

## Analisis Pondasi Tiang Pancang Dengan Variasi Diameter dan Kedalaman Menggunakan Program 3D Berbasis FEM

Rizal M. Al Fatah<sup>1</sup>, Indra Nurtjahjaningtyas<sup>1,\*</sup>, Paksitya Purnama Putra<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Universitas Jember, Jember<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [indran.teknik@unej.ac.id](mailto:indran.teknik@unej.ac.id)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	12 Januari 2021	<i>Pile foundations in construction need to be analyzed using several methods. The method that can be used is the 3D Finite Element Method (FEM) analysis program. This method can overcome the limitations of the P-Y method that exists for a large area and approaches the actual combination of behavior. In this study, a simulation program was carried out on the diameter and depth of the pile, which was interpreted on the PDA test results with CAPWAP. From the results of the calculation of the carrying capacity of the permit using six interpreted modeling in the 3D FEM program, the best analysis and calculation is obtained, namely the pile foundation with a diameter of 0,6 meters and a depth of ± 54 meters, which produces a safety value of 2,721, Qijin 220,67 tons, and a total settlement of 0,2907 meters. Pile cap reinforcement D25-100 mm and raft D32-100 mm.</i>
Diperbaiki	09 Februari 2021	
Disetujui	09 Februari 2021	

*Keywords: pile foundation, 3D FEM, PDA test, CAPWAP.*

**Abstrak**  
Pondasi tiang pancang pada suatu konstruksi sangat perlu dilakukan analisa dengan menggunakan beberapa metode. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah program analisis *Finite Element Method (FEM) 3D*. Pada metode ini dapat mengatasi keterbatasan metode P-Y yang ada untuk area yang luas dan mendekati kombinasi perilaku yang sesungguhnya. Pada penelitian ini dilakukan simulasi program 3D pada diameter dan kedalaman tiang yang diinterpretasikan pada hasil uji PDA dengan CAPWAP. Dari hasil perhitungan daya dukung ijin menggunakan 6 pemodelan pada program 3D FEM yang telah diinterpretasikan, didapatkan analisis dan perhitungan yang terbaik yaitu pondasi tiang dengan diameter 0,6 meter dan kedalaman ± 54 meter yang menghasilkan nilai keamanan 2,721, Qijin 220,67 ton, dan penurunan total 0,2907 meter. Penulangan pilecap D25-100 mm dan raft D32-100 mm.

Kata kunci: pondasi tiang, 3D FEM, PDA test, CAPWAP.

### 1. Pendahuluan

Pondasi merupakan bagian dari struktur yang berfungsi meneruskan beban struktur atas pada lapisan tanah yang mempunyai daya dukung aman [1]. Analisis dan perhitungan pondasi selalu memerlukan pertimbangan-pertimbangan khusus agar mendapat kualitas dan keamanan yang baik bagi infrastruktur [2]. Selain metode empiris perhitungan dan analisa pondasi dapat dilakukan dengan program analisa 3D yang menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* dalam perhitungannya. Dengan adanya program analisis FEM 3D yang baik dapat mengatasi keterbatasan metode P-Y yang ada untuk area yang luas dengan mempertimbangkan efek tiga dimensi mendekati kombinasi perilaku yang sesungguhnya [3]. Program komputer geoteknik memudahkan analisis pondasi tiang untuk menghasilkan output yang dibutuhkan [4].

Metode Meyerhof dan Luciano Decourt dengan menggunakan SPT merupakan metode yang paling mendekati hasilnya dengan uji Pile Driving Analyzer (PDA) pada tanah lempung dan pada pondasi tiang pancang [5]. Analisis dan

perhitungan pondasi tiang pancang yang dilakukan dengan metode empiris dan dengan bantuan program 3D FEM yang akan diverifikasi dengan hasil dinamik tes dilapangan yaitu PDA Test dan CAPWAP.

Pengujian PDA adalah metode yang paling banyak digunakan untuk pengujian beban secara dinamik dan pengawasan pemancangan di dunia [5]. PDA akan menghasilkan keluaran berupa daya dukung ultimit pondasi ( $Q_u$ ). Penginputan data PDA yang dianalisis dengan CAPWAP akan menghasilkan keluaran berupa daya dukung ijin pondasi ( $Q_{ijin}$ ), daya dukung gesek tiang ( $Q_s$ ), daya dukung ujung tiang ( $Q_p$ ), penurunan total yang terjadi, dan penurunan maksimum yang terjadi pada tiang.

Berdasarkan uraian diatas perlu dilakukan analisis dan perhitungan pondasi dengan variasi diameter dan kedalaman tiang guna mengetahui hasil perhitungan dan analisis menggunakan program 3D berbasis *Finite Element Method (FEM)* yang mana tentunya diharapkan hasilnya perlu diinterpretasikan dengan hasil uji PDA dan CAPWAP.

Pada penelitian ini lokasi penelitian dilakukan pada proyek Tamansari Emerald Mansion Surabaya yang beralamat di Jalan Emerald Mansion TX 03 Citraland, Surabaya.

## 2. Metode

Untuk memulai penelitian diperlukan data untuk analisis dan perhitungan pondasi berupa data sekunder yang diperoleh dari instansi-instansi dan pihak-pihak terkait dalam penelitian ini. Data yang dibutuhkan adalah data pengujian N-SPT, beban yang ditahan oleh pondasi, data hasil pengujian Pile Driving Analyzer Test (PDA Test), spesifikasi tiang, serta denah dan detail pondasi.

Pengujian tanah yang dilakukan pada penelitian ini dengan 2 titik pengeboran (Borehole), yaitu BH-1 dan BH-2 yang jaraknya jauh diperlukan tahap stratigrafi dan korelasi data tanah. Pembuatan stratigrafi tanah/pembagian lapisan tanah dilakukan berdasarkan nilai N-SPT dan konsistensi tanah [6] yang diberikan pada **Tabel 1**. Asumsi data korelasi yang dibutuhkan sebagai input perhitungan diambil dari beberapa peneliti terdahulu di bidang geoteknik [1], [6], [7], [8], [9], [10].

Selain korelasi data tanah juga diperlukan data material untuk diinput pada program 3D berbasis FEM adapun data material dapat dilihat pada **Tabel 2** [11], Adapun material beton pada pondasi memiliki modulus elastisitas (E) yang dapat dihitung menggunakan rumus :

$$E_{\text{beton}} = 4700 \cdot \sqrt{f_c'} \quad (1)$$

dimana :

$f_c'$  = kuat tekan beton (mpa)

**Tabel 1.** Konsistensi Tanah berdasarkan Nilai SPT

Nilai SPT	Konsistensi	qu ( <i>Unconfined Compressive Strength</i> ) kN/m <sup>2</sup>	$\gamma_{\text{sat}}$ , kN/m <sup>3</sup>
<4	<i>Very soft</i>	<25	14-19
4-6	<i>Soft</i>	20-50	16-18
6-15	<i>Medium</i>	30-60	16-18
16-25	<i>Stiff</i>	40-200	16-20
>25	<i>Hard</i>	>100	>20

Sumber: J.E. Bowles [6]

Metode Meyerhoff dan Luciano Decourt digunakan sebagai acuan perhitungan pondasi tiang yang nantinya akan dimodelkan menggunakan program 3D FEM sehingga didapat daya dukung ijin tiang dari perhitungan menggunakan metode Meyerhoff dan Luciano Decourt. Rumus daya dukung ijin dapatkan dengan rumusan [12] sebagai berikut :

$$Q_{\text{ijin}} = \text{Pall} = \frac{Q_u}{S_f} \quad (2)$$

$$Q_u = \text{Pall} \times S_f \quad (3)$$

dimana :

$Q_{\text{ijin}}$  = Pall = daya dukung ijin tiang (ton)

$Q_u$  = kapasitas ultimit (ton)

$S_f$  = Nilai faktor keamanan

**Tabel 2.** Properti Material untuk Layer Tanah

Parameter	Name	Clayey/Sand (Brown)	Silty Sand	Clayey Sand (Red)	Deep Sand	Pile	Unit
Material Model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Linear-elastic	-
Material Behaviour	Type	Drained	Drained	Drained	Drained	Non-Porous	-
Unsaturated Soil Weight	$\gamma_{\text{unsat}}$	16.7	18.8	19.8	17.6	24	kN/m <sup>3</sup>
Saturated Soil Weight	$\gamma_{\text{sat}}$	16.7	18.8	19.8	20	-	kN/m <sup>3</sup>
Young's Modulus	E	9150	13000	13500	19000	29.2 10 <sup>6</sup>	Kpa
Poisson's Constant	$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-
Cohesion	c	13	12	14	17	-	Kpa
Friction Angle	$\phi$	26	23	23	23	-	°
Dilatancy Angle	$\Psi$	0	0	0	0	-	°
Interface Reduction Factor	<i>Rinter</i>	1	1	1	1	1	-

Sumber: Plaxis 3D Tutorial Manual Version 1[11]

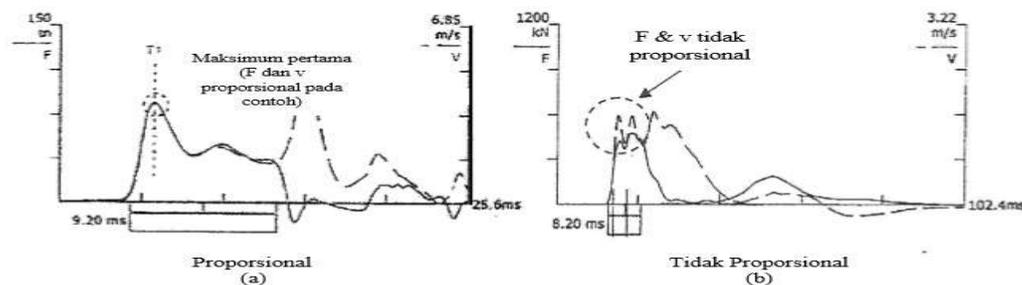
Selanjutnya dari perhitungan pondasi tiang dilakukan pemodelan menggunakan program 3D berbasis FEM untuk mendapatkan hasil yang mendekati keadaan aslinya yaitu 6 tipe pemodelan dengan variasi diameter tiang dan kedalaman tiang yang dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Variasi Model Pondasi

Nama Model	Diameter Tiang (m)	Kedalaman Tiang (m)
Model 1	0,5	50
Model 2	0,5	52
Model 3	0,5	54
Model 4	0,6	50
Model 5	0,6	52
Model 6	0,6	54

Pemodelan dilakukan dengan 4 tahapan konstruksi yaitu pemasangan tiang, pengecoran raft dan pilecap, bekerjanya gaya yang ditahan pondasi, dan perhitungan *Safety factor*. Kalkulasi pemodelan akan mengalami kegagalan apabila nilai *safety factor* kurang dari 1, maka diperlukan pengecekan kembali pada pemodelan agar pemodelan dapat selesai dalam melakukan kalkulasi lalu data dapat dianalisa.

Interpretasi analisis dan perhitungan pondasi tiang menggunakan program 3D FEM dengan data PDA test yang telah dikonfirmasi dengan metode *Case Wave Analyze Program* (CAPWAP). Analisa didapatkan dari pengujian PDA berupa F dan v untuk memberikan hasil analisa yang lebih rinci dan detail. Pada Konversi Transportasi Louisiana hasil analisis CAPWAP dari pengujian PDA didapat nilai daya dukung ultimate CAPWAP mendekati  $\pm 20\%$  dari hasil Static Loading Test. Kurva hasil pengujian PDA dapat dilihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Kurva Hasil Uji PDA

Sumber: *Interpretation of HSDPT, Work Instructions for Engineers, G&P Geotechnics SDN BHD, 2009.*

Analisa daya dukung dari hasil pemodelan 3D dibandingkan dengan analisa daya dukung yang menggunakan metode CAPWAP dari pengujian PDA didapatkan analisis dan perhitungan pondasi terbaik dengan bantuan program 3D berbasis *Finite Element Method* (FEM).

Setelah dari enam model dengan variasi diameter dan kedalaman ditemukan analisis dan perhitungan terbaik menggunakan program 3D FEM dan PDA test, selanjutnya dilakukan perhitungan dan penggambaran detail penulangan pondasi dengan berpedoman pada 2847:2013 SNI [13].

### 3. Hasil dan Pembahasan

Analisis dan perhitungan pondasi tiang dilakukan pada proyek Tamansari Emerald Mansion Surabaya dengan bantuan program 3D berbasis *Finite Element Method* (FEM) lalu dilakukan interpretasi menggunakan PDA test dan metode CAPWAP.

Pemodelan dan kalkulasi program 3D dapat dilakukan setelah perhitungan pondasi tiang menggunakan metode

seperti metode perhitungan pondasi dari Meyerhoff dan Luciano Decourt. Hal tersebut dikarenakan pemodelan memerlukan perkiraan pondasi yang dibutuhkan untuk menahan beban sampai keadaan aman rencana (*reencana Safety Factor*).

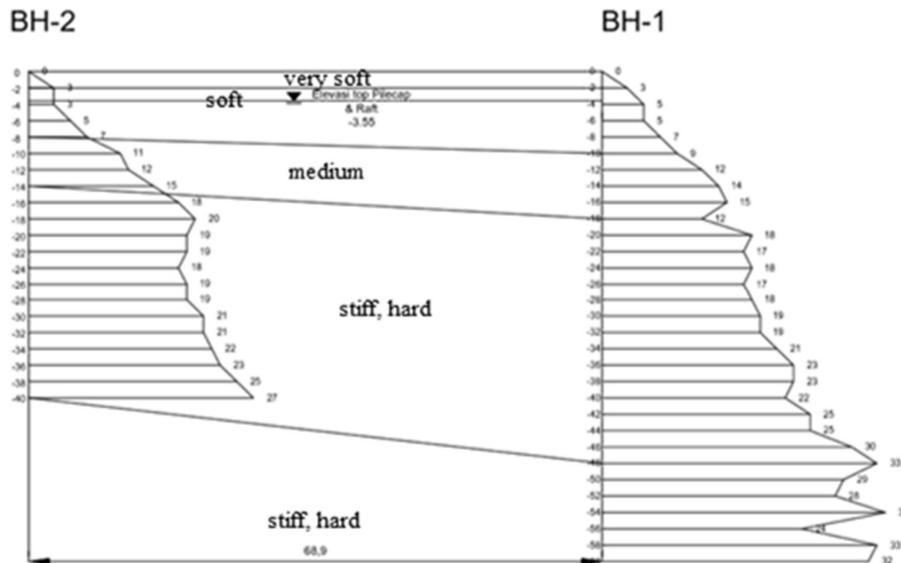
Daya dukung ijin dari kalkulasi menggunakan program 3D FEM dapat dihitung dengan membandingkan daya dukung ijin program dengan daya dukung perhitungan pondasi menggunakan metode empiris Meyerhoff dan Luciano Decourt dengan persamaan 2 dan 3. Pemodelan perhitungan pondasi terbaik dipilih berdasarkan interpretasi Qijin program dan Qijin PDA test menggunakan CAPWAP. Dan perhitungan tulangan lentur pelat pada pondasi berpedoman pada 2847:2013 SNI [13].

### Stratigrafi Tanah dan Korelasi Data Tanah

Letak tiang yang berada diantara 2 titik uji SPT memerlukan pengklasifikasian tanah sebagai acuan parameter-parameter pada program 3D FEM. Stratigrafi

dilakukan dengan membagi lapisan tanah sesuai konsistensi tanah yang dapat dilihat pada **Tabel 1** oleh [6]. Sehingga

didapatkan 5 lapisan tanah dari hasil pengklasifikasian tanah BH1 dan BH2 seperti pada **Gambar 2** dan **Tabel 4**.



**Gambar 2.** Pembagian Lapisan Tanah BH1 sampai BH2

**Tabel 4.** Pembagian Lapisan Tanah BH1 Sampai BH2

Nama Lapisan	Konsistensi	Nilai SPT
Lapisan 1	Very Soft	<4
Lapisan 2	Soft	4-6
Lapisan 3	Medium	6-15
Lapisan 4	Stiff, Hard	16-25, >25
Lapisan 5	Stiff, Hard	16-25, >25

Pada **Gambar 2** dan **Tabel 4** menunjukkan tanah dari bore-hole 1 dan borehole 2 memiliki konsistensi very soft sampai stiff-hard dengan nilai SPT <4 sampai >25.

Korelasi tanah tiap-tiap lapisan dilakukan setelah hasil pembagian lapisan tanah didapatkan, yang mana data korelasi tiap lapisan tersebut diperlukan untuk pemodelan perhitungan, analisis dan kalkulasi pada program 3D FEM sebagai nilai parameter-parameter tanah, sehingga didapatkan hasil korelasi tanah pada lapisan 1 sampai lapisan 5 seperti pada **Tabel 5**. Berikut contoh perhitungan korelasi tanah antara BH1 dan BH2:

- Menentukan Nilai rata-rata NSPT BH1 dan BH2  
Contohnya lapisan lempung kaku kedalaman BH1 12m - 18m dan BH2 10m - 14m memiliki nilai SPT 12,96 . Nilai SPT tersebut didapat dengan cara :

$$N-SPT = \frac{(XNSPT\ BH1) + (XNSPT\ BH2)}{2}$$

$$N-SPT = \frac{\left(\frac{12+14+15+12}{4}\right) + \left(\frac{11+12+15}{3}\right)}{2}$$

$$N-SPT = \frac{(13,25) + (12,67)}{2}$$

$$= 12,96$$

- NSPT Terkoreksi BH1 dan BH2  
NSPT Terkoreksi =  $15 + 0,5 \cdot (N - 15)$   
 $= 15 + 0,5 \cdot (12,96 - 15)$   
 $= 13,98$
- Menentukan nilai berat isi jenuh tanah ( $\gamma_{sat}$ ). Nilai tersebut didapat dengan menggunakan interpolasi. Nilai berat isi jenuh tanah ( $\gamma_{sat}$ ) untuk NSPT 13,98 adalah  $17,77\text{ kN/m}^3$  atau  $1,78\text{ g/cm}^3$ .
- Menentukan berat isi efektif tanah ( $\gamma'$ ).  
 $\gamma' = \text{Berat isi jenuh tanah} - \text{Berat isi air}$   
 $= 17,77 - 10$   
 $= 7,77\text{ kN/m}^3$  atau  $0,78\text{ g/cm}^3$

Akan tetapi untuk nilai yang dimasukkan pada program 3D FEM  $\gamma_{unsat}$  didapatkan dengan:

$$\gamma_{unsat} = \gamma_{sat} - 2$$

$$= 17,77 - 2$$

$$= 15,77\text{ kN/m}^3$$

Hal ini dikarenakan pada program 3D FEM dipilih dengan tipe Undrained tipe C.

5. Menentukan nilai  $c$ 

Untuk menentukan nilai  $c$  harus didapatkan nilai *Unconfined Compressive Strength* ( $q_u$ ) dan nilai  $C_u$  terlebih dahulu. Nilai *Unconfined Compressive Strength* ( $q_u$ ) didapat dari tabel 2.3 menggunakan interpolasi. Nilai *Unconfined Compressive Strength* ( $q_u$ ) untuk  $\gamma_{sat}$  17,77 kN/m<sup>3</sup> adalah 53,06 kN/m<sup>2</sup>. Dan nilai  $c_u$  didapatkan dengan cara:

$$\begin{aligned} C_u &= 0,5 \cdot q_u \\ &= 0,5 \cdot 53,06 \\ &= 26,53 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Lalu nilai  $C$  didapatkan dengan cara:

$$\begin{aligned} c &= \frac{2}{3} \cdot q_u \\ &= \frac{2}{3} \cdot 26,53 \\ &= 18,7 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

6. Menentukan nilai *Young Modulus* ( $E$ ). Nilai tersebut didapat dari tabel 2.5 menggunakan interpolasi. Nilai *Young Modulus* ( $E$ ) untuk  $\gamma_{sat}$  17,77 kN/m<sup>3</sup> adalah 5591,08 kN/m<sup>2</sup>.
7. Menentukan angka poisson ( $V_u$ ). Nilai tersebut didapat dari tabel 2.6 menggunakan interpolasi. Nilai angka poisson ( $V_u$ ) untuk NSPT terkoreksi 13,98 adalah 0,46.

**Tabel 5.** Hasil Korelasi Lapisan BH1 sampai BH2

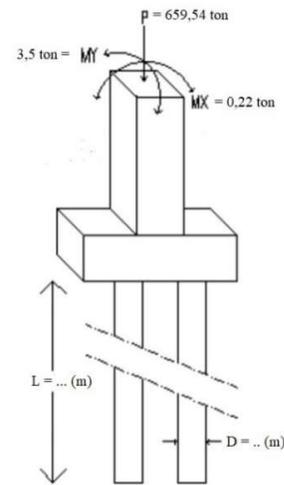
Nomor Lapisan	N-SPT Terkoreksi	$\gamma_{unsat}$ kN/m <sup>3</sup>	$c$ kN/m <sup>2</sup>	$E$ kN/m <sup>2</sup>	$V_u$
1	3	13	1.67	2415.0	0.50
2	10.38	14.97	14.86	4623.96	0.49
3	13.98	15.77	17.69	5591.08	0.46
4	18.18	14.97	26.24	4618.97	0.43
5	22.50	16.89	51.85	9391.67	0.43

### Perhitungan Pondasi Tiang

Dalam merencanakan pondasi tiang diperlukan beban aksial, moment x, dan momen y hasil rekapitulasi beban pada as kolom terbesar. Seperti pada penelitian ini beban terbesar terdapat pada kolom as E6 sebesar 659,54 ton, 0,22 ton, dan 3,5 ton. **Gambar 3** menjelaskan gaya bekerja pada pondasi.

Kapasitas daya dukung pondasi tiang dengan metode Meyerhoff dan Luciano Decourt dengan persamaan 2 dan 3 dengan variasi diameter dan kedalaman seperti yang telah disajikan pada **Tabel 2**. Dengan 6 model menghasilkan daya dukung ijin ( $Q_{ijin}$ ) pondasi pada model 1 sebesar 181,88 ton, model 2 sebesar 190,48 ton, model 3 sebesar 199,32 ton, model 4 sebesar 222,49 ton, model 5 sebesar 232,85 ton, dan model 6 sebesar 243,3 ton. Pada **Gambar 4** menyajikan  $Q_{ijin}$  mulai kedalaman 0-60m dengan variasi diameter 0,5 meter

(garis grafik warna merah) dan 0,6 meter (garis grafik warna biru).



**Gambar 3.** Sketsa Gaya yang Bekerja pada Pondasi

Daya dukung ijin selanjutnya digunakan untuk menghitung kebutuhan tiang pada 1 as kolom, seperti pada as E6 dengan gaya yang bekerja 659,54 ton, 0,22 ton, dan 3,5 ton pada model 6 diperlukan tiang berjumlah 4 pada as E6.

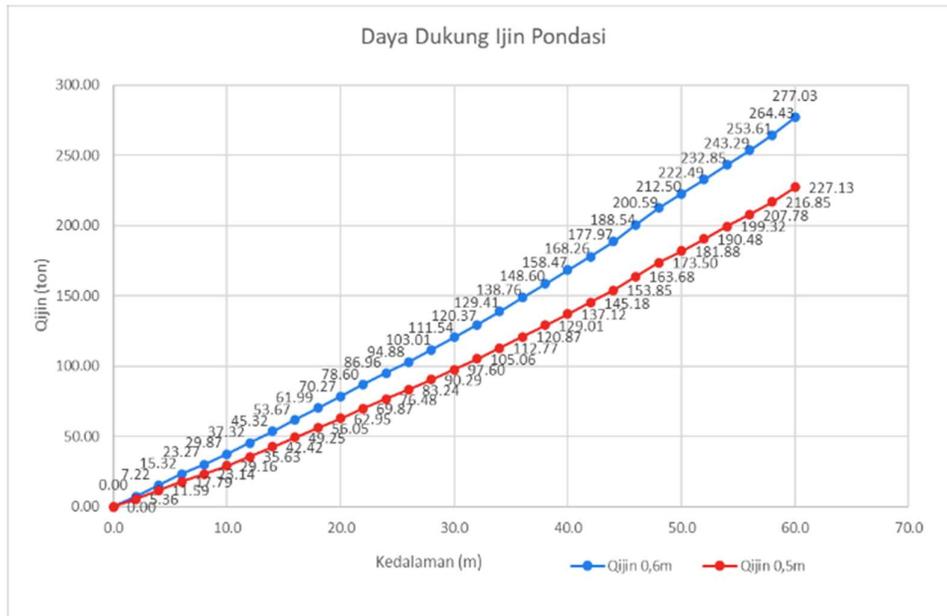
Analisis penurunan pondasi diperlukan agar dapat diketahui perkiraan penurunan pondasi yang terjadi akibat dari beban yang bekerja ketika infrastruktur mulai beroperasi atau digunakan. Dari 6 model didapatkan penurunan konsolidasi rata-rata pada model 1 sebesar 0,920 m, model 2 sebesar 0,858 m, model 3 sebesar 0,840 m, model 4 sebesar 0,917 m, model 5 sebesar 0,911 m, dan model 6 sebesar 0,8821 m. Pada **Gambar 5** menyajikan grafik penurunan rata-rata model 1 sampai model 6.

Pada **Gambar 5** garis grafik berwarna biru memiliki penurunan lebih rendah dibandingkan garis grafik berwarna merah dikarenakan pondasi menggunakan diameter 0,6 meter, yang artinya semakin besar diameter penurunan yang terjadi maka semakin rendah dikarenakan daya dukung ijin selimut dapat menahan beban dan penurunan yang terjadi.

### Pemodelan Pondasi Dengan Program 3D FEM

Pemodelan dilakukan dengan acuan desain 6 model. Pemodelan pada program 3D FEM meliputi borehole, tiang pondasi, pelat raft maupun pilecap, gaya yang bekerja, dan tentu tanah dapat dilihat pada **Gambar 6** pemodelan pondasi tiang pada model 6.

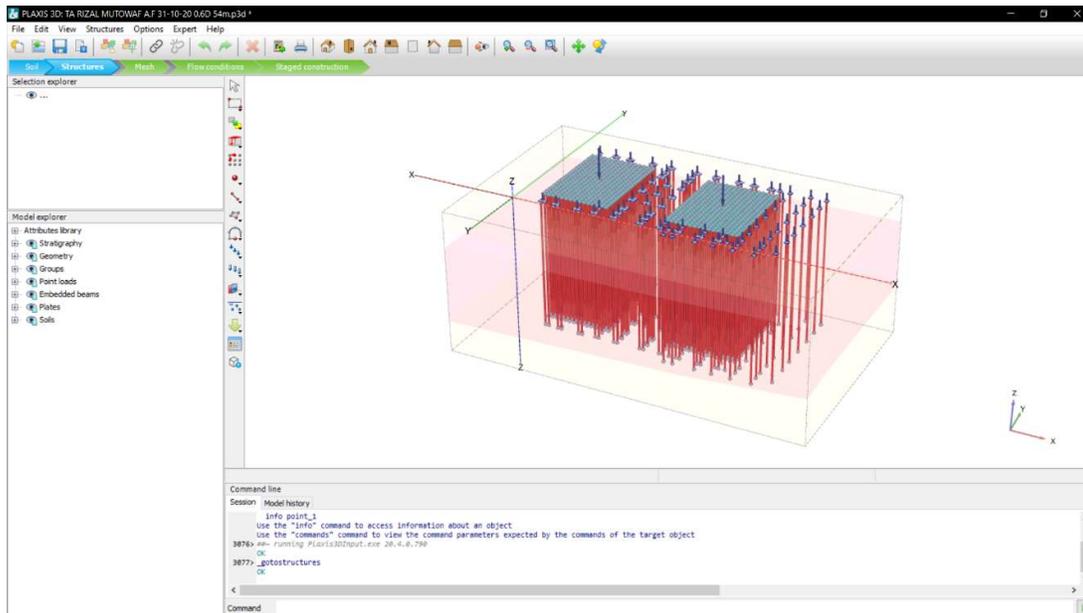
Setelah dilakukan pemodelan selanjutnya dilakukan analisis dan kalkulasi program pada model 6 sehingga didapatkan nilai *safety factor* 2,721, dan penurunan elastis pondasi 0,291 m dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.



Gambar 4. Grafik Daya Dukung Ijin Pondasi



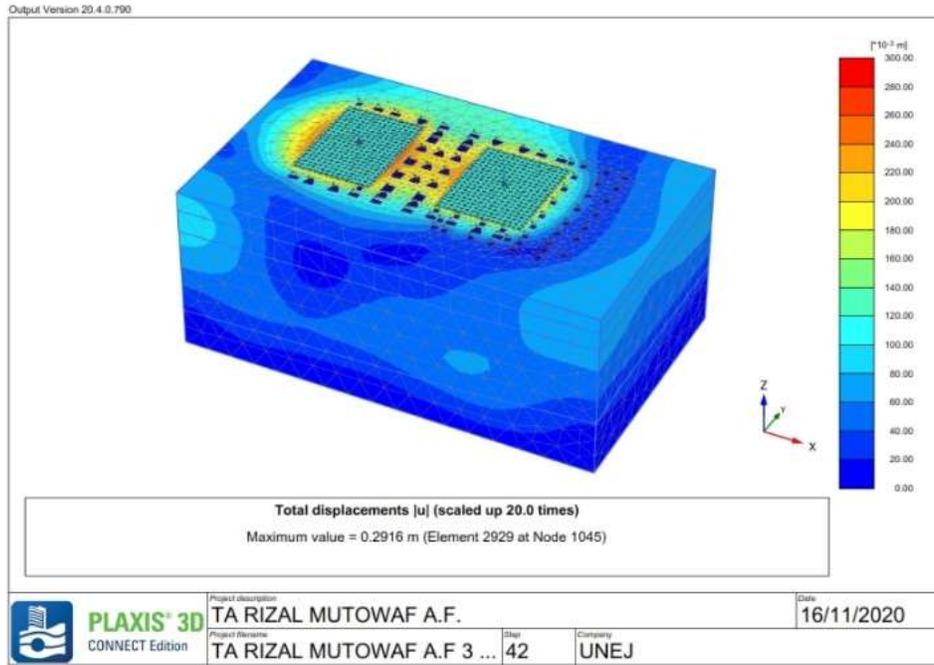
Gambar 5. Grafik Rerata Penurunan Pondasi



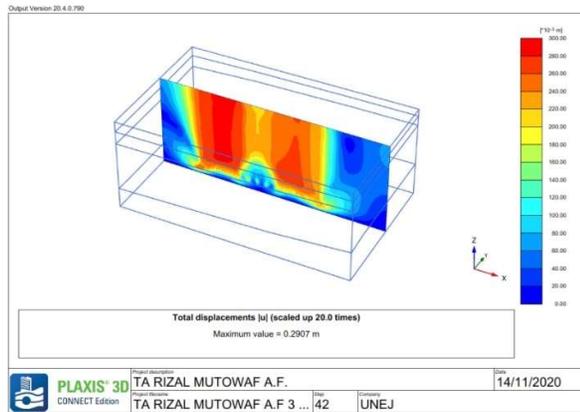
Gambar 6. Pemodelan pondasi

Name	Value
Cavitation cut-off	<input type="checkbox"/>
Cavitation stress	100.0 kN/m <sup>2</sup>
<b>Numerical control parameters</b>	
Solver type	Picos (multicore iterative)
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use compression for result files	<input type="checkbox"/>
Use default iter parameters	<input checked="" type="checkbox"/>
Max steps	100
Tolerated error	0.01000
Over-relaxation factor	1.200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On
Use line search	<input type="checkbox"/>
<b>Reached values</b>	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	1.720E-3
ForceX - Reached total force X	0.000 kN
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN
ForceZ - Reached total force Z	0.000 kN
Pmax - Reached max pp	0.000 kN/m <sup>2</sup>
IM <sub>stage</sub> - Reached phase proportior	0.000
IM <sub>weight</sub> - Reached weight proporti	1.000
IM <sub>sf</sub> - Reached safety factor	2.721

Gambar 7. Nilai Safety Factor pada Program 3D FEM



Gambar 8. Penurunan Pondasi Tiang pada Program 3D FEM



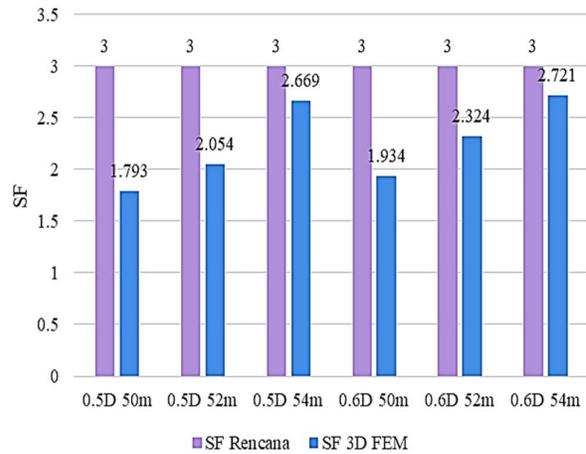
Gambar 9. Potongan Melintang Pemodelan Pondasi

Dapat dilihat pada Gambar 9 potongan melintang tanah warna merah berada pada bawah raft dengan penurunan terbesar terjadi pada tengah raft yang artinya tekanan terbesar terjadi pada pondasi raft.

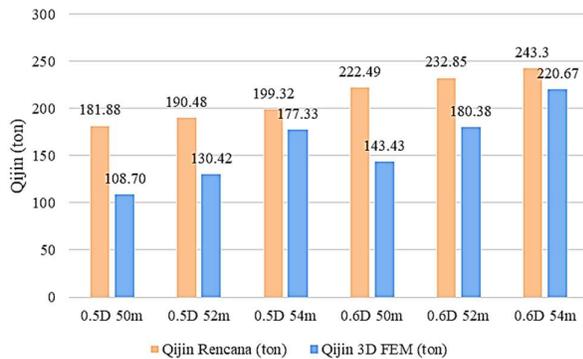
**Metode Interpretasi Program 3D FEM dengan CAPWAP pada PDA Test**

Program 3D FEM tidak dapat memunculkan hasil daya dukung secara langsung didapat, sehingga untuk mendapatkan hasil daya dukung ijin harus dihitung

menggunakan persamaan 2 dan 3. Dari 6 model didapatkan daya dukung ijin program 3D pada model 1 sebesar 108,7 ton, model 2 sebesar 130,42 ton, model 3 sebesar 177,33 ton, model 4 sebesar 143,43 ton, model 5 sebesar 180,38 ton, dan model 6 sebesar 220,67 ton. Perbandingan analisis dan perhitungan pondasi menggunakan metode Meyerhof dan Luciano Decourt dengan program 3D FEM disajikan pada Gambar 10-12.



Gambar 10. Grafik Perbandingan SF



Gambar 11. Grafik Perbandingan Q<sub>ijin</sub>

Daya dukung ijin program didapatkan dengan persamaan 2 dan 3 seperti contoh perhitungan daya dukung ijin program pada model 6 berikut:

$$Q_{ijin\ Rencana} = 243,3\ ton$$

$$SF\ Rencana = 3$$

$$SF\ program = 2,721\ (Gambar\ 7)$$

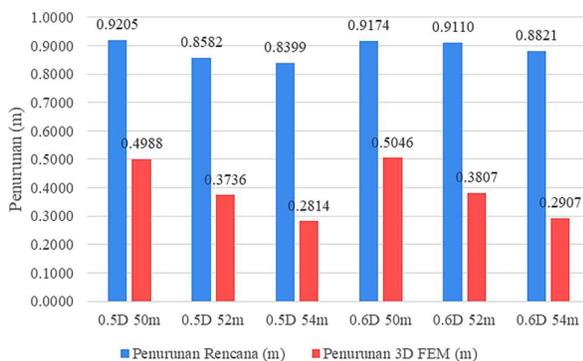
$$Q_u\ Rencana = Q_u\ Program\ 3D\ FEM$$

$$\frac{Q_{ijin\ Rencana}}{SF\ Rencana} = \frac{Q_{ijin\ Program}}{SF\ Program}$$

$$\frac{243,3}{3} = \frac{Q_{ijin\ Program}}{2,721}$$

$$Q_{ijin\ Program} = \frac{243,3}{3} \times 2,721$$

$$Q_{ijin\ Program} = 220,67\ ton$$



Gambar 12. Grafik Perbandingan Penurunan Pondasi

Untuk mendapatkan analisis dan perhitungan pondasi terbaik diperlukan data hasil analisis daya dukung ijin menggunakan metode CAPWAP pada PDA Test, Gambar 13 Menyajikan hasil analisis CAPWAP pada 3 titik PDA Test.

Pondasi terbaik didapat pada model 6 dengan diameter 0,6 meter dan kedalaman pondasi 54 meter, hal tersebut didasarkan pada nilai Q<sub>ijin</sub> program 3D FEM model 6

sebesar 220,67 ton yang mana Q<sub>ijin</sub> tersebut batas minimum ditinjau dari hasil analisis CAPWAP pada PDA Test yaitu sebesar 213 ton.

Berdasarkan 2847:2013 SNI [13] untuk perhitungan tulangan lentur pelat pada raft didapat D32-100 mm dan pada pilecap didapat D25-100 mm, dapat dilihat pada Tabel 6.

No. tiang yang diuji	IP10	IP18*	IP25
Tanggal Pengujian	22/10/2018	22/10/2018	22/10/2018
Tanggal Pemancangan	21/09/2018	18/09/2018	12/09/2018
Penampang tiang (cm)	Ø 60	Ø 60	Ø 60
Panjang tiang total (m)	36.9+1.56	44.0	45.0
Segmen tiang (m)	16+16+4.9+1.56	16+16+12	16+16+13
Panjang tiang dibawah transducer (m)	36.6	43.1	44.0
Panjang tiang terbenam (m)	36.3	42.8	43.6
Tipe hammer/ berat hammer (ton)	Drop/ ± 4.2	Drop/ ± 4.2	Drop/ ± 4.2
Tinggi jatuh (m)	± 2.0-2.3	± 2.0-2.5	± 2.5-3.0
Wave speed (m/s)	4000	4000	4000
File density (t/m <sup>3</sup> )	2.45	2.45	2.45
Energi transferred to pile, EMX (tonm)	6.40	7.67	7.06
Qujing termobilisir CAPWAP (ton)	31.3	29.6	28.7
Qselmut termobilisir CAPWAP (ton)	428.8	395.4	397.7
Ultimate termobilisir CAPWAP (ton)	460.1	425.0	426.4
Q <sub>ijin</sub> termobilisir dengan SF=2 (ton)	230	213	213

\* Pengujian titik IP18 kepala tiang sedikit pecah pada saat pengujian berlangsung

Gambar 13. Hasil Analisis CAPWAP pada PDA Test

Sumber: CV. Engineering Konsultan

Tabel 6. Rekapitulasi Penulangan Pilecap dan Raft

Tipe Pilecap	Jumlah Tiang	Mu (kNm)	Diperlukan Tulangan	Tulangan Terpasang
P1	1	87.08	D25 - 106	D25 - 100
P1b	1	87.08	D25 - 106	D25 - 100
P2	2	22.46	D25 - 106	D25 - 100
P2b	2	22.46	D25 - 106	D25 - 100
P3	3	6.47	D25 - 106	D25 - 100
P3b	3	6.47	D25 - 106	D25 - 100
P4	4	34.32	D25 - 106	D25 - 100
P4b	4	34.32	D25 - 106	D25 - 100
R1	315	9861.13	D32 - 113	D32 - 100
R2	320	6701.21	D32 - 113	D32 - 100

#### 4. Simpulan

Perhitungan pondasi tiang menggunakan Meyerhoff dan Luciano Decourt dengan menggunakan program 3D FEM mempunyai perbedaan yang signifikan dapat dilihat dari selisih nilai keamanan (SF) paling besar yaitu 30%, selisih Q<sub>ijin</sub> paling besar yaitu 35,5%, serta selisih penurunan paling besar 67%. Selisih yang cukup besar tersebut dikarenakan analisis dan perhitungan pondasi menggunakan Meyerhoff dan Luciano Decourt diperuntukan desain pondasi tunggal dan kelompok sedangkan menggunakan program 3D FEM pada penelitian diperuntukan untuk seluruh pondasi pada suatu infrastruktur.

Perhitungan pondasi tiang spunpile menggunakan program 3D FEM dengan variasi diameter 0,5 dan 0,6 m serta kedalaman 50 m, 52 m, dan 54 m pada masing-masing diameter didapatkan pondasi yang terbaik yaitu pondasi tiang dengan diameter 0,6 meter dan kedalaman  $\pm$  54 meter.

Pemilihan pondasi tiang tersebut didapatkan dari hasil interpretasi antara analisis dan perhitungan metode Meyerhof, Luciano Decourt dan program 3D FEM dengan hasil uji dan analisis PDA menggunakan metode CAPWAP sehingga perhitungan pondasi menghasilkan nilai keamanan 2,721, Qijin 220,67 ton, penurunan total 0,2907 meter, serta penurunan elastis sebesar 0,0284 m yang artinya memenuhi syarat penurunan maksimal ( $S_{ijin}$ ) pada tanah lempung yaitu 0,065 m.

Penulangan pilecap dan raft didapatkan dengan cara perhitungan tulangan lentur pelat sehingga pada semua tipe pilecap P1, P1b, P2, P2b, P3, P3b, P4, dan P4b didapatkan tulangan D25-100 mm, sedangkan untuk penulangan raft tipe R1 dan R2 didapatkan penulangan D32-100 mm.

#### Daftar Pustaka

- [1] J. . Bowles, *Foundation Analysis and Design*. 1997.
- [2] N. Hutahaean and A. M. Hia, "Evaluasi Perencanaan Abutmen dan Pondasi pada Proyek Jembatan di Bawadasi Kecamatan Lahomi Kab. Nias Barat," *J. Tek.*, vol. 8, no. 1, pp. 36–48, 2019.
- [3] Y. Kim and S. Jeong, "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction," *Comput. Geotech.*, vol. 38, no. 2, pp. 248–257, 2011, doi: 10.1016/j.compgeo.2010.12.001.
- [4] A. S. Nugraha and A. Refanie, "Analisis Beban-Penurunan pada Pondasi Tiang Bor Berdasarkan Hasil Uji Beban Tiang Terinstrumentasi dan Program GEO5," *J. Tek. Sipil*, vol. 11, no. 2, pp. 76–168, 2015.
- [5] A. Yusti, "Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang diverifikasi dengan Hasil Uji Pile Driving Analyzer Test dan CAPWAP ( Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung Kantor Bank Sumsel Babel di Pangkalpinang )," *J. Fropil*, vol. 2, no. 1, pp. 19–31, 2014.
- [6] J. . Bowles, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, 2nd ed. USA: McGraw-Hill, Inc., 1984.
- [7] W. T. Lambe and R. V. Whitman, "Soil Mechanics." p. 236, 1969.
- [8] B. M. Das, *Solutions Manual to Accompany Principles of Foundation Engineering*. Pws Publishing Company, 1995.
- [9] W. Teng, "Foundation Design Civil Engineering and Engineering Mechanics Series." p. 466, 1962.
- [10] H. Wahyudi, "Daya Dukung Pondasi Dangkal." Surabaya, p. 70, 1999.
- [11] P. B. V, *Plaxis 3D foundation Tutorial Manual Version 1*. Netherlands.
- [12] B. M. Das, *Principle of Foundation Engineering*. USA: CENGAGE Learning, 2011.
- [13] 2847:2013 SNI, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung," *Badan Stand. Indones.*, pp. 1–265, 2013.