

## ANALISIS PEMANCANGAN TIANG PADA KONSTRUKSI *OFFSHORE* PELABUHAN DI PULAU JAWA TERHADAP *SCOURING EFFECT*

Mega Rukmana<sup>1</sup> dan Chaidir A. Makarim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: megarukmana97@gmail.com

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: chaidir259@gmail.com

### ABSTRAK

Penggunaan pondasi tiang pancang banyak digunakan pada perencanaan konstruksi dimana bangunan bertemu dengan air seperti bangunan lepas pantai (*offshore*). Analisis perencanaan yang tepat harus dilakukan agar bangunan lepas pantai terbebas dari kegagalan yang tidak diinginkan. Dalam perencanaannya diperlukan adanya analisis terhadap kemungkinan terjadinya gerusan (*scouring*) dan energi pemancangan (*driveability*). Dengan menganalisis hal tersebut pada pondasi tiang, dapat diketahui kapasitas tiang yang lebih tepat lagi untuk digunakan dalam perencanaan konstruksi *offshore*. Pemancangan tiang dengan menggunakan alat yang tepat juga tidak luput dari peranan pukulan yang diberikan oleh energi *hammer*. Dengan mengetahui tegangan yang terjadi selama pemancangan tiang, *overstress* dan *overtension* pada tiang dapat dihindari. Dari hasil simulasi yang dilakukan dapat dibahas dan diambil kesimpulan tentang integritas dan kapasitas tiang itu sendiri.

Kata Kunci: *Scouring*, *Offshore*, Kapasitas Tiang, *Overstress*, Pemancangan Tiang.

### 1. PENDAHULUAN

Di dalam pembangunan proyek konstruksi terdapat berbagai macam proyek konstruksi, mulai dari konstruksi jalan, jembatan, gedung bertingkat tinggi, rumah, dan lain-lain. Setiap konstruksi juga dibagi menjadi dua tahap, yaitu pekerjaan konstruksi struktur bawah dan pekerjaan konstruksi struktur atas. Pekerjaan struktur atas pada sebuah pekerjaan konstruksi biasanya meliputi pekerjaan balok, kolom, pelat lantai, dinding geser, dan tangga. Sedangkan pekerjaan struktur bawah pada sebuah pekerjaan konstruksi biasanya meliputi pekerjaan galian, pekerjaan pondasi, dan pekerjaan *basement*.

Pekerjaan struktur bawah merupakan pekerjaan yang krusial dikarenakan bangunan yang akan dibangun harus memiliki struktur pondasi yang benar. Pondasi memiliki berbagai tipe yang salah satunya adalah pondasi tiang pancang. Pondasi tiang pancang sudah tidak asing lagi dalam pembangunan sebuah konstruksi. Tiang pancang bisa terbuat dari beton, baja, dan kayu. Tiang pancang yang terbuat dari baja bukan hanya dapat digunakan pada bangunan gedung tetapi bisa juga digunakan pada konstruksi lepas pantai (*offshore*).

Pelabuhan merupakan sebuah struktur yang digunakan untuk kegiatan pemerintahan dan kegiatan ekonomi yang dipergunakan sebagai tempat kapal bersandar, berlabuh, naik dan turunnya penumpang, maupun bongkar muat barang. Dikarenakan fungsinya yang vital bagi negara dan masyarakat, diperlukan perencanaan yang mumpuni agar pelabuhan dapat terus digunakan. Tetapi terkadang pelabuhan bisa menjadi tidak reliabel, dikarenakan seringkali terdengar beberapa kasus dimana pelabuhan rusak atau mengalami kegagalan. Hal ini menyebabkan kegiatan yang memerlukan fungsi pelabuhan menjadi terhentikan.

Salah satu penyebab terjadinya kegagalan pelabuhan adalah *scouring effect*. Peristiwa *scouring* yang terjadi pada bangunan-bangunan yang bertemu dengan air, seperti pelabuhan, jembatan, maupun bangunan lepas pantai lainnya dapat menyebabkan kerusakan pada pondasi tiang struktur tersebut, mengingat bahwa tanah turut serta dalam memberi ketahanan friksi pada sebuah tiang. Jika tanah tersebut tergerus atau terangkat bersama gelombang air, maka kegagalan pun tidak dapat dihindari.

Tanah selalu mempunyai peranan yang penting dalam pekerjaan konstruksi. Tanah adalah pondasi pendukung suatu bangunan, atau bahan konstruksi dari bangunan itu sendiri. *Scouring effect* sering menjadi salah satu biang masalah pada tiang bangunan *offshore*, dikarenakan komponen tiang yang bertemu dengan tanah akan terlihat seperti memiliki lubang. Hal ini yang dapat menyebabkan kegagalan sebuah pelabuhan yang disebabkan oleh penurunan daya dukung tanah akibat tanah yang hilang atau terangkat karena gerusan oleh air disekitar tiang.

Beban pada sebuah tiang dalam bangunan pelabuhan tidak hanya dapat menerima momen guling dan beban aksial, tetapi juga beban lateral. Pada bangunan pelabuhan, beban lateral muncul akibat adanya gelombang air, gempa, maupun angin. Kelebihan beban lateral pada tiang dapat menyebabkan berbagai masalah pada jembatan salah satunya kegagalan tiang. Kegagalan ini juga dapat disebabkan oleh pemancangan tiang yang kurang baik di lapangan, seperti pemilihan *hammer* yang kurang tepat sehingga tegangan yang terjadi pada tiang melebihi tegangan ijin. Oleh sebab itu analisis dan desain dalam pembangunan konstruksi *offshore* merupakan hal yang penting untuk memastikan bahwa bangunan dapat mempertahankan kestabilannya sesuai dengan umur rencana.

Analisis kapasitas lateral pada tiang dapat dimodelkan dengan menggunakan program *LPILE*. Hasil dari perhitungan pada program *LPILE* adalah gaya yang dapat terjadi pada tiang dan tahanan tiang tersebut. Sedangkan untuk simulasi pemancangan dilakukan pada program *GRLWEAP* untuk mengetahui efek dari jenis *hammer* serta tegangan yang terjadi selama pemancangan.

### Tiang Pancang

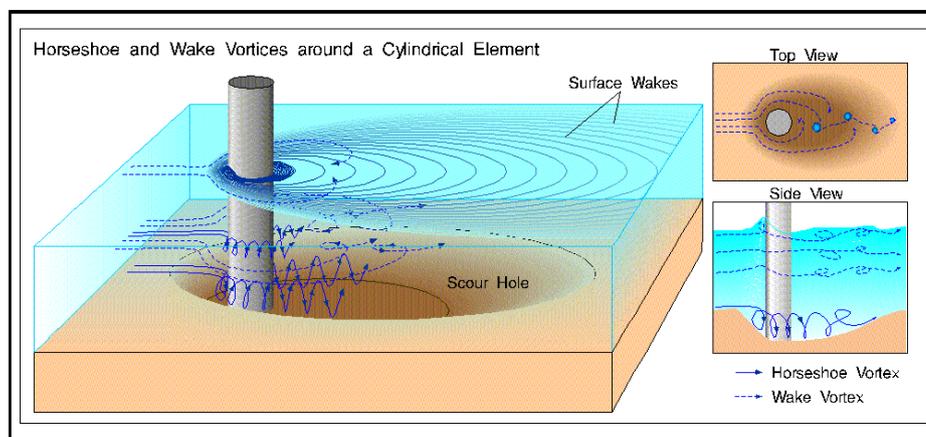
Tiang pancang merupakan salah satu dari berbagai jenis fondasi dalam yang dipasang dengan cara dipancang. Tiang pancang dapat terbuat dari kayu, beton, baja, serta campuran beton dan baja (komposit). Penggunaan fondasi tiang pancang sebagai posisi bangunan apabila tanah yang berada dibawah dasar bangunan tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memiliki berat bangunan dan beban yang bekerja padanya (Sardjono, 1984)..

### Tanah

Menurut Braja M Das (1995), tanah umumnya dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*), tergantung pada ukuran partikel yang paling dominan pada tanah tersebut. Kerikil (*gravel*) adalah kepingan-kepingan dari batuan yang terkadang juga mengandung partikel-partikel mineral *quartz*, *feldspar*, dan mineral-mineral lain. Pasir (*sand*) sebagian besar terdiri dari mineral *quartz* dan *feldspar*. Butiran dari mineral yang lain mungkin juga masih ada pada golongan ini. Lanau (*silts*) sebagian besar merupakan fraksi mikroskopis (berukuran sangat kecil) dari tanah yang terdiri dari butiran-butiran *quartz* yang sangat halus, dan sejumlah partikel berbentuk lempengan-lempengan pipih yang merupakan pecahan dari mineral-mineral mika. Lempung (*clays*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis (tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskopis biasa) yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung (*clay minerals*), dan mineral-mineral yang sangat halus lainnya.

### Scouring

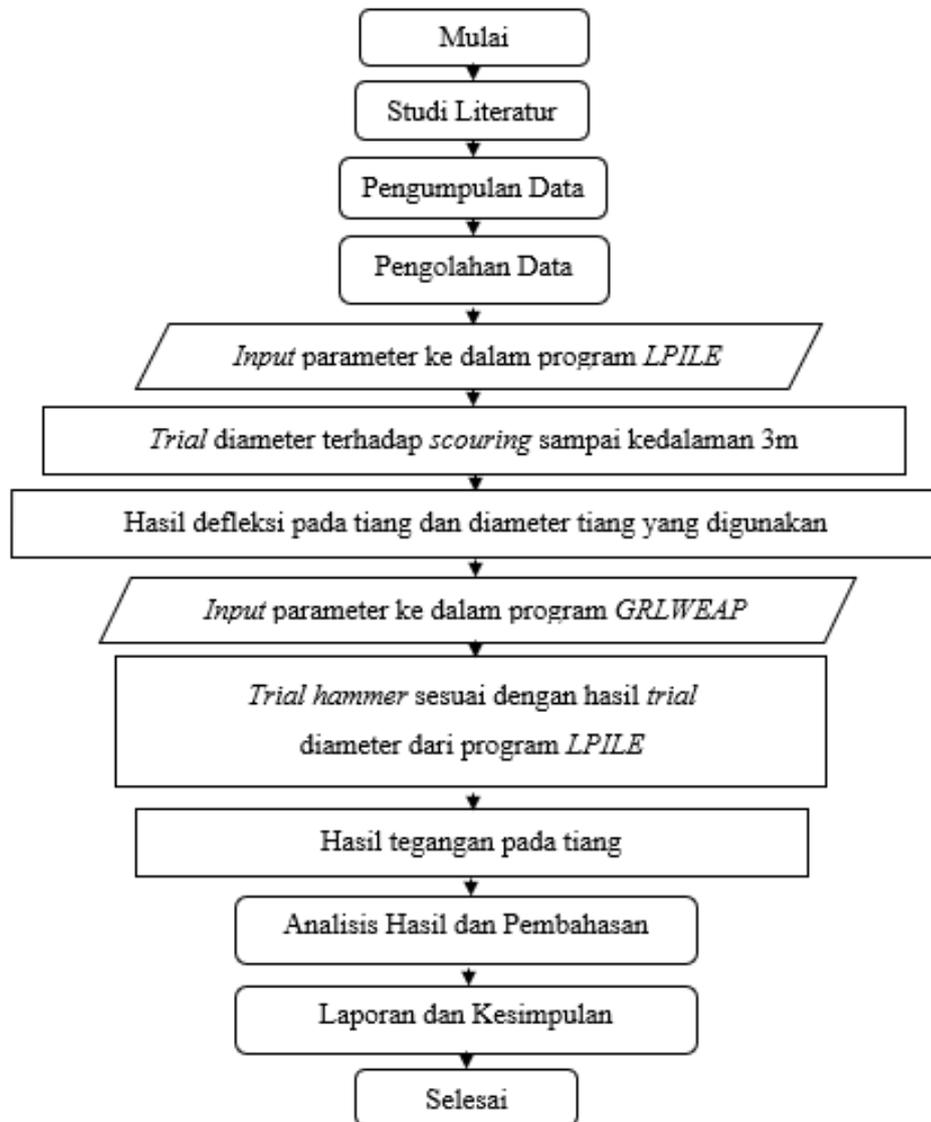
Gerusan (*scouring*) adalah proses erosi dan deposisi yang terjadi karena perubahan aliran di sungai. Perubahan ini karena adanya halangan pada aliran sungai yang berupa bangunan sungai seperti pilar jembatan. Bangunan-bangunan ini dipandang dapat merubah geometri alur serta pola aliran, yang selanjutnya diikuti dengan timbulnya gerusan lokal di sekitar bangunan. Adanya pilar jembatan pada suatu ruas sungai dapat menyebabkan perubahan pola aliran yang menimbulkan gerusan lokal di sekitar pilar sehingga menyebabkan penurunan elevasi dasar di sekitar pilar. Sehubungan dengan adanya gerusan lokal yang dapat membahayakan bangunan sungai (pilar, abutment, krib dan sebagainya) berupa keruntuhan pada bangunan tersebut (Lujitno, 2015).



Gambar 1. Ilustrasi Terjadinya *Scouring* pada Tiang

## 2. METODOLOGI PENELITIAN (SECTION)

Penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil analisis dengan bantuan program *LPILE* dan *GRLWEAP*. Dalam melaksanakan analisis, langkah-langkah yang ditempuh penulis digambarkan melalui diagram alir penelitian seperti pada Gambar 1.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### Studi Literatur

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan teori untuk analisis pemancangan tiang pada konstruksi pelabuhan di pulau Jawa terhadap *scouring effect* berupa buku, jurnal, penelitian, disertasi, dan persyaratan defleksi pada tiang.

### Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data-data awal yang telah dikumpulkan adalah berupa data tanah *bore log*, data tiang, dan data *hammer*. Tiang yang digunakan adalah tiang pancang pipa baja (*steel pipe pile*) *open ended* dengan diameter 600 mm, tebal 16 mm, panjang total 30 m, serta mutu baja BJ37. Untuk data tiang lainnya dapat dilihat pada Tabel 4. *Hammer* yang digunakan adalah tipe KOBE K 25. Data tanah yang didapatkan berupa data *bore log* 1 dan *bore log* 2 lalu diambil nilai desainnya berdasarkan korelasi terhadap nilai N-SPT. Data tanah yang akan digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. Untuk pembebanan pada kepala tiang digunakan beban maksimum yang dapat diterima oleh masing-masing ukuran tiang.

Tabel 1. Data *Bore Log 1*

<i>Bore Log 1</i>		
<i>Depth (m)</i>	<i>Soil</i>	<i>N-SPT</i>
0-1	<i>Sand</i>	7
1-2	<i>Sand</i>	9
2-4	<i>Sandy Clay</i>	11
4-6	<i>Clay</i>	6
6-8.5	<i>Clayey Silt</i>	5
8.5-10	<i>Clay</i>	4
10-12	<i>Clay</i>	7
12-14	<i>Silty Clay</i>	4
14-16	<i>Clayey Silt</i>	10
16-18	<i>Clay</i>	5
18-20	<i>Silt</i>	8
20-22	<i>Silt</i>	13
22-24	<i>Silt</i>	50
24-28	<i>Cemented Silt</i>	50
28-30	<i>Cemented Clay</i>	50

Tabel 2. Data *Bore Log 2*

<i>Bore Log 2</i>		
<i>Depth (m)</i>	<i>Soil</i>	<i>N-SPT</i>
0-1	<i>Sand</i>	12
1-2	<i>Sand</i>	8
2-4	<i>Sand</i>	10
4-6	<i>Sand</i>	7
6-8	<i>Sand</i>	5
8-10	<i>Silty Clay</i>	4
10-12	<i>Clayey Silt</i>	4
12-14	<i>Clayey Silt</i>	3
14-16	<i>Clayey Silt</i>	11
16-18	<i>Clay</i>	9
18-20	<i>Clay</i>	8
20-22	<i>Silty Clay</i>	10
22-24	<i>Silt</i>	41
24-26	<i>Cemented Silt</i>	50
26-28	<i>Silt</i>	50
28-30	<i>Cemented Sand</i>	50

Tabel 3. Data Tanah Desain

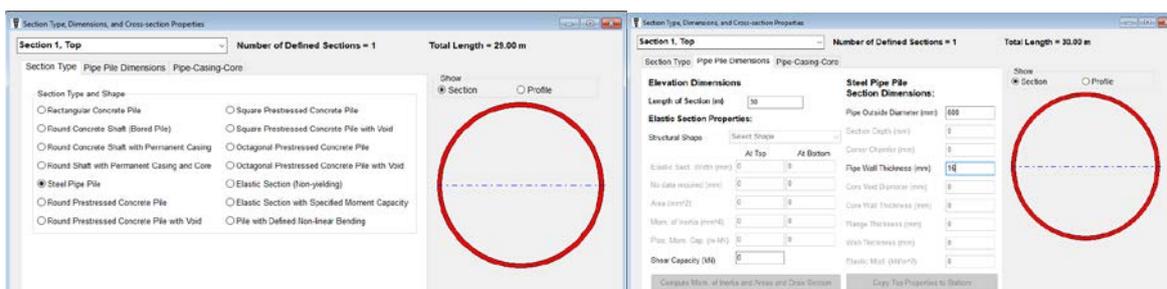
Data Tanah Desain					
Depth (m)	Soil	N-SPT	Berat Jenis $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Sudut Geser $\phi'$ (derajat)	Undrained Cohesion $C_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
0-4	Sand	9	16	34	-
4-8	Sand	6	15	30	-
8-14	Clay	5	14	-	3
14-20	Clay	8	16	-	4.5
20-22	Clay	11	17	-	7.5
22-24	Clay	45	21	-	29
24-28	Clay	50	22	-	35
28-30	Sand	50	22	45	-

Tabel 4. Data Awal Tiang dan Hammer

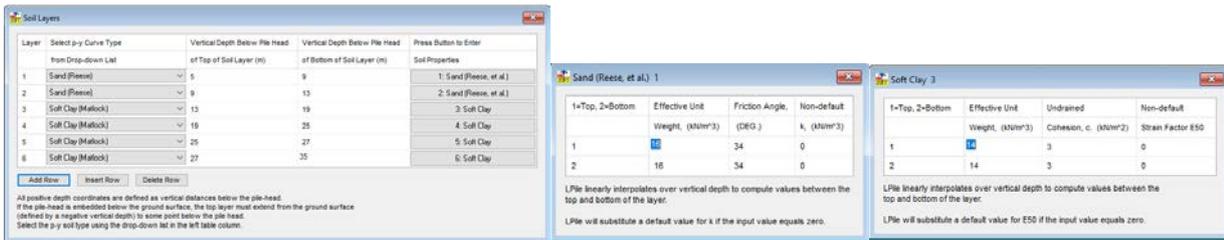
Data Awal Tiang dan Hammer	
Jenis tiang	Steel pipe pile (open ended)
Bahan tiang	Baja
Panjang tiang	30 m
Tegangan leleh (fy)	240 MPa
	240000 kN/m <sup>2</sup>
Modulus Elastisitas (E)	200000 MPa
	200000000 kN/m <sup>2</sup>
Diameter tiang	600 mm
Tebal tiang	16 mm
Tinggi bebas tiang	2.5 m
Tinggi air bebas	2.5 m
Hammer	KOBE K 25

### Analisis dengan Program LPILE

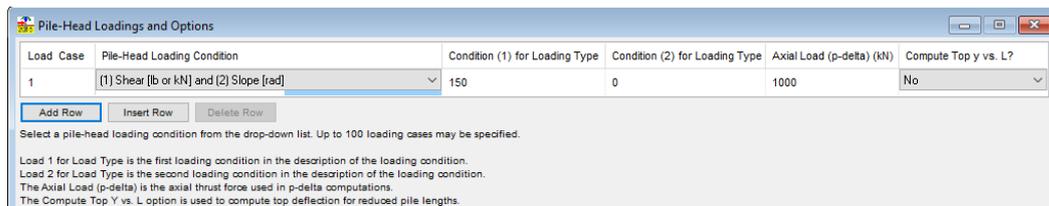
Analisis dengan program LPILE dilakukan untuk mengetahui kapasitas lateral dan defleksi tiang yang terjadi akibat adanya efek geseran sampai pada kedalaman 3 m. Pada program ini dilakukan trial diameter tiang sampai didapatkan hasil kapasitas dan defleksi tiang yang memenuhi syarat. Untuk mendapatkan hasil kapasitas dan defleksi tiang, dilakukan dengan input parameter tiang yang akan digunakan, lalu input parameter tanah, dan input pembebanan maksimum pada kepala tiang. Setelah itu dilakukan run analysis dan diperoleh kapasitas serta defleksi tiang.



Gambar 3. Input Parameter Tiang pada Program LPILE



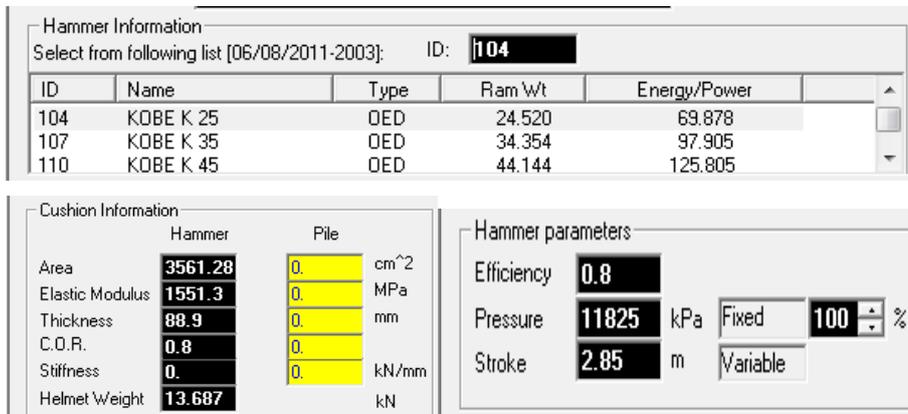
Gambar 4. *Input Parameter Tanah pada Program LPILE*



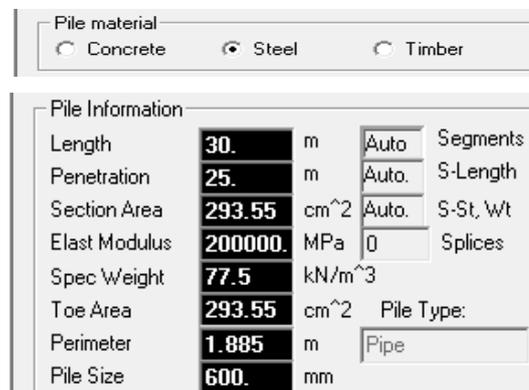
Gambar 5. *Input Parameter Pembebanan pada Program LPILE*

### Analisis dengan Program *GRLWEAP*

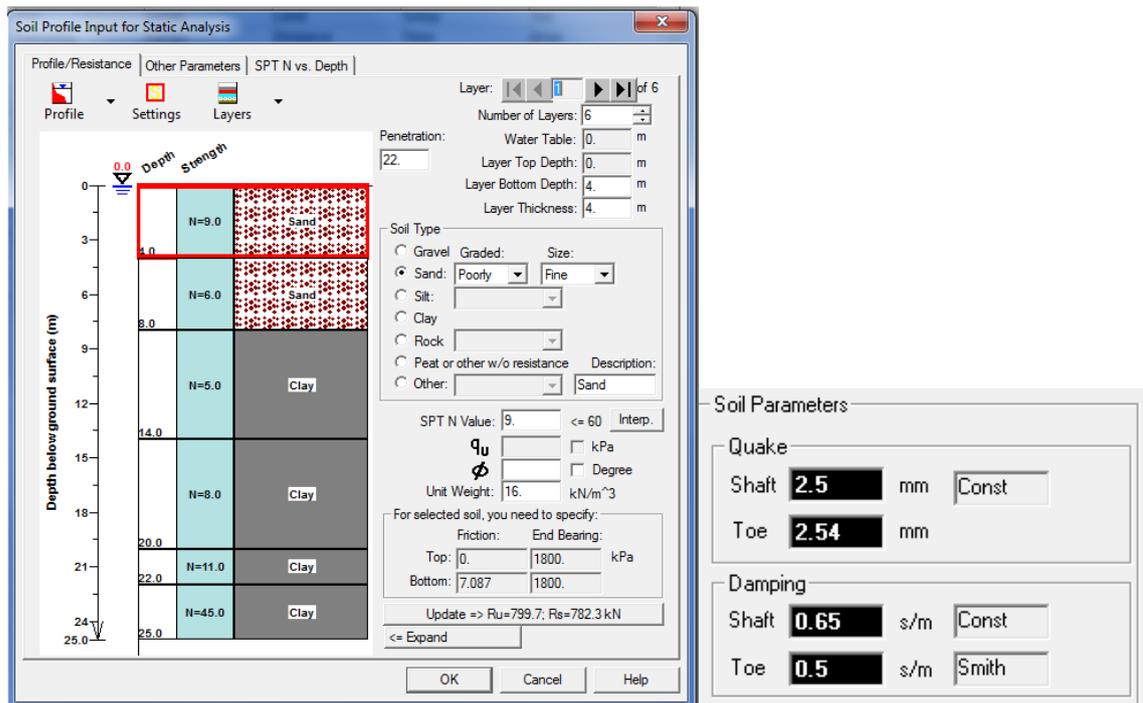
Analisis dengan program *GRLWEAP* dilakukan untuk mengetahui kapasitas tiang, tegangan tiang dan karakteristik pemancangan tiang jika menggunakan *hammer* yang berbeda dari data awal. Analisis dilakukan dengan menggunakan *hammer* yang lebih besar dari data awal pada diameter tiang hasil *trial* pada program sebelumnya. Tegangan yang terjadi selama pemancangan tiang dengan menggunakan *hammer* yang berbeda akan dibandingkan dan diperiksa terhadap syarat tegangan untuk memastikan tiang tidak terjadi *overstress* dan *overtension*. Untuk mendapatkan hasil kapasitas dan tegangan, dilakukan dengan analisis *driveability*, lalu *input* jenis *hammer*, *input* parameter tiang, dan *input* parameter tanah. Parameter *hammer* berasal dari *manufacturer hammer* masing-masing.



Gambar 6. *Input Pemilihan Hammer dan Parameter Hammer*



Gambar 7. *Input Parameter Tiang*



Gambar 8. Input Parameter Tanah

Untuk parameter tanah *quake* dan *damping* akan diisi secara otomatis oleh program *GRLWEAP* sesuai dengan jenis tanah yang digunakan pada simulasi. *Quake* merupakan nilai deformasi elastis maksimum tanah yang terjadi. Berikut merupakan tabel jenis tanah beserta dengan nilai *quake* dan *damping* menurut program *GRLWEAP*:

Tabel 5. Rekomendasi Nilai *Quake* Program *GRLWEAP* (Sumber: *GRLWEAP Help*)

	Soil Type	Pile Type or Size	Quake (mm)
Shaft Quake	All soil types	All Types	2.5
	All soil types, soft rock	Non-displacement piles i.e. driving unplugged	2.5
Toe Quake	Very dense or hard soils	Displacement piles of diameter or width D	D/120
	Soils which are not very dense or hard	Displacement piles of diameter or width D	D/60
	Hard Rock	All Types	1

Tabel 6. Rekomendasi Nilai *Damping* Program *GRLWEAP* (Sumber: *GRLWEAP Help*)

	Soil Type	Damping Factor s/m
Shaft Damping	Non-cohesive	0.16
	Cohesive	0.65
Toe Damping	In all soil types	0.5

### 3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Analisis dengan Program *LPILE*

Analisis dari program *LPILE* berhasil dilakukan jika tidak ada pesan *error* dari program saat melakukan *run analysis* seperti pada gambar berikut:

Load Case No.	Load Type	Pile-head Load 1	Load Type 2	Pile-head Load 2	Axial Loading kN	Pile-head Deflection meters	Pile-head Rotation radians	Max Shear in Pile kN	Max Moment in Pile kN-m
1	V, kN	150.0000	S, rad	0.00	1000.0000	0.03309	0.00	150.0000	-653.8222

Maximum pile-head deflection = 0.033094363 meters  
 Maximum pile-head rotation = 0.0000000 radians

The analysis ended normally.

Gambar 9. Contoh run analysis tanpa pesan error

Nilai kapasitas tiang dapat dilihat dari notepad hasil run analysis program *LPILE*. Tanda “Y” pada keterangan menunjukkan bahwa tiang telah mencapai batas tegangan lelehnya. Kapasitas tiang dapat diketahui dengan membandingkan momen maksimum yang dapat terjadi pada tiang sebelum mencapai tegangan leleh terhadap nilai momen lentur maksimum. Jika nilai momen maksimum yang terjadi pada tiang lebih kecil dibandingkan dengan nilai momen maksimum yang dapat diterima oleh tiang, maka tiang tersebut telah memenuhi syarat dan dapat digunakan.

Bending Curvature rad/m	Bending Moment kN-m	Bending Stiffness kN-m2	Depth to N Axis m	Max Comp Strain m/m	Run Msg
0.00004318	51.7126552	1197512.	0.8511392	7308.	
0.00008637	103.4253105	1197512.	0.6755696	11583.	
0.0001296	155.1379657	1197512.	0.6170464	15858.	
0.0001727	206.8506210	1197512.	0.5877848	20133.	
0.0002159	258.5632762	1197512.	0.5702278	24408.	
0.0002591	310.2759315	1197512.	0.5585232	28684.	
0.0003023	361.9885867	1197512.	0.5501627	32959.	
0.0003455	413.7012420	1197512.	0.5438924	37234.	
0.0003887	465.4138972	1197512.	0.5390155	41509.	
0.0004318	517.1265525	1197512.	0.5351139	45784.	
0.0004750	568.8392077	1197512.	0.5319217	50059.	
0.0020843	2496.	1197512.	0.5484997	226566.	
0.0021813	2612.	1197512.	0.5463441	236164.	
0.0022782	2723.	1195150.	0.5448570	240000.	Y
0.0023752	2816.	1185662.	0.5450235	240000.	Y

Load Case No.	Load Type	Pile-head Load 1	Load Type 2	Pile-head Load 2	Axial Loading kN	Pile-head Deflection meters	Pile-head Rotation radians	Max Shear in Pile kN	Max Moment in Pile kN-m
1	V, kN	150.0000	S, rad	0.00	1000.0000	0.02348	0.00	150.0000	-984.8406

Maximum pile-head deflection = 0.023478121 meters  
 Maximum pile-head rotation = 0.0000000 radians

The analysis ended normally.

Gambar 10. Contoh Perbandingan Kapasitas Tiang dengan Momen Maksimum yang Terjadi

Output dari program *LPILE* juga menunjukkan nilai defleksi maksimum yang dapat terjadi pada tiang jika memperhitungkan adanya potensi gerusan dikemudian hari. Defleksi maksimum yang diperbolehkan adalah 25 mm. Contoh hasil defleksi maksimum pada kepala tiang dapat dilihat pada contoh gambar berikut:

Load Case No.	Load Type	Pile-head Load 1	Load Type 2	Pile-head Load 2	Axial Loading kN	Pile-head Deflection meters	Pile-head Rotation radians	Max Shear in Pile kN	Max Moment in Pile kN-m
1	V, kN	150.0000	S, rad	0.00	1000.0000	0.02348	0.00	150.0000	-984.8406

Maximum pile-head deflection = 0.023478121 meters  
 Maximum pile-head rotation = 0.0000000 radians

The analysis ended normally.

Gambar 11. Contoh Output Defleksi Maksimum Kepala Tiang

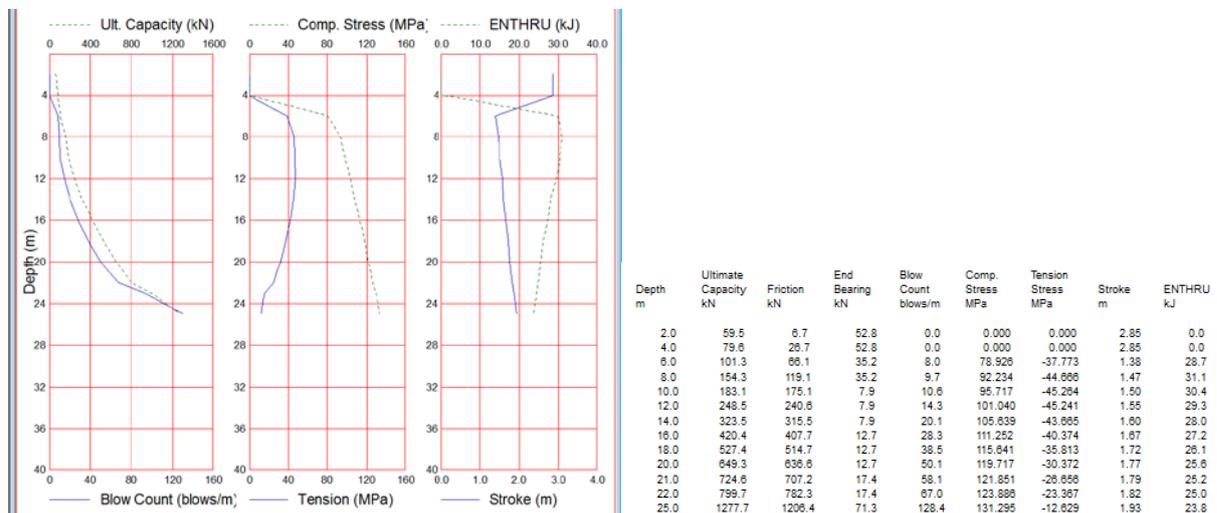
Berikut merupakan tabel-tabel hasil analisis kapasitas tiang dan defleksi maksimum yang terjadi pada kepala tiang dengan *trial* diameter tiang akibat adanya efek gerusan:

Tabel 7. Hasil Kapasitas Tiang dan Defleksi Maksimum Akibat Efek Gerusan

Diameter Tiang (cm)	Gerusan (m)	Momen Maksimum (kNm)	Kapasitas Tiang (kNm)	Defleksi Maksimum (cm)
60	0	653.8222	839.0738716	3.3094363
	1	743.6343	839.0738716	4.7828464
	2	845.3812	839.0738716	6.8841656
	3	973.7067	839.0738716	10.1611443
80	0	654.6857	1630	1.4136667
	1	740.2589	1630	2.0150096
	2	847.9661	1630	2.9993734
	3	965.4956	1630	4.2767935
100	0	676.9474	2612	0.8098823
	1	761.8538	2612	1.1362795
	2	869.6246	2612	1.6671209
	3	984.8406	2612	2.3478121

### Hasil Analisis dengan Program GRLWEAP

Pada laporan *output* program GRLWEAP dapat diketahui kapasitas ultimit tiang, jumlah pukulan, tegangan tarik dan tekan yang terjadi saat pemancangan tiang, serta energi maksimum yang ditransfer pada kepala tiang. *Output* dari program GRLWEAP kemudian dibandingkan jika menggunakan *hammer* yang lebih besar. Berikut merupakan contoh dari hasil *numerical* dan grafik *driveability* program GRLWEAP:



Gambar 12. Contoh *output* grafik *driveability* dan *numerical* dari program GRLWEAP

Pada gambar grafik yang pertama diketahui kapasitas ultimit tiang terhadap kedalaman pemancangan tiang serta jumlah pukulan *hammer* per meter. Pada gambar grafik kedua diketahui tegangan tarik dan tekan yang terjadi pada tiang saat dilakukan pemancangan. Pada grafik yang ketiga diketahui energi yang ditransfer pada kepala tiang selama dilakukan pemancangan di lapangan.

Pada gambar hasil *numerical* program dapat diketahui lebih tepat lagi berapa besaran nilai-nilai yang diperoleh dari simulasi pemancangan tiang. Berikut merupakan tabel hasil dari simulasi pemancangan dengan menggunakan *hammer* yang berbeda serta mengikuti hasil *trial* diameter pada program sebelumnya.

Tabel 8. *Output* Simulasi Pemancangan dengan *Trial Hammer*

Ukuran Tiang	Jenis <i>Hammer</i>	Kapasitas Ultimit (kNm)	Jumlah Pukulan	Tegangan Tarik (MPa)	Tegangan Tekan (MPa)	Tegangan Ijin (MPa)
60 cm	KOBE K 25	1277.7	128.4	12.629	131.295	216
	KOBE K 35	1277.7	85.9	15.885	153.163	
80 cm	KOBE K 25	1704.1	200	21.841	126.63	
	KOBE K 35	1704.1	131	21.573	150.889	
100 cm	KOBE K 25	2130.4	290.7	23.421	120.9	
	KOBE K 35	2130.4	184.5	23.900	143.708	

Dari hasil tegangan tarik dan tegangan tekan yang terjadi pada tiang dengan *trial hammer* KOBE K 25 dan KOBE K 35, lalu akan dibandingkan dengan tegangan tarik dan tegangan tekan ijin untuk material tiang baja dengan  $f_y$  240 MPa. Menurut program *GRLWEAP* tegangan tarik dan tegangan tekan ijin material tiang baja, dapat diperiksa dengan seperti berikut:

$$\sigma_{ijin} = 0,9 \cdot f_y \quad (1)$$

dengan  $f_y$  = tegangan leleh material baja

#### 4. KESIMPULAN

1. Dari hasil simulasi program *LPILE*, dapat diambil kesimpulan bahwa jika terjadi *scouring* sedalam 3 meter, maka tiang akan mengalami pertambahan momen lentur, dan defleksi tiang yang lebih besar jika dibandingkan dengan tidak terjadinya *scouring* pada sekitar tiang. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 7.
2. Diameter tiang yang semakin besar dapat mempengaruhi kapasitas tiang dan defleksi tiang tersebut. Ukuran tiang 100 cm merupakan tiang dengan defleksi kepala tiang yang terkecil serta memenuhi syarat defleksi yaitu 25 mm. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 7. Dari hasil simulasi program juga dapat disimpulkan bahwa diperlukannya kapasitas tiang yang lebih besar agar struktur atas tidak dapat mengalami kerusakan yang membahayakan.
3. Dari hasil simulasi program *GRLWEAP*, dapat diambil kesimpulan bahwa jika menggunakan *hammer* yang lebih besar, tegangan yang terjadi pada tiang juga akan membesar, hal ini patut diwaspadai karena dapat terjadi *overstress* maupun *overtension* pada tiang. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.
4. Dari hasil simulasi program *GRLWEAP*, dapat diambil kesimpulan bahwa ukuran *hammer* yang berbeda dengan diameter tiang yang sama tidak mempengaruhi kapasitas ultimit tiang tersebut. Dan jika menggunakan *hammer* yang lebih besar, jumlah pukulan terhadap tiang akan mengecil dan hal ini dapat mempercepat waktu pemancangan di lapangan dikarenakan penetrasi tiang akan lebih mudah dicapai dibandingkan dengan menggunakan *hammer* yang lebih kecil. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Budhu, M. (2000). *Soil Mechanics and Foundations. Unites States of America: John Wiley & Sons, Inc.*
- LPILE 2018 – User’s Manual*. (2018). *A Program to Analyze Deep Foundations Under Lateral Loading*. Texas: Ensoft, Inc.
- Lujito, Purwantoro. D., dan Sudiyono. (2015). *Gerusan di Sekitar Dua Pilar Jembatan dan Upaya Pengendaliannya. Peneltian*, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Miller, W. (2003). *Model For The Time Rate Of Local Sediment Scour At A Cylindrical Structure. Disertasi*, University of Florida.
- Sardjono H.S. (1984). *Teknik Pondasi Bagian 1*, Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.