

DESAIN FONDASI *SUCTION PILE* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA STUDI KASUS DI LEPAS PANTAI MADURA

Suction Pile Foundation Design with Finite Element Method Case Study in Madura Offshore

Anisa Dwi Puspita¹ dan Hendriyawan²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132

¹anisadp024@gmail.com dan ²hendriyawan@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Fondasi merupakan salah satu komponen penting dari struktur anjungan lepas pantai dan dibutuhkan rancangan desain fondasi sebaik mungkin agar fondasi berfungsi dengan baik dan tidak mengalami kegagalan. Salah satu jenis fondasi yang dapat digunakan yaitu fondasi *suction pile* yang belum umum digunakan di Indonesia namun menjadi alternatif yang menjanjikan. Metode yang digunakan untuk mendesain fondasi *suction pile* pada studi ini yaitu metode elemen hingga dengan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 3D dan PLAXIS 2D. Akan tetapi perangkat lunak PLAXIS 3D belum umum digunakan di Indonesia, maka dari itu inti studi ini bertujuan untuk melakukan simplifikasi pada model di PLAXIS 2D. Lokasi studi untuk penelitian ini berada di Lepas Pantai Madura dengan dimensi fondasi *suction pile* berdiameter 5 m, panjang fondasi 7.5 m, dan tebal fondasi 0.05 m. Terlebih dahulu dilakukan pencarian faktor koreksi untuk simplifikasi model 2D dengan acuan dari pemodelan Edgers *et al.* (2008) yang kemudian faktor koreksi yang telah didapatkan digunakan pada pemodelan untuk lokasi studi. Didapatkan kesimpulan bahwa faktor koreksi untuk simplifikasi model 2D dapat digunakan karena nilai kapasitas tegangan puncak antara model 2D terhadap model 3D memiliki nilai deviasi yang kecil.

Kata kunci: fondasi *suction pile*, PLAXIS 3D, faktor koreksi

PENDAHULUAN

Dewasa ini bahan bakar minyak (BBM) dari pengolahan minyak dan gas (migas) masih menjadi sumber daya energi yang paling dibutuhkan oleh kehidupan manusia, tidak terkecuali oleh masyarakat Indonesia. Eksplorasi minyak dan gas pun mulai beralih dari daratan menuju lepas pantai yang menyebabkan anjungan lepas pantai di Indonesia terus bertambah seiring berjalannya waktu.

Salah satu komponen penting dari struktur anjungan lepas pantai yaitu fondasi yang berfungsi menyalurkan beban yang diterima oleh struktur ke lapisan tanah dibawahnya sehingga dibutuhkan rancangan desain fondasi sebaik mungkin agar fondasi

tersebut stabil dan tanah dibawahnya tidak mengalami keruntuhan.

Fondasi jenis *suction pile* kemudian dipilih sebagai studi kasus pada penulisan studi ini. Fondasi *suction pile* belum secara umum digunakan di Indonesia, namun menjadi salah satu alternatif yang sangat menjanjikan.

Dalam mendesain fondasi *suction pile* terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, diantaranya yaitu dengan menggunakan metode elemen hingga. Untuk penulisan studi ini dilakukan dengan perangkat lunak elemen hingga dua-dimensi PLAXIS 2D bentuk model *Axisymmetric* dan *Plane Strain* serta perangkat lunak elemen hingga tiga-dimensi PLAXIS 3D.

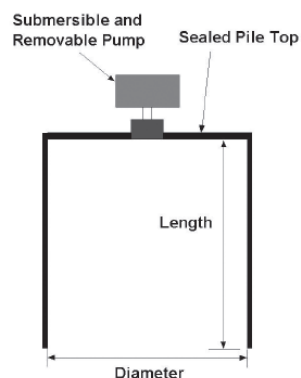
Digunakan ketiga pemodelan karena PLAXIS 3D masih belum umum digunakan di Indonesia jika dibandingkan dengan PLAXIS 2D. Maka dari itu, pada studi ini dilakukan simplifikasi pada model 2D.

Dengan dilakukan studi ini diharapkan dapat mendukung efisiensi dalam proses desain fondasi *suction pile* pada anjungan lepas pantai di Indonesia.

TEORI DAN METODOLOGI

Fondasi *suction pile*

Fondasi *suction pile* merupakan fondasi yang memiliki bentuk seperti *bucket* yang terbalik. Unit *suction pile* sendiri terdiri dari silinder yang terbuka pada sisi dasarnya dan tertutup pada sisi atasnya, dengan lubang udara pada atasnya (Wang *et al.*, 1978) seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut:



Gambar 1 Bentuk fondasi *suction pile*
(Sumber : Bang *et al.*, 2009)

Menurut (Dean, 2010) *Suction pile* dikenal dengan beberapa sebutan. Ketika rasio panjang *pile* per diameter *pile* bernilai 1 atau kurang, dapat disebut dengan *suction caisson* atau *bucket foundation*. Disebut juga dengan *suction anchor* ketika tujuan dari penggunaannya yaitu sebagai jangkar. Untuk penamaan *suction pile* sendiri digunakan ketika rasio panjang *pile* per

diameter *pile* bernilai relatif besar. Terlepas dari perbedaan penyebutannya, semua memiliki prinsip instalasi yang sama. Berikut pada **Gambar 2** merupakan jenis fondasi *suction pile*:



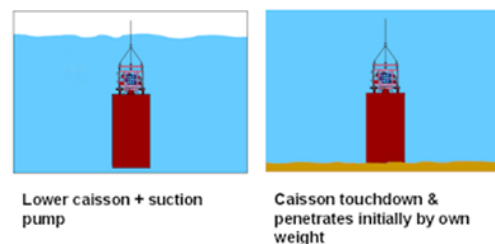
Gambar 2 Fondasi *Suction pile*

(Sumber : http://www.offshore-technology.com/contractors/design-engineering-construction/spt_2/)

Mekanisme instalasi dari *suction pile* terdiri dari 2 tahap, yaitu:

1) *Self-weight penetration phase*

Pada tahap ini *suction pile* perlahan diturunkan ke seabed dan di letakan pada lokasi yang telah ditentukan. Kemudian *suction pile* akan perlahan penetrasi karena berat sendirinya. Tahapan nya dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut:

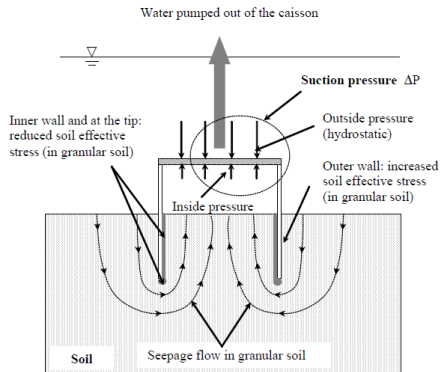


Gambar 3 Tahapan *Self-weight Penetration Phase*
(Sumber : <http://www.epd.gov.hk/>)

2) *Suction-assisted penetration phase*

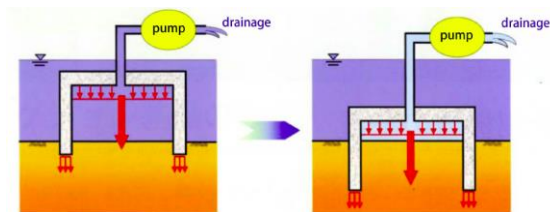
Setelah tahapan *self-weight penetration* selesai, masuklah ke tahap *suction-assisted penetration*. Tahap ini dilakukan dengan bantuan pompa untuk

mengalirkan air yang terdapat pada bagian dalam *suction pile* dan menutup lubang udara (*vent*) seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4** berikut:



Gambar 4 Konsep instalasi Suction
(Sumber : Tran, 2007)

Pemompaan air keluar dari *suction pile* menurunkan tekanan didalam *suction pile*, sehingga dihasilkannya gaya yang mendorong *suction pile* untuk penetrasi ke seabed seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 5** berikut:



Gambar 5 Mekanisme penetrasi suction pile
(Sumber : Niigata Research and Engineering Office for Port and Airport, 2001)

Sangat penting untuk menentukan tekanan pompa yang tepat saat pemompaan untuk menghindari ketidakstabilan tanah didalam *suction pile* ketika tekanan pompa yang digunakan terlalu besar dan mengakibatkan kapasitas daya dukung *suction pile* dapat berkurang secara signifikan.

Berdasarkan beberapa contoh *suction pile* yang telah diaplikasikan dan beroperasi,

suction pile dapat digunakan pada jenis tanah *clay* lunak seperti contohnya pada *Nkossa process barge offshore* Afrika (Colliat *et al.*, 1995; Colliat *et al.*, 1996), dan *semi-submersible platforms* di Marlim *offshore* Brazil (Mello *et al.*, 1996). *Suction pile* juga dapat digunakan pada jenis tanah *very dense sand* seperti yang digunakan di Platform Draupner E dan Sleipner T pada North Sea (Bye *et al.*, 1995; Tjelta, 1995) serta juga dapat diaplikasikan pada *layered soil* seperti pada Curlew Field di North Sea (Tran, 2007).

Kelebihan *suction pile* yang paling signifikan merupakan biaya yang relatif lebih murah dibandingkan fondasi konvensional (Tran, 2007). Faktor biaya tersebut merupakan penjumlahan dari biaya yang dikeluarkan saat investigasi tanah, fabrikasi pile, dan instalasi.

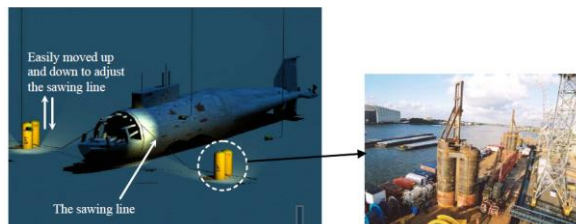
Apabila dibandingkan dengan fondasi konvensional, biaya investigasi tanah tidak akan berpengaruh walau menggunakan *suction pile*. Untuk biaya fabrikasi, *suction pile* sesungguhnya membutuhkan biaya yang lebih mahal dibanding dengan fondasi konvensional. Hal ini dikarenakan toleransi bentuk yang sangat kecil dari *suction pile* dan area pengelasan sangat luas, sehingga dibutuhkan material las yang sangat mahal dan upah pekerja fabrikasi yang tinggi.

Namun, untuk biaya instalasi dari *suction pile* jauh lebih murah jika dibandingkan dengan fondasi konvensional. Biaya instalasi dapat lebih sedikit dikarenakan proses instalasi *suction pile* sangat efektif. Hanya dibutuhkan peralatan instalasi yang sederhana yaitu hanya menggunakan pompa drainase yang dapat dilepas-pasang. Pompa drainase tersebut dapat menyelesaikan

seluruh operasi pemancangan *suction pile* sehingga dapat dikatakan *suction pile* sangat efisien.

Waktu instalasi *suction pile* pun jauh lebih cepat dibandingkan dengan instalasi fondasi konvensional. Sehingga ketika keseluruhan aspek biaya dijumlahkan, fondasi *suction pile* dapat menghemat biaya cukup besar apabila dibandingkan dengan fondasi konvensional.

Mobilitas dan fleksibilitas dari *suction pile* pun menjadi tambahan daya tarik dalam penggunaan *suction pile*. *Suction pile* dapat “diambil” kembali hanya dengan memompa balik air kedalam *suction pile* seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6 Kelebihan Suction pile : mudah untuk di ambil kembali

(Sumber : Tran, 2007)

Suction pile juga menghasilkan gangguan yang lebih sedikit terhadap dasar laut, yang dimana meminimalisir kerusakan pada lingkungan laut (lebih ramah lingkungan).

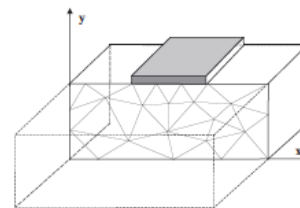
PLAXIS

PLAXIS merupakan perangkat lunak yang dikembangkan berdasarkan metode elemen hingga (*finite element*) yang digunakan untuk analisis geoteknik (PLAXIS, 2016). PLAXIS dilengkapi dengan fitur khusus yang berhubungan dengan aspek-aspek struktur geometri sehingga PLAXIS dapat melakukan analisis yang mendekati kondisi sebenarnya.

Dalam PLAXIS 2D terdapat 2 bentuk pemodelan yang dapat dilakukan yaitu:

1) Regangan bidang (*Plane Strain*)

Model *Plane Strain* digunakan untuk geometri dengan potongan melintang yang seragam dengan kondisi tegangan dan skema pembebanan pada suatu panjang tertentu juga relatif seragam searah sumbu z. Ilustrasi pemodelan *Plane Strain* dapat dilihat pada **Gambar 7** berikut:



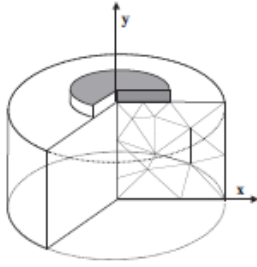
Gambar 7 Ilustrasi pemodelan Plane Strain

(Sumber : PLAXIS 2D reference manual, 2016)

Perpindahan dan regangan pada arah sumbu z diasumsikan bernilai nol namun tegangan normal pada arah sumbu z tetap memiliki nilai.

2) *Axisymmetric*

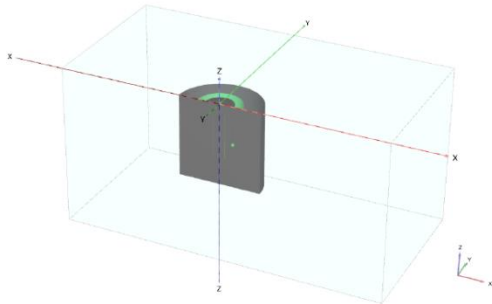
Model *Axisymmetric* digunakan untuk struktur melingkar dengan potongan melintang radial yang seragam. Skema pembebanan relatif seragam di sekitar titik pusat lingkaran yang dimana deformasi dan kondisi tegangan yang terjadi diasumsikan identik dalam semua arah radial. Ilustrasi pemodelan *Axisymmetric* dapat dilihat pada **Gambar 8** berikut:



Gambar 8 Ilustrasi pemodelan Axisymmetric
(Sumber : PLAXIS 2D reference manual, 2016)

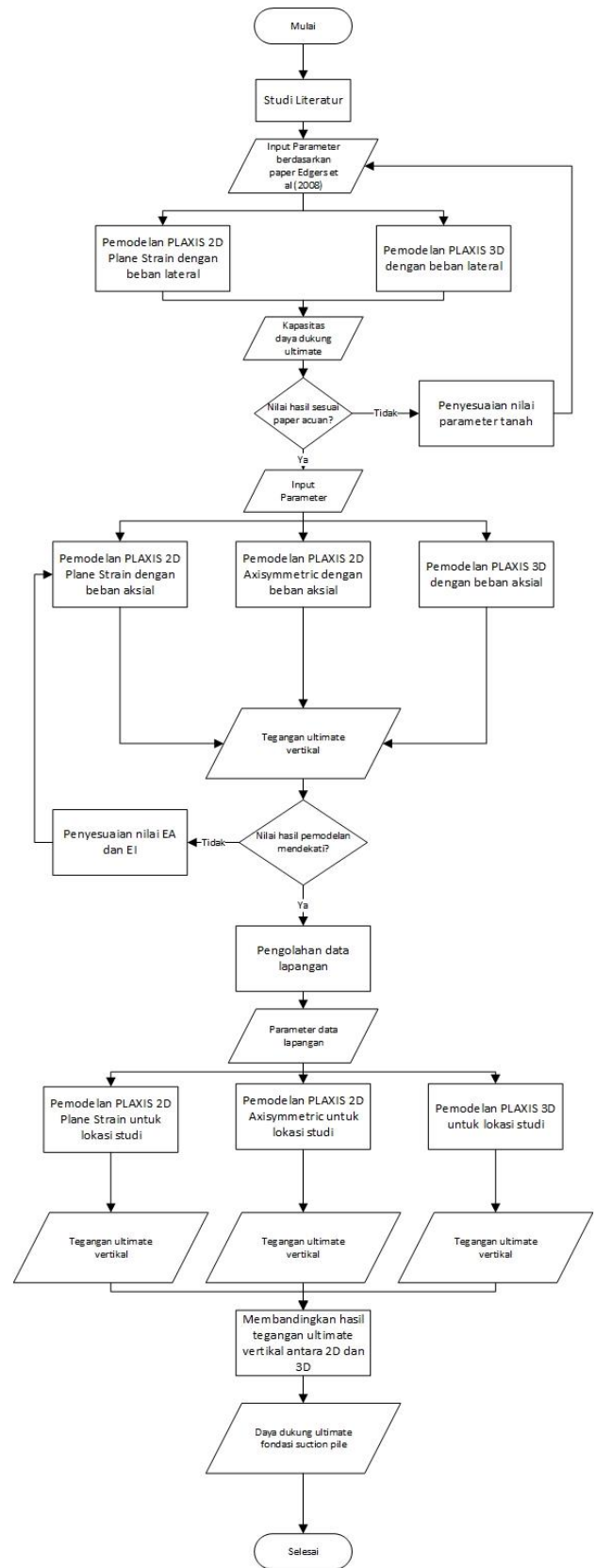
Kedua bentuk pemodelan 2D diatas dipilih sesuai dengan kebutuhan pemodelan yang diinginkan oleh pengguna.

PLAXIS 3D memiliki fitur lebih maju untuk mengatasi tantangan pemodelan geoteknik yang kompleks dan tidak dapat dipecahkan dengan PLAXIS 2D serta juga dapat menghasilkan penilaian realistis terhadap tegangan dan *displacement* dari tanah. Ilustrasi pemodelan PLAXIS 3D dapat dilihat pada **Gambar 9** berikut:



Gambar 9 Ilustrasi pemodelan PLAXIS 3D
(Sumber : PLAXIS 3D tutorial manual, 2016)

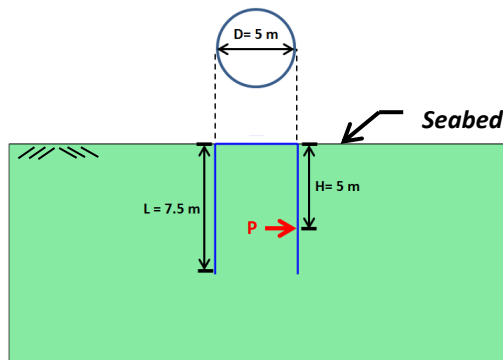
Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini dapat dilihat pada Error! Reference source not found. berikut:



Gambar 10 Metodologi penelitian bagian I

HASIL DAN ANALISA

Pada Studi ini terlebih dahulu dilakukan validasi model saat beban lateral bekerja untuk memeriksa apakah model sudah valid digunakan dengan cara membandingkan hasil dari pemodelan yang dilakukan dengan hasil dari Edgers *et al.* (2008). Pada **Gambar 11** berikut merupakan ilustrasi geometri fondasi *suction pile* dan beban lateral yang bekerja pada fondasi:



Gambar 11 Geometri struktur dan lokasi beban lateral pada *suction pile*
(Sumber : Edgers *et al.*, 2008)

Dimana :

D = Diameter fondasi *suction pile*

L = Panjang fondasi *suction pile*

H = Jarak seabed ke lokasi beban lateral

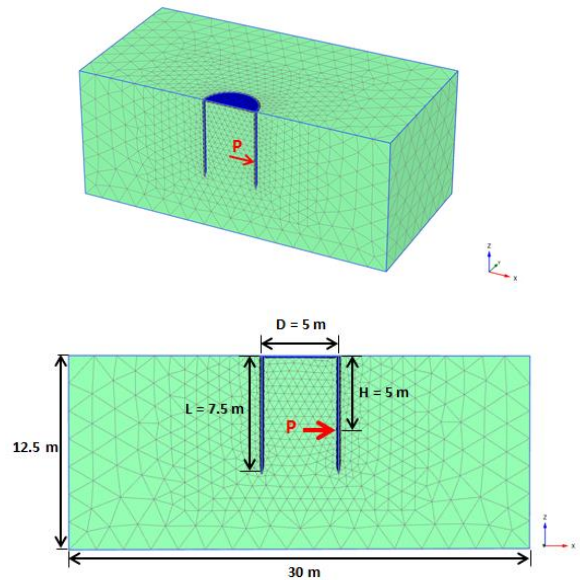
Pada tahap ini dilakukan iterasi penentuan parameter tanah yang digunakan, berikut **Tabel 1** merupakan iterasi penentuan parameter tanah yang dilakukan:

Tabel 1 Tabel iterasi penentuan parameter tanah

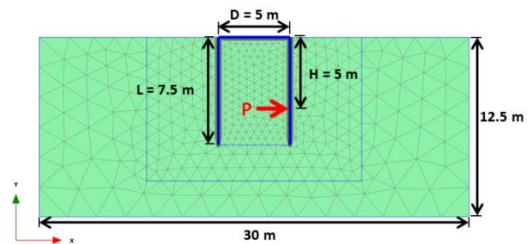
Iterasi	Beban (kN)	Su_{ref} (kN/m ²)	E_{ref} (kN/m ²)	E_{inc} (kN/m ²)	SF
1	1710	6.05	2000	1000	<i>Soil Collapse</i>
2	1710	11	2000	1000	≥ 1.2
3	1710	9.5	2000	1000	≥ 1.1
4	1710	8	2000	1000	1.0

Kemudian dilakukan pemodelan dengan menggunakan PLAXIS 3D seperti yang dapat

dilihat pada **Gambar 12** dan PLAXIS 2D – *Plane Strain* pada **Gambar 13**:



Gambar 12 Ilstrasi pemodelan 3D



Gambar 13 Ilustrasi 2D - *Plane Strain*

Didapatkan perbandingan hasil pemodelan yang dilakukan dengan hasil pemodelan Edgers *et al.* (2008) yaitu seperti pada **Tabel 2**:

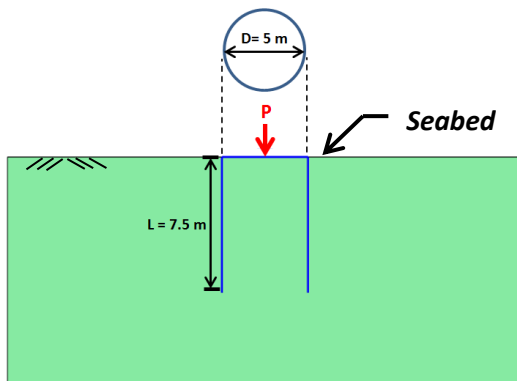
Tabel 2 Perbandingan hasil pemodelan yang dilakukan dengan pemodelan Edgers *et al.* (2008)

Pemodelan	Hasil pemodelan yang dilakukan	Hasil pemodelan Edgers <i>et al.</i> (2008)
PLAXIS 3D	1710 kN	1710 kN
PLAXIS 2D – <i>Plane Strain</i>	228 kN/m	228 kN/m

Disimpulkan bahwa pemodelan yang dilakukan sudah valid karena hasil pemodelan yang dilakukan bernilai sama dengan pemodelan Edgers *et al.* (2008).

Setelah validasi beban lateral, dilakukan pemodelan dengan PLAXIS 3D, PLAXIS 2D *Axisymmetric*, dan PLAXIS 2D *Plane Strain* dengan adanya beban aksial yang bekerja.

Gambar 14 berikut merupakan ilustrasi geometri fondasi *suction pile* dan beban aksial yang bekerja di titik pusat fondasi:



Gambar 14 Geometri struktur dan lokasi beban aksial pada *suction pile*

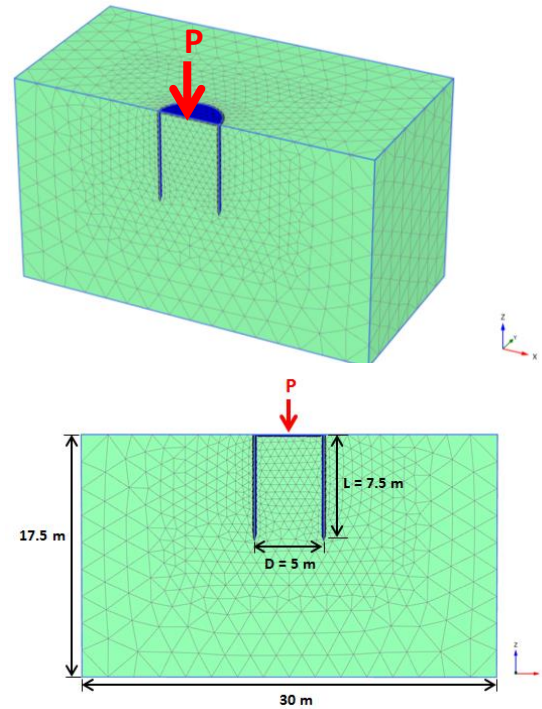
Dimana :

D = Diameter fondasi *suction pile*

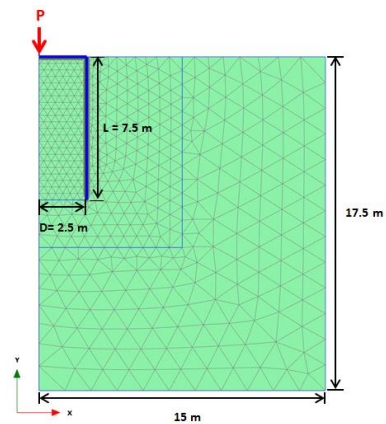
L = Panjang fondasi *suction pile*

P = Beban aksial yang bekerja pada fondasi

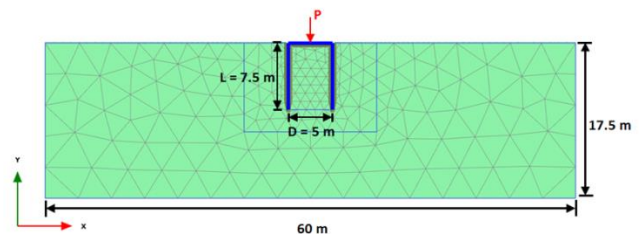
Untuk ilustrasi yang pemodelan 3D, 2D *Axisymmetric*, dan 2D *Plane Strain* dapat dilihat pada **Gambar 15**, **Gambar 16**, dan **Gambar 17**:



Gambar 15 Ilustrasi pemodelan 3D dengan beban aksial

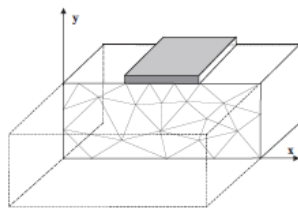


Gambar 16 Ilustrasi pemodelan 2D *Axisymmetric* dengan beban aksial



Gambar 17 Ilustrasi pemodelan 2D *Plane Strain* dengan beban aksial

Pemodelan dengan beban aksial ini bertujuan untuk mendapatkan faktor koreksi yang dapat digunakan untuk simplifikasi pemodelan PLAXIS 2D *Plane Strain*. Seperti yang telah dijelaskan bahwa bentuk model *Plane Strain* pada PLAXIS 2D memodelkan kondisi tegangan dan skema pembebanan seragam searah sumbu z padahal struktur fondasi *suction pile* berbentuk melingkar. Berikut **Gambar 18** merupakan ilustrasi bentuk model PLAXIS 2D *Plane Strain*:



Gambar 18 Ilustrasi bentuk model PLAXIS 2D *Plane Strain*

(Sumber : PLAXIS 2D reference manual, 2016)

Faktor koreksi didapatkan dengan metode iterasi, yaitu dengan mencari nilai koefisien pengkali untuk nilai kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI) yang mendekati nilai kapasitas daya dukung dari hasil pemodelan PLAXIS 3D, karena dianggap pemodelan 3D merupakan pemodelan yang paling mendekati keadaan sebenarnya. Berikut pada **Tabel 3** merupakan parameter fondasi *suction pile* yang digunakan:

Tabel 3 Parameter *suction pile*
(Pollestad, 2015)

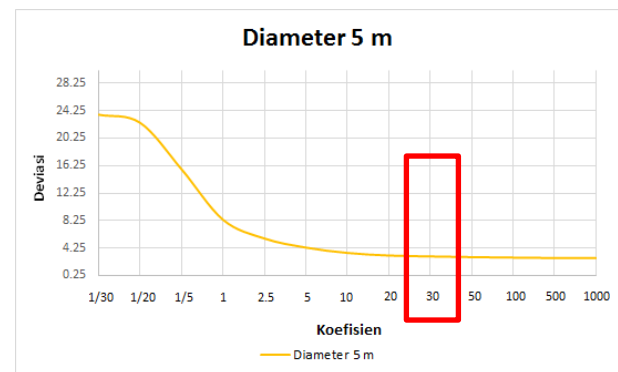
Parameter	Nilai	Satuan
EA	1.4×10^{11}	kN/m
EI	2.9×10^7	kNm ² /m
d	0.05	m
μ	0.33	-

Dimana :

EA = Kekakuan aksial
EI = Kekakuan lendutan
d = Tebal *pile*
 μ = *Poisson's Ratio*

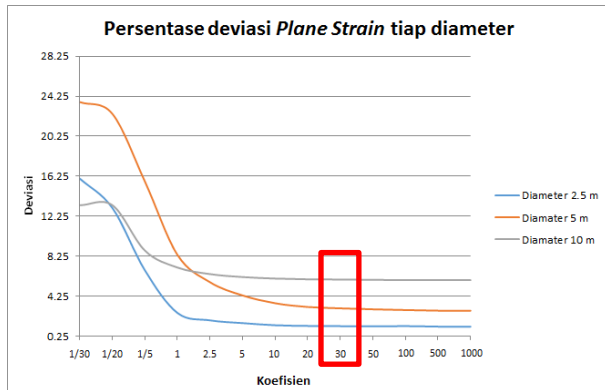
Rangkuman iterasi pemilihan faktor koreksi atau koefisien yang paling optimum untuk diameter *pile* 5 m dapat dilihat pada **Gambar 19** dengan perhitungan deviasi untuk tiap koefisien dihitung dengan persamaan (1) berikut:

$$\% \text{deviasi} = \left(\frac{\text{Tegangan Plane Strain} - \text{Tegangan Axisymmetric}}{\text{Tegangan Axisymmetric}} \right) \times 100\% \quad (1)$$



Gambar 19 Grafik %deviasi vs nilai koefisien untuk diameter 5 m

Dapat terlihat bahwa faktor koreksi atau koefisien yang paling optimum yaitu ketika nilai kekakuan aksial (EA) dan kekakuan lendutan (EI) diperbesar 30 kali dari nilai semulanya. Kemudian dilakukan validasi koefisien dengan mengubah diameter *suction pile* untuk melihat apakah nilai koefisien tersebut tetap akan berlaku pada diameter yang berbeda yaitu pada diameter 10 m dan diameter 2.5 m. Untuk tabel perbandingan deviasi tiap diameter dapat dilihat pada **Gambar 20** dibawah ini:



Gambar 20 Grafik %deviasi vs nilai koefisien untuk tiap diameter

Berdasarkan tahapan iterasi diatas dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien 30 (diperbesar 30 kali semula) dapat digunakan sebagai faktor koreksi untuk pemodelan 2D *Plane Strain* karena pada nilai tersebut hasil nilai tegangan pada pemodelan 2D *Plane Strain* paling mendekati nilai pemodelan 2D *Axisymmetric*. Rangkuman hasil pemodelan dari PLAXIS 3D, PLAXIS 2D *Axisymmetric*, dan PLAXIS 2D *Plane Strain* dengan perhitungan deviasi dihitung dengan persamaan (2) dapat dilihat pada

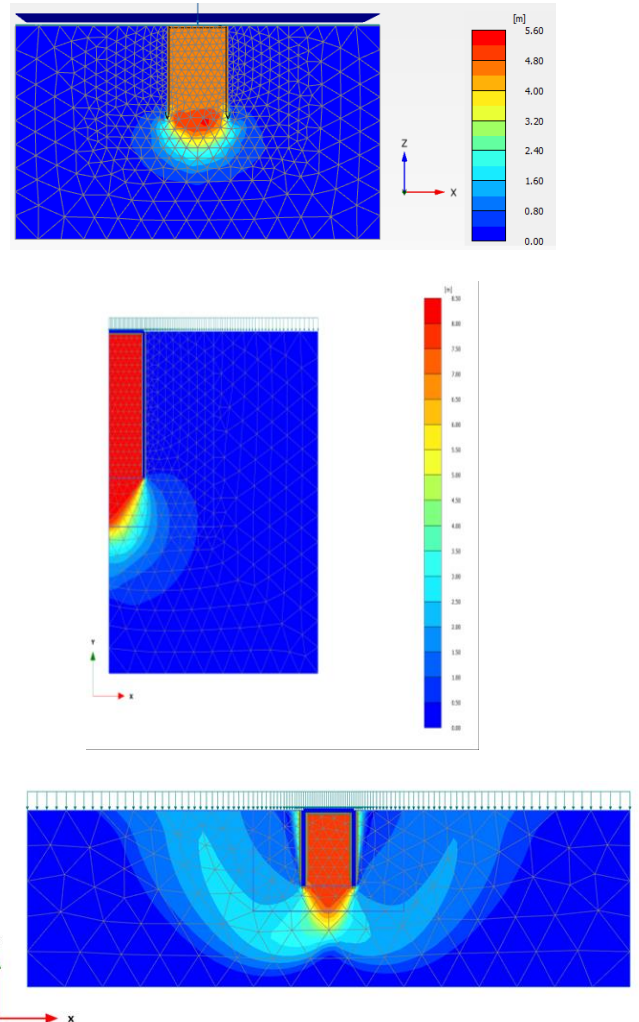
Tabel 4:

$$\%deviasi = \left(\frac{\text{Tegangan Ultimate 2D} - \text{Tegangan Ultimate 3D}}{\text{Tegangan Ultimate 3D}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Tabel 4 Rangkuman hasil pemodelan untuk validasi aksial

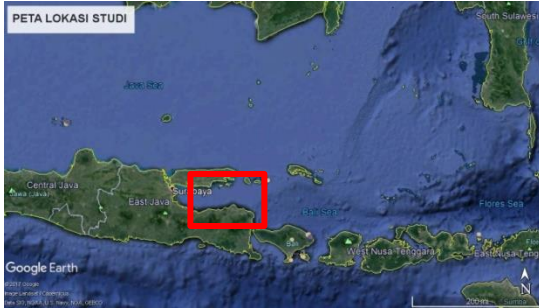
Pemodelan	Tegangan ultimate	Kapasitas daya dukung ultimate	Deviasi
PLAXIS 3D	320.86 kN/m ²	6300 kN	
PLAXIS 2D <i>Axisymmetric</i>	315.72 kN/m ²	6199 kN	1.60%
PLAXIS 2D <i>Plane Strain</i>	306.13 kN/m ²	6011 kN	4.59%

Pola keruntuhan yang terjadi untuk ketiga model termasuk pola keruntuhan *Punching shear failure* yang dapat dilihat pada **Gambar 21** berikut:



Gambar 21 Pola keruntuhan 3D, 2D *Axisymmetric*, dan 2D *Plane Strain* untuk validasi aksial

Kemudian setelah didapatkan faktor koreksi penyesuaian untuk simplifikasi model 2D, dilakukan pemodelan untuk lokasi studi yang berada di Lepas Pantai Madura seperti yang ditunjukkan dengan kotak merah pada **Gambar 22** berikut:



Gambar 22 Peta lokasi studi

(Sumber : Google Earth Pro)

Pada pemodelan fondasi *suction pile* ini di gunakan model keruntuhan Mohr-Coloumb pada kondisi tanah *undrained*. Tanah yang dimodelkan memiliki tebal 20 m dari seabed dengan jenis tanah dan parameter tanah yang dapat dilihat pada **Tabel 5**:

Tabel 5 Parameter tanah pada lokasi studi

(Sumber : Data Tanah di Lokasi Studi)

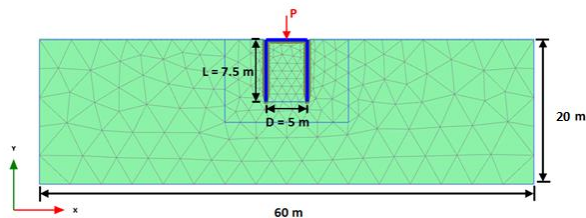
γ_{sat} (kN/m ³)	S_u (kPa)
13.7	2-10

Dimana :

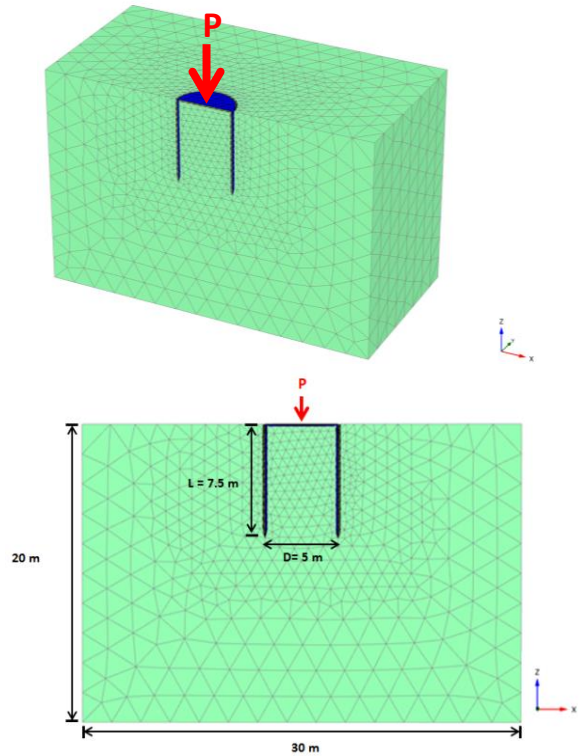
γ_{sat} = Berat jenis tanah (kN/m³)

S_u = Kuat geser tanah (kPa)

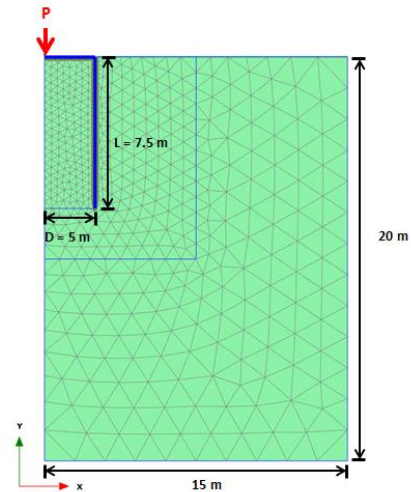
Berikut **Gambar 23**, **Gambar 24**, dan



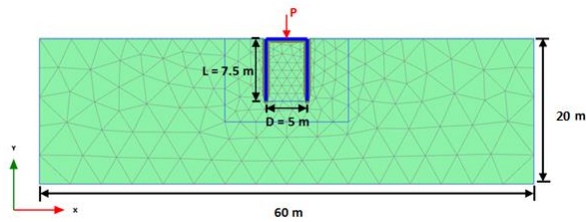
Gambar 25 merupakan ilustrasi geometri fondasi *suction pile* dan beban aksial yang bekerja di titik pusat fondasi untuk pemodelan PLAXIS 3D, PLAXIS 2D – *Axisymmetric*, dan PLAXIS 2D *Plane Strain*.



Gambar 23 Ilustrasi pemodelan 3D untuk lokasi studi



Gambar 24 Ilustrasi pemodelan 2D *Axisymmetric* untuk lokasi studi



Gambar 25 Ilustrasi pemodelan 2D Plane Strain untuk lokasi studi

Dimana :

D = Diameter fondasi *suction pile*

L = Panjang fondasi *suction pile*

P = Beban aksial yang bekerja pada fondasi

Berdasarkan hasil ketiga pemodelan di lokasi studi didapatkan kesimpulan seperti pada Tabel 6 dengan perhitungan deviasi dihitung dengan persamaan (3) berikut ini:

$$\%deviasi = \left(\frac{\text{Tegangan Ultimate 2D} - \text{Tegangan Ultimate 3D}}{\text{Tegangan Ultimate 3D}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Tabel 6 Kesimpulan hasil pemodelan di lokasi studi

Pemodelan	Tegangan ultimate	Kapasitas daya dukung ultimate	Deviasi
PLAXIS 3D	46.09 kN/m ²	905 kN	
PLAXIS 2D – Axisymmetric	44.76 kN/m ²	879 kN	2.89%
PLAXIS 2D – Plane Strain	43.76 kN/m ²	859 kN	5.06%

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari studi yang dilakukan yaitu:

- 1) Dibutuhkan faktor koreksi untuk simplifikasi pemodelan 2D pada saat memodelkan fondasi *suction pile* dan

didapatkan faktor koreksi tersebut bernilai 30.

- 2) Pemodelan 2D yang dilakukan sudah merepresentasikan model 3D karena kapasitas tegangan puncak (q_{ult}) di lokasi studi untuk 2D *Axisymmetric* hanya memiliki deviasi sebesar 2.89%, dan 2D *Plane Strain* hanya memiliki deviasi sebesar 5.06% terhadap pemodelan 3D.
- 3) Nilai kapasitas tegangan puncak yang didapatkan (q_{ult}) di lokasi studi untuk model 3D yaitu sebesar 46.09 kN/m², model 2D *Axisymmetric* sebesar 44.76 kN/m², dan 2D *Plane Strain* di lokasi studi sebesar 43.76 kN/m².

Beberapa saran untuk menjadikan studi ini menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

- 1) Dibutuhkan penelitian lebih lanjut dengan jumlah lokasi studi yang lebih banyak dan nilai dimensi fondasi *suction pile* yang berbeda sehingga sistem desain yang diterapkan tervalidasi lebih akurat.
- 2) Dibutuhkan penelitian lebih lanjut apabila beban yang bekerja pada fondasi merupakan beban lateral untuk menambah keakuratan faktor koreksi yang didapatkan.

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. 2000. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design*.

- Washington D.C.: American Petroleum Institute.
- Andersen, K., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, E.C., Erbrich, C., Jostad, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P. & Supachawarote, C. 2005. *Suction Anchors for Deepwater Application. Proc. International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics IS-FOG*. Perth, Australia, pp. 3-30.
- Niigata Research and Engineering Office for Port and Airport. 2001. *The Development of The Suction Foundation*. Niigata City: Niigata Research and Engineering Office for Port and Airport, Hokuriku Regional Development Bureau, MLIT.
- Bang, S., Jones, K., Cho, Y. & Kwag, D. 2009. *Suction Piles and Suction Anchors for Offshore Structures. DFI Journal Vol.3 No.2*.
- Bowles, J. E. 1997. *Foundation Analysis and Design Fifth Edition*. Singapore: The McGraw-Hill Companies.
- Bye, A., Erbrich, C., Rognlien, B. & Tjelta, T.I. 1995. *Geotechnical Design of Bucket Foundation. Offshore Technology Conference*. Houston, USA. Paper: OTC 7793.
- Coduto, D. P. 2001. *Foundation Design : Principles and Practices*. New Jersey: Prentice Hall.
- Colliat, J-L., Boissard, P., Andersen, K.H., & Schroder, K. 1995. *Caisson Foundations as Alternative Anchors for Permanent Mooring of a Process Barge Offshore Congo. Offshore Technology Conference*. Houston, USA. Paper: 7797.
- Colliat, J-L., Boissard, P., Gramet, J-C, & Sparrevik, P. 1996. *Design and Installation of Suction Anchor Piles at a Soft Clay Site in the Gulf of Guinea. Offshore Technology Conference*. Houston, USA. Paper: 8150.
- Das, B. M. 2010. *Principles of Geotechnical Engineering Seventh Edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Das, B. M. 2011. *Principles of Foundation Engineering Seventh Edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Dean, E. 2010. *Offshore Geotechnical Engineering Principles and Practice*. London: Thomas Telford.
- Edgers, L., Andresen, L. & Jostad, H. 2008. *Capacity Analysis of Suction Anchors in Clay by 3D Finite Element Analysis. PLAXIS Bulletin*, October, pp. 5-9.
- Mello, J.R.C., Moretti, M.J., Sparrevik, P., Schroder, K. & Hansen, S.B. 1998. *P19 and P26 Moorings at the Marlim Field : The First Permanent Taut Leg Mooring with Fibre Rope and Suction Anchors. FPS 98 Conf., Proc., London*.
- PLAXIS. 2016. *PLAXIS 2D Reference Manual*.
- PLAXIS. 2016. *PLAXIS 3D Reference Manual*.
- PLAXIS. 2016. *PLAXIS 3D Tutorial Manual*.
- Pollestad, J. H. 2015. *Master's Thesis : Investigation of Suction Anchor Pullout Capacity under Undrained Conditions*. Stavanger: University of Stavanger .
- Sparrevik, P. 2002. *Suction Pile Technology and Installation in Deep Water. Offshore Technology Conference*. Houston, USA. Paper: OTC 14241.
- Tjelta, T.I. 1995. *Geotechnical Experience from the Installation of the Europipe Jacket with Bucket Foundation. Offshore Technology Conference*. Houston, USA. Paper: OTC 7795.

Tran, M. N. 2007. *Suction Caissons : A New Offshore Foundation Concept*. *Australian Geomechanics* Vol. 42 No. 4, December.

Wang, M., Demars, K. & Nacci, V. 1978. *Application of Suction Anchors in Offshore Technology*. *Offshore Technology Conference*. Paper: OTC 3203.

Zaky, Fauzi Achmad. 2015. Tugas Akhir : Analisis Stabilitas Fondasi Dangkal dengan Menggunakan Prosedur ISO 19901-4. Bandung : Institut Teknologi Bandung.

<https://offshore2011.wordpress.com> diakses pada 4 agustus 2017 pukul 05.24

http://www.offshore-technology.com/contractors/design-engineering-construction/spt_2/ diakses pada 31 September 2017 pukul 17.0.3.

<http://www.epd.gov.hk/> diakses pada 4 Agustus 2017 pukul 02.01.

<http://www.sptoffshore.com/en/solutions/subsea-structures1/suction-pile-clusters-spc-for-subsea-structures> diakses tanggal 18 Agustus 2017 pukul 14.17.

www.infometrik.com/2009/07/konsep-dasar-finite-element-method/ diakses tanggal 4 Agustus pukul 11.18.