

Pengaruh Spasi antar Helix terhadap Daya Dukung Fondasi Helical Pile pada Tanah Limestone dengan Metode Hoek Brown dan Mohr Coloumb

YUKI ACHMAD YAKIN^{1*}, DESTI SANTI PRATIWI¹,
YANUAR AGIS SUGIARTO²

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Email: destisantipratiwi@itenas.ac.id

ABSTRAK

Rencana pembangunan pembangkit listrik tenaga surya di Bali. Karena pembangunan berada di lokasi bukit tinggi dekat laut yang dimana memiliki hembusan angin yang cukup kuat sehingga memengaruhi kuat aksial tekan dan aksial tarik. Oleh karena itu alternatif untuk menahan beban tekan dan tarik yaitu menggunakan fondasi Helical pile dimana lokasi penempatannya di bebatuan tanah Limestone. Dalam pemodelan fondasi helical pile divariasikan spasi helix nya yaitu 0,1 m; 0,15 m; 0,2 m; dan 0,3 m. Hasil Deformasi dipemodelan plaxis 3D ada yaitu daya dukung ultimate dengan perbandingan model tanah Hoek Brown dan Mohr Coloumb dimana nilai daya dukung nya berbeda karena parameter dan spasi helix mempengaruhi nilai daya dukung. Untuk perhitungan analitis daya dukung menggunakan 2 metode yaitu Individual Bearing dan Cylindrical Shear. Tahapan perhitungan 2 metode memiliki nilai daya dukung yang berbeda berdasarkan nilai variasi spasi antar helix.

Kata kunci: helical pile, Plaxis 3D, Hoek Brown, Mohr Coloumb

ABSTRACT

Plans to build a solar power plant in Bali. Because the development is located on a high hill near the sea which has strong enough wind gusts that affect axial compressive and axial tensile strength. Therefore an alternative to withstand compressive and tensile loads is to use a Helical pile foundation where the location is placed in Limestone soil rocks. In modeling the helical pile foundation, the helix spacing varies, namely 0.1 m 0.15 m 0.2 m and 0.3 m. The results of deformation in 3D plaxis modeling are the ultimate bearing capacity with a comparison of the Hoek Brown and Mohr Coloumb soil models where the bearing capacity values are different because the parameters and helix spacing affect the bearing capacity values. For the analytical calculation of the carrying capacity using 2 methods, namely Individual Bearing and Cylindrical Shear. The calculation stages of the 2 methods have different carrying capacity values based on the variation in the spacing between helix.

Keywords: helical pile, Plaxis 3D, Hoek Brown, Mohr Coloumb

1. PENDAHULUAN

Fondasi *helical pile* ialah fondasi tiang yang berbahan dasar berupa baja fabrikasi yang memiliki satu atau lebih pelat helix dimana pemasangannya dengan cara memutar fondasi itu ke dalam lapisan tanah [1]. Fondasi *helical pile* akan digunakan pada tanah jenis limestone (tanah kapur) yang dimana tanah kapur ini tanah yang keras di banding dengan tanah jenis lain. Plat helix ini memengaruhi kuat daya dukung fondasi. Sudah banyak penelitian terdahulu mengenai analisis daya dukung fondasi *helical pile*. Namun belum banyak yang membandingkan adakah pengaruh spasi antara helix terhadap kekuatan daya dukung, serta belum ada studi kasus penempatan fondasi *helical pile* di tanah limestone (kapur) sehingga pemilihan model tanah yang cocok untuk studi kasus di tanah limestone yaitu model tanah Hoek Brown dan Mohr-Coloumb karena parameter nya bisa didapatkan dari parameter batuan dan tanah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah didefinisikan secara umum adalah kumpulan dari bagian-bagian yang padat dan tidak terikat antara satu dengan yang lain, sedangkan rongga-rongga diantara material tersebut berisi udara dan air [2].

2.2 Batu Kapur

Batu gamping adalah batuan sedimen yang utamanya tersusun oleh kalsium karbonat (CaCO_3) dalam bentuk mineral kalsit. Di Indonesia, batu gamping sering disebut juga dengan istilah batu kapur, sedangkan istilah luarnya biasa disebut "Limestone".

2.3 Fondasi Helical Pile

Fondasi *helical pile* ialah fondasi tiang yang berbahan dasar berupa baja fabrikasi yang memiliki satu atau lebih pelat helix dimana pemasangannya dengan cara memutar fondasi itu ke dalam lapisan tanah [1].

2.4 Pendekatan Persamaan Kriteria Hoek Brown dan Mohr Coloumb

Pada tahun 2002, [3] memperkenalkan *Geological Strength Index* untuk memperkirakan berkurangnya kekuatan suatu massa batuan yang disebabkan oleh perbedaan kondisi geologi. Nilai GSI bisa didapat dengan dua cara, yaitu pengamatan geologi di lapangan dengan batuan dan juga bisa diperkirakan dari hasil *Rock Mass Rating* (RMR) [4][13]. Nilai RMR didapatkan dari korelasi nilai kohesi **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Peringkat RMR System [5]

<i>Rock Mass Rating (RMR) is sum of the six ratings</i>			<i>Note that orientation ratings are negative</i>		
<i>Class</i>	I	II	III	IV	V
<i>Description</i>	<i>Very good rock</i>	<i>Good rock</i>	<i>Fair rock</i>	<i>Poor rock</i>	<i>Very poor rock</i>
<i>RMR</i>	80 – 100	60 – 80	40 – 60	20 – 40	< 20
<i>Q Value</i>	> 40	10 – 40	4 – 10	1 – 4	1
<i>Friction angle ϕ (°)</i>	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15
<i>Cohesion (kPa)</i>	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
<i>SBP (MPa)</i>	10	4 – 6	1 – 2	0.5	< 0.2
<i>Safe Cut Slope (°)</i>	> 70	65	55	45	< 40
<i>Tunnel Support</i>	<i>None</i>	<i>Spot bolts</i>	<i>Pattern bolts</i>	<i>Bolts+shotcrete</i>	<i>Steel ribs</i>
<i>Stand up time for span</i>	20 yr for 15 m	1 yr for 10 m	1 wk for 5 m	12 h for 2 m	30 min for 1 m

Setelah menentukan RMR selanjutnya dapat menghitung nilai GSI dengan **Persamaan 1**.

$$GSI = RMR - 5 \quad \dots(1)$$

Pengaruh Spasi antar Helix terhadap Daya Dukung Fondasi Helical Pile pada Tanah Limestone dengan Metode Hoek Brown dan Mohr Coloumb

halmana:

GSI = *Geological Strength Index*,

RMR = *Rock Mass Rating*.

Parameter-parameter yang menunjukkan sifat-sifat massa batuan dapat dihitung dengan **Persamaan 2** hingga **Persamaan 4**, dengan memasukkan nilai GSI.

Tabel 2. Nilai Konstanta m_i untuk Batuan Utuh [5]

Rock type	Class	Group	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very Fine	
SEDIMENTARY	Clastic	Conglomerates (21 ± 3)			Silt stones 7 ± 2	Clay stones 4 ± 2	
		Breccias (19 ± 5)	Sandstones (17 ± 4)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)	
		Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Spartic Limestones (10 ± 2)		Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
							Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2		
		Organic				Chalk 7 ± 2	
	METAMORPHIC	Non foliated	Marble 9 ± 3		Hornfels (19 ± 4)	Quartzites 20 ± 3	
				Metasandstone (19 ± 3)			
Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)				
Foliated**		Gneiss (28 ± 5)	Schists (12 ± 3)	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)		
IGNEOUS		Plutonic	Light	Granite (32 ± 3)	Diorite (25 ± 5)		
			Granodiorite (29 ± 3)				
	Dark	Gabbro (27 ± 3)	Dolerite (16 ± 5)				
			Nerite (20 ± 5)				
		Hypabyssal	Porphyrics (20 ± 5)	Diorase (15 ± 5)	Andesite (25 ± 5)		
Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Obsidian (19 ± 3)		
			Andesite 25 ± 5	Rasalt (25 ± 5)			
Pyroclastic	Agglomerate (20 ± 5)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)				

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad \dots(2)$$

$$s = \exp\left[\frac{GSI-100}{9-3D}\right] \quad \dots(3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right] \quad \dots(4)$$

halmana:




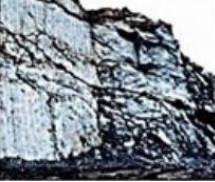

m_b, s, a = konstanta massa batuan,

m_i = konstanta jenis batuan,

D = faktor kerusakan.

m_i berdasarkan jenis batuan. D adalah faktor kerusakan (*disturbance factor*) yang tergantung pada derajat kerusakan massa batuan yang disebabkan oleh peledakan ataupun akibat penggalian. Rentang D bervariasi dari 0 untuk *undisturbed* sampai 1 untuk *disturbed* pada massa batuan. Nilai m_i dan Faktor Kerusakan D dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 3. Faktor Kerusakan Batuan [6]

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	<i>Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.</i>	$D = 0$
	<i>Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.</i>	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	<i>Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.</i>	$D = 0.8$
	<i>Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.</i>	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	<i>Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.</i>	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation
	<i>In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.</i>	

Pengaruh Spasi antar Helix terhadap Daya Dukung Fondasi Helical Pile pada Tanah Limestone dengan Metode Hoek Brown dan Mohr Coloumb

Modulus deformasi dihitung dari persamaan Hoek-Brown dengan memasukkan faktor D untuk memperhitungkan efek kerusakan akibat ledakan dan *stress* relaksasi yang besarnya dapat dilihat dari **Persamaan 5**.

$$E_m(GPa) = (1 - \frac{D}{2}) \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{4}\right)} \quad \dots(5)$$

Jika $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa, menggunakan **Persamaan 5**, sedangkan untuk $\sigma_{ci} \geq 100$ MPa menggunakan **Persamaan 6**.

$$E_m(GPa) = (1 - \frac{D}{2}) \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{4}\right)} \quad \dots(6)$$

halmana:

E_m = modulus deformasi [GPa],

σ_{ci} = kuat tekan [GPa].

Pendekatan atau kesamaan untuk mendapatkan kekuatan geser berupa sudut geser dalam (ϕ') dan kohesi (c') pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb harus dilakukan pada bidang geser dari massa batuan. Untuk mencari parameter sudut geser dalam (ϕ') dan kohesi (c') harus menyelesaikan **Persamaan 7** sampai **Persamaan 13**.

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot S^a \quad \dots(7)$$

Untuk menghitung kuat tarik menggunakan **Persamaan 8**.

$$\sigma_t = -\frac{S \cdot \sigma_{ci}}{m_b} \quad \dots(8)$$

Lalu menentukan kekuatan massa batuan didapatkan dengan **Persamaan 9**.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad \dots(9)$$

Untuk menentukan σ_{3max} dapat menggunakan **Persamaan 10**.

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0,91} \quad \dots(10)$$

Untuk menentukan σ_{3n} dapat menggunakan **Persamaan 11**.

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci} \quad \dots(11)$$

Kemudian parameter kekuatan geser dapat dihitung, yang terdiri atas sudut geser dalam efektif (ϕ') beserta kohesi efektif (c') menggunakan **Persamaan 12** dan **Persamaan 13**.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \quad \dots(12)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2\alpha)s+(1-\alpha)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{\alpha-1})/(1+\alpha)(2+\alpha)}} \quad \dots(13)$$

halmana:

- σ'_{cm} = kekuatan massa batuan,
- γ = berat isi,
- H = kedalaman [m],
- ϕ' = sudut geser tanah,
- c' = kohesi.

2.5 Kapasitas Daya Dukung Analitis

Daya dukung ujung tiang (Q_b) yaitu kemampuan yang dimiliki oleh tahanan ujung fondasi *helix* pada tanah. Berikut **Persamaan 14** untuk daya dukung ujung fondasi tiang *helix*.

$$Q_b = \frac{\pi(Dh^2-d^2)}{4}(N_c c_u + \gamma'H) \quad \dots(14)$$

halmana:

- σ'_{cm} = kekuatan massa batuan,
- γ = berat isi,

Untuk menentukan nilai N_c didapat dari tabel *Bearing Capacity Factor* Metode [7][12] yang dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Bearing Capacity Factor [4]

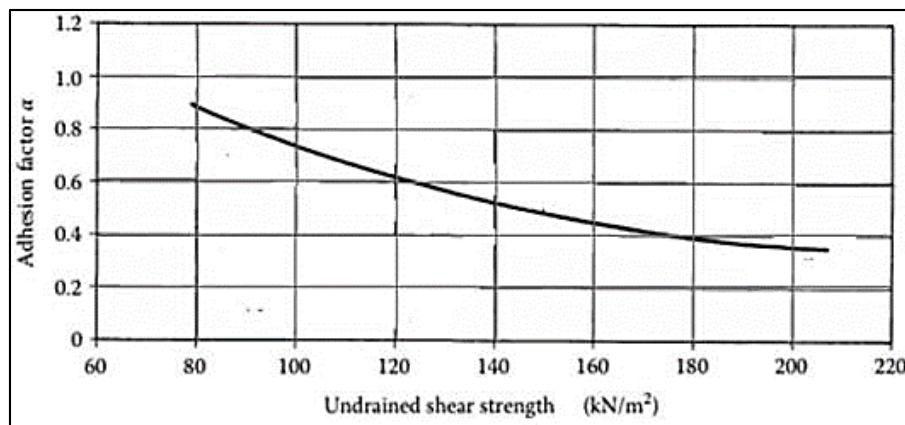
ϕ [°]	N_c	N_q	N_γ	ϕ [°]	N_c	N_q	N_γ
0	5,14	1,00	0,00	23	18,05	8,66	8,20
1	5,38	1,09	0,07	24	19,32	9,60	9,44
2	5,63	1,20	0,15	25	20,72	10,66	10,88
3	5,90	1,31	0,24	26	22,25	11,85	12,54
4	6,19	1,43	0,34	27	23,94	13,20	14,47
5	6,49	1,57	0,45	28	25,80	14,72	16,72
6	6,81	1,72	0,57	29	27,86	16,44	19,34
7	7,16	1,88	0,71	30	30,14	18,40	22,40
8	7,53	2,06	0,86	31	32,67	20,63	25,99
9	7,92	2,25	1,03	32	35,49	23,18	30,22
10	8,35	2,47	1,22	33	38,64	26,09	35,19
11	8,80	2,71	1,44	34	42,16	29,44	41,06
12	9,28	2,97	1,69	35	46,12	33,30	48,03
13	9,81	3,26	1,97	36	50,59	37,75	56,31
14	10,37	3,59	2,29	37	55,63	42,92	66,19
15	10,98	3,94	2,65	38	61,35	48,93	78,03
16	11,63	4,34	3,06	39	67,87	55,96	92,25
17	12,34	4,77	3,53	40	75,31	64,20	109,41
18	13,10	5,26	4,07	41	83,86	73,90	130,22
19	13,93	5,80	4,68	42	93,71	85,38	155,55
20	14,83	6,40	5,39	43	105,11	99,02	186,54
21	15,82	7,07	6,20	44	118,37	115,31	224,64
22	16,88	7,82	7,13	45	133,88	134,88	271,76

Daya dukung selimut tiang (Q_s) ialah tahanan yang dimiliki oleh gesekan antara keliling tiang dengan lapisan tanah. Berikut untuk mengkalkulasi nilai daya dukung keliling tiang pada tanah lempung dapat mengaplikasikan **Persamaan 15**.

$$Q_s = \pi \cdot d \cdot H_{eff} \cdot c_u \cdot a \quad \dots(15)$$

Nilai faktor adhesi untuk limestone dapat diestimasi menggunakan grafik yang terdapat pada

Gambar 1.



Gambar 1. Faktor adhesi [8] [9]

Daya dukung silinder yaitu tahanan yang dimiliki oleh setiap *helix* pada sebuah fondasi tiang *helical pile*. Menghitung nilai daya dukung silinder (Q_c) dapat mengaplikasikan **Persamaan 16**.

$$Q_c = \pi \cdot D_h \cdot c_u \cdot a \cdot (H_n - H_1) \quad \dots(16)$$

halmana:

- D_h = diameter helix [kN],
- c_u = kohesi tanah tak terdrainase,
- γ' = berat isi efektif,
- d = diameter *shaft*,
- H_{eff} = kedalaman efektif,
- a = faktor adhesi,
- H_n = posisi helix terbawah [m],
- H_1 = posisi helix teratas [m].

2.6 Cylindrical Shear Method

Perhitungan nilai daya dukung ultimate tiang (Q_{ult}) untuk Metode *Cylindrical Shear* dapat menggunakan penjumlahan nilai daya dukung ujung tiang (Q_b) dijumlahkan dengan nilai daya dukung keliling tiang (Q_s) ditambah nilai daya dukung silinder tiang (Q_c), yang terdapat pada **Persamaan 17**.

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s + Q_c \quad \dots(17)$$

2.7 Individual Bearing Method

Nilai daya dukung ultimate tiang (Q_{ult}) dapat menggunakan penjumlahan daya dukung ujung tiang (Q_b) dari setiap helix dijumlahkan terhadap nilai daya dukung keliling tiang (Q_s). Metode ini biasanya dilakukan, jika *pile* memiliki rasio jarak ($S/D_h > 3,0$). Nilai Q_b diperoleh dari akumulasi nilai daya dukung ujung tiang dari setiap helix yang dinyatakan dengan Q_{b1} , Q_{b2} dan Q_{bn} sesuai dengan jumlah helix. Berikut dapat digunakan **Persamaan 18** untuk perhitungan nilai daya dukung *ultimate individual bearing*.

$$Q_{ult} = Q_{b1} + Q_{b2} + Q_s \quad \dots(17)$$

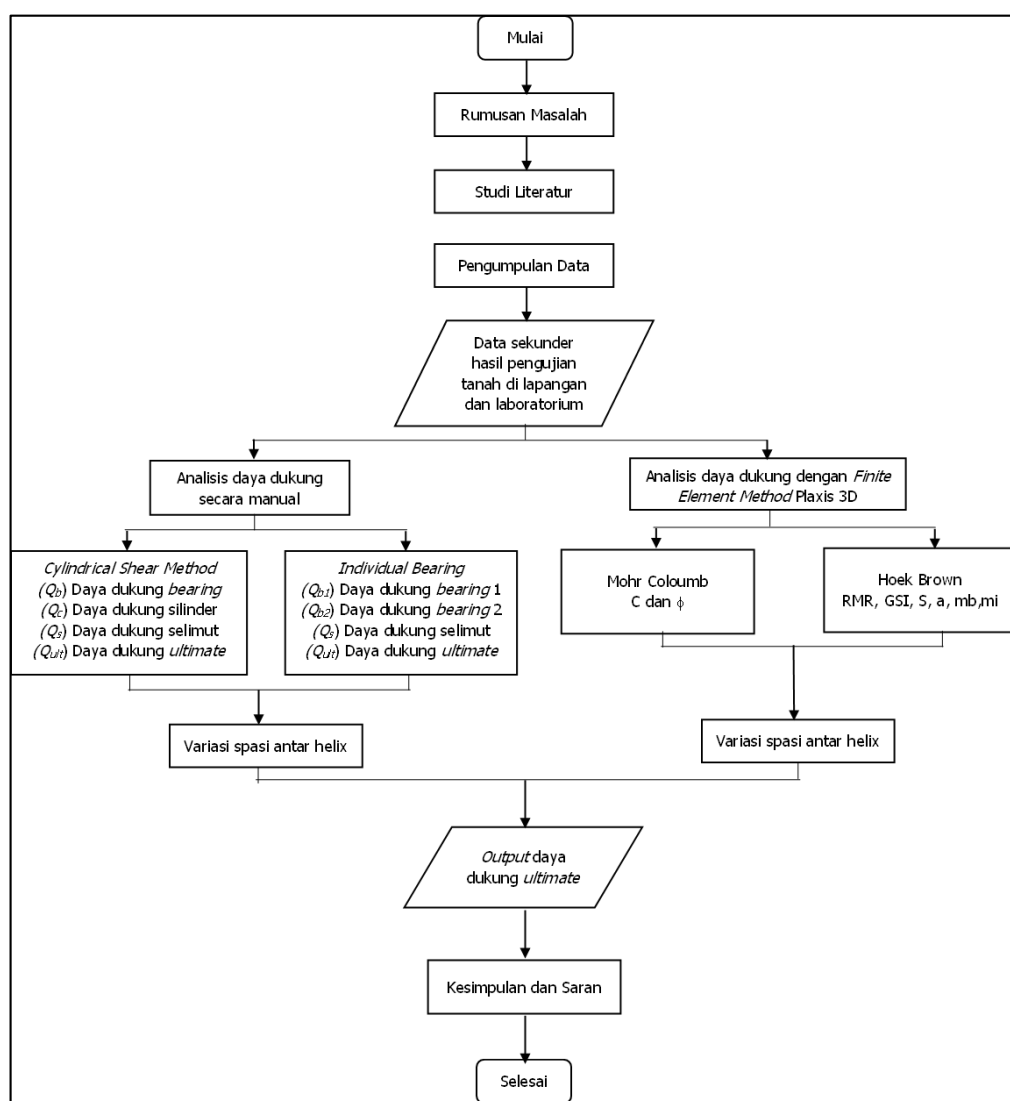
2.8 Metode Elemen Hingga

Perangkat lunak yang digunakan untuk perhitungan daya dukung yaitu Plaxis 3D. Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Untuk memodelkan fondasi *helical pile* dapat juga dilakukan di Plaxis 3D.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 2** dimana analisis dilakukan dengan Metode Analitis dan Metode Numerik. Analisis berdasarkan Metode Numerik dibantu dengan menggunakan Program Plaxis 3D. Pada pemodelan numerik, dilakukan analisis perbandingan model material Hoek Brown dan Mohr Coulomb.



Gambar 1. Baglan alir penelitian

3.2 Pengumpulan Data

Berikut ini kumpulan parameter-parameter tanah yang diperoleh dari persamaan dan korelasi [4][6][10][11] dan dapat dilihat pada **Tabel 5. Tabel 6** menunjukkan dimensi fondasi.

Tabel 5. Data Parameter Tanah

Klasifikasi		Lime Stone	Lime Stone
Material Model		Hoek Brown	Mohr-Coloumb
γ unsat	kN/m ³	17	17
γ sat	kN/m ³	18	18
E ref	kN/m ²	292.400	292.400
ν (poisson ratio)		0,3	0,3
c	kN/m ²	-	400
ϕ (Friction Angles)	°	-	45
Dilatancy angle	°	-	12
UniAxial Compressive	kN/m ²	30.343	-

Tabel 6. Data Dimensi Fondasi Helical Pile

S	Diameter Helix	Diameter Shaft	H	Heff	h ₁	H _n
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,1	0,2	0,08	1	0,35	0,65	0,75
0,15	0,2	0,08	1	0,4	0,6	0,75
0,2	0,2	0,08	1	0,5	0,5	0,7
0,3	0,2	0,08	1	0,45	0,55	0,85

4. HASIL DAN PENELITIAN

4.1 Hasil Analisis dari Penelitian

Hasil analisis nilai daya dukung metode *Cylindrical Shear* dan *Individual Bearing* disajikan pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Nilai Daya Dukung Ultimit (Q_{ult}) Metode *Cylindrical Shear*

Spasi Helix [m]	D helix [m]	D helix tengah [m]	N helix	Q_{b1} [kN]	Q_s [kN]	Q_c [kN]	Q_{ult} [kN]
0,1	0,2	0,2	2	1.412,71	15,825	8,792	1.437,316
0,15	0,2	0,2	2	1.412,71	14,067	13,188	1.439,954
0,2	0,2	0,2	2	1.412,71	10,554	13,188	1.440,833
0,3	0,2	0,2	2	1.412,71	12,308	19,782	1.451,383

Tabel 8. Nilai Daya Dukung Ultimit (Q_{ult}) Metode *Individual Bearing*

Spasi Helix [m]	D helix [m]	D helix tengah [m]	N helix	Q_{b1} [kN]	Q_s [kN]	Q_c [kN]	Q_{ult} [kN]
0,1	0,2	0,2	2	1.412,71	1.412,71	15,825	2.841,223
0,15	0,2	0,2	2	1.412,71	1.412,71	14,067	2.839,464
0,2	0,2	0,2	2	1.412,71	1.412,71	10,554	2.835,947
0,3	0,2	0,2	2	1.412,71	1.412,71	12,308	2.837,706

4.2 Rekapitulasi Nilai Daya Dukung *Ultimate*

Kompilasi nilai daya dukung ultimate fondasi *helical pile* dengan variasi spasi ditunjukkan pada **Tabel 9**. Pada **Tabel 9** dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan hasil analisis nilai daya dukung *ultimate* dari beberapa metode. Metode Numerik dengan model Hoek Brown menjadi acuan nilai daya dukung *ultimate* karena parameter yang dibutuhkan berasal dari data sekunder di laboratorium yang merupakan data asli di lapangan. Daya dukung *ultimate* secara analitis yang mendekati dengan Metode Hoek Brown adalah Metode *Cylindrical Shear* karena sesuai penggunaan rumus yang cocok sesuai spesifikasi, diameter *helix* dibagi spasi

$helix \leq 3$ m. Sehingga daya dukung Hoek Brown mendekati dengan Metode *Cylindrical Shear*. Sedangkan untuk Mohr Coloumb nilai daya dukung *ultimate* yang nilainya mendekati secara analitis adalah Metode Individual Bearing, karena parameter Mohr Coloumb yang didapat dari persamaan kriteria pendekatan untuk mendapatkan nilai c dan ϕ dari hasil tersebut nilai daya dukung *ultimate* yang didapat dari Plaxis 3D nilai nya lebih besar dari pada Hoek Brown, dan untuk Metode *Individual Bearing*, nilai daya dukung *ultimate* mendekati dengan Mohr Coloumb karena metode ini menganggap bahwa masing masing plat *helix* memiliki daya dukung ujung (Q_b) nya masing masing sehingga daya dukung *ultimate* didapat mendekati Metode Mohr Coloumb.

Tabel 9 Kompilasi Nilai Daya Dukung *Ultimate*

Spasi [m]	D <i>helix</i> [m]	<i>Individual bearing</i> [kN]	<i>Cylindrical shear</i> [kN]	Mohr Coloumb [kN]	Hoek Brown [kN]
0,1	0,2	2.841,223	1.437,316	2.360,000	1.644,600
0,15	0,2	2.839,464	1.439,954	2.776,121	1.745,443
0,2	0,2	2.835,947	1.440,833	2.918,749	1.896,103
0,3	0,2	2.837,706	1.451,383	3.037,105	1.931,667

Dilihat dari **Tabel 10** persentase kenaikan nilai daya dukung karena pengaruh spasi antar *helix* untuk Metode *Cylindrical Shear* memiliki nilai rata-rata persentase kenaikan 0,46%; untuk model Mohr Coloumb didapat nilai persentase kenaikan daya dukung 23,33% dan untuk model Hoek Brown persentasi kenaikan daya dukung sebesar 12,96%. Untuk metode *Individual Bearing* dianggap tidak ada persentase kenaikan karena daya dukung Metode *Individual Bearing* pengaruh kuat terhadap daya dukung *ultimate* karena jumlah plat *helix* nya sehingga sedikit pengaruh persentase kenaikan daya dukung karena spasi *helix*.

Tabel 10. Persentase Kenaikan Nilai Daya Dukung Akibat Varisai Spasi *Helix*

Perbandingan Spasi <i>Helix</i> [m]	<i>Cylindrical Shear</i> [%]	Mohr Coloumb [%]	Hoek Brown [%]
0,1-0,15	0,18	17,63	6,13
0,1-0,2	0,24	23,67	15,29
0,1-0,3	0,98	28,69	17,45

Tabel 11. Persentasi Perbandingan Metode Daya Dukung

<i>Cylindrical</i> – (MC) [%]	<i>Cylindrical</i> – <i>Individual</i> [%]	<i>Cylindrical</i> – (HB) [%]
118,9	97,67	52,54
157,02	97,2	61,61
170,06	96,83	75,44
178,97	95,52	77,43

Pada **Table 11** dapat dilihat persentasi perbandingan nilai daya dukung *ultimate* antara *Cylindrical* (MC), *Cylindrical* (*Individual*), dan *Cylindrical* (HB). Dari persentasi metode *Cylindrical* dan HB terdapat perbandingan persentase nilai daya dukung *ultimate* yang tidak terlalu signifikan, sedangkan untuk metode *Cylindrical* dan Mohr Coloumb memiliki perbandingan persentase yang besar. **Tabel 12** menunjukkan rekapitulasi hasil daya dukung *ultimate* tarik.

Tabel 12. Rekapitulasi Hasil Daya Dukung *Ultimate* Tarik

Spasi [m]	Mohr Coloumb [kN]	Hoek Brown [kN]
0,1	431,68	360
0,15	440	368,4
0,2	445,16	388,30
0,3	450,97	398,4

Tabel 13. Persentase Kenaikan Nilai Daya Dukung Tarik Akibat Varisai Spasi *Helix*

Perbandingan Spasi Helix [m]	Mohr Coloumb [%]	Hoek Brown [%]
0,1-0,15	1,926	2,333
0,1-0,2	3,122	7,862
0,1-0,3	4,469	10,667

Daya dukung tarik hanya dilakukan di Plaxis 3D, dilihat dari **Tabel 13** terdapat kenaikan akibat variasi spasi antar *helix*. Dilihat pada **Tabel 13**, Mohr Coloumb memiliki rata-rata kenaikan 3% sedangkan Hoek Brown 7%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai pemodelan numerik fondasi *helical pile* dengan beberapa variasi jarak spasi antar *helix*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sesuai dengan rumusan masalah adakah pengaruh spasi antar *helix* mempengaruhi nilai daya dukung *helical pile*, dari analisis didapat menyimpulkan bahwa ada pengaruh terhadap daya dukung *helical pile* meskipun pengaruhnya tidak terlalu besar dimana kedalaman fondasi yang hanya 1 m dan variasi spasi *helix* yang perbedaannya tidak terlalu besar.
2. Terdapat perbedaan nilai daya dukung *ultimate* perhitungan secara analitis dan numerik. Metode elemen hingga dengan model Hoek Brown menjadi patokan nilai daya dukung *ultimate* karena parameter yang dibutuhkan berasal dari data sekunder di laboratorium yang merupakan data asli di lapangan. Daya dukung *ultimate* secara analitis yang mendekati dengan metode Hoek Brown adalah metode *Cylindrical Shear* karena sesuai penggunaan rumus yang cocok untuk diameter *helix* dibagi spasi *helix* ≤ 3 m. Sehingga daya dukung Hoek Brown mendekati dengan metode *Cylindrical Shear*.
3. Terdapat perbedaan nilai daya dukung *ultimate* Metode Hoek Brown dan Mohr Coloumb, nilai daya dukung Hoek Brown lebih besar dari pada Mohr Coloumb karena parameter Hoek Brown yang dibutuhkan berasal dari data sekunder di laboratorium yang merupakan data asli di lapangan, sedangkan untuk Mohr Coloumb didapat dari persamaan sehingga seakan akan nilai daya dukung *ultimate* didapat lebih besar.

5.2 Saran

Adapun, saran yang dapat diberikan yaitu:

1. Pemodelan fondasi *helical pile* sebaiknya dimodelkan di plaxis 3D dapat digambarkan semirip mungkin di lokasi di lapangan.

2. Untuk pemodelan *helical pile* dimensi kedalaman dan spasi *helix* lebih diperbesar lagi agar terlihat lebih jelas pengaruh terhadap daya dukung *ultimate*.
3. Untuk jenis tanah dapat divariasikan menjadi beberapa jenis model tanah agar mengetahui pengaruh daya dukung jika divariasikan jenis tanah yang berbeda.
4. Dalam penggunaan fondasi tiang *helical pile* dapat dibandingkan dengan fondasi tiang jenis yang lain dan dibandingkan nilai daya dukung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Willis D. 2009. How to Design Helical Piles per the 2009 International Building Code. Ram Jack Foundation Solution, USA.
- [2] Verhoef, P.N.W. (1994) Geologi Untuk Teknik Sipil. PT. Erlangga. Jakarta.
- [3] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. Proceedings of NARMS-Tac, 1(1), 267-273.
- [4] Hoek E. (1994) "Strength of rock and rock masses". ISRM News Journal, 2(2), 4-16.
- [5] Z. T. Bieniawski, Engineering Rock Mass Classifications. 1989.
- [6] Hoek, E. (2006). Practical Rock Engineering. Toronto s.n.
- [7] Vesic, A. S. (1963). Bearing Capacity of Deep Foundations in Sand. Hwy. Res. Record No. 39 (112-53)
- [8] Canadian Geotechnical Society, 2006. Canadian Foundation Engineering Manual (CFEM), 4th edition, The Canadian Geotechnical Society, Richmond, BC, Canada
- [9] B.M. (2012) Principles of Foundation Engineering. Edition. Fredericton: Canadian Geotechnical Society.
- [10] Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B.M. (2016). Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. India : Springer.
- [11] Look, B. G. (2007). Handbook of geotechnical investigation and design tables. Taylor & Francis.
- [12] Lutenecker, A., (2003). J. Scale Effect of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Material.
- [13] Marinos, P., Marinos, V., & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Underground works under special conditions, 13-21.