

## ANALISIS METODE PRELOADING PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGUNAKAN PROGRAM NUMERIK

Duta Dewa Suganda<sup>1\*</sup>, Fajar Dwi Saputra<sup>2</sup>, Abdul Rochim<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, [ddutadewa07@gmail.com](mailto:ddutadewa07@gmail.com)

### ABSTRAK

Tanah lunak memiliki sifat geoteknik yang kurang mendukung, seperti daya dukung yang rendah, tingkat kompresibilitas tinggi, dan proses konsolidasi yang berlangsung lambat. Kondisi ini sering menjadi kendala dalam perencanaan serta pembangunan infrastruktur. Salah satu teknik yang sering diterapkan untuk memperbaiki karakteristik tanah tersebut adalah metode preloading, yaitu pemberian beban awal guna mempercepat proses konsolidasi sebelum konstruksi utama dimulai. Penelitian ini dilakukan untuk menilai sejauh mana metode preloading mampu meningkatkan respons tanah lunak, terutama terkait besarnya penurunan serta stabilitas timbunan. Pendekatan penelitian menggunakan analisis numerik berbasis metode elemen hingga. Parameter utama yang dianalisis meliputi nilai  $c_u$  sebesar 0-50 kPa yang dikaitkan dengan rentang N-SPT 1-8 pada konsistensi tanah lempung sangat lunak sampai sedang (*very soft clay-medium clay*), serta variasi  $\gamma$ timbunan 16-20 kN/m<sup>3</sup> yang digunakan sebagai dasar perhitungan tinggi kritis timbunan (Hkritis) pada tiga lapisan timbunan. Nilai Hkritis ini menjadi acuan dalam menentukan tinggi timbunan yang aman sebelum dilakukan pemodelan numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan preloading menghasilkan nilai penurunan yang sesuai dengan karakteristik tanah lunak. Selain itu, terdapat hubungan yang kuat antara N-SPT dan Hkritis, di mana semakin tinggi N-SPT, semakin tinggi timbunan yang dapat ditahan sebelum mencapai kondisi kritis.

**Kata kunci :** *Preloading, konsolidasi tanah lunak, analisis numerik*

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

## 1 PENDAHULUAN

Tanah lunak merupakan media yang sering menimbulkan kendala dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan laju konsolidasi lambat, sehingga struktur di atasnya rentan mengalami penurunan berlebih [1]. Oleh sebab itu, diperlukan metode perbaikan tanah sebelum konstruksi dilakukan.

Penelitian ini membahas karakteristik tanah lunak sebagai dasar evaluasi perbaikan, penentuan tinggi timbunan kritis berdasarkan variasi konsistensi tanah, serta estimasi penurunan setelah preloading menggunakan analisis numerik. Preloading dipilih sebagai metode utama, yaitu pemberian beban awal sementara untuk mempercepat konsolidasi melalui disipasi tekanan air pori, sehingga kapasitas dukung meningkat dan deformasi pasca konstruksi dapat diminimalkan [2].

Penentuan tinggi kritis timbunan ( $H_{kritis}$ ) menjadi aspek penting agar tidak terjadi deformasi berlebih. Perhitungan dilakukan berbasis nilai  $c_u$ , N-SPT, faktor keamanan (*Safety Factor*), serta berat isi timbunan atau gamma timbunan ( $\gamma_{timbunan}$ ). Analisis numerik berbasis metode elemen hingga digunakan untuk mensimulasikan respons tanah terhadap variasi parameter tersebut sehingga perilaku preloading dapat diprediksi secara lebih akurat.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Korelasi N-SPT dengan Kohesi *Undrained* ( $c_u$ ) untuk Tanah Lempung

Bersumber dari Terzaghi dan Peck (1967), hubungan variasi nilai N-SPT dengan nilai kohesi tak terdrainase terdapat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Variasi korelasi N-SPT dengan  $c_u$  tanah lempung (Terzaghi dan Peck, 1967)

Konsistensi	$N$	$C_u$ ( $kN/m^2$ )
Sangat Lunak	0-2	<12
Lunak	2-4	12-25
Sedang	4-8	25-50
Kaku	8-15	50-100
Sangat Kaku	15-30	100-200
Keras	>30	>200

### 2.2 Tinggi Kritis Timbunan

Tinggi kritis timbunan menunjukkan tinggi maksimum yang dapat ditahan tanah sebelum gagal, dihitung dari kohesi tanah, berat timbunan, dan faktor keamanan sebagai dasar penentuan desain timbunan awal. Nilai dari tinggi kritis timbunan ( $H_{kritis}$ ) dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$H_{kritis} = \frac{5 \times c_u}{\gamma_{timb} \times SF} \quad (1)$$

dimana,

$H_{kritis}$  = Tinggi Timbunan Kritis (m)

$c_u$  = Kohesi Tanah Dasar (kPa)

$\gamma_{timb}$  = Berat Volume Tanah Timbunan ( $kN/m^3$ )

$SF$  = *Safety Factor*

## 3 METODE PENELITIAN

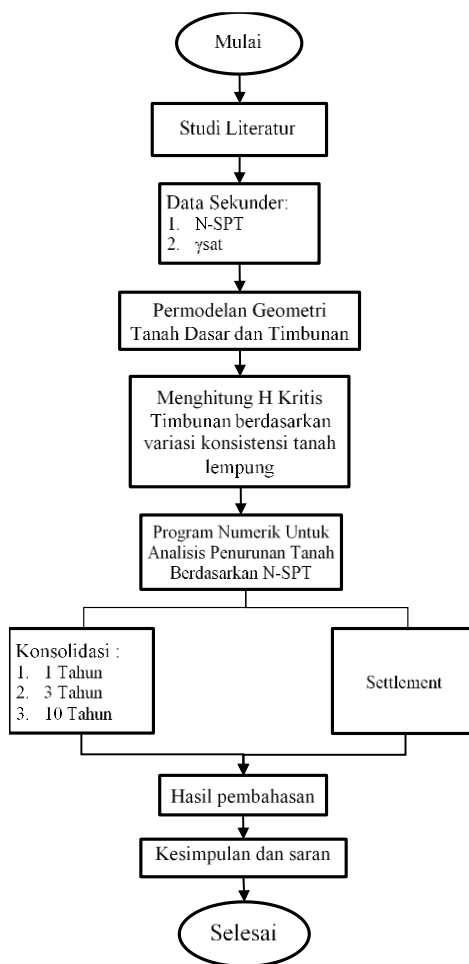
### 3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis numerik. Fokus penelitian terletak pada perhitungan tinggi kritis timbunan ( $H_{kritis}$ ) serta simulasi preloading untuk memprediksi, mengukur dan membuktikan pengaruh perbaikan yang terjadi pada subjek tanah lempung lunak.

Spesifikasi parameter pada tanah dasar serta tanah timbunan yang digunakan meliputi kuat geser tak terdrainase ( $c_u$ ) 0-50 kPa, nilai N-SPT 1-8, faktor keamanan (*Safety Factor*) 1.5, berat isi tanah atau gamma timbunan ( $\gamma_{\text{timbunan}}$ ) divariasikan antara 16-20 kN/m<sup>3</sup>.

### 3.2 Alur Penelitian

Alur penelitian dimulai dengan penentuan nilai parameter sebagai dasar analisis. N-SPT,  $c_u$ , SF, dan perhitungan tinggi kritis timbunan. Pemodelan numerik kemudian dilakukan dengan penerapan beban preloading sesuai hasil perhitungan tinggi kritis timbunan. Hasil simulasi berupa penurunan (*settlement*) pada konsolidasi 1 tahun, 3 tahun, 10 tahun dianalisis untuk menilai respons tanah. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Hkritis Timbunan vs N-SPT

#### a. Hkritis Timbunan Pertama

Hasil perhitungan Hkritis timbunan lapisan pertama terdapat pada tabel 2 dibawah ini. Nilai  $c_u$  juga berfungsi sebagai  $c_0$ .

Tabel 2. Perhitungan Hkritis Timbunan Lapisan Pertama

No	Konsistensi	N	Cu (kPa)	SF	Hkritis 1 (m)				
					y <sub>timb</sub> = 16kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 17kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 18kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 19kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 20kN/m <sup>3</sup>
1	Very Soft	1	6	1,5	1,250	1,176	1,11	1,053	1,0
2	Very Soft	2	12	1,5	2,500	2,353	2,22	2,105	2,0
3	Soft	3	18	1,5	3,750	3,529	3,33	3,158	3,0
4	Soft	4	24	1,5	5,000	4,706	4,44	4,211	4,0
5	Medium	5	30	1,5	6,250	5,882	5,56	5,263	5,0
6	Medium	6	36	1,5	7,500	7,059	6,67	6,316	6,0
7	Medium	7	42	1,5	8,750	8,235	7,78	7,368	7,0
8	Medium	8	50	1,5	10,417	9,804	9,26	8,772	8,3

## b. Delta Tegangan Vertikal Efektif Pertama

Sebelum didapatkan perhitungan Hkritis lapisan kedua, diperhitungkan terlebih dahulu delta tegangan vertikal efektif pertama ( $\Delta\sigma'_1$ ) setelah terjadi proses preloading pada lapisan pertama. Semakin besar perubahan tegangan vertikal efektif akibat dari beban preloading, semakin cepat dan besar penurunan (*settlement*) terjadi. Digunakan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta\sigma' = H_{kritis} + \gamma_{timb} \quad (2)$$

dimana,

$\Delta\sigma'$  = Tegangan Vertikal Efektif

Hkritis = Tinggi Timbunan Kritis (m)

$\gamma_{timb}$  = Berat Volume Tanah Timbunan (kN/m<sup>3</sup>)

Tabel 3. Perhitungan Delta Tegangan Vertikal 1 ( $\Delta\sigma'_1$ )

$\Delta\sigma'_1$				
y <sub>timb</sub> = 16kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 17kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 18kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 19kN/m <sup>3</sup>	y <sub>timb</sub> = 20kN/m <sup>3</sup>
16	17	18	19	20
40	34	36	38	40
56	59,5	54	57	60
80	76,5	72	76	80
96	93,5	99	95	100
120	119	117	114	120

## c. Kuat Geser Tak Terdrainase Pertama

Nilai  $c_1$  didapatkan emnggunakan persamaan berikut.

$$C_1 = C_0 + (0.22 \times \Delta\sigma'_1) \quad (3)$$

dimana,

$C_1$  = kohesi akhir (kPa)

$C_0$  = Kohesi Awal (kPa)

$\Delta\sigma'_1$  = Peningkatan Tegangan efektif vertikal awal

Tabel 4. Perhitungan Kenaikan Kuat Geser Undrained ( $C_1$ )

<b><math>C_1</math> (kPa)</b>				
<b>ytimb= 16kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 17kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 18kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 19kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 20kN/m<sup>3</sup></b>
9,52	9,74	9,96	10,18	10,4
20,8	19,48	19,92	20,36	20,8
30,32	31,09	29,88	30,54	31,2
41,6	40,83	39,84	40,72	41,6
51,12	50,57	51,78	50,9	52
62,4	62,18	61,74	61,08	62,4

d. Hkritis Timbunan Kedua

Berikut hasil perhitungan Hkritis lapisan kedua, dengan nilai  $c_u$  diganti dengan menggunakan nilai  $c_1$ .

Tabel 5. Perhitungan Hkritis Timbunan Lapisan kedua

<b>No</b>	<b>Konsistensi</b>	<b>N</b>	<b><math>C_u</math> (kPa)</b>	<b>SF</b>	<b>Hkritis 2 (m)</b>				
					<b>ytimb= 16kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 17kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 18kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 19kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 20kN/m<sup>3</sup></b>
1	Very Soft	1	6	1,5	1,983	1,910	1,844	1,786	1,733
2	Very Soft	2	12	1,5	4,333	3,820	3,689	3,572	3,467
3	Soft	3	18	1,5	6,317	6,096	5,533	5,358	5,200
4	Soft	4	24	1,5	8,667	8,006	7,378	7,144	6,933
5	Medium	5	30	1,5	10,650	9,916	9,589	8,930	8,667
6	Medium	6	36	1,5	13,000	12,192	11,433	10,716	10,400
7	Medium	7	42	1,5	14,983	14,102	13,278	12,502	12,133
8	Medium	8	50	1,5	17,750	16,771	15,859	15,005	14,200

e. Delta Tegangan Vertikal Efektif Kedua

Berikut merupakan hasil dari nilai  $\Delta\sigma'_2$ .

Tabel 6. Perhitungan Delta Tegangan Vertikal 2 ( $\Delta\sigma'_2$ )

<b><math>\Delta\sigma'_2</math></b>				
<b>ytimb= 16kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 17kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 18kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 19kN/m<sup>3</sup></b>	<b>ytimb= 20kN/m<sup>3</sup></b>
24	25,5	27	28,5	30
64	59,5	63	66,5	60
96	102	99	95	100
136	136	126	133	140
168	170	171	171	170
208	204	198	199,5	200

f. Kuat Geser Tak Terdrainase Kedua

Untuk perhitungan  $c_2$ , digunakan persamaan sebagai berikut.

$$C_2 = C_1 + (0.22 \times \Delta\sigma'_2) \quad (4)$$

dimana,

$$C_2 = \text{kohesi akhir (kPa)}$$

$C_1$  = Kohesi Awal (kPa)

$\Delta\sigma'_2$  = Peningkatan Tegangan efektif vertikal akhir

Tabel 7. Perhitungan Kenaikan Kuat Geser Undrained ( $C_2$ )

$C_2$ (kPa)				
$y_{timb}= 16kN/m^3$	$y_{timb}= 17kN/m^3$	$y_{timb}= 18kN/m^3$	$y_{timb}= 19kN/m^3$	$y_{timb}= 20kN/m^3$
14,8	15,35	15,9	16,45	17
34,88	32,57	33,78	34,99	34
51,44	53,53	51,66	51,44	53,2
71,52	70,75	67,56	69,98	72,4
88,08	87,97	89,4	88,52	89,4
108,16	107,06	105,3	104,97	106,4

g. Hkritis Timbunan Ketiga

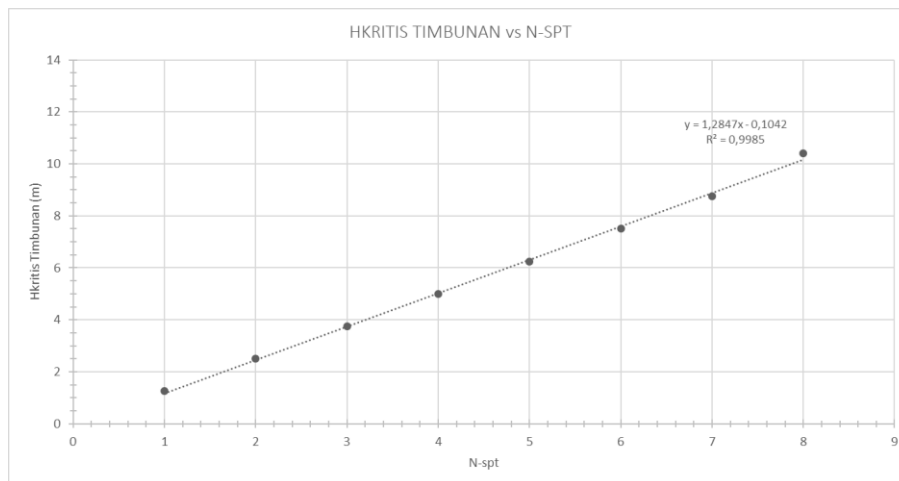
Hasil perhitungan Hkritis lapisan ketiga didapatkan sesuai pada tabel 8 dibawah ini.

Tabel 8. Perhitungan Hkritis Timbunan Lapisan Ketiga

No	Konsistensi	N	$C_u$ (kPa)	SF	Hkritis 3 (m)				
					$y_{timb}= 16kN/m^3$	$y_{timb}= 17kN/m^3$	$y_{timb}= 18kN/m^3$	$y_{timb}= 19kN/m^3$	$y_{timb}= 20kN/m^3$
1	Very Soft	1	6	1,5	1,983	1,910	1,844	1,786	1,733
2	Very Soft	2	12	1,5	4,333	3,820	3,689	3,572	3,467
3	Soft	3	18	1,5	6,317	6,096	5,533	5,358	5,200
4	Soft	4	24	1,5	8,667	8,006	7,378	7,144	6,933
5	Medium	5	30	1,5	10,650	9,916	9,589	8,930	8,667
6	Medium	6	36	1,5	13,000	12,192	11,433	10,716	10,400
7	Medium	7	42	1,5	14,983	14,102	13,278	12,502	12,133
8	Medium	8	50	1,5	17,750	16,771	15,859	15,005	14,200

h. Grafik Hkritis vs N-SPT

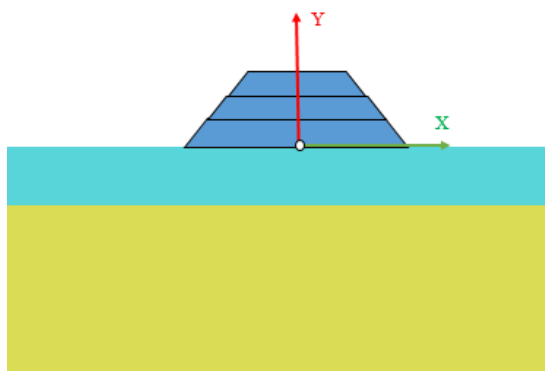
Grafik menunjukkan nilai N-SPT berbanding lurus dengan  $h_{kritis}$ . Regresi linear  $y = 1,2847x - 0,1042$  dengan  $R^2 = 0,9985$  menegaskan hubungan sangat kuat, di mana peningkatan N-SPT meningkatkan tinggi timbunan kritis. Semakin besar N-SPT, semakin tinggi timbunan yang mampu ditahan tanah.



Gambar 2. Grafik Hkritis Timbunan vs N-SPT

## 4.2 Analisis Program Numerik

Pemodelan numerik dilakukan untuk menganalisis respons tanah lunak terhadap beban timbunan. Geometri 2D terdiri dari tanah keras 40 m, tanah lunak 10 m, serta variasi tinggi timbunan kritis tiga lapisan dengan variasi kemiringan >1:5 pada timbunan  $\geq 10$  m. Pembebanan dilakukan bertahap sesuai konsep preloading. Pemodelan menghasilkan nilai *settlement* konsolidasi 1 tahun, 3 tahun dan 10 tahun.



Gambar 3. Grafik Hkritis Timbunan vs N-SPT

## 4.3 Hasil Analisis Program Numerik

Tabel 9. *Settlement*  $\gamma_{\text{timb}} 16$

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 16 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	18,09	21,02	30,04
2	25,37	28,86	38,44
3	42,07	45,86	59,69
4	31,1	33,43	42,84
5	35,12	36,92	44,98
6	38,6	39,92	46,19
7	40,03	46,12	51,25
8	43,11	49,06	56,71

Tabel 10. *Settlement*  $\gamma_{\text{timb}} 17$

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 17 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	16,75	19,36	27,36
2	23,52	26,92	32,63
3	37,01	40,57	51,26
4	44,19	49,83	55,36
5	33,66	33,56	43,94
6	36,63	38,04	44,71

Tabel 11. *Settlement*  $\gamma_{\text{timb}} 18$

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 18 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
7	38,14	39,14	43,94
8	41,23	43,8	48,08

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 18 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	17,05	18,41	26,55
2	23,53	27	32,73
3	28,18	32,07	39,14
4	34,14	37,86	45,37
5	46,19	50,09	57,25
6	31,76	34,74	43,58
7	38	41,88	49,94
8	43,74	45,77	51,12

Tabel 12. *Settlement*  $\gamma_{\text{timb}} 19$

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 19 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	17,54	19,08	29,66
2	23,78	26,85	36,51
3	27,23	34,67	41,35

4	43,47	48,34	53,87	7	44,26	48,21	52,33
5	36,28	42,71	47,42	8	45,27	49,73	56,47
6	39,18	43,46	50,62				

Tabel 13. Settlement  $\gamma_{\text{timb}} 20$

N-SPT	$\gamma_{\text{timb}} = 20 \text{ kN/m}^3$		
	Settlement (cm)		
	1 Tahun	3 Tahun	10 Tahun
1	16,42	18,96	27,02
2	22,97	26,32	31,85
3	26,23	27,3	33,01
4	29,92	32,54	38,11
5	43,89	49,57	54,93
6	34,18	37,72	43,07
7	36,79	38,39	41,83
8	37,01	40,28	46,24

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan nilai N-SPT, kuat geser tanah, perhitungan tinggi timbunan kritis, pemodelan numerik dan hasil *settlement*, dapat disimpulkan bahwa tanah dasar lempung lunak memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan memerlukan perbaikan sebelum digunakan sebagai pondasi timbunan. Analisis menunjukkan bahwa tinggi timbunan kritis sangat dipengaruhi oleh konsistensi tanah, di mana nilai N-SPT rendah menghasilkan tinggi timbunan maksimum yang terbatas dan meningkat seiring bertambahnya kekuatan tanah. Hasil pemodelan numerik menunjukkan bahwa metode preloading efektif dalam mempercepat konsolidasi, mengurangi penurunan, dan meningkatkan stabilitas tanah lunak sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki kondisi geoteknis secara signifikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wesley, L. D., 2017, *Mekanika Tanah. Edisi Baru*, Andi Offset, Jakarta
- [2] Darwis, H., 2018, *Dasar-Dasar Mekanika Tanah*, Pena Indis
- [3] Hardiyatmo, H. C., 2008, *Teknik Pondasi. Edisi Keempat*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta
- [4] Das, B. M., 2022, *Principles of Geotechnical Engineering*, Cengage, <https://books.google.co.id/books?id=JFrBzQEACAAJ>
- [5] Terzaghi K., Peck R. B., 1967, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd edn, Wiley, New York