

# **LAPORAN PENELITIAN**

## ***“Analisis Daya Dukung Lateral pada Suction Pile dengan Menggunakan Metode Numerik”***

Dr.techn. Indra Noer Hamdhan



**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL  
BANDUNG - 2019**

# Analisis Daya Dukung Lateral pada *Suction Pile* dengan Menggunakan Metode Numerik

R. THASYIA PUTERI DEARINI J., INDRA NOER HAMDHAN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung  
Email: puteri626@gmail.com

## ABSTRAK

*Suction Pile* merupakan fondasi berbentuk silinder baja berdiameter besar yang tertutup pada bagian atas dan terbuka pada bagian bawah. Fondasi ini sering digunakan untuk menyokong bangunan *offshore* dan *platforms*. Beban yang diterima oleh *suction pile* merupakan beban aksial yang berasal dari beban strukturnya dan juga beban lateral dari tekanan tanah dan air laut di sekelilingnya. Analisis daya dukung lateral pada *suction pile* dilakukan dengan menggunakan metode numerik, yaitu menggunakan *software* PLAXIS 3D dengan *soil model* Mohr-Coulomb dan *Hardening Soil*, serta menggunakan metode analisis, yaitu metode COM624 dari *Federal Highway Administration* (FHWA). Pemodelan *suction pile* dilakukan dengan cara memvariasikan panjang dari *suction pile* dengan mutu baja, diameter *suction pile*, dan parameter tanah yang sama. Berdasarkan hasil dari penelitian bahwa semakin panjang penampang dari *suction pile* yang digunakan, maka daya dukung lateral yang diperoleh semakin meningkat dikarenakan letak titik jepit yang masih berubah.

**Kata Kunci:** *suction pile*, daya dukung lateral, titik jepit, Mohr-Coulomb, *Hardening Soil*

## ABSTRACT

*Suction pile is a large cylinder-shaped steel foundation which has a closed top and an open bottom. This foundation is often used to support offshore buildings and platforms. The loads resisted by the suction pile are the axial load from its own structure weight and the lateral load caused by soil and deep-sea pressure around it. Analysis of lateral bearing capacity of suction pile is done by using numerical method is conducted using commercial software PLAXIS 3D, with Mohr-Coulomb and Hardening Soil as the soil model and analysis method is conducted using COM624 method from Federal Highway Administration (FHWA). Suction pile model is designed by varying the suction pile lengths of equal steel quality, suction pile diameter, and soil parameter. The result of the research showed that the longer the cross section of the suction pile used, the higher its lateral bearing capacity, due to the location of the fixity point is still changed.*

**Keywords:** *suction pile*, lateral bearing capacity, fixity point, Mohr-Coulomb, *Hardening Soil*

## 1. PENDAHULUAN

Dalam kegiatan eksplorasi minyak bumi dan gas alam, dibutuhkan struktur yang dibangun di lepas pantai untuk menunjang kegiatan tersebut. Fondasi yang digunakan untuk bangunan yang berada di lepas pantai ini salah satunya menggunakan *Suction Pile*. *Suction Pile* merupakan fondasi berbentuk silinder baja berdiameter besar yang tertutup pada bagian atas dan terbuka pada bagian bawah. Beban aksial yang diterima oleh *suction pile* berasal dari beban struktur di atasnya sedangkan beban lateral yang ditahannya berasal dari tekanan tanah dan air laut disekelilingnya. Pada perencanaan *suction pile* sendiri berbeda dengan fondasi lain dalam menerima beban, jenis tanah juga merupakan salah satu faktor terpenting akibat letaknya yang berada di lepas pantai membuat analisis daya dukung fondasi menjadi sedikit berbeda dengan fondasi pada umumnya.

Pada tugas akhir ini akan menganalisis daya dukung *suction pile* dalam menahan beban lateral menggunakan PLAXIS 3D sebagai metode pendekatan secara numerik berdasarkan defleksi lateral yang diizinkan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berapa besar daya dukung *ultimate* lateral pada *suction pile* dengan metode pendekatan secara numerik dan analisis manual, kemudian menerapkan variasi yang berbeda pada panjang *suction pile*, serta untuk mengetahui berapa besar pengaruh kondisi tersebut terhadap daya dukung *ultimate* lateral.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Suction Pile*

*Suction Pile* adalah salah satu jenis fondasi dalam. Fondasi ini banyak digunakan untuk menahan dan menyalurkan beban struktur atas ke dasar laut. *Suction pile* sendiri berbentuk silinder yang terbuka pada bagian dasarnya dan tertutup pada bagian atasnya, dengan lubang udara pada bagian atasnya (Allersma *et al*, 1999).

Proses Instalasi *Suction Pile* dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

#### 1. *Self-weight penetrasion phase*

Pada tahap ini *suction pile* diletakan pada lokasi yang telah ditentukan. *Suction pile* akan turun secara perlahan akibat berat sendiri dan celah udara (*vent*) yang terdapat pada bagian atas dibiarkan terbuka.

#### 2. *Suction-assisted penetrasion phase*

Pada tahapan ini, pompa digunakan untuk mengalirkan air yang terdapat di dalam *suction pile* dan menutup celah udara (*vent*). Proses keluarnya air ini berfungsi untuk menurunkan tekanan di dalam *pile*, sehingga mendorong *suction pile* untuk turun dan masuk ke dalam dasar laut (Houlsby *et al*, 2005)

### 2.2 Beban Lateral

Beban lateral merupakan beban yang arah gerakanya secara horizontal. Beban lateral ini dapat menyebabkan suatu fondasi mengalami deformasi atau defleksi yang dapat memberikan dampak buruk pada suatu struktur.

Defleksi desain dalam arah lateral berdasarkan SNI (2017), defleksi lateral yang diizinkan pada fondasi bergantung kepada kategori struktur dan resiko gempa struktur atasnya. Pada umumnya defleksi lateral yang diizinkan pada fondasi tidak lebih dari 2,50 cm atau sama dengan 1 inch.

### 2.3 Daya Dukung Lateral Metode COM624

Metode analisis COM624 dari *Federal Highway Administration* (FHWA, 1991) merupakan metode analisis daya dukung lateral yang menggunakan pendekatan reaksi *subgrade* berdasarkan defleksi lateral. COM624 menggunakan **Persamaan 1** *differential* nonlinear untuk analisis beban lateral, berikut persamaan dari COM624:

$$EI \frac{d^4 Y}{dz^4} + Q \frac{d^2 Y}{dz^2} - R - P_q = 0 \quad \dots(1)$$

halmana:

$Q$  = beban aksial pada fondasi [kN],  
 $Y$  = defleksi lateral pada fondasi [m],  
 $Z$  = kedalaman dari atas fondasi [m],  
 $R$  = modulus reaksi *subgrade* [MN/m<sup>3</sup>],  
 $E$  = modulus elastisitas fondasi [kN/m<sup>2</sup>],  
 $I$  = momen inersia fondasi [m<sup>4</sup>],  
 $P_q$  = distribusi beban sepanjang fondasi [kN].

### 2.4 PLAXIS 3D

PLAXIS 3D adalah salah satu program PLAXIS yang mampu menampilkan bentuk deformasi, stabilitas tanah, penurunan, dan berbagai perilaku tanah saat diberi beban. PLAXIS 3D dapat menampilkan tampilan grafis yang nyaman untuk digunakan oleh pengguna sehingga dengan cepat mampu membuat geometri model dan membuat ukuran elemen hingga.

### 2.5 Keruntuhan Mohr-Coulomb

Keruntuhan Mohr-Coulomb adalah teori keruntuhan yang menyatakan bahwa keruntuhan pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser (Mohr, 1900). Hubungan antara tegangan normal dan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan dalam **Persamaan 2** berikut.

$$\tau = c + \sigma(\tan\varphi) \quad \dots(2)$$

halmana:

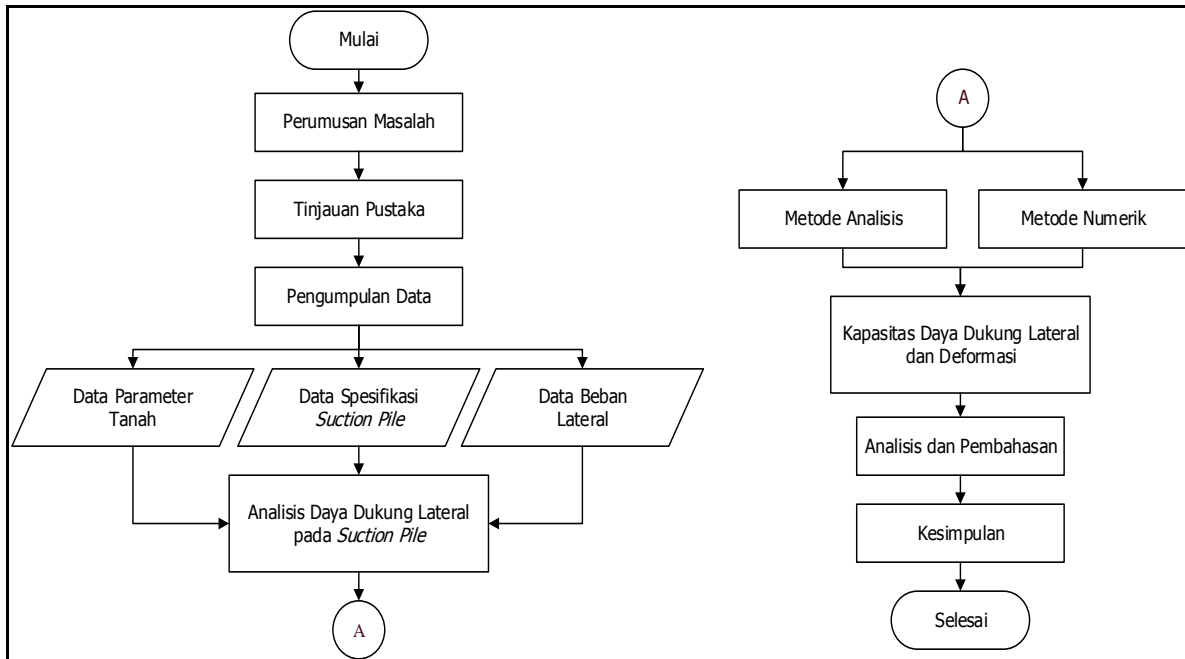
$\tau$  = kuat geser tanah [kN/m<sup>2</sup>],  
 $c$  = kohesi tanah [kN/m<sup>2</sup>],  
 $\varphi$  = sudut geser tanah [°],  
 $\sigma$  = tegangan normal pada bidang runtuh [kN/m<sup>2</sup>].

### 2.6 Keruntuhan *Hardening Soil*

*Hardening soil model* adalah jenis keruntuhan geser tanah pada model tingkat lanjutan untuk memodelkan berbagai jenis perilaku tanah lunak maupun tanah keras (Schanz, 1998). Perbedaan antara model *Hardening Soil* dan model Mohr-Coulomb terletak pada hubungan nilai tegangan dan regangan. Pada Mohr-Coulomb dijelaskan bahwa pembatasan nilai tegangan berdasarkan nilai sudut geser sedangkan pada *Hardening Soil model* menjelaskan jenis elastoplastis dari model hiperbolik dimana hubungan tegangan dan regangan ini dikembangkan untuk deformasi tanah. Pada *hardening soil model* parameter kekakuan tanah dijelaskan jauh lebih akurat dibandingkan dengan Mohr-Coulomb karena menggunakan 3 parameter kekakuan, yaitu *triaxial stiffness* ( $E_{50}$ ), *triaxial unloading stiffness* ( $E_{ur}$ ) dan *oedometer loading stiffness* ( $E_{oed}$ ).

### 3. METODE PENELITIAN

Pemodelan *suction pile* yang dilakukan menggunakan program PLAXIS 3D. Pemodelan ini dilakukan dengan asumsi tanah pasir. Model divariasikan dengan cara mengubah panjang *suction pile* sehingga dianalisis untuk mengetahui besar pengaruh panjang *suction pile* terhadap daya dukung lateral berdasarkan batas defleksi lateral yang diijinkan. Bagan alir dari penelitian ini ditunjukkan **Gambar 1**.

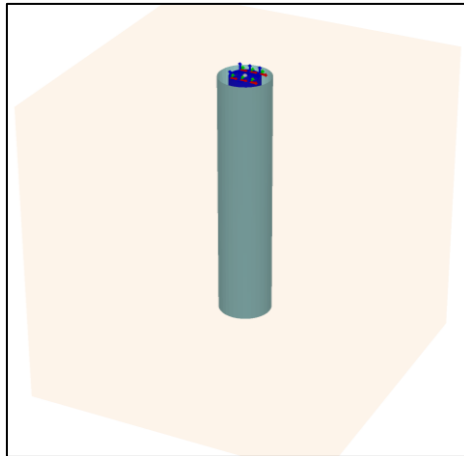


**Gambar 1.** Bagan alir analisis daya dukung lateral pada *suction pile*

### 4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Daya Dukung Lateral Metode Numerik

Analisis daya dukung lateral *suction pile* menggunakan program PLAXIS 3D, pemodelan dilakukan dengan memberikan muka air tanah yang berada di atas lapisan tanah dan *suction pile* setinggi 1 meter. Pemodelan muka air tanah ini menyerupai keadaan *suction pile* yang berada di dasar laut dan keadaan tanah pasir yang jenuh. Rasio panjang dan diameter atau variasi panjang *suction pile* yang digunakan adalah 3 meter (1:1), 6 meter (1:2), 9 meter (1:3), 12 meter (1:4), 15 meter (1:5), 18 meter (1:6), 21 meter (1:7), dan 24 meter (1:8) dengan kondisi kepala bebas (*free head*). Pemodelan dari struktur *suction pile* yang dianalisis dapat dilihat pada **Gambar 2**. Adapun data parameter tanah dan *suction pile* yang digunakan dalam menganalisis daya dukung lateral pada PLAXIS 3D dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.



**Gambar 2. Pemodelan *suction pile* pada PLAXIS 3D**

**Tabel 1. Parameter Tanah**

Model Tanah	Jenis	$\gamma_{unsat}$	$\gamma_{sat}$	$E$			$\nu$	$C$	$\phi$	$\varphi$
				$E_{50}$	$E_{oed}$	$E_{ur}$				
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]					[°]	[°]
Mohr-Coulomb	Drained	16	17		15.000		0,33	0,1	35	5
Hardening Soil	Drained	16	17	15.000	15.000	30.000	0,33	0,1	35	5

**Tabel 2. Parameter *Suction Pile***

Tebal Pelat	Berat Jenis	Modulus Elastisitas	Poisson Rasio	Modulus Geser
$d$	$\gamma$	$E$	$\nu$	$G$
[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	[kN/m <sup>3</sup> ]
0,05	63,4	200x10 <sup>6</sup>	0,33	75,19x10 <sup>6</sup>

Hasil analisis menggunakan metode numerik yaitu program PLAXIS 3D berupa variasi daya dukung lateral akibat dari pengaruh ukuran dimensi *suction pile*. Pada analisis ini, daya dukung lateral diperoleh berdasarkan batas defleksi lateral yang diizinkan yaitu sebesar 2,5 cm. Saat *suction pile* memikul beban lateral, defleksi lateral akan terjadi di daerah permukaan yang mengikuti arah beban lateral yang diberikan seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 3**.



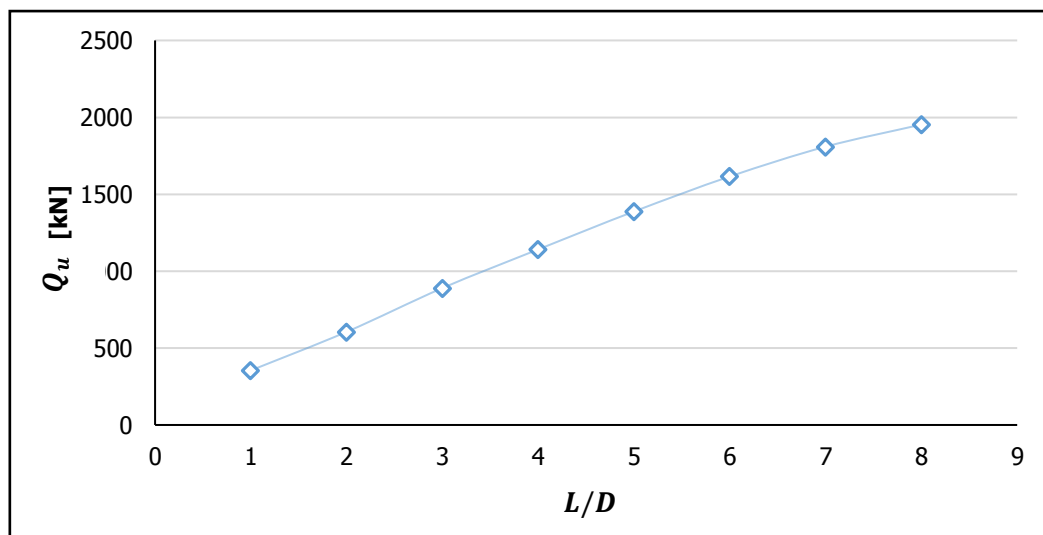
**Gambar 3. *Suction pile* mengalami defleksi akibat beban lateral**

### A) Pemodelan dengan Model Mohr-Coulomb

Pemodelan yang dilakukan pertama kali adalah pemodelan dengan menggunakan model Mohr-Coulomb untuk tanah pasir homogen. Peningkatan daya dukung lateral *suction pile* dapat dilihat pada **Tabel 3**. Kapasitas daya dukung lateral *suction pile* diperoleh dari *output* program PLAXIS 3D yang ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan rasio antara panjang dan diameter *suction pile* terhadap daya dukung lateral yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 4**.

**Tabel 3. Rekapitulasi Daya Dukung Lateral Keruntuhan Mohr-Coulomb**

Diameter	Panjang	Rasio	$U_x$	$Q_u$
[m]	[m]		[m]	[kN]
3	3	1:1	0,025	354,681
3	6	1:2	0,025	605,557
3	9	1:3	0,025	890,144
3	12	1:4	0,025	1.141,291
3	15	1:5	0,025	1.387,907
3	18	1:6	0,025	1.615,292
3	21	1:7	0,025	1.809,198
3	24	1:8	0,025	1.952,989



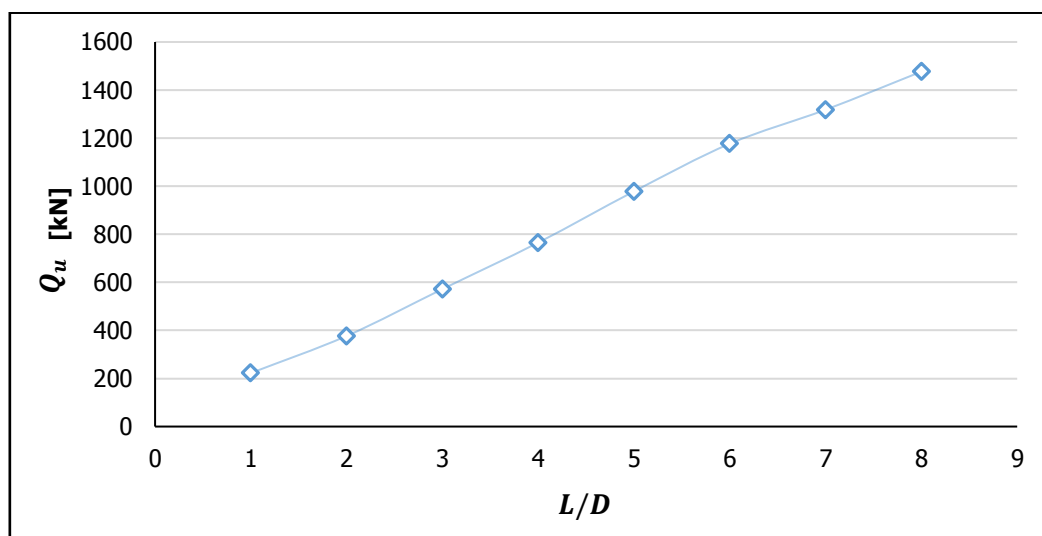
**Gambar 4. Grafik hubungan rasio  $L/D$  dengan daya dukung lateral keruntuhan Mohr-Coulomb**

### B) Pemodelan dengan Model *Hardening Soil*

Pemodelan yang dilakukan pertama kali adalah pemodelan dengan menggunakan model *hardening soil* untuk tanah pasir homogen. Peningkatan daya dukung lateral *suction pile* dapat dilihat pada **Tabel 4**. Kapasitas daya dukung lateral *suction pile* diperoleh dari *output* program PLAXIS 3D yang ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan pengaruh rasio antara panjang dan diameter *suction pile* terhadap daya dukung lateral yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 5**.

**Tabel 4. Rekapitulasi Daya Dukung Lateral Keruntuhan *Hardening Soil***

Diameter	Panjang	Rasio	$U_x$	$Q_u$
[m]	[m]		[m]	[kN]
3	3	1:1	0,025	222,573
3	6	1:2	0,025	376,982
3	9	1:3	0,025	571,957
3	12	1:4	0,025	765,367
3	15	1:5	0,025	978,412
3	18	1:6	0,025	1.176,824
3	21	1:7	0,025	1.318,234
3	24	1:8	0,025	1.476,677

**Gambar 5. Grafik hubungan rasio  $L/D$  dengan daya dukung lateral keruntuhan *Hardening Soil***

Analisis daya dukung lateral pada *suction pile* menggunakan Metode Elemen Hingga dari program PLAXIS 3D ini menunjukkan bahwa dengan diameter *suction pile* tetap, semakin panjang kedalaman dari *suction pile*, maka daya dukung lateral yang diperoleh semakin besar. Peningkatan daya dukung lateral yang terjadi karena letak *fixity point* yang masih dekat dengan permukaan tanah dan dapat dikatakan letak *fixity point* pada *suction pile* masih bergerak turun ke bawah hingga menemukan letak *fixity point* yang tetap. Sehingga akibat letak *fixity point* yang masih turun ke bawah dan belum mencapai letak yang stabil maka, daya dukung lateral yang didapatkan akan semakin besar hingga mencapai panjang *suction pile* yang sesuai.

#### 4.2 Daya Dukung Lateral Metode Analisis

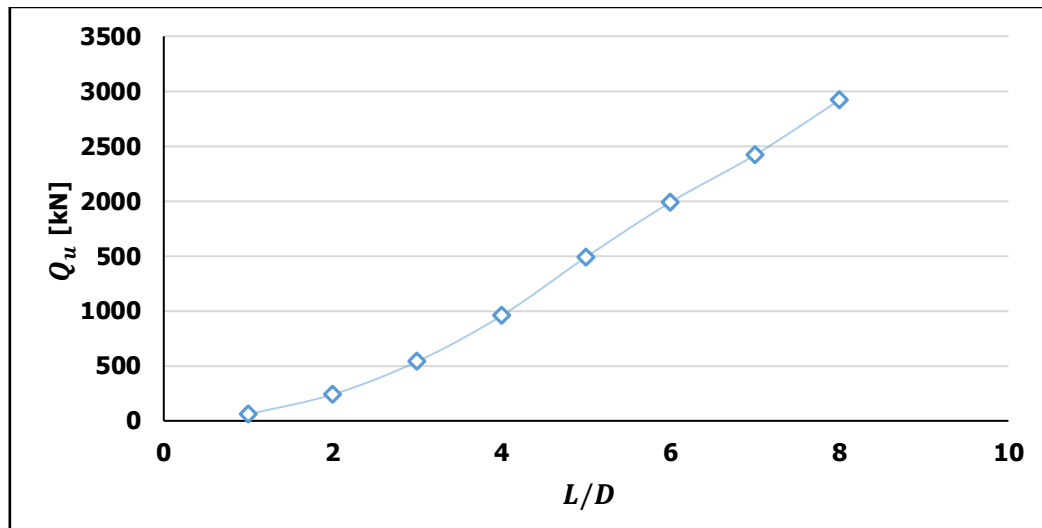
Daya dukung lateral diperoleh dengan cara coba-coba besar beban lateral pada *suction pile* yang menghasilkan defleksi lateral yang sama besar nilainya dengan defleksi lateral izin, yaitu 2,5 cm. Peningkatan daya dukung lateral *suction pile* dapat dilihat pada **Tabel 5**.



**Tabel 5. Rekapitulasi Daya Dukung Lateral dengan Metode COM624**

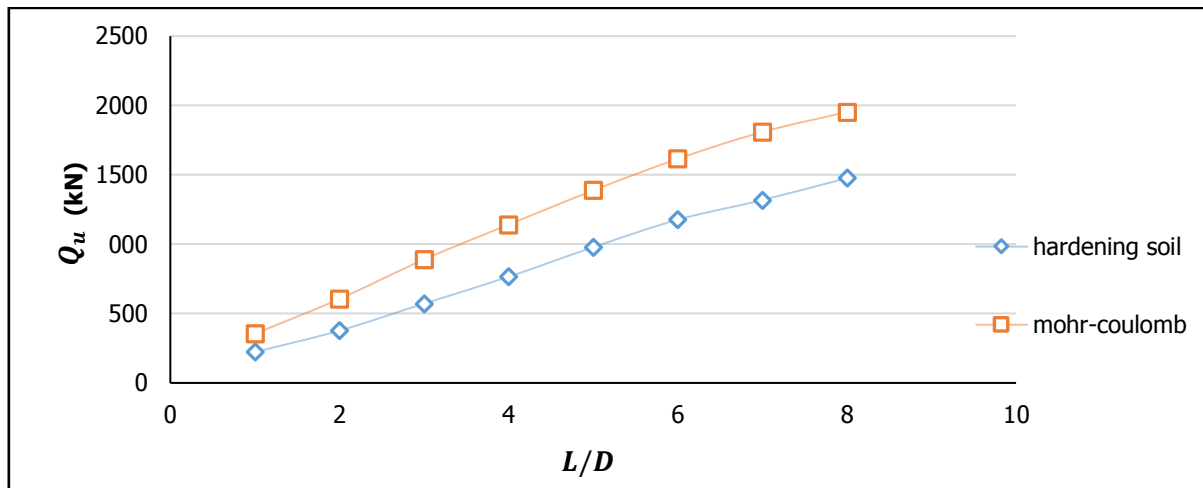
Diameter	Panjang	Rasio	$U_x$	$Q_u$
[m]	[m]		[m]	[kN]
3	3	1:1	0,025	60
3	6	1:2	0,025	240
3	9	1:3	0,025	540
3	12	1:4	0,025	957
3	15	1:5	0,025	1490
3	18	1:6	0,025	1990
3	21	1:7	0,025	2420
3	24	1:8	0,025	2920

Kapasitas daya dukung lateral *suction pile* diperoleh dari hasil analisis menggunakan metode COM624 yang ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan rasio antara panjang dan diameter *suction pile* terhadap daya dukung lateral yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 6**.

**Gambar 6. Grafik hubungan rasio  $L/D$  dengan daya dukung lateral metode Com624**

#### 4.3 Perbandingan Metode Analisis Daya Dukung Lateral

Hasil perbandingan analisis dari kedua *soil model* ini menunjukkan bahwa daya dukung lateral yang diperoleh berdasarkan defleksi lateral izin sebesar 2,5 cm pada *soil model hardening soil* lebih rendah dibandingkan dengan *soil model Mohr-Coulomb* seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 7**. Daya dukung lateral pada *soil model Mohr-Coulomb* yang diperoleh memiliki nilai rata-rata 31,48% lebih besar dibandingkan *Hardening Soil*. Perbedaan daya dukung lateral dari hasil analisis kedua *soil model* yang dilakukan karena parameter yang digunakan pada *soil model hardening soil* memiliki 3 jenis  $E$ , sehingga menyebabkan daya dukung lateral pada *soil model hardening soil* lebih besar dibandingkan dengan *soil model Mohr Coulomb*.



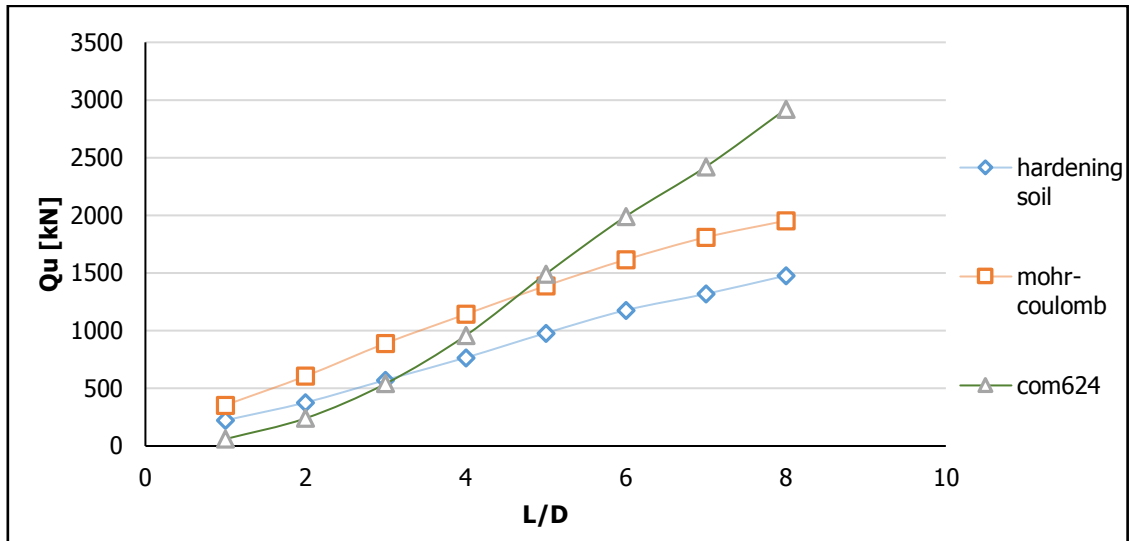
**Gambar 7. Grafik perbandingan keruntuhan *Mohr-Coulomb* dan *hardening soil***

Hasil analisis daya dukung lateral menggunakan program PLAXIS 3D yang kemudian dibandingkan dengan metode COM624 dapat dilihat pada **Tabel 6** dan perbandingan analisis daya dukung lateral terhadap rasio dari hasil analisis PLAXIS 3D baik menggunakan *soil model* Mohr-Coulomb dan *Hardening Soil* dan analisis menggunakan metode COM624 seperti pada **Gambar 8**.

**Tabel 6. Rekapitulasi Daya Dukung Lateral pada *Suction Pile***

Rasio	$U_x$ [m]	Mohr-Coulomb	Hardening Soil	COM624
		$Q_u$ [kN]	$Q_u$ [kN]	$Q_u$ [kN]
1:1	0,025	354,681	222,573	60
1:2	0,025	605,557	376,982	240
1:3	0,025	890,144	571,957	540
1:4	0,025	1.141,291	765,367	957
1:5	0,025	1.387,907	978,412	1.490
1:6	0,025	1.615,292	1.176,824	1990
1:7	0,025	1.809,198	1.318,234	2420
1:8	0,025	1.952,989	1.476,677	2920

Data di atas menunjukkan bahwa perbandingan daya dukung lateral hasil analisis menggunakan PLAXIS 3D yang diperoleh jika dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan metode COM624 berdasarkan defleksi lateral izin sebesar 2,5 cm memiliki nilai persentase selisih daya dukung lateral yang berbeda tiap pertambahan panjang *suction pile*. Daya dukung lateral pada metode COM624 yang diperoleh memiliki nilai rata-rata 39,10% lebih besar dibandingkan Mohr-Coulomb sedangkan terhadap *Hardening Soil*, daya dukung lateral metode COM624 memiliki nilai rata-rata lebih besar 55,34%.



**Gambar 8. Grafik perbandingan hasil analisis daya dukung lateral**

Pada **Gambar 8** terlihat perbandingan daya dukung lateral tiap metode yang digunakan untuk seluruh kenaikan rasio. Jika dilakukan perbandingan antara metode COM624 dan PLAXIS 3D dengan *soil model* Mohr-Coulomb dapat dilihat bahwa untuk rasio rentang 1:1 hingga 1:4 daya dukung lateral yang diperoleh dari metode COM624 masih berada di rentang yang sesuai dengan hasil analisis dari PLAXIS 3D, sedangkan pada rasio 1:5 dan 1:8 diperoleh daya dukung lateral yang lebih besar dibandingkan PLAXIS 3D. Kemudian jika dibandingkan antara metode COM624 dan PLAXIS 3D dengan *soil model hardening soil* dapat dilihat bahwa untuk rasio rentang 1:1 hingga 1:3 daya dukung yang diperoleh dari metode COM624 masih berada di rentang yang sesuai dengan hasil analisis dari PLAXIS 3D, sedangkan pada rasio 1:4 hingga 1:8 diperoleh daya dukung lateral yang lebih besar dibandingkan PLAXIS. Hal ini disebabkan karena pada metode COM624 memiliki pendekatan yang berbeda yakni hanya memperhitungkan kekuatan dari *suction pile* dan *modulus subgrade reaction soil* ( $k$ ) tanpa memperhitungkan *interface* (bagian suction pile yang bergesekan dengan tanah), kontribusi tanah yang berada di dalam *suction pile* dan *shear strength* dari tanah itu sendiri.

Sehingga analisis daya dukung lateral *suction pile* saat menggunakan PLAXIS 3D dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan analisis menggunakan metode COM624. Pada program PLAXIS 3D, analisis daya dukung lateral *suction pile* membuat pemodelan dengan memasukkan parameter tanah pasir dan parameter *suction pile* yang akan digunakan. Analisis menggunakan PLAXIS 3D ini juga memperhitungkan kondisi dimana lapisan tanah tersebut jenuh karena dimodelkan muka air setinggi 1 meter diatas permukaan tanah, *interface* pada *suction pile*, dan tanah yang berada di dalam *suction pile*.

Perbedaan hasil analisis daya dukung lateral dari kedua metode tersebut memberikan variasi daya dukung lateral yang bergantung pada parameter-parameter yang digunakan dan diperhitungkan serta keterbatasan menganalisis fondasi dari kedua metode tersebut.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar rasio antara panjang dan diameter penampang dari *suction pile* yang digunakan, maka daya dukung lateral yang diperoleh semakin meningkat dikarenakan letak *fixity point* yang masih turun ke bawah dan belum mencapai titik yang tetap.

2. Daya dukung lateral yang diperoleh pada *soil model Hardening Soil* lebih kecil dibandingkan dengan *soil model* Mohr-Coulomb. Perbedaan ini disebabkan karena parameter pada *Hardening Soil* terdapat 3 jenis  $E$ , yaitu  $E_{50}$ ,  $E_{oed}$ , dan  $E_{ur}$ .
3. Hasil analisis daya dukung lateral *suction pile* yang didapat menggunakan metode COM624 berbeda dengan hasil analisis menggunakan PLAXIS 3D dikarenakan adanya perbedaan pendekatan dari kedua metode yaitu parameter yang diperhitungkan dalam metode hanya kekuatan *suction pile* dan *modulus subgrade reaction soil* tanpa memperhitungkan *interface* pada *suction pile*, kontribusi tanah di dalam *suction pile*, dan *shear strength* tanah.

### **DAFTAR RUJUKAN**

- Allersma, H. G., Kirstein, A. A., Brinkgreve, R. B., & Simon, T. (1999). Centrifuge and Numerical Modelling of Horizontally Loaded Suction Pile. *International Offshore and Polar Engineering Conference* (pp. 711 - 717). France: International Society of Offshore and Polar Engineers.
- BSN. (2017). *SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- FHWA. (1991). *Design and Construction Guidelines Federal Highway Administration*. Washington DC: Departement of Transportation.
- Houlsby, G. T., & Bryne, B. W. (2005). Design Procedures for Installation of Suction Caissons in Sand. *Geotechnical Engineering*, 158, 135-144.
- Mohr, O. (1900). Welche umstande bedingen die elastizitatsgrenze und den bruch eines materiales? *Zeitschrift des Vereines*, 44, 1524-1530.