburden (σ'), [12], [2], [3]

Hasil perhitungan tegangan overburden ditampilkan pada Tabel 1.

- Lapisan 1 (h = 0,25), titik tinjau diambil $\frac{1}{2} h = 0,125$ m
 $G_s = 2.438$
 $e = 1.706$
 $\gamma' = 2,4 \text{ t/m}^3$
 $\gamma_{\text{sat}} = 2,4 \text{ t/m}^3$
 $\gamma' = 1 \text{ t/m}^3$
 $\sigma'_{\text{dry}} = \frac{1}{2} h \cdot \gamma'$
 $= \frac{1}{2} 0,25 \cdot 2,4 = 0,300 \text{ t/m}^2$
- Lapisan 2 (h = 0,75), titik tinjau diambil $\frac{1}{2} h = 0,375$ m

$$G_s = 2.438$$

$$e = 1.706$$

$$\gamma' = 0,576 \text{ t/m}^3$$

$$\gamma_{\text{sat}} = 0,576 \text{ t/m}^3$$

$$\gamma' = 1 \text{ t/m}^3$$

$$\sigma'_o = \frac{1}{2} h_2 \cdot \gamma' + h_1 \cdot \gamma'$$

$$= \frac{1}{2} 0,75 \cdot 0,576 + 0,25 \cdot 2,4$$

$$= 0,816 \text{ t/m}^2$$

Tabel 1. Perhitungan Tegangan Overburden (σ') pada BH-09

Tegangan Overburden (σ') pada BH-09							
Lap isa n	Keda lama n	H	Ys at	Y w	Y' m	Yb et	σ'_o
		(m)	(t/ m ³)	(t/ m ³)	(t/ m ³)	(t/ m ³)	(t/ m ²)
I	0 - 0,25	0, 2 5	-	-	-	-	0,3
II	0,25 - 1	0, 7 5	1,5	1	0,5	0,5	0,8
III	1-8	7	1,5	1	0,5	0,5	3,0
IV	8 - 14	6	1,5	1	0,5	0,5	6,6
V	14 - 18,5	4, 5	1,5	1	0,5	0,5	9,4
VI	18,5 - 23	4, 5	1,4	1	0,4	0,4	11, 5
VII	23 - 27,5	4, 5	1,5	1	0,5	0,5	13, 8
VIII	27,5 - 35	7, 5	1,5	1	0,5	0,5	17

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perhitungan penambahan tegangan ($\Delta\sigma$) [12], [2], [3]

Hasil perhitungan penambahan tegangan ditampilkan pada Tabel 2.

Pada lapisan 1:

$$Z_1 = 0,125 \text{ m}$$

$$q = \gamma_{\text{timb}} \times h_{\text{timb}} = 1,8 \times 5 = 9$$

$$B_1 = 22 \text{ m}$$

$$B_2 = 2,5 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = \left[\tan^{-1} \left\{ \left(\frac{B_2+B_1}{z} \right) \right\} - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \right]$$

$$= \left[\tan^{-1} \left\{ \left(\frac{2,5+22}{0,125} \right) \right\} - \tan^{-1} \left(\frac{22}{0,125} \right) \right]$$

$$= 0,033$$

$$\alpha_2 = \left[\tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \right]$$

$$= \left[\tan^{-1} \left(\frac{22}{0,125} \right) \right]$$

$$= 89,674$$

$$I = \frac{1}{\pi} \left(\left(\frac{B_2+B_1}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} \alpha_2 \right)$$

$$= \frac{1}{180} \left(\left(\frac{2,5+22}{2,5} \right) (0,033 + 89,674) - \frac{22}{2,5} 89,674 \right) = 0,5$$

$$I_{pakai} = 0,5 \times 2$$

$$= 1.000$$

$$\Delta\sigma = I_{pakai} \cdot q$$

$$= 1.000 \times 9$$

$$= 9 \text{ t/m}^2$$

Tabel 2. Perhitungan Penambahan Tegangan ($\Delta\sigma$)

Lapisan	Tebal (m)	z	q		B		α_1	α_2	Ipakai	$\Delta\sigma$ (t/m ²)
			ti	B	B	B				
I	0,25	0,125	9	2	2	0	8	1,9	9	
II	0,75	0,375	9	2	2	0	8	1,9	9	
III	7	3,5	9	2	2	1	7	0,9	8,9	
IV	6	3	9	2	2	2	6	0,9	8,6	

Lapisan	Tebal (m)	z	q		B		α_1	α_2	Ipakai	$\Delta\sigma$ (t/m ²)
			ti	B	B	B				
V	4,5	4,5	9	2	2	2	5	0,9	8,1	
VI	4,5	4,5	9	2	2	3	4	0,85	7,6	
VII	4,5	4,5	9	2	2	3	4	0,79	7,1	
VIII	7,5	7,5	9	2	2	2	3	0,71	6,4	

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perhitungan penurunan konsolidasi primer (Sc) [12], [2], [3]

- Lapisan 1 (h = 0,25 m)
 - $\sigma'_c = 0,48 \text{ kg/cm}^2$ (hasil dari data lab)
 - $\sigma'_o = 0,300 \text{ t/m}^2$
 - $OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} = \frac{0,48}{0,300}$
 - $= 1,600 \text{ Over Consolidated (OC)}$
- Lapisan 2 (h = 0,75 m)
 - $\sigma'_c = 0,48 \text{ kg/cm}^2$ (hasil dari data lab)
 - $\sigma'_o = 0,816 \text{ t/m}^2$
 - $OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} = \frac{0,48}{0,816}$
 - $= 0,588 \text{ Normal Consolidated (NC)}$
- Lapisan 3 (h = 7 m)
 - $\sigma'_c = 0,48 \text{ kg/cm}^2$ (hasil dari data lab)
 - $\sigma'_o = 3,048 \text{ t/m}^2$
 - $OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} = \frac{0,48}{3,048}$
 - $= 0,157 \text{ Normal Consolidated (NC)}$

Maka nilai tersebut dijadikan acuan perhitungan penurunan primer (Sc).

- Lapisan 1 (Hi = 0,25)
 $H_{timb} = 5$ $e_0 = 1,706$
 $\sigma'_o = 0,300$ $\Delta\sigma = 9$
 $\sigma'_c = 0,48$ $C_s = 0,106$
 $C_c = 0,391$
 Hasil dari $P_o + \Delta p$ lebih besar dari P_c , maka menggunakan rumus dibawah ini:

$$S_{c1} = C_s \cdot \frac{H}{1+e_0} \cdot \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + C_c \cdot \frac{H}{1+e_0} \cdot \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_c} \right)$$

$$= 0,106 \cdot \frac{0,25}{1+1,706} \cdot \log \frac{0,48}{0,300} + 0,391 \cdot \frac{0,25}{1+1,706} \cdot \log \left(\frac{0,300+9}{0,48} \right)$$

$$= 0,048 \text{ m}$$

- Lapisan 2 (Hi = 0,75)
 $H_{timb} = 5$ $e_0 = 1,706$
 $\sigma'_o = 0,816$ $\Delta\sigma = 9$
 $C_s = 0,106$ $C_c = 0,391$
 $S_{c2} = \frac{H}{1+e_0} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \right]$
 $= \frac{0,75}{1+1,706} \left[0,391 \log \left(\frac{0,816+9}{0,816} \right) \right]$
 $= 0,117 \text{ m}$

- Lapisan 3 (Hi = 7)
 $H_{timb} = 5$ $e_0 = 1,706$
 $\sigma'_o = 3,048$ $\Delta\sigma = 9$
 $\sigma'_c = 0,48$ $C_s = 0,106$
 $C_c = 0,391$
 $S_{e3} = \frac{H}{1+e_0} \left[C_c \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o} \right) \right]$
 $= \frac{7}{1+1,706} \left[0,391 \log \left(\frac{3,048+9}{3,048} \right) \right]$
 $= 0,603 \text{ m}$

Untuk penurunan primer (Sc) total akibat adanya pembebanan pada lokasi BH-09 sebagai berikut:

$$S_c \text{ total} = S_{c1} + S_{c2} + S_{c3} + S_{c4} + S_{c5} + S_{c5} + S_{c6} + S_{c7} + S_{c8}$$

$$= 0,048 + 0,117 + 0,603 + 0,340 + 0,282 + 0,226 + 0,216 + 0,161$$

$$= 1,993 \text{ m}$$

Perhitungan waktu penurunan [12], [2], [3]

Hasil perhitungan waktu penurunan ditampilkan pada Tabel 3. Perhitungan waktu penurunan pada lokasi BH-09 sebagai berikut:

$$Cv_{gab} = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{Cv_n}} \right)^2}$$

$$= 0037 \text{ cm/sec}$$

$$= 0,224 \text{ m/week}$$

$$Cv_{gab} = 0,224 \text{ m/week}$$

$$Ch = 2 Cv = 0,448 \text{ m/week}$$

$$t = \frac{t_{90} H d r^2}{Cv_{gab}} = \frac{0,848 \cdot 17,5^2}{0,224}$$

$$= 1160,5 \text{ minggu}$$

$$= 22,368 \text{ tahun}$$

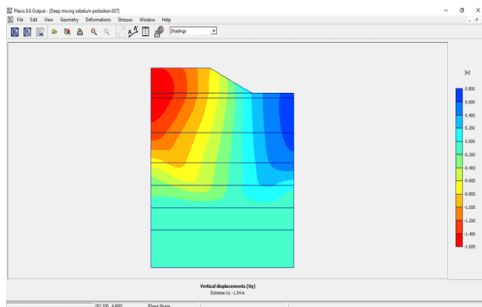
Tabel 3, Perhitungan Waktu Penurunan

Lap isa n	Keda lama n	h (m)	LL	Cv		Ch	
				(m ² / sec)	C (m ² / week)	(m ² / week)	(m ² / week)
1	0 - 0,25	0, 2 5	71 ,3 5	0,0			
2	0,25 - 1	0, 7 5	71 ,3 5	0,0			
3	1 - 8	7	71 ,3 5	0,0			
4	8 - 14	6	68 ,5 5	0,0			
5	14 - 18,5	4, 5	64 ,9 8	0,0	0,2	0,4	
6	18,5 - 23	4, 5	88 ,3 9	0,0			
7	23 - 27,5	4, 5	81 ,2	0,0			
8	27,5 - 35	7, 5	88 ,5 6	0,0			
cv gab				0,0			
t =				116 0,5	Week		
				22,3	Years		

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perhitungan penurunan konsolidasi Dengan software plaxis [8], [13]

Akan didapatkan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada program keluaran (output). Jendela keluaran akan menampilkan total *displacements* pada kondisi setelah konsolidasi secara penuh terjadi. Hasil akhir gambar total *displacements* dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini:



Gambar 1. Total Displacement dengan Menggunakan Plaxis 8.6 2D

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perbandingan perhitungan analitis dan plaxis

Dari perhitungan analitis akibat pembebanan awal dapat diketahui tinggi timbunan 5 m dengan total penurunan akibat penurunan primer sebesar 1,993 m dan hasil perhitungan derajat konsolidasi 90% waktu penurunan diketahui membutuhkan waktu penurunan sebesar 22,368 tahun (Tabel 3). Sedangkan dari perhitungan akibat beban awal dengan program Plaxis 8.6 2D telah diketahui total penurunan sebesar 1,54 m dengan tinggi timbunan sebesar 5 m. Persentase selisih menggunakan perbandingan analitis terhadap plaxis.

Selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini: Tabel 4. Selisih Antara Perhitungan Analitis terhadap Plaxis

Tabel 4. Selisih Antara Perhitungan Analitis terhadap Plaxis

H (m)	S (m)	Selisih h	t (tahun)	Selisih h (%)
------------	------------	----------------	----------------	-----------------------

Analisis	5	1,9	22,7	22,3	98,8
Plaxis		1,5		0,26	

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perhitungan penurunan dengan deep mixing menggunakan plaxis 8,6 2D [8], [13].

Pemodelan tanah dan parameter yang digunakan:

Untuk perhitungan pertama setelah mendapatkan total panjang plat sedalam 17,5 m kemudian dilakukan desain perhitungan diameter yaitu sebagai berikut:

$$\text{Diameter plat} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{Spacing plat} = 2,5 \text{ m}$$

$$\text{Modulus Elastis} = 50000 \text{ kPa}$$

Pada input pemodelan PLAXIS membutuhkan parameter kekakuan EI dan EA serta W, karena pada pemodelan menggunakan model *plane strain* maka nilai kekakuan plat berbentuk lingkaran akan di konversikan ke bentuk *plane strain* sebagai berikut:

$$A_{\text{circle}} = 1/4 \pi d^2 = 0,2826 \text{ m}^2 \text{ untuk,}$$

$$d = \text{diameter plat}$$

$$I_{\text{circle}} = 1/64 \pi d^4 = 0,0064 \text{ m}^4$$

$$E_{\text{circle}} = 50000 \text{ kPa}$$

- Konversi ke bentuk *square*
 $S_{\text{square}} = \sqrt{A_{\text{circle}}} = 0,53160 \text{ m}$
 $I_{\text{square}} = 1/12 \times S_{\text{square}}^4 = 0,00666 \text{ m}^4$
 $E_{\text{square}} = (E_{\text{circle}} \times I_{\text{circle}}) / I_{\text{square}}$
 $= 477700,7 \text{ kN/m}^2$
- Konversi bentuk *plane strain*
 $h = S_{\text{square}}$ $b = 1$ untuk h (tebal dinding) dan b (lebardinding)
 $A_{\text{plane strain}} = b \times h$
 $= 1 \times 0,53160$
 $= 0,53160$
 $I_{\text{plane strain}} = \frac{1}{12} \times b \times h^3$
 $= 0,01252 \text{ m}^4$
 $E_{\text{plane strain}} = \frac{E_{\text{square}} \times I_{\text{square}}}{I_{\text{plane strain}}}$

$$EA = \frac{E \text{ plane strain} \times A \text{ plane strain}}{\text{Spacing}} = 25394,97 \text{ kN/m}^2$$

$$EI = \frac{E \text{ plane strain} \times I \text{ plane strain}}{\text{Spacing}} = 127,17 \text{ kN/m}^2 / \text{m}$$

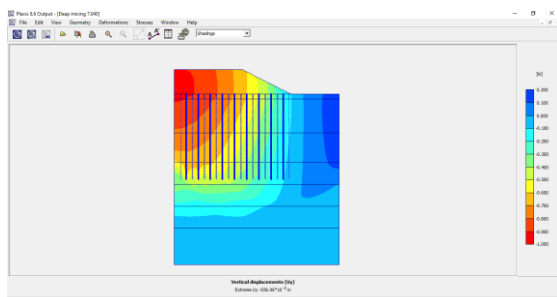
$$W = \frac{A \text{ circle} \times \gamma \text{ beton}}{\text{Spacing}} = 2,713 \text{ kN/m (dengan } \gamma \text{ beton } 24 \text{ kN/m}^3)$$

Hasil rekapitulasi perhitungan parameter kekakuan dan w dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Input Parameter Kekakuan Plat Parameter

E variasi (kPa)	Spasi (m)	d (m)	EA (KN/m)	EI (KN/m ² /m)	W (KN/m)
50000			5400	127,17	2,7
100000	2,5	0,6	10800	254,34	2,7
200000			21600	508,68	2,7

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



Gambar 2. Total Displacement Plaxis 8,6 2D

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Dari perhitungan penurunan dengan *deep mixing* akibat pembebanan awal pada program Plaxis 8,6 2D dengan spasi 2,5 m, modulus elastis (E) 50000 kPa dan diameter 0,6 m telah diketahui total penurunan sebesar $936,00,10^{-3} \text{ m}$, dengan

tinggi timbunan 5 m, dapat di lihat pada Gambar 2.

Tabel 6. Penurunan *Deep Mixing* Dengan Variasi E

E variasi (kPa)	Spasi (m)	d (m)	S (m)
50000			0,936
100000	2,5	0,6	0,741
200000			0,686

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Perbandingan penurunan sebelum dan sesudah pemasangan *deep mixing*

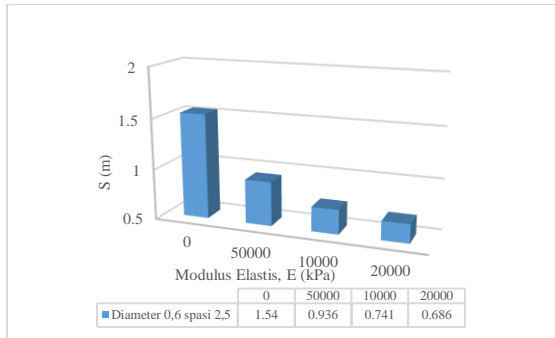
Pada penurunan sesudah pemasangan *deep mixing* terdapat beberapa variasi yang diperhitungkan.

Untuk perhitungan *deep mixing* dengan variasi modulus elastis (E), spasi 2,5 dan diameter 0,6 dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini:

Tabel 7. Hasil Perhitungan Penurunan dengan *Deep Mixing* dengan Variasi Modulus Elastis (E)

Spasi (m)	d (m)	Variasi E (kPa)	S deep mixing	S tanpa perbaikan tanah	Selisih (%)
		50000	0,9	1,54	39,2
2,5	0,6	100000	0,7	1,54	51,8
		200000	0,6	1,54	55,4

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

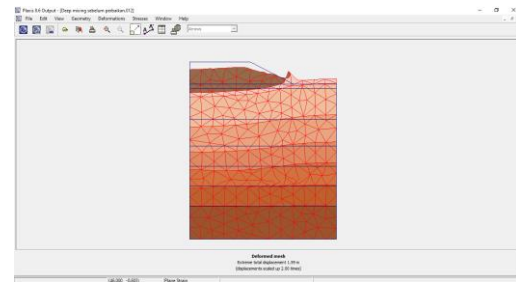


Gambar 3. Pengaruh Variasi Modulus Elastis (E) Terhadap Penurunan Tanah (S)

Gambar 3 menunjukkan pengaruh variasi modulus elastis terhadap penurunan tanah. Modulus elastis $E = 0$ menunjukkan kondisi sebelum adanya perbaikan. Berdasarkan hasil penelitian pada Gambar 3 diperoleh bahwa peningkatan nilai modulus elastis (E) yang semakin besar hingga 200000 kPa dapat menurunkan nilai penurunan tanah (S) yang terjadi. Modulus elastis yang besar menunjukkan kemampuan dalam menahan beban besar, artinya semakin besar modulus elastisitas semakin kecil lendutan karena mampu menahan tegangan yang cukup besar akibat beban-beban atau tekanan yang terjadi pada suatu regangan. Nilai penurunan tanah yang terjadi pada model dengan $E = 50000$ kPa turun sebesar 39,221% dibandingkan dengan nilai penurunan tanah untuk model sebelum adanya perbaikan tanah dengan *deep mixing*. Nilai penurunan tanah yang terjadi pada model dengan $E = 100000$ kPa turun sebesar 51,883% dibandingkan dengan nilai penurunan tanah untuk model sebelum adanya perbaikan tanah dengan *deep mixing*. Nilai penurunan tanah yang terjadi pada model dengan $E = 200000$ kPa turun sebesar 55,455% dibandingkan dengan nilai penurunan tanah untuk model sebelum adanya perbaikan tanah dengan *deep mixing*.

Pola keruntuhan

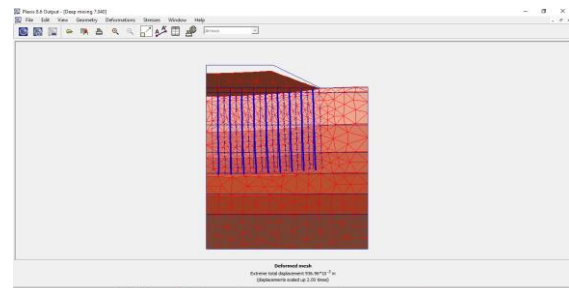
Hasil dari pengujian pembebanan timbunan tersebut, dapat dilihat pola keruntuhan yang terjadi pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola Keruntuhan Sebelum Adanya *Deep Mixing*

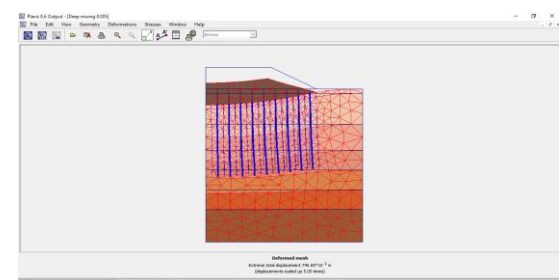
Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Keruntuhan yang terjadi mencapai ke lapisan kedua tanah lunak. Tanah lapisan pertama dan kedua lapisan tanah lunak menjorok ke arah kanan atas yaitu tanah lunak terjadi deformasi pada daerah disekitar timbunan. Untuk hasil dari variasi modulus elastis yang ditambahkan pada *deep mixing* terdapat pola keruntuhan geser dangkal dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7. Lapisan tanah tidak mengalami penurunan yang merata dikarenakan sudah adanya perbaikan menggunakan *deep mixing*.



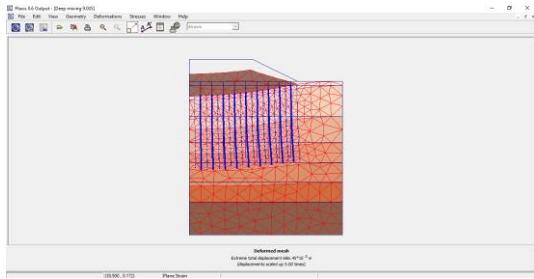
Gambar 5. Deformasi Keruntuhan Variasi Modulus Elastis 50000 kPa

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



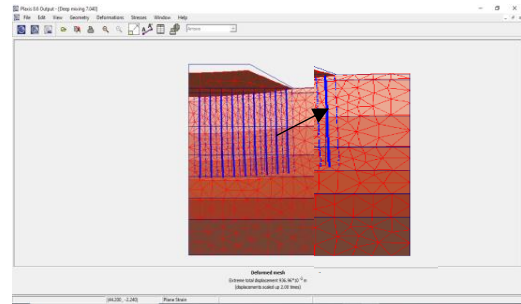
Gambar 6. Deformasi Keruntuhan Variasi Modulus Elastis 100000 Kpa

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



Gambar 7. Deformasi Keruntuhan Variasi Modulus Elastis 200000 kPa

Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

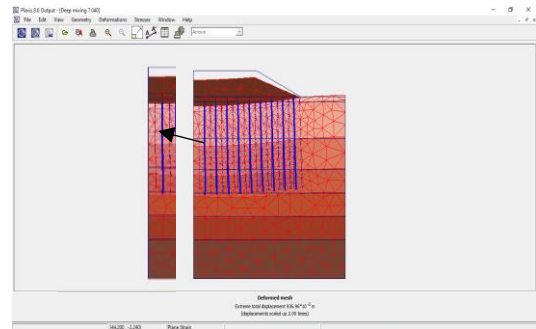


Gambar 8. Gaya Aksial Plat Kanan Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Gaya aksial

Pengamatan gaya aksial dilakukan pada *deep mixing* (plat) paling kanan dan kiri dari model.

Hasil dari pengaruh modulus elastis terhadap gaya aksial yang terjadi pada *deep mixing* yaitu adanya peningkatan nilai pada *axial forces* atau gaya aksial ketika nilai modulus elastis (E) semakin besar seperti ditunjukkan Tabel 8.



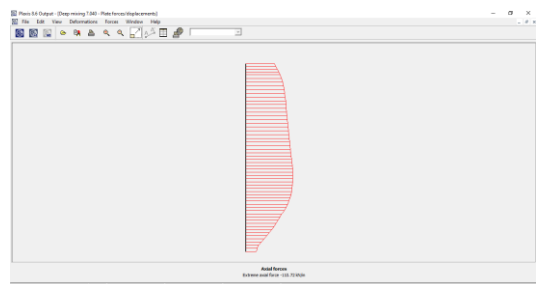
Gambar 9. Gaya Aksial Plat Kiri Sumber: Hasil Perhitungan (2021)

Tabel 8. Hasil Pengaruh *Modulus Elastis* terhadap *Axial Force*.

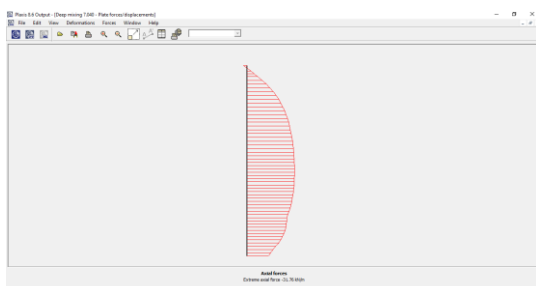
<i>Spasi</i>	<i>d</i>	<i>E</i>	<i>S deep mixing</i>	<i>Axial Force</i>	
				<i>Plat Kanan</i>	<i>Plat Kiri</i>
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>kPa</i>	<i>m</i>	<i>kN/m</i>	
2,5	0,6	50000	0,9	31,7	110,7
		100000	0,7	51,5	1560
		200000	0,6	67,1	199,3

Sumber: Hasil perhitungan (2021)

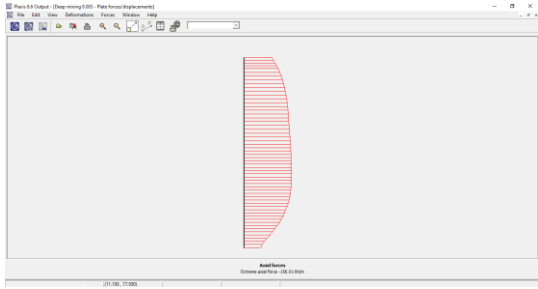
Hasil output dari program plaxis dapat dilihat pada Gambar 8-15.



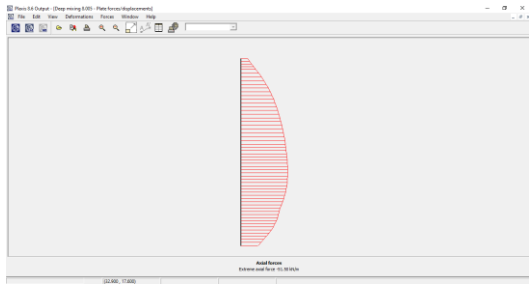
Gambar 10. *Axial Forces* Plat Kiri Variasi E 50,000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6 Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



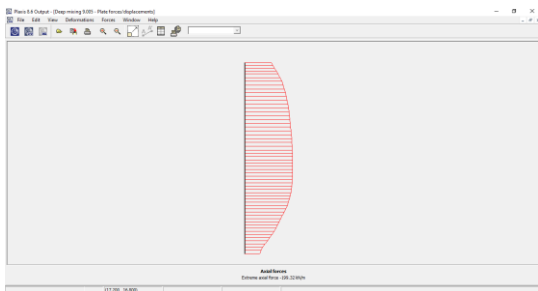
Gambar 11. *Axial Forces* Plat Kanan Variasi E 50000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6 Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



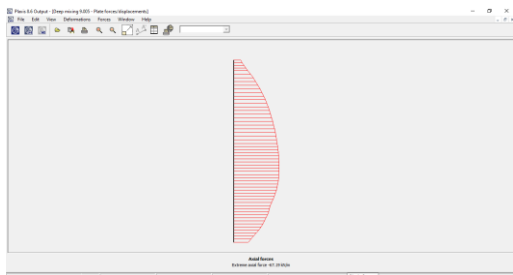
Gambar 12. Axial Forces Plat Kiri Variasi E 100,000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6
Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



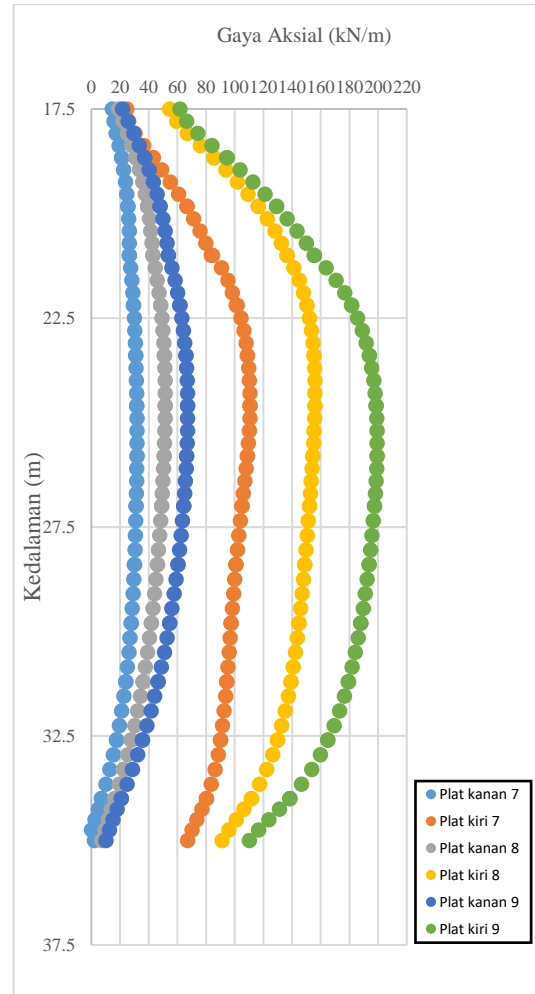
Gambar 13. Axial Forces Plat Kanan Variasi E 100,000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6
Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



Gambar 14. Axial Forces Plat Kiri Variasi E 200,000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6
Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



Gambar 15. Axial Forces Plat Kanan Variasi E 200,000 kPa, Spasi 2,5 dan Diameter 0,6
Sumber: Hasil Perhitungan (2021)



Gambar 16. Hubungan Antara Pengaruh Modulus Elastis (E) Terhadap Gaya Aksial

Hasil dari gambar 16 menunjukkan bahwa pengaruh modulus elastis terhadap gaya aksial yang terjadi pada *deep mixing* yaitu adanya peningkatan nilai pada *axial forces* atau gaya aksial ketika nilai *modulus elastis* (E) semakin besar. Hal tersebut karena semakin besar nilai modulus elastis yang diberikan maka semakin besar juga ketahanan perbaikan tanah dalam terjadinya deformasi.

4. KESIMPULAN

Hasil dari seluruh perhitungan yang sudah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Kondisi tanah sebelum adanya perbaikan *deep mixing* akibat pembebanan awal dengan tinggi timbunan setinggi 5 m diperoleh total

- penurunan primer sebesar 1,993 m. Dari derajat konsolidasi 90% waktu penurunan membutuhkan waktu penurunan sebesar 22,368 tahun. Perhitungan penurunan akibat pembebanan awal dari program Plaxis 8.6 2D diperoleh total penurunan 1,54 m dengan tinggi timbunan 5 m.
- b. Kondisi tanah setelah perbaikan menggunakan *deep mixing* diperoleh bahwa peningkatan nilai modulus elastis (E) yang semakin besar yaitu 200000 kPa dapat menurunkan nilai penurunan tanah (S). Modulus elastis yang besar menunjukkan kemampuan dalam menahan beban besar, artinya semakin besar modulus elastisitas semakin kecil lendutan karena mampu menahan tegangan yang cukup besar akibat beban-beban atau tekanan yang terjadi pada suatu regangan. Nilai penurunan tanah yang terjadi pada model dengan E = 200000 kPa turun sebesar 55,455% dibandingkan dengan nilai penurunan tanah untuk model sebelum adanya perbaikan tanah dengan *deep mixing*.
 - c. Pola keruntuhan pada timbunan sebelum adanya perbaikan dengan *deep mixing* terjadi keruntuhan hingga lapisan kedua tanah lunak. Untuk pola keruntuhan setelah adanya perbaikan dengan *deep mixing* hanya terjadi pada daerah sekitar timbunan saja.
 - d. Hasil dari pengaruh modulus elastis terhadap gaya aksial yang terjadi pada *deep mixing* yaitu adanya peningkatan nilai pada *axial forces* atau gaya aksial ketika nilai modulus elastis (E) semakin besar. Hal tersebut karena semakin besar nilai modulus elastis yang diberikan maka semakin besar juga ketahanan perbaikan tanah dalam terjadinya deformasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ardiyansari, A. O., dkk. (2016). "Pengaruh Jarak dan Panjang Deep Soil Mixing Berpola Triangular terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif (The Effect Spacing and Length of Deep Soil Mixing by Using Triangular Configuration on The Bearing Capacity of Expansive Soil)". Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Vol. 1 No. 2, 1-11.
- [2] Badan Standardisasi Nasional. Persyaratan Perancangan Geoteknik 8460:2017.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung 1726:2019.
- [4] Brinkgreve, R., B., J., Kumarswamy, S., Swolfs, W., M., Waterman, D., Chesaru, A., Bonnier, P, G., & Haxaire, A. (2016). PLAXIS 2016, Netherlands.
- [5] Das, B., M., Endah, N., & Mochtar, I., B. (1995) Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geotekniks). Erlangga, Jakarta.
- [6] Design Guide. (2002). Soft Soil Stabilization. Ministry of Transport Public Works and Management.
- [7] Farouk, A., dan Shahien, M. M. (2013). "Ground Improvement Using Soil-Cement Columns: Experimental Investigation". Alexandria Engineering Journal, Vol. 52, 733-740.
- [8] Hamdhan, Indra, N., Iskandar, dan Fauziah, F. (2019). Analisis Perkuatan Timbunan Di Atas Tanah Lunak Menggunakan Dinding Turap dengan Pendekatan Model Numerik, Media Komunikasi Teknik Sipil. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- [9] Hardiyatmo, H., C. 2002. Mekanika Tanah II. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- [10] Keller Group plc. 2016. Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method.

- [11] Nguyen, B. T. T, et al. (2016). "Numerical Analyses on The Failure of Deep Mixing Columns Reinforced by a Shallow Mixing layer". The 15th Asian Regional Conference on Soil Mech. And Geo. Eng., Japan, Nov. 15, 2144-2148.
- [12] Panduan Geoteknik 1. 2002. Proses Pembentukan dan Sifat Dasar Tanah Lunak.
- [13] Perbaikan Tanah Lunak, Jurnal Teknik Sipil Vol. 23 No. 3. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- [14] Pratama, R. D., dan Kawanda, A. (2019). "Analisis Penurunan Tanah Timbunan Pada Konstruksi Runway dengan Program Bantu Microsoft Excel". Seminar Intelektual Muda, Universitas Trisakti, 11 April 2019, 360-367.
- [15] Putro, Galih, K. 2016. Pengaruh Jarak dan Panjang Kolom Deep Soil Mixing (DSM) Tipe Panels dengan Campuran 10% Kapur terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif. Universitas Brawijaya, Malang.
- [16] Wardoyo,dkk. (2019). Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia. Badan Geologi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.