

PENGGUNAAN *SACRIFICIAL PLATE* SEBAGAI ANTISIPASI KEGAGALAN *TIP BUCKLING* PADA *STEEL PIPE PILE*

M.D.P. Laksana^{1*}, J.D.Pangestu²

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

² Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: daffandra@ugm.ac.id

INTISARI

Steel pipe pile banyak digunakan pada konstruksi *onshore* maupun *offshore* karena kapasitas lentur tinggi dan kemudahan pemasangan. Namun, risiko kegagalan *tip buckling* pada ujung tiang sering muncul saat tiang menembus lapisan keras atau batuan. Kegagalan ini mengurangi kemampuan penetrasi pile serta berpotensi menimbulkan kerusakan struktur. Penelitian ini menganalisis penggunaan *sacrificial plate* sebagai metode mitigasi untuk menahan *buckling* pada ujung *steel pipe pile*. *Sacrificial plate* berupa penebalan ujung tiang sepanjang 1 meter dengan ketebalan ganda dari dinding tiang.

Metode yang digunakan adalah simulasi numeris berbasis elemen hingga dengan pendekatan Lagrangian menggunakan perangkat lunak Plaxis 3D. Model tanah dibangun dari data bor-hole lapangan dan dimodelkan dengan kriteria *Mohr-Coulomb*. Beban yang dianalisis meliputi skema static press dan impact driving force sesuai kondisi pemancangan aktual.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tanpa *sacrificial plate*, deformasi signifikan terjadi pada ujung *pile*, menandakan potensi *buckling*. Penambahan *sacrificial plate* terbukti menurunkan deformasi hingga 40% sehingga mampu memperkuat ketahanan ujung tiang terhadap gaya tekan dan pukulan. Dengan demikian, penggunaan *sacrificial plate* efektif sebagai strategi mitigasi untuk mencegah kegagalan *tip buckling* pada *steel pipe pile*.

Kata kunci: *buckling*, *steel pipe pile*, deformasi, *Plaxis*, Lagrangian.

1 PENDAHULUAN

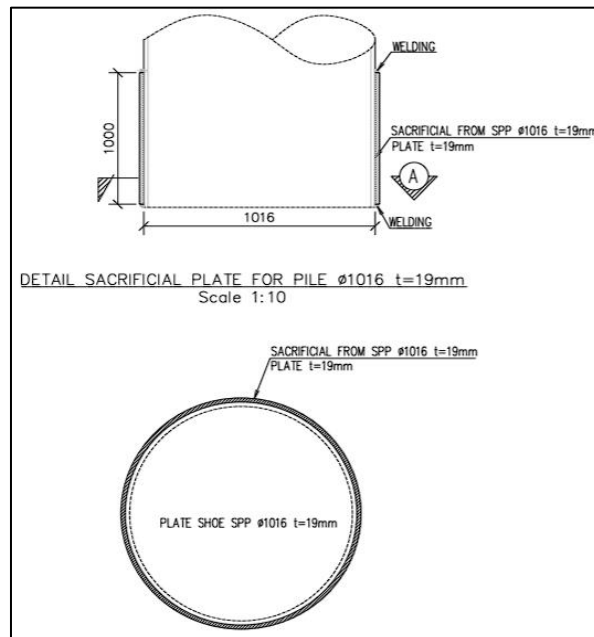
1.1 Latar Belakang

Steel pipe pile menjadi salah satu pilihan yang paling sering digunakan dalam konstruksi *offshore* maupun *onshore*. Kapasitas *bending* yang besar dan kemudahan konstruksi menjadi alasan *steel pipe pile* masih menjadi solusi utama dalam konstruksi *high risk*. Namun, terdapat beberapa kendala dan resiko yang mungkin terjadi. Kegagalan *buckling* pada *steel pile* akan terjadi secara progresif di area ujung pile apabila terkena batu *boulder* atau lapisan pasir yang padat pada saat proses pemancangan (Chen, 2024). Kegagalan *buckling* memiliki efek yang signifikan pada proses penetrasi tiang pancang ke dalam tanah, dimana apabila tiang mengalami *tip buckling*, kemampuan penetrasi *pile* menurun (Le, Hung 2025). Banyak kerusakan pada ujung tiang pancang pada saat proses pemancangan pada beberapa jenis tiang pancang baja (Randolph, 2018). Kerusakan ini bisa terjadi dikarenakan kontak dengan lapisan batuan atau lapisan tanah keras. Namun bisa juga terjadi dikarenakan kegagalan struktur materialnya.

Oleh sebab itu diperlukan simulasi atau pendekatan awal untuk melakukan pre-determinasi kegagalan *buckling* yang mungkin terjadi. Dengan mengadopsi pendekatan metode elemen hingga berbasis lagrangian, penelitian ini menghasilkan simulasi numeris perilaku *buckling* ujung *steel pipe pile* yang dibebani secara aksial dengan menggunakan model 3D. Model diperluas sehingga mampu merepresentasikan geometri tiang dan interaksi tanah-struktur secara lebih realistis. Analisis ini dilakukan untuk menganalisis *buckling* yang terjadi dan langkah mitigasi yang akan dilakukan untuk meminimalisasi potensi terjadinya kegagalan struktur.

Penggunaan *sacrificial plate* atau biasa disebut dengan *pile shoe* sudah umum digunakan untuk struktur tiang pancang baja. *Sacrificial plate* merupakan penebalan tiang pancang sepanjang 1 meter pada bagian ujung tiang untuk menahan *buckling* yang terjadi. Umumnya penebalan dilakukan 2 kali dari tebal tiang pancang. Dengan pendekatan simulasi numeris berbasis lagrangian, deformasi yang terjadi sebelum dan sesudah dilakukan penebalan pada ujung tiang pancang dapat diprediksi. Hal ini dilakukan untuk mensimulasikan keefektifan penggunaan *sacrificial plate* dalam

menahan *buckling* yang terjadi. Model penebalan *sacrificial plate* dapat dilihat pada Gambar 1, *steel pile pipe* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Model penebalan *sacrificial plate*



Gambar 2. *Steel pipe pile*

2 METODOLOGI

2.1 Data Tanah Acuan

Pengujian *bor-hole* dilakukan di daerah yang akan dilakukan pemancangan. Data *bor-hole* tersebut dilakukan interpretasi dan pendekatan menggunakan buku Handbook of Geotechnical Engineering oleh burt G. look. Hasil interpretasi akan dijadikan sebagai dasar pemodelan geometri tanah serta stratigrafi tanah pada daerah pemancangan.

Hasil interpretasi data tanah dapat dilihat pada

Tabel 1. Stratigrafi tanah menunjukkan pada kedalaman 2,5 meter dibawah tanah sudah berada di lapisan tanah keras dengan nilai N-Spt >50. Hal ini menjadi landasan utama diperlukannya analisis dan rencana mitigasi pada proses instalasi tiang pancang guna mencegah kegagalan struktur pada saat pemancangan mengenai lapisan tanah keras atau *boulder*.

Tabel 1. Interpretasi data lapisan tanah.

Kedalaman m	N_m	Deskripsi	Konsistensi	ϕ °	ψ °	γ_{sat} kN/m ³	γ_b kN/m ³	E kPa
0 – 2.5	15	Sandy Silt	Medium dense	35	5	19	16	5.844
2.5 – 5	60	Sandy Silt	Medium dense	50	20	20	18	18.993
5 – 7.5	60	Andesite	Medium strong	50	20	20	18	18.993
7.5 – 10	60	Gravel	Very dense	50	20	20	18	18.993
10 – 16	60	Silty Sand	Very dense	50	20	20	18	18.993
16 – 25	60	Silty Sand	Very dense	50	20	20	18	18.993

2.2 Data Steel Pipe Pile

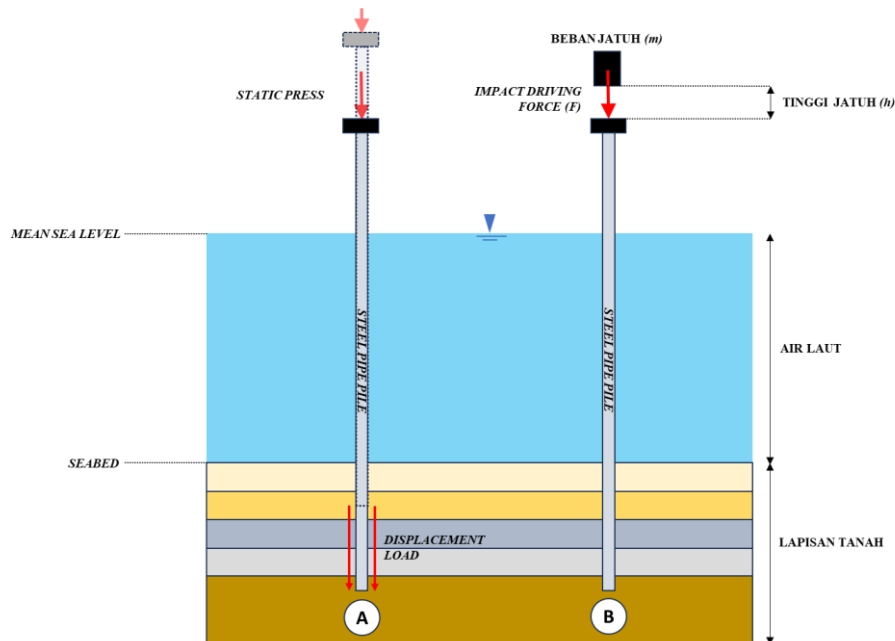
Steel pile pipe yang digunakan merupakan *steel pipe pile grade III* dengan diameter 1.016 mm dengan tebal 19 mm yang mengacu pada standar spesifikasi ASTM A252 untuk *Welded and Seamless Steel Pipe Pile*. Mutu material ASTM A252 grade 3 memiliki minimum tegangan leleh (f_y) = 310 MPa. Detail spesifikasi untuk tiang pancang baja dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data properties steel pipe pile.

Parameter	Nilai	Satuan
E	210.000.000	kN/m ²
f_y	310	MPa
W	0,06	
d	0,019	m
L	40	m
Unit weight	77	kN/m ³

2.3 Definisi Pembebanan Pancang

Penelitian ini melakukan pengamatan pada model numeris terhadap perilaku *buckling ujung pile* ketika diberikan pembebanan aksial. Pemodelan yang dilakukan memiliki 2 (dua) skema pembebanan: *static press*, dan *impact driving force* sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema pembebanan pada model numeris.

Kedua skema pembebanan tersebut dilakukan untuk mempertimbangkan variasi metode dalam pemancangan. Pengaplikasian kedua skema pembebanan pada model numeris dilakukan dengan mempertimbangkan hal-hal berikut.

a) Skema *static press (displacement load)*

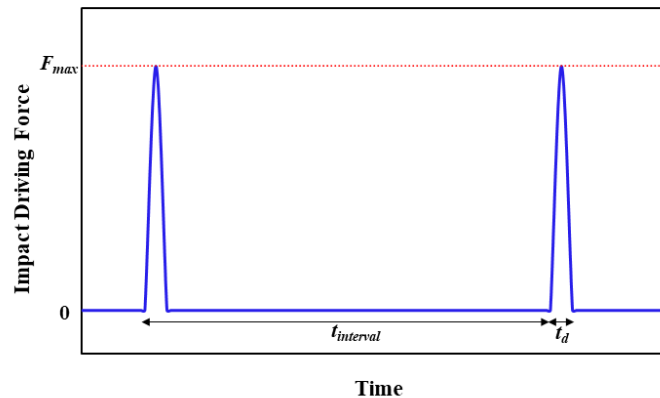
Pada model dengan skema pembebanan ini, ujung *steel pipe pile* akan diaplikasikan beban *displacement* hingga kedalaman rencana *pile* tertanam. Dengan demikian akan diperoleh efek penetrasi *steel pipe pile* menembus lapisan-lapisan tanah hingga kedalaman rencana yaitu 11 m kedalaman tertanam di bawah *seabed*. Hasil akhir dari analisis ini akan diperoleh *stress, strain*, beserta deformasi yang terjadi pada *shaft steel pipe pile*.

b) Skema *impact driving force* (beban pukulan dinamis)

Simulasi yang dilakukan menggunakan skema ini menggunakan beban energi pukulan dalam penetrasi yang terjadi pada *pile*. Pukulan dari beban jatuh diperhitungkan sebagai energi potensial yang ditransfer menjadi *impact driving force*. Menurut Daryae et al (2025), gaya maksimum yang dihasilkan dari pukulan beban jatuh pada *pile* dapat diformulasikan ke dalam ekspresi matematis pada Persamaan (1).

$$F_{max} = \frac{\pi \eta m \sqrt{2gh}}{2t_d} \tag{1}$$

di mana η adalah faktor reduksi/efisiensi akibat disipasi energi selama terjadinya *impact*, dan t_d sebagai durasi *impact*. Kurva gaya yang diterima oleh *pile* akibat beban jatuh dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 4



Gambar 4. Kurva *impact driving force* pada model numeris (Daryae et al, 2025).

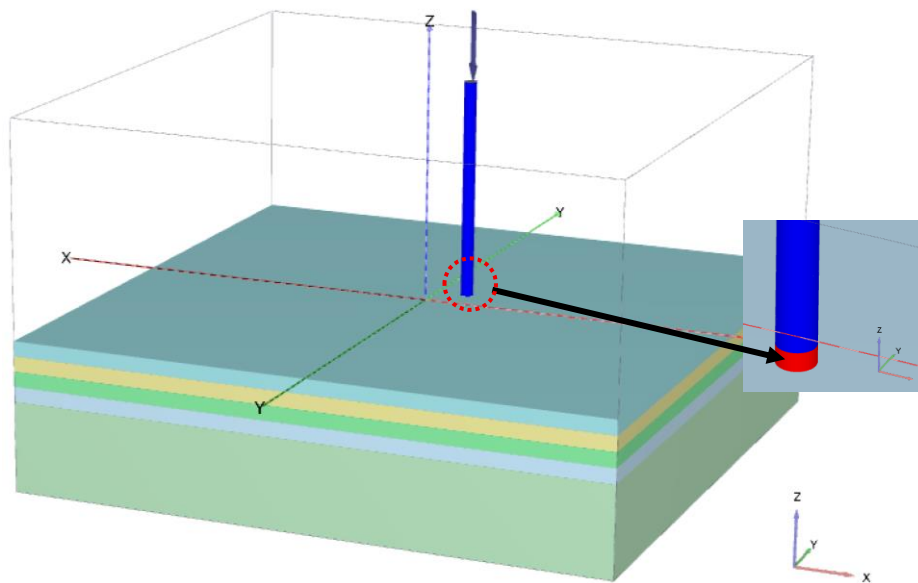
Tabel 3. Perhitungan *maximum impact driving force*.

Beban jatuh (kg)	Tinggi jatuh, h (m)	<i>Impact duration</i> , t_d (ms)	<i>Efficiency factor</i> , η	F_{max} (N)	F_{max} (kN)
5.600	5	20	0,756	3.293.322,09	3.293,32

2.4 Model Simulasi Numeris

Model simulasi numeris menggunakan software Plaxis 3D, dengan konfigurasi menyerupai pemancangan asli dilapangan, dimodelkan pada sebuah geometri dengan stratigrafi hasil interpretasi. Model tanah dimodelkan secara Mohr-Coloumb. Model ini didasarkan pada kriteria keruntuhan, yaitu tanah dianggap mengalami keruntuhan ketika tegangan geser maksimum tercapai pada bidang geser tertentu. Dikarenakan simulasi hanya mensimulasikan skema beban *static pressing* dan beban dinamis hasil dari *impact driving*, model Mohr-Coloumb efektif digunakan.

Sementara itu model *steel pipe pile* dimodelkan sebagai struktur *plate circular* dengan ketebalan sesuai dengan yang diinginkan. Model *plate* akan menunjukkan hasil deformasi secara keseluruhan dari batang tubuh tiang pancang. Tiang pancang dimodelkan sepanjang 40 meter dengan diameter 1.016 mm dan ketebalan 19 mm. Dan dibagian bawah tiang pancang dimodelkan penebalan 19 mm. Gambar model geometri serta ilustrasi penebalan dapat dilihat pada Gambar 4



Gambar 5. Model Geometri serta model *sacrificial plate*.

Terdapat beberapa metode analisis elemen hingga, beberapa di antaranya adalah metode Lagrangian maupun Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL). Baik metode Lagrangian maupun Coupled Eulerian-Lagrangian memiliki keunggulannya masing-masing. Metode Lagrangian, yang diperkuat dengan teknik *mesh/remeshing* adaptif, adalah pilihan yang efektif untuk banyak aplikasi. Sementara itu, CEL menawarkan kelebihan dalam menangani deformasi yang sangat besar tanpa memerlukan pembaruan mesh. Penelitian ini menggunakan pendekatan Lagrangian di mana perhitungan dilakukan secara iteratif dikarenakan sifat tanah yang nonlinier. Dimana formula *finite element method* akan bergantung pada sifat fisik dan mekanis dari permasalahan yang mau diselesaikan. Bentuk umum persamaan matriks yang menghubungkan kekakuan, displacement, dan gaya dapat dilihat pada Persamaan (2)

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (2)$$

di mana,

K : matriks kekakuan

U : vektor perpindahan

F : vektor gaya

Pemodelan beban pukulan hammer pada tiang pancang kedalam simulasi numeris melalui PLAXIS 3D dilakukan secara bertahap melalui *staged construction*. Tahap pertama dimulai dengan perhitungan geostatic, dimana kondisi tegangan awal tanah tanpa adanya struktur agar distribusi tegangan in-situ dan tekanan air pori terbentuk. Tahap kedua yaitu mengaktifkan elemen tiang atau element plate, tahap ini membuat interaksi awal antara tanah dengan plate pile. Fase selanjutnya adalah memasukan beban pukulan hammer. Pada tahap ini analisis diubah menjadi fase dinamis, serta beban hammer dimodelkan sebagai beban dinamis. Dengan memasukan *time-history-load* pada beban tersebut dengan memasukan faktor frekuensi serta amplitudo terjadinya pukulan. Hal ini dilakukan agar pemodelan bisa memodelkan dengan rinci interaksi tanah struktur terhadap rangkaian pukulan dari hammer. Setelah semua pukulan diberikan, tahap terakhir berupa *post-driving relaxation* dilakukan dengan menghilangkan beban hammer. Fase ini berguna untuk memantau respons tanah dan tiang setelah pemukulan berhenti, seperti deformasi sisa.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

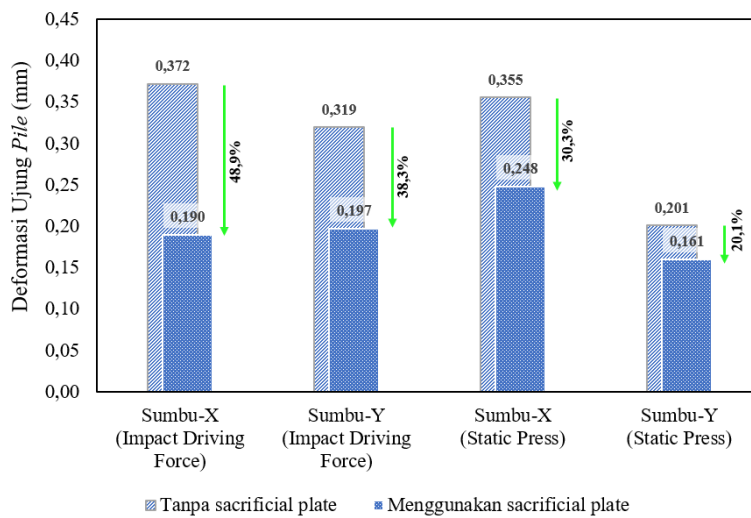
3.1 Hasil Analisis

Hasil analisis model numeris untuk skema pembebanan *impact driving force* maupun *static pressing* menunjukkan adanya perilaku deformasi pada bagian ujung *pile*. Deformasi tersebut dapat diperiksa melalui visualisasi model numeris yang ada pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil analisis deformasi ujung *pile* simulasi numeris PLAXIS 3D.

Model	Deformasi Model Numeris			
	Sumbu X		Sumbu Y	
	<i>Impact Driving Force</i>	<i>Static Pressing</i>	<i>Impact Driving Force</i>	<i>Static Pressing</i>
Tanpa <i>Sacrificial Plate</i>				
Menggunakan <i>Sacrificial Plate</i>				

Berdasarkan pemeriksaan deformasi yang dilakukan diperoleh beberapa data terkait adanya perbedaan deformasi yang muncul setelah digunakannya *sacrificial plate*. Berikut Gambar 6 merupakan perbandingan nilai deformasi yang diperoleh dari hasil analisis numeris.



Gambar 6. Pengaruh penggunaan *sacrificial plate* terhadap deformasi ujung *pile*.

3.2 Pembahasan

Kriteria utama dalam indikasi terjadinya *buckling* adalah nilai deformasi yang terjadi pada *shaft* tiang pancang, terdapat distorsi antara dimensi arah X dengan arah Y yang seharusnya apabila dimodelkan secara simetris nilai deformasi X dan Y relatif sama. Beberapa kemungkinan penyebab perbedaan ini antara lain, ketidakpastian pada pemodelan beban pancang, efisiensi beban, serta model kerapatan relatif simulasi numeris.

Secara umum, kesesuaian deformasi pada bagian ujung tiang, menunjukkan bahwa model mampu menangkap aspek penting dari proses instalasi tiang, di mana deformasi pada ujung tiang menjadi aspek pengamatan apakah struktur tersebut mengalami kegagalan *buckling* atau tidak. Tabel 4 menunjukkan bahwa terdapat deformasi yang cukup

signifikan pada bagian ujung tiang. Hal ini membuktikan bahwa beban pancang akan menghasilkan deformasi pada ujung tiang, apabila mengenai lapisan tanah keras atau terkena lapisan batu.

Berdasarkan Gambar 6 diperoleh bahwa penggunaan *sacrificial plate* dapat menurunkan nilai deformasi yang dihasilkan pemancangan secara signifikan dengan nilai rata-rata penurunan deformasi sebesar 34,4%. Selain itu, berdasarkan definisi *buckling* sebagai terjadinya ketidakseragaman deformasi *shaft* tiang pada bidang X-Y maka hasil analisis menunjukkan bahwa adanya *trend* penurunan ketidakseragaman deformasi pada ujung tiang yang ditunjukkan dengan berkurangnya nilai deviasi (perbedaan) deformasi arah X dan arah Y yang terjadi. Perhitungan pengaruh penggunaan *sacrificial plate* terhadap deviasi deformasi ujung tiang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh penambahan *sacrificial plate* terhadap ketidakseragaman deformasi ujung tiang.

Model	Impact Driving Load			Static Pressing		
	Sumbu-X	Sumbu-Y	Deviasi	Sumbu-X	Sumbu-Y	Deviasi
Tanpa <i>sacrificial plate</i>	0,372	0,319	14%	0,355	0,201	44%
Menggunakan <i>sacrificial plate</i>	0,19	0,197	4%	0,248	0,161	35%
Perubahan deviasi	-10,4%			-8,3%		

Hal ini akan menjadi dasar pelaksanaan mitigasi di lapangan, bahwa perlu dilakukan penebalan pada ujung tiang pancang untuk menurunkan potensi terjadinya kegagalan *buckling* pada saat tiang pancang menerima beban pancang. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan *sacrificial plate* dapat memberikan pengaruh berupa penurunan ketidakseragaman deformasi ujung tiang hingga 10,4%. Dengan demikian, potensi terjadinya *end tip buckling* pada *steel pipe pile* dapat diminimalisasi dengan penggunaan *sacrificial plate*.

4 KESIMPULAN

Dengan demikian, setelah dilakukan peninjauan menggunakan skema *impact driving load* maupun *static pressing* diperoleh kesimpulan bahwa penambahan *sacrificial plate* pada ujung tiang dapat mengurangi risiko terjadinya *end tip buckling* yang ditunjukkan dengan nilai rata-rata penurunan deformasi sebesar 34,4% dan menurunkan ketidakseragaman deformasi ujung tiang hingga 10,4%.

REFERENSI

- 121627, O. E. (2018, march 1). *Ocean Engineering* 334 (2025) 121627. *IPA NEWS LETTER VOL 3, Issue 1 March 2018*.
- Amr Farouk Elhakim a, M. A. (2014). Three dimensional modeling of laterally loaded pile. *Housing and Building National Research Center*.
- Chen, B. (2024). *PROGRESSIVE BUCKLING OF LARGE-DIAMETER MONOPILES DUE TO BOULDER COLLISION DURING INSTALLATION*. Wolfson College, University of Oxford: Department of Engineering Science – Renewable Energy Marine Structures.
- Hang cen, J.-n.-z. Z.-l.-l. (2024). *Bearing performance and failure mechanisms of HSCM piles in marine soft*. China: *Ocean Engineering* 313.
- Jin Zhang a, R. L. (2025). Field load testing and numerical analysis of offshore photovoltaic steel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 188 (2025) 109034.
- look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Invertigation and Design Tables*. Consulting Geotechnical Engineer.
- Peiyuan Lin, X. Y. (2025). Accuracy evaluation of API P-Y model for Offshore Piles in Clays. *Results in Engineering* 27 (2025) 106774.
- Pitthaya Jamsawang a, *. P. (2015). Three-dimensional numerical investigation on lateral movement and. *Engineering Geology* 188 (2015) 159–167.
- R. Daryaei, V. H. (2023). Numerical simulation and validation of monopile tip damage.
- Viet Hung Le, C. T. (2025). Model tests on pile tip buckling scenarios during impact driving in. *Ocean Engineering* 334 (2025) 121627.

LAMPIRAN

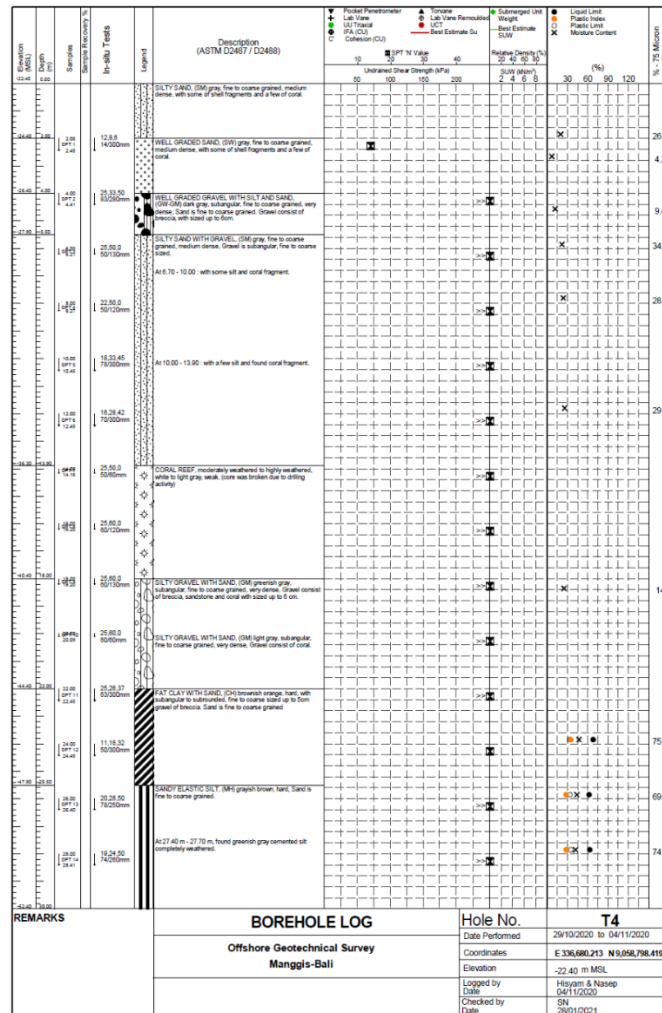
Lampiran 1

bentley licencing status

Entitlements		Checkout License	Product Status				
Product	Feature String	Reserved	Allowed Offline	Offline Access Until	Alerting Setting	License Type	Acce
✓ CONNECTION Client		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow
✓ PLAXIS 3D Advanced		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow
✓ Geotechnical SELECT Entitlements		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow
✓ STAAD.Pro		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow
✓ Structural SELECT Entitlements		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow
✓ PLAXIS 3D Ultimate		No	Yes	10/10/2025	Disabled	Commercial	Allow

Lampiran 2

Bor-Log T4



Lampiran 3

Input Plaxis

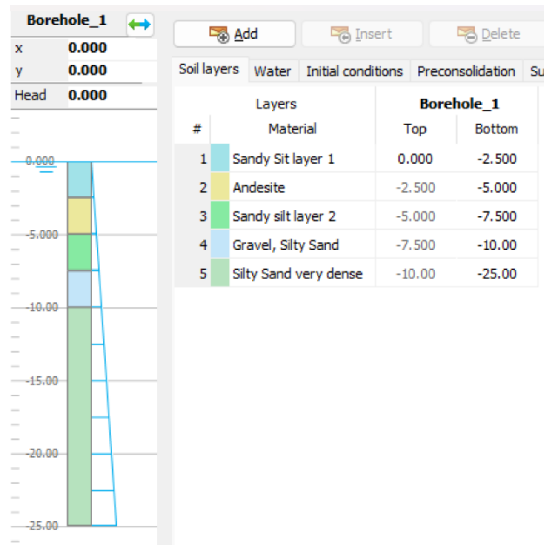


Plate - Steel pile pipe2				Plate - Steel pile pipe			
General				General			
Property	Unit	Value		Property	Unit	Value	
Properties				Properties			
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>		Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>	
Stiffness				Stiffness			
E ₁	kN/m ²	210.0E6		E ₁	kN/m ²	210.0E6	
E ₂	kN/m ²	210.0E6		E ₂	kN/m ²	210.0E6	
ν ₁₂		0.3000		ν ₁₂		0.3000	
d	m	0.03800		d	m	0.01900	
G ₁₂	kN/m ²	80.77E6		G ₁₂	kN/m ²	80.77E6	
G ₁₃	kN/m ²	80.77E6		G ₁₃	kN/m ²	80.77E6	
G ₂₃	kN/m ²	80.77E6		G ₂₃	kN/m ²	80.77E6	
Strength				Strength			
Yield stress σ _{y,11}	kN/m ²	250.0E3		Yield stress σ _{y,11}	kN/m ²	250.0E3	
Yield stress σ _{y,22}	kN/m ²	250.0E3		Yield stress σ _{y,22}	kN/m ²	250.0E3	
W ₁₁	m ³ /m	0.06000		W ₁₁	m ³ /m	0.06000	
W ₂₂	m ³ /m	0.06000		W ₂₂	m ³ /m	0.06000	