

ANALISIS KEGAGALAN TIANG PANCANG PADA KONSTRUKSI DERMAGA DENGAN PROGRAM APILE OFFSHORE, LPILE, DAN GRLWEAP

Ivana Natasha¹ dan Chadir A. Makarim

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: ivananatasha211096@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: chadir259@gmail.com

ABSTRAK

Konstruksi lepas pantai (*offshore*) berbeda di dalam perencanaannya dengan konstruksi di daratan (*onshore*) dan konstruksi di dekat pantai (*near shore*). Analisis yang dilakukan pada skripsi ini menggambarkan interaksi antara konstruksi dengan parameter hidrodinamika, antara lain: beban siklik akibat ombak berulang, penggerusan (*scouring*), dan gaya gesek selimut negatif akibat endapan dari muara sungai. Skripsi ini memaparkan perbedaan tersebut dan menampilkan contoh kegagalan yang terjadi pada suatu proyek dermaga pada salah satu kawasan pulau di Indonesia. Metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kegagalan antara lain adalah dengan menggunakan analisis kapasitas tiang dan data hasil pukulan tiang untuk mendapatkan kapasitas tiang secara aksial dan lateral dengan program APILE Offshore dan LPILE, serta simulasi pemancangan tiang dengan program GRLWEAP. Input parameter yang digunakan berupa parameter tanah, tiang, dan hammer. Hasil analisis dari program akan dibandingkan dengan kapasitas tiang hasil uji pembebanan dinamik (PDA test) dan kalendering serta beban yang harus dipikul oleh tiang.

Kata kunci: *Offshore*, Pondasi tiang, APILE Offshore, LPILE, GRLWEAP.

1. PENDAHULUAN

Konstruksi lepas pantai (*offshore*) berbeda di dalam perencanaannya dengan konstruksi di daratan (*onshore*) dan konstruksi di dekat pantai (*near shore*) dan merupakan sebuah anjungan besar yang menyediakan fasilitas seperti pelabuhan. Pembangunan pelabuhan memegang peranan penting seperti administratif, perkembangan, industrial, dan komersil. Pelabuhan mencakup struktur dermaga yang merupakan fasilitas tempat kapal keluar masuk dan transfer muatan yang umumnya terletak pada tepi laut, sungai, maupun danau.

Struktur pada dermaga didukung oleh pondasi yang meneruskan beban yang dipikul ke dalam lapisan tanah. Tanah harus mampu memikul beban tanpa mengalami kegagalan. Pondasi yang umumnya digunakan adalah pondasi tiang. Pada tahap perencanaan, daya dukung pondasi perlu diperhatikan secara saksama karena kegagalan konstruksi dapat terjadi apabila pondasi tidak mampu menahan beban yang dipikul. Kegagalan yang terjadi pada tiang pancang konstruksi dermaga pada salah satu kawasan pulau di Indonesia merupakan suatu kasus nyata yang menimbulkan permasalahan pada struktur dermaga dan *trestle*.

Pengujian pada pondasi tiang perlu dilakukan untuk memperoleh verifikasi terhadap hasil desain pondasi berdasarkan data tanah yang tersedia, memberikan kepastian kepada insinyur desain dalam menentukan metode instalasi pondasi tiang, kapasitas tiang, memprediksi besarnya defleksi yang terjadi, dan mengetahui integritas pondasi tiang. Pengujian kapasitas tiang pondasi di darat (*onshore*) dapat dilakukan secara statik, namun hal ini sangat sulit dilakukan pada konstruksi lepas pantai (*offshore*) karena lingkungan dan beban muatan yang besar. Oleh sebab itu pengujian secara dinamik merupakan alternatif yang dapat ditempuh untuk menentukan kapasitas pondasi tiang, seperti *Pile Driving Analyzer* (PDA) test untuk memperoleh informasi mengenai kapasitas, integritas, dan memonitor instalasi pondasi tiang.

Perkembangan teknologi komputer yang cukup pesat menghasilkan software yang dapat digunakan untuk analisis dan memprediksi kapasitas pondasi tiang secara cepat dan baik. GRLWEAP merupakan program komputer yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas tiang berdasarkan hasil pengujian dinamik berupa simulasi pemancangan pondasi tiang dengan memasukkan parameter *hammer*, pondasi tiang, dan tanah. *Output* program berupa tegangan yang terjadi sepanjang tiang dan estimasi kapasitas aksial. Sementara itu untuk menganalisa kapasitas tiang secara aksial dan lateral digunakan program APILE Offshore dan LPILE. Hasil analisa dengan program dan data pengujian tiang di lapangan akan dibandingkan dengan besarnya beban yang bekerja pada masing-masing tiang dalam kondisi statik dan *service*. Oleh sebab itu, untuk menganalisa penyebab kegagalan tiang pancang

yang terjadi pada konstruksi dermaga pada salah satu kawasan pulau di Indonesia dilakukan dengan program APILE Offshore, LPILE, dan GRLWEAP.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Studi Literatur

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan teori untuk analisis penyebab kegagalan tiang pancang pada konstruksi dermaga pada salah satu kawasan pulau di Indonesia berupa buku, jurnal, dan peraturan seperti API *Recommended Practice 2GEO 2014 Geotechnical and Foundation Design Consideration* dan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik.

Hipotesis Penyebab Kegagalan Tiang Pancang

Langkah selanjutnya melakukan hipotesis (pendugaan sementara) terhadap penyebab kegagalan pada tiang pancang konstruksi dermaga, antara lain:

- Letak pelabuhan yang berada sangat dekat dengan muara sungai sehingga pada saat musim banjir, debit sungai membawa muatan material yang cukup besar yang menyebabkan sedimentasi pada area dermaga. Adanya endapan sedimen pada dasar laut dermaga ini dapat menjadi beban tambahan bagi struktur dermaga, khususnya tiang pancang yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan pada struktur dermaga.
- Selain potensi sedimentasi, terdapat potensi penggerusan (*scouring*) pada dermaga dan *trestle*. Apabila kembali terjadi curah hujan yang besar, dikhawatirkan akan terjadi perpindahan sedimen yang semakin tinggi.
- Semakin besar tiang bebas tiang pancang, maka potensi deformasi pada struktur dermaga dapat semakin besar.
- Pergeseran dermaga yang mengakibatkan dilatasi menjadi semakin renggang dapat disebabkan oleh gaya tekanan lateral akibat tumbukan kapal maupun banjir besar yang menimbulkan endapan sedimen sehingga mendorong dermaga bergerak maju. Selain itu, pergeseran dermaga dapat disebabkan oleh penurunan pada pondasi tiang.

Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data-data yang dikumpulkan antara lain data tiang, data tanah dari hasil pengujian lapangan dan laboratorium, dan data *hammer*. Tiang yang digunakan adalah tiang pancang pipa baja (*steel line pipe*) *open ended* diameter 457,2 mm dan tebal 6,35 mm Grade A dengan kuat leleh 30000 psi (205 MPa) dan kuat tarik 48000 psi (330 MPa). Hammer yang digunakan tipe KOBE K 35. Data tanah pada bagian dermaga dan *trestle* adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Parameter Tanah Bagian Dermaga

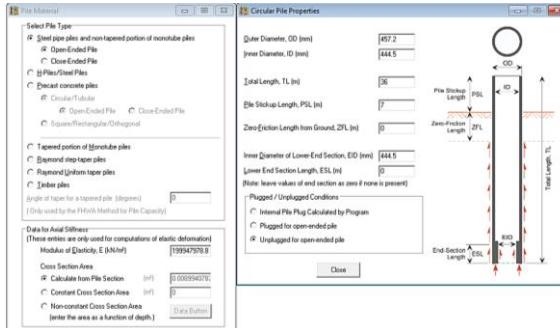
Lapisan	Kedalaman (m)	Jenis tanah	N – SPT	Berat jenis, γ (kN/m ³)	Sudut geser, ϕ (°)	Kepadatan relatif, Dr
1	0 – 5	Pasir	2	12,08	20,08	0
2	5 – 10	Pasir	9	14,95	23,00	0,1
3	10 – 17	Pasir kelanauan	12	17,04	24,00	0,15
4	17 – 30	Pasir kelanauan	18	17,02	24,71	0,35
5	30 – 37	Pasir kelanauan	25	17,80	26,20	0,4
6	37 – 45	Pasir kelanauan	28	17,50	26,00	0,59
7	45 – 62	Pasir kelanauan	38	17,50	27,33	0,7

Tabel 2. Parameter Tanah Bagian *Trestle*

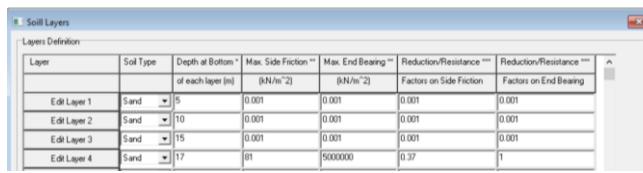
Lapisan	Kedalaman (m)	Jenis tanah	N – SPT	Berat jenis, γ (kN/m ³)	Sudut geser, ϕ (°)	Kepadatan relatif, Dr
1	0 – 5	Pasir	3	12,88	21,00	0
2	5 – 8	Pasir	6	12,50	21,00	0,1
3	8 – 25	Pasir kelanauan	11	15,91	22,07	0,15
4	25 – 30	Pasir kelanauan	16	16,72	22,99	0,3
5	30 – 35	Pasir kelanauan	20	16,94	25,00	0,35
6	35 – 45	Pasir kelanauan	27	17,00	25,75	0,58
7	45 – 62	Pasir kelanauan	37	17,50	27,33	0,69

Analisis pada Program APILE Offshore

Analisis pada program APILE Offshore dilakukan dengan memasukkan parameter tiang dan tanah. Setelah itu melakukan *run analysis* dan diperoleh kapasitas aksial tiang sepanjang kedalaman penetrasi tiang.



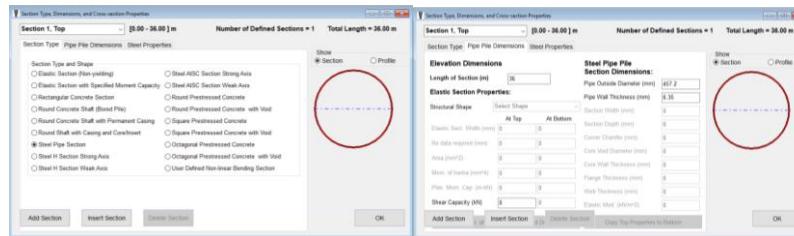
Gambar 1. *Input* Parameter Tiang pada Program APILE Offshore



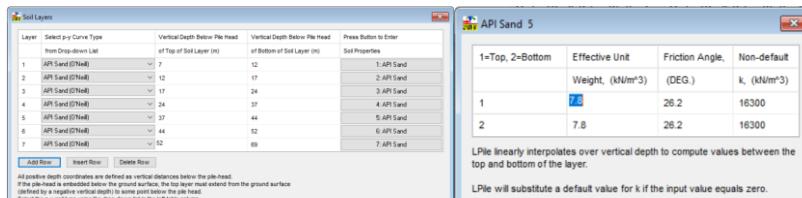
Gambar 2. *Input* Parameter Tanah pada Program APILE Offshore

Analisis pada Program LPILE

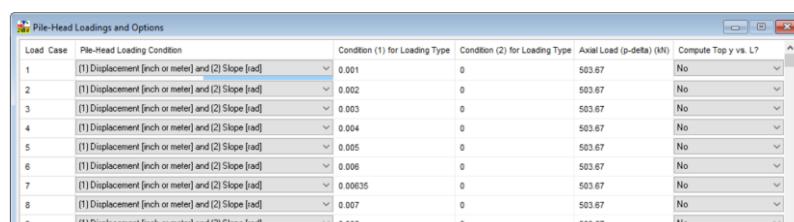
Analisis pada program LPILE dilakukan dengan memasukkan parameter tiang dan tanah. Untuk mengetahui kapasitas lateral tiang dilakukan dengan membatasi defleksi maksimum pada kepala tiang dengan *input* pembebanan opsi *Deflection and Slope* dimana besarnya defleksi pada kepala tiang dibatasi sebesar $\frac{1}{2}$ inch untuk gempa kuat dan $\frac{1}{4}$ inch untuk gempa nominal. Setelah itu melakukan *run analysis* dan diperoleh kapasitas lateral tiang.



Gambar 3. *Input* Parameter Tiang pada Program LPILE



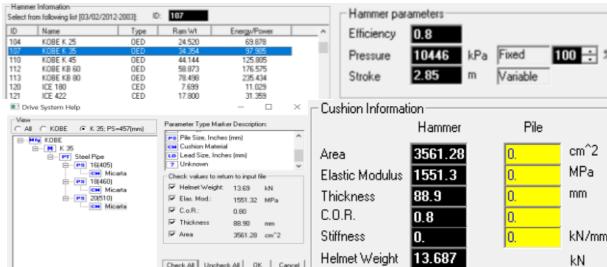
Gambar 4. *Input* Parameter Tanah pada Program LPILE



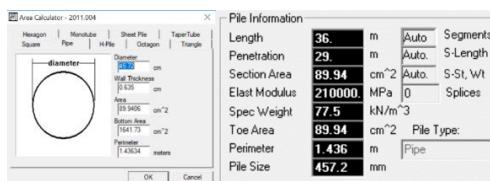
Gambar 5. *Input* Pembebanan pada Kepala Tiang Tipe *Displacement and Slope*

Analisis pada Program GRLWEAP

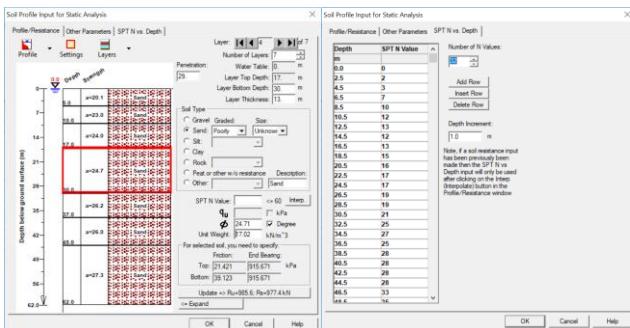
Analisis pada program GRLWEAP dilakukan dengan memasukkan parameter *hammer*, tiang, dan tanah. Data parameter *hammer* berasal dari *manufacturer*. Tipe analisis yang digunakan adalah *driveability* dimana kapasitas tiang ditentukan nilainya berdasarkan *gain/ loss factor* pada *shaft* dan *toe* tiang. Faktor ini bertujuan untuk mengurangi atau meningkatkan nilai tahanan pada tiang. Hasil analisis berupa *driveability graph* yang menyatakan kapasitas tiang, jumlah pukulan, tegangan tarik dan tekan sepanjang tiang, energi yang ditransfer dari sistem pemancangan ke tiang, dan *stroke* terhadap panjang penetrasi tiang.



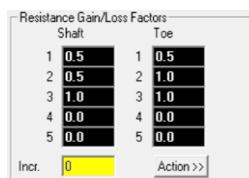
Gambar 6. Input Parameter Hammer dan Cushion KOBE K 35



Gambar 7. Input Parameter Tiang pada Program GRLWEAP



Gambar 8. Input Parameter Tiap Lapisan Tanah pada Program GRLWEAP



Gambar 9. Gain/loss Factor untuk Shaft dan Toe Resistance

Parameter tanah lainnya adalah *quake* dan *damping*. *Quake* merupakan deformasi elastis maksimum tanah yang terjadi. Nilai *quake* yang dianjurkan menurut program GRLWEAP adalah:

Tabel 3. Rekomendasi Nilai *Quake* Program GRLWEAP (Sumber: GRLWEAP 2010)

	Soil Type	Pile Type or Size	Quake (in) Quake (mm)
Shaft Quake	All soil types	All Types	0.10 2.5
Toe Quake	All soil types, soft Rock	Non-displacement piles** i.e. driving unplugged	0.10 2.5
	Very dense or hard soils	Displacement Piles*** of diameter or width D	D/120 D/120
	Soils which are not very dense or hard	Displacement Piles*** of diameter or width D	D/60 D/60
	Hard Rock	All Types	0.04 1.0

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Daya Dukung Aksial Tiang Statik pada Dermaga dan Trestle

Perhitungan daya dukung aksial tiang statik dilakukan dengan rumus Meyerhof. Analisis kapasitas tiang pipa baja *open ended* perlu mempertimbangkan efek *plugging*. Pertimbangan analisis yang akan digunakan adalah:

- Jika daya dukung friksi dalam tiang lebih besar daripada daya dukung ujung tiang kondisi *close ended*, maka tiang dianggap berperilaku seperti penampang *close ended* sehingga daya dukung ultimate adalah daya dukung friksi luar dan daya dukung tiang ujung *close ended*.

$$Q_{\text{side (inner)}} > Q_{\text{Tip (closed ended)}}, \text{ maka } Q_{\text{ult}} = Q_{\text{side (outer)}} + Q_{\text{Tip (closed ended)}} \quad (1)$$

- Jika daya dukung friksi dalam lebih kecil dari daya dukung ujung tiang *close ended*, maka tiang dianggap berperilaku seperti penampang *open ended* sehingga daya dukung ultimat adalah daya dukung friksi luar dan friksi dalam.

$$Q_{\text{side (inner)}} < Q_{\text{Tip (closed ended)}}, \text{ maka } Q_{\text{ult}} = Q_{\text{side (outer)}} + Q_{\text{side (inner)}} \quad (2)$$

Syarat kondisi *plugged* pada tanah *cohesionless* berdasarkan API Recommended Practice 2GEO 2014 Appendix C:

$$D_i < 2(D_r - 0,3) \quad (3)$$

Perhitungan daya dukung ujung dan selimut pondasi tiang pancang pipa baja dengan cara statik adalah:

$$Q_{\text{tip}} = A_{\text{tip}} \times q_t = A_{\text{tip}} \times 4.N \quad (4)$$

$$Q_{\text{side}} = \sum f_s l_i p \quad (5)$$

Kemudian perhitungan dilakukan pada semua tipe tiang pada dermaga dan *trestle* dengan panjang 36 meter dan 48 meter serta panjang tiang bebas 4 m – 14 m yang dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4. Daya Dukung Tiang Pancang Statik Meyerhof

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding (m)	Kondisi	Qu (kN)	Qall (kN)
Dermaga	36	6	<i>Unplugged</i>	708.27	283.31
		7	<i>Unplugged</i>	659.28	263.71
		8	<i>Unplugged</i>	610.28	244.11
		9	<i>Unplugged</i>	561.29	224.52
		10	<i>Unplugged</i>	512.29	204.92
		11	<i>Unplugged</i>	463.30	185.32
		12	<i>Unplugged</i>	414.30	165.72
		13	<i>Unplugged</i>	365.31	146.12
		14	<i>Unplugged</i>	316.31	126.53
		10	<i>Unplugged</i>	1273.23	509.29
		11	<i>Unplugged</i>	1202.61	481.04
	48	12	<i>Unplugged</i>	1131.99	452.80
		13	<i>Unplugged</i>	1061.37	424.55
		14	<i>Unplugged</i>	990.75	396.30
Trestle	36	4	<i>Unplugged</i>	648.27	259.31
		5	<i>Unplugged</i>	594.76	237.91
		6	<i>Unplugged</i>	541.26	216.50
		7	<i>Unplugged</i>	504.15	201.66
		8	<i>Unplugged</i>	467.05	186.82
		9	<i>Unplugged</i>	429.94	171.98

Analisis Daya Dukung Aksial dengan Program APILE Offshore

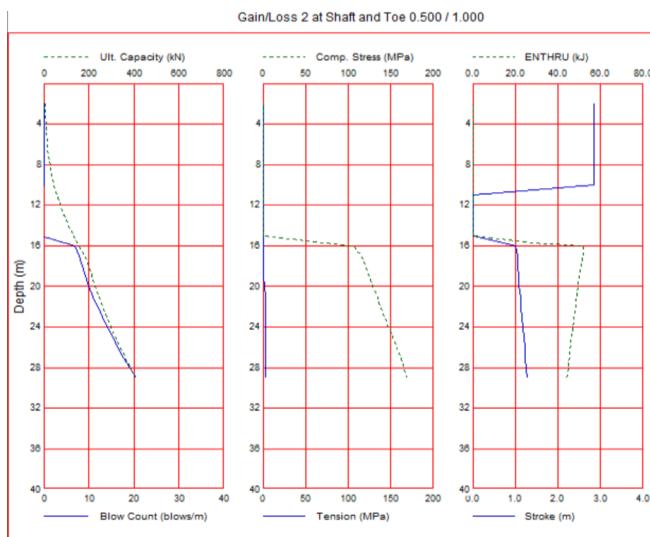
Kapasitas aksial yang akan diperhitungkan adalah metode API. *Output* kapasitas berupa kapasitas selimut, kapasitas ujung, dan kapasitas total yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5. Daya Dukung Aksial dengan Program APILE Offshore

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding (m)	Q_{tip} (kN)	Q_{side} (kN)	Axial Capacity, Q (kN)
Dermaga	36	6	39.2	275.8	315
		7	37.7	252	289.7
		8	35.8	221.7	257.5
		9	34.3	200	234.3
		10	32.9	179.1	212
		11	31.5	159.2	190.7
		12	29.5	134	163.5
		13	28.1	116.2	144.3
		14	26.6	99.2	125.9
	48	10	59.3	542.3	601.6
		11	57.6	507.5	565
		12	55.8	473.5	529.3
		13	53.4	430	483.3
		14	51.6	398.6	450.1
Trestle	36	4	37.5	288.9	326.4
		5	36.1	265.8	301.8
		6	27.7	244.7	272.4
		7	26.6	225.6	252.3
		8	25.1	201.4	226.6
		9	24	184.2	208.2

Analisis Daya Dukung Aksial dengan Program GRLWEAP

Hasil analisis berupa *driveability graph* sebagai berikut.



Gambar 10. Grafik Driveability pada Tiang Dermaga L = 36 m dan Panjang Freestanding 7 m

Tegangan tarik dan tekan yang diijinkan untuk material tiang baja adalah:

$$\sigma_{ijin} = 0.9 \cdot f_y \quad (6)$$

Dengan demikian, hasil analisis dengan program GRLWEAP adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Analisis Program GRLWEAP

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding (m)	Kapasitas Tiang (kN)	Tegangan Tekan (MPa)	Tegangan Tarik (MPa)	Cek Integritas Tiang
Dermaga	36	6	431.8	171.272	-3.016	OK
		7	406.8	168.305	-3.207	OK
		8	382.8	165.218	-3.369	OK
		9	359.28	161.835	-3.381	OK
		10	334.1	156.698	-4.151	OK
		11	316.8	152.135	-3.131	OK
		12	296.8	147.705	-2.914	OK
	48	13	274.2	141.682	-3.631	OK
		14	256.2	137.193	-3.461	OK
		10	672.4	180.135	-7.838	OK
		11	637.4	178.708	-5.113	OK
		12	605.4	177.726	-3.134	OK
		13	568.4	176.380	-1.960	OK
		14	544.8	174.852	-1.756	OK
Trestle	36	4	441.3	169.335	-4.851	OK
		5	417.9	166.552	-5.036	OK
		6	394.8	163.440	-5.764	OK
		7	373.7	160.641	-6.208	OK
		8	353.5	157.738	-6.584	OK
		9	334.2	154.253	-6.442	OK

Analisis Daya Dukung Lateral dengan Program LPILE

Kapasitas lateral tiang ijin yang akan diperhitungkan berdasarkan pembatasan defleksi maksimum sebesar $\frac{1}{2}$ inch untuk gempa kuat dan $\frac{1}{4}$ inch untuk gempa nominal. Kapasitas ijin lateral tiang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 7. Hasil Analisis Program LPILE

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding pile (m)	H _{all} (kN)		Momen maksimum (kNm)		Defleksi maksimum (m)	
			Defleksi $\frac{1}{4}$ "	Defleksi $\frac{1}{2}$ "	Statik	Service	Statik	Service
Dermaga	36	6	4.307	8.3199	122.75	182.58	0.0515	0.0865
		7	3.729	7.2219	139.71	207.98	0.072	0.13
		8	3.2196	6.3205	158.14	- ^{a)}	0.098	- ^{a)}
		9	2.8135	5.4951	178.46	- ^{a)}	0.1335	- ^{a)}
		10	2.4561	4.8785	201.53	- ^{a)}	0.1845	- ^{a)}
		11	2.1774	4.286	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		12	1.9228	3.8445	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
	48	13	1.723	3.4238	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		14	1.5478	3.0837	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		10	2.4372	4.8192	202.37	- ^{a)}	0.1874	- ^{a)}
		11	2.1562	4.2535	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		12	1.9174	3.7751	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		13	1.7116	3.3691	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
		14	1.5348	3.0338	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}	- ^{a)}
Trestle	36	4	8.3683	14.5861	87.15	128.41	0.0206	0.033
		5	5.8902	10.5423	101.51	149.55	0.031	0.0495
		6	4.404	8.5826	116.69	171.85	0.0448	0.0724
		7	3.7469	7.4085	132.97	195.73	0.0629	0.106
		8	3.2574	6.3905	150.61	- ^{a)}	0.0862	- ^{a)}
		9	2.82	5.6182	169.91	- ^{a)}	0.117	- ^{a)}

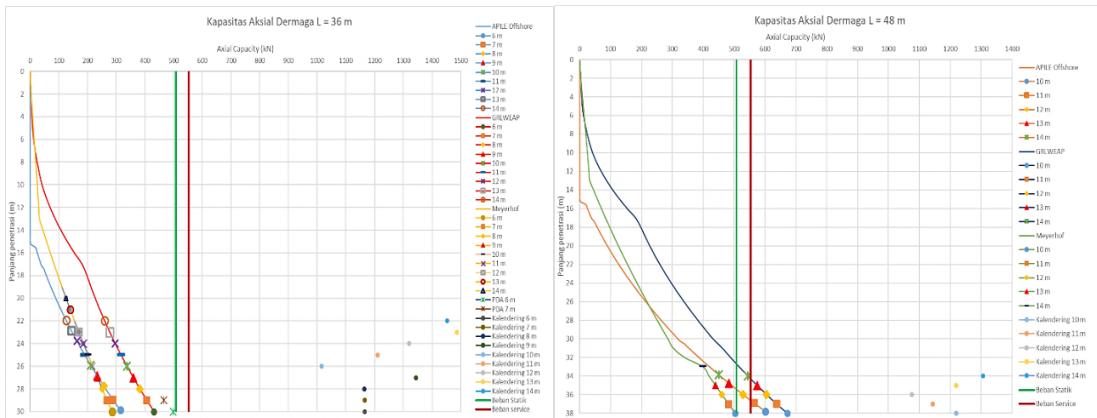
Catatan: ^{a)} Akibat beban maksimum (kondisi statik dan service), defleksi yang terjadi melampaui batas defleksi ijin. Hal ini disebabkan karena tiang mengalami *overloading*.

Perbandingan Hasil Kapasitas Aksial

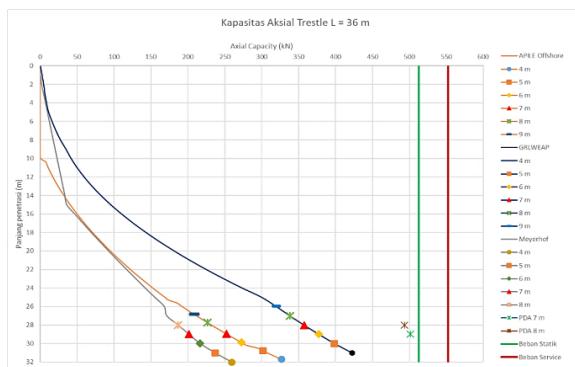
Hasil analisis kapasitas aksial hasil perhitungan statik dengan rumus Meyerhof dibandingkan dengan hasil analisis dengan program, PDA test, dan kalendering terhadap beban dari struktur dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 8. Perbandingan Daya Dukung Aksial Tiang Pancang Pipa Baja

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding pile (m)	Lokasi Tiang	Beban dari Struktur		Kapasitas Ijin (kN)				
				Statik	Service	Meyerhoff	APILE Offshore	GRLWEAP	PDA Test	Kalendering
Dermaga	36	6	C7	Tengah = 503,67 kN	Tengah = 549,23 kN	283,31	315	431,8	499,14	1165,63
		7	B7			263,71	289,7	406,8	466,57	1165,63
		8	C9			244,11	257,5	382,8		1163,87
		9	C11			224,52	234,3	359,28		1344,63
		10	B17			204,92	212	334,1		1016,08
		11	B12	Ujung = 508,05 kN	Ujung = 553,61 kN	185,32	190,7	316,8		1210,96
		12	C13			165,72	163,5	296,8		1321,04
		13	C14			146,12	144,3	274,2		1486,17
		14	C16			126,53	125,9	256,2		1453,15
		10	B1			509,29	601,6	672,4		1219,29
Trestle	48	11	A1	512,61 kN	552,61 kN	481,04	565	637,4		1143,09
		12	C18			452,80	529,3	605,4		1075,85
		13	B18			424,55	483,3	568,4		1219,29
		14	A18			396,30	450,1	544,8		1306,39
		4	A1			259,31	326,4	441,3		
		5	A2			237,91	301,8	417,9		
Trestle	36	6	A3			216,50	272,4	394,8		
		7	A6			201,66	252,3	373,7	501,14	
		8	A8			186,82	226,6	353,5	493,43	
		9	A11			171,98	208,2	334,2		



Gambar 11. Perbandingan Kapasitas Aksial Tiang Dermaga L = 36 m dan L = 48 m



Gambar 12. Perbandingan Kapasitas Aksial Tiang Trestle L = 36 m

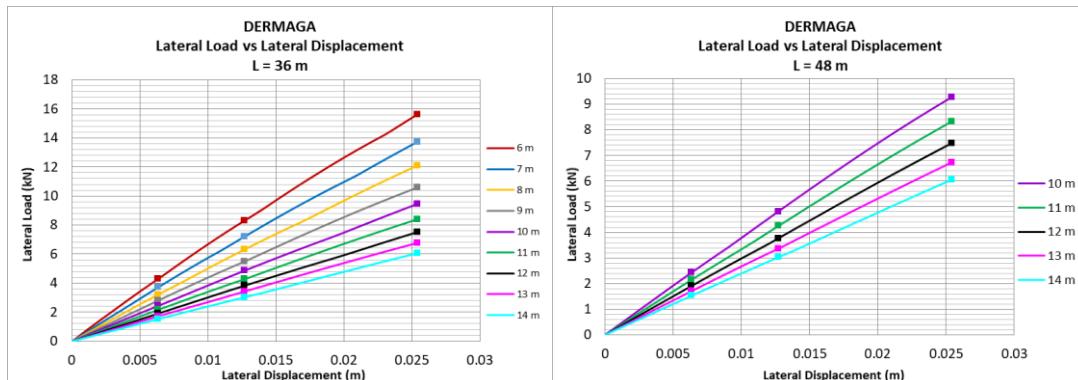
Maka berdasarkan perbandingan kapasitas dengan beban aksial yang bekerja pada kondisi statik dan *service*, tiang mengalami kegagalan karena beban yang bekerja melebihi kapasitas aksial tiang.

Perbandingan Hasil Kapasitas Lateral

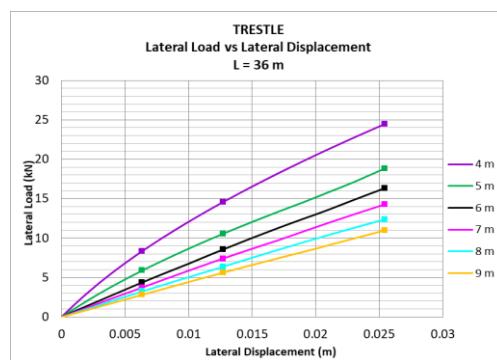
Hasil analisis kapasitas lateral hasil analisis dengan program LPILE terhadap beban dari struktur dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 9. Perbandingan Daya Dukung Lateral Tiang Pancang Pipa Baja

Lokasi Tiang	Panjang Tiang, L (m)	Panjang freestanding pile (m)	Beban dari Struktur (kN)		H _{all} (kN)		Momen maksimum (kNm)	
			Statik	Service	Defleksi ¼"	Defleksi ½"	Statik	Service
Dermaga	36	6	21.1	29.5	4.307	8.3199	122.75	182.58
		7			3.729	7.2219	139.71	207.98
		8			3.2196	6.3205	158.14	– *)
		9			2.8135	5.4951	178.46	– *)
		10			2.4561	4.8785	201.53	– *)
		11			2.1774	4.286	– *)	– *)
		12			1.9228	3.8445	– *)	– *)
		13			1.723	3.4238	– *)	– *)
		14			1.5478	3.0837	– *)	– *)
	48	10			2.4372	4.8192	202.37	– *)
		11			2.1562	4.2535	– *)	– *)
		12			1.9174	3.7751	– *)	– *)
		13			1.7116	3.3691	– *)	– *)
		14			1.5348	3.0338	– *)	– *)
Trestle	36	4			8.3683	14.5861	87.15	128.41
		5			5.8902	10.5423	101.51	149.55
		6			4.404	8.5826	116.69	171.85
		7			3.7469	7.4085	132.97	195.73
		8			3.2574	6.3905	150.61	– *)
		9			2.82	5.6182	169.91	– *)



Gambar 13. Perbandingan Kapasitas Lateral Tiang Dermaga L = 36 m dan L = 48 m



Gambar 14. Perbandingan Kapasitas Lateral Tiang Trestle L = 36 m

Maka berdasarkan perbandingan kapasitas hasil analisis dengan program LPILE dengan beban lateral yang bekerja pada kondisi statik dan *service*, tiang mengalami kegagalan karena beban yang bekerja melebihi kapasitas tiang.

4. KESIMPULAN

1. Hasil analisis daya dukung aksial dengan perhitungan secara manual, program APILE Offshore, dan program GRLWEAP tidak memenuhi syarat kestabilan struktur karena beban vertikal baik kondisi statik maupun *service* yang bekerja pada masing-masing tiang melampaui kapasitas daya dukung ijin aksial.
2. Hasil analisis daya dukung lateral dengan program LPILE menunjukkan tiang tidak dapat menahan beban lateral secara statik dan *service* yang melampaui kapasitas tiang lateral.
3. Berdasarkan analisis dengan program GRLWEAP, tegangan tekan pada ujung tiang hampir mendekati batas tegangan tekan ijin sebesar 184,5 MPa namun belum mengalami leleh dan rusak saat pemancangan. Sedangkan tegangan tarik tiang dalam kondisi aman.
4. Kegagalan yang terjadi pada pondasi tiang pipa baja konstruksi dermaga disebabkan karena kesalahan dalam mendesain struktur dermaga dan *trestle*, yaitu salah dalam menentukan posisi pelabuhan yang terletak di muara yang membawa endapan sehingga menurunkan kapasitas pondasi, ujung tiang yang tidak bersandar pada tanah keras, tidak mempertimbangkan beban siklik dan efek *scouring*.
5. Semakin besar panjang tiang bebas (*freestanding*) tiang pancang, maka potensi deformasi pada struktur dermaga dapat semakin besar. Hal ini terbukti oleh semakin menurunnya kapasitas daya dukung baik aksial maupun lateral dengan semakin berkurangnya panjang penetrasi ke dalam tanah, karena tanah yang menyumbangkan tahanan selimut tiang berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. (2014). Geotechnical and Foundation Design Considerations. Washington, DC: API.
- APILE 2015 – User’s Manual. (2015). A Program for the Study of Driven Piles under Axial Loads. Texas: Ensoft, Inc.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN.
- Bowles, J.E. (1991). Analisa dan Desain Pondasi Edisi keempat Jilid 1. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, J.E. (1991). Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah). Jakarta: Erlangga.
- Bowles, J.E. (1997). Foundation Analysis and Design 5th Edition. Singapore: McGraw – Hill Book Co.
- Chamani, Mohammad R. Pier Scour. chamani.iut.ac.ir.
- Coduto, Donald P. (2016). Foundation Design Principles and Practices 3rd Edition. California: Pearson.
- Das, Braja M. (1993). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Dean, E.T.R. (2010). Offshore Geotechnical Engineering Principles and Practice. Great Britain: Thomas Telford.
- Dictionary of Construction. Timber Pile. <http://www.dictionaryofconstruction.com/definition/timber-pile>.
- Direktorat Pelabuhan dan Pengerukan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut Kementerian Perhubungan. (2014). Detail Engineering Desain (DED) Pelabuhan Tahun Anggaran 2014. Bandung: Marga Nusantara Persada.
- Dutch Foundation. Pile Testing. <http://dfdubai.com/quality/pile-testing-2/>.
- Fundamentals of Environmental Measurements. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/hydro-logy/sediment-transport-deposition/>.
- Ghazvinei, Pezhman, T. Scour Hazard Assessment and Bridge Abutment Instability Analysis. www.researchgate.net.
- Hunt, Roy E. (2005). Geotechnical Engineering Investigation Handbook 2nd Edition. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis Group.
- Introduction to Deep Foundations. <http://slideplayer.com/slide/5730387/>.
- Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut Kantor Unit Penyelenggara Pelabuhan (KUPP) Laut Kolaka. (2016). Laporan Pemancangan Dermaga. Sulawesi: KUPP.
- LPILE 2018 – User’s Manual. (2018). A Program to Analyze Deep Foundations Under Lateral Loading. Texas: Ensoft, Inc.
- Masjedi, A. Reduction of Local Scour at a Bridge Pier using Collar in a 180 Degree Flume Bend. 2010. <https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2010.124.131>.
- Mello, De. 1971. The Standard Penetration Test. 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan (Puerto Rico). Vol. I. (Juni 1971): 1 – 86.
- Pile Driving Analysis - Driven Piles. www.abuildersengineer.com.
- Pile Driving Analyzer (PDA). <http://www.earthproducts.in/pile-driving-analyzer-pda/>.
- Pile Dynamic, Inc. GRLWEAP 2010 help (<http://www.pile.com/grlweap>).
- Randolph, Mark dan S. Gouvenec. (2011). Offshore Geotechnical Engineering. Oxon: Spon Press.
- Terzaghi, Karl. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. Singapore: Wiley.
- Universitas Katolik Parahyangan. (2017). Manual Pondasi Tiang Edisi 5. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan.