

Evaluasi Daya Dukung Pondasi *Boredpile* Menggunakan Metode Numerik 3 Dimensi dengan Hasil Uji di Lapangan

ANDIKA GERRY HABRIANTO, DESTI SANTI PRATIWI, IMAM ASCHURI

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: destisantipratiwi@itenas.ac.id

ABSTRAK

Pondasi tiang bor merupakan salah satu jenis pondasi dalam yang sudah sangat populer, terutama untuk pembangunan gedung-gedung megastruktur. Pada perencanaan suatu pondasi tiang sangat penting dilakukan analisis daya dukung dan penurunan untuk memastikan bahwa pondasi tersebut mampu menahan beban struktur di atasnya. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pondasi tiang bor menggunakan pemodelan numerik 3 dimensi dalam Program Plaxis. Pada pemodelan tiang bor digunakan model struktur Soil Cluster dan Embedded Beam, sedangkan pemodelan tanah menggunakan model tanah Hardening Soil (HS) dan Mohr Coulomb (MC). Hasil dari analisis numerik berupa nilai daya dukung dan penurunan ini akan dibandingkan dengan hasil pengujian PDA dan Beban Statik di lokasi pekerjaan Pembangunan Kantor PT. Daya Adicipta Mustika Bandung.

Kata kunci: pondasi tiang, daya dukung, penurunan, model numerik, uji PDA

ABSTRACT

Bored pile foundation is a popular deep foundation type, mainly for the construction of megastructural buildings. For designing a pile foundation, it is important to analyze the bearing capacity and settlement to ensure that the foundation is able to restrain the structure load. The objective of this paper is to analyze bored pile foundation using 3D numerical model in Plaxis software. In the bored pile modeling the Soil Cluster and Embedded Beam structural models are used, while the soil model uses Hardening Soil (HS) and Mohr Coulomb (MC). The numerical analysis results of bearing capacity and settlement will be compared with PDA and Static Loading test result at the PT. Daya Adicipta Mustika Bandung.

Keywords: pile foundation, bearing capacity, settlement, numerical model, PDA test

PENDAHULUAN

Pada bangunan gedung megastruktur, pondasi yang dalam dan kuat sangat dibutuhkan. Pondasi berfungsi untuk menyalurkan beban yang bekerja di atasnya kepada tanah dasar yang memiliki daya dukung yang tinggi. Analisis pondasi perlu dilakukan secara teliti baik itu dalam menentukan daya dukung maupun deformasinya agar tidak terjadi keruntuhan secara menyeluruh pada bangunan gedung tersebut.

Menurut Baars dan Niekerk (1999) untuk menentukan kapasitas dukung ultimate dari suatu pondasi tiang, sering kali digunakan hubungan empirik antara kekuatan tanah dan gesekan selimut. Selain itu terdapat metode lain untuk menghitung kuat geser dan tegangan pada tanah yaitu melalui pengukuran perlawanan tanah in-situ berdasarkan nilai q_c (tahanan ujung) hasil pengujian CPT (Baars dan Niekerk, 1999).

Metode-metode yang disebutkan di atas merupakan metode analitik yang sudah banyak digunakan oleh para insinyur. Semakin berkembangnya ilmu penelitian, cara yang digunakan untuk menganalisis kekuatan pondasi pun semakin meningkat. Saat ini sudah ada Metode Numerik yang dapat digunakan untuk menganalisis kekuatan pondasi. Salah satu Metode Numerik yang dapat digunakan, yaitu metode berbasis elemen hingga. Metode ini sudah banyak digunakan untuk menganalisis kasus pondasi dalam, baik itu menentukan daya dukung maupun penurunan yang terjadi pada pondasi.

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan analisis daya dukung dan penurunan pondasi tiang bor. Analisis dilakukan secara numerik dengan menggunakan Program Plaxis 3 dimensi yang berbasis Metode Elemen Hingga. Pada Program Plaxis, tiang bor dimodelkan dengan menggunakan *soil cluster* dan *embedded beam row* sehingga tujuan dari penelitian ini yaitu membandingkan nilai daya dukung dan penurunan pondasi tiang bor berdasarkan pendekatan tiang bor. Hasil analisis tersebut juga akan dibandingkan dengan hasil Uji PDA dan Beban Statik di lapangan.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. PARAMETER TANAH

Menurut Murthy (2006) tanah didefinisikan sebagai agregat alami dari butiran mineral, dengan atau tanpa bahan organik, yang dapat dipisahkan dengan cara mekanis. Sebaliknya batu dianggap sebagai agregat alami dari butiran mineral yang dihubungkan oleh gaya kohesif yang kuat dan permanen. Proses pelapukan dari batuan mengurangi gaya kohesif yang mengikat butiran mineral dan menyebabkan disintegrasi massa yang lebih besar menjadi partikel yang lebih kecil. Tanah terbentuk dari proses pelapukan batuan induk. Pelapukan batuan mungkin terjadi akibat disintegrasi mekanis, dan/ atau dekomposisi kimia (Murthy, 2006).

Parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil korelasi melalui nilai N-SPT dan jenis tanah. Berikut merupakan tabel yang digunakan untuk korelasi beberapa parameter tanah (**Tabel 1** sampai dengan **Tabel 3**).

Tabel 1. Korelasi Nilai N-SPT dengan Parameter Tanah

Tanah tidak kohesif				
N	0 – 10	11 – 30	30 – 50	> 50
Berat isi (γ) [kN/m ³]	12 – 16	14 – 18	16 – 20	18 – 23
Sudut geser (ϕ) [°]	25 – 32	28 – 36	30 – 40	> 35
Kepadatan	Lepas	Sedang	Padat	Sangat padat
Tanah kohesif				
N	< 4	4 – 6	6 – 15	16 – 25
Berat isi (γ) [kN/m ³]	14 – 18	16 – 18	16 – 18	16 – 18
Sudut geser (ϕ) [°]	20 – 50	20 – 50	30 – 60	40 – 200
Konsistensi	Sangat lunak	Lunak	Sedang	Kaku

Sumber: Look (2007)

Tabel 2. Korelasi Jenis Tanah dengan Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam

Type	Deskripsi Tanah	Rentang Berat Isi [kN/m ³]	
		Kering	Jenuh
<i>Cohesionless</i>	<i>Soft sedimentary (chalk, shale, siltstone, coal)</i>	12	18
<i>Compacted Broken rock</i>	<i>Hard sedimentary (Conglomerate, sandstone)</i>	14	19
	<i>Metamorphic</i>	18	20
	<i>Igneous</i>	17	21
<i>Cohesionless</i>	<u>Sangat lepas</u>	14	17
	Lepas	15	18
Pasir dan gravel	Padat sedang	17	20
	Padat	19	21
	Sangat Padat	21	22
<i>Cohesionless</i>	Lepas		
	Gradasi seragam	14	17
Pasir	Gradasi baik	16	19
	Padat		
	Gradasi seragam	18	20
	Gradasi baik	19	21
Kohesif	Lunak – organik	8	14
	Lunak – tidak organik	12	16
	Kaku	16	18
	Keras	18	20

Sumber: Look (2007)

Tabel 3. Deskripsi Konsistensi Tanah Lempung Berdasarkan Nilai N-SPT

Material	Deskripsi	SPT – N (tumbukan/ 300 mm)	qu [kPa]
Lempung	Sangat lunak	< 2	0 – 12
	Lunak	2 – 5	12 – 25
	Tegas	5 – 10	25 – 50
	Kaku	10 – 20	50 – 100
	Sangat kaku	20 – 40	100 – 200
	Keras	> 40	> 200

Sumber: Look (2007)

Nilai yang diusulkan oleh Schmertmann (1970), menyajikan korelasi nilai SPT terhadap modulus elastisitas tanah diperoleh melalui **Persamaan 1** hingga **Persamaan 4** berikut ini. Nilai modulus elastisitas yang didapatkan memiliki satuan kN/m².

Tanah Pasir

$$E = 766 (N - SPT) \quad (1)$$

Tanah Lempung *Normally Consolidated*

$$E = 250 cu s/d 500 cu \quad (2)$$

Tanah Lempung *Over Consolidated*

$$E = 750 cu \text{ s/d } 1000 cu \quad (3)$$

$$Cu = (35 - 6,5) N - SPT \quad (4)$$

Briaud (2013) menyajikan korelasi nilai SPT terhadap modulus elastisitas tanah pasir yang diperoleh melalui persamaan yang ditunjukkan pada **Tabel 4** di bawah ini. Sedangkan nilai modulus elastisitas, kohesi, dan sudut geser dalam yang diusulkan oleh Look (2007) ditunjukkan pada **Tabel 5**. Nilai *poisson ratio* juga dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 7**.

Tabel 4. Korelasi N-SPT untuk tanah Non Kohesif

<i>Soil Types</i>	<i>Correlation</i>
<i>Silts, sandy silts, <u>slightly cohesive mixtures</u></i>	$E \text{ [kPa]} = 400 N \text{ (bpf)}^*$
<i>Clean fine to medium sands and slightly silty sands</i>	$E \text{ [kPa]} = 700 N \text{ (bpf)}^*$
<i>Coarse sand and sand with little gravel</i>	$E \text{ [kPa]} = 1000 N \text{ (bpf)}^*$
<i>Sandy gravels and gravels</i>	$E \text{ [kPa]} = 1200 N \text{ (bpf)}^*$
	$E \text{ [kPa]} = 7000 (N \text{ (bpf)})^{0.5}$
<i>Sand (normally consolidated)</i>	$E \text{ [kPa]} = (15000 - 22000) \text{ Log}_e (N \text{ (bpf)})$
	$E \text{ [kPa]} = 500 (N \text{ (bpf)})^{*+15}$
<i>Sand (saturated)</i>	$E \text{ [kPa]} = 250 (N \text{ (bpf)})^{*+15}$
<i>Sand (<u>overconsolidated</u>)</i>	$E \text{ [kPa]} = 40000 + 1050 N \text{ (bpf)}^*$
<i>Gravelly sand</i>	$E \text{ [kPa]} = 1200 (N \text{ (bpf)})^* + 6$
	$E \text{ [kPa]} = 2 qc^{**}$
<i>Sandy soils (normally consolidated)</i>	$E \text{ [kPa]} = (2,5 - 3,5) qc^{**} < 100 \text{ tahun}$
	$E \text{ [kPa]} = (3,5 - 6) qc^{**} > 3000 \text{ tahun}$
<i>Sand (normally consolidated)</i>	$E \text{ [kPa]} = (1 + Dr^2)qc$, $Dr = \text{kepadatan relatif}$
<i>Sand (<u>overconsolidated</u>)</i>	$E \text{ [kPa]} = (6 - 10) qc^{**}$
<i>Sand: $qc < 5 \text{ MPa}$</i>	$E \text{ [kPa]} = 2 qc^{**}$
<i>Sand: $qc > 10 \text{ MPa}$</i>	$E \text{ [kPa]} = 1.5qc^{**}$

*SPT blow count N in bpf, blows per 0.3 m

** CPT point resistance in units of pressure

Sumber: Briaud (2013)

Tabel 5. Parameter Modulus Elastisitas dari Beberapa Jenis Tanah

<i>Type</i>	<i>Strength of soil</i>	<i>Elastic modulus, E (MPa)</i>	
		<i>Short term</i>	<i>Long term</i>
<i>Gravel</i>	<i>Loose</i>	25 – 50	
	<i>Medium</i>	50 – 100	
	<i>Dense</i>	100 – 200	
<i>Medium to coarse sand</i>	<i>Very loose</i>	< 5	
	<i>Loose</i>	3 – 10	
	<i>Medium dense</i>	8 – 30	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
	<i>Very dense</i>	40 – 100	
<i>Fine sand</i>	<i>Loose</i>	5 – 10	
	<i>Medium</i>	10 – 25	
	<i>Dense</i>	25 – 50	
<i>Silt</i>	<i>Soft</i>	< 10	< 8
	<i>Stiff</i>	10 – 20	8 – 15
	<i>Hard</i>	> 20	> 15
<i>Clay</i>	<i>Very soft</i>	< 3	< 2
	<i>Soft</i>	2 – 7	1 – 5
	<i>Firm</i>	5 – 12	4 – 8
	<i>Stiff</i>	10 – 25	7 – 20
	<i>Very stiff</i>	20 – 50	15 – 35
	<i>Hard</i>	40 – 80	30 – 6-

Sumber: Look (2007)

Tabel 6. Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam

<u>Type</u>	<u>Deskripsi Tanah</u>	<u>Kohesi efektif [kPa]</u>	<u>Sudut geser [°]</u>
Kohesif	Lunak – organik	5 – 10	10 – 20
	Lunak – non organik	10 – 20	15 – 25
	Kaku	20 – 50	20 – 30
	Keras	50 – 100	25 – 30

Sumber: Look (2007)

Tabel 7. Perkiraan Poisson Ratio tanah

<u>Jenis Tanah</u>	<u>Poisson Ratio (v)</u>
Lempung jenuh	0,40 – 0,50
Lempung tak jenuh	0,10 – 0,30
Lempung berpasir	0,20 – 0,30
Lanau	0,30 – 0,35
Pasir padat	0,20 – 0,40
Pasir kasar (angka pori, e= 0,4 – 0,7)	0,15
Pasir halus (angka pori, e= 0,4 – 0,7)	0,25
Batu	0,10 – 0,40
Loess	0,10 – 0,30

Sumber: Hardiyatmo (2007)

2.2. DAYA DUKUNG PONDASI

Pondasi tiang bor merupakan jenis pondasi tiang yang pemasangannya dilakukan dengan cara pengeboran tanah terlebih dahulu dan selanjutnya pemasangan tulangan yang telah dirangkai kemudian dicor beton. Jika ditemukan muka air yang dangkal, maka diperlukan pemasangan *temporary casing* untuk menahan dinding dari lubang bor agar tidak terjadi kelongsoran dan *casing* ini akan dikeluarkan ketika pengecoran beton (Hardiyatmo, 2010).

Analisis daya dukung tanah yaitu upaya untuk mengetahui kemampuan tanah dalam mendukung beban struktur di atasnya. Daya dukung menyatakan kekuatan/ tahanan geser dari tanah untuk melawan penurunan akibat pembebanan. Tahanan geser merupakan kekuatan tanah yang dapat dikerahkan oleh tanah di sepanjang bidang-bidang gesernya. Persamaan-persamaan daya dukung tanah yang diusulkan, umumnya didasarkan pada persamaan *Mohr-Coulomb* (**Persamaan 5**).

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

Halmana:

$\tau = s$ = Kuat geser tanah

c = Kohesi tanah

φ = Sudut gesek dalam tanah

σ = Tegangan normal

2.3. METODE ELEMEN HINGGA

2.3.1 Teori Deformasi

Menurut Plaxis (2021) pada Program Plaxis, persamaan dasar untuk deformasi statik dari tanah dirumuskan dalam susunan dari mekanika kontinum. Pembatasan dibuat dalam arti bahwa deformasi dianggap kecil. Hal tersebut memungkinkan formulasi dengan mengacu pada geometri asli yang tidak terdeformasi. Deskripsi kontinum didiskritisasi sesuai dengan Metode Elemen Hingga (Plaxis, 2021b).

Keseimbangan statis sebuah kontinum dapat dirumuskan seperti yang ditunjukkan pada **Persamaan 6** (Plaxis, 2021b).

$$L^T \underline{\sigma} + \underline{b} = 0 \quad (6)$$

Halmana:

L^T = transpose dari operasi diferensial

$\underline{\sigma}$ = turunan parsial dari enam komponen tegangan

\underline{b} = tiga komponen gaya

Menurut Metode Elemen Hingga sebuah kontinum dibagi menjadi beberapa (volume) elemen. Setiap elemen terdiri dari beberapa *node*. Setiap *node* memiliki sejumlah derajat kebebasan (*degree of freedom*). Dalam kasus teori deformasi ini, derajat kebebasan sesuai dengan komponen deformasi (*displacement*) (Plaxis, 2021b).

Hubungan antara pertambahan tegangan dan pertambahan regangan biasanya tidak linear. Akibatnya, kenaikan regangan umumnya tidak dapat dihitung secara langsung, dan prosedur iterasi global diperlukan untuk memenuhi kondisi keseimbangan untuk semua titik material (Plaxis, 2021b).

2.3.2 Material *Embedded Beam Rows*

Embedded Beam Rows dapat digunakan untuk memodelkan berbagai jenis struktur ramping yang berinteraksi dengan tanah/batuan di sekitarnya seperti tiang pancang, tiang bor, angkur tanah atau baut batuan (*rock bolt*). Input data untuk material *embedded beam rows* ini umumnya mewakili jenis dari *embedded* yang akan dimodelkan, termasuk material tiang/batuan dan bentuk geometri, sifat interaksi dengan tanah atau batuan di sekitarnya (daya dukung) serta jarak antar tiang di luar tiang/ baut batu (Plaxis, 2021a).

Interaksi antara tiang atau baut batuan (elemen *embedded beam row*) dan tanah atau batuan sekitarnya (elemen volume tanah) dimodelkan melalui elemen antarmuka khusus (*special interface*). Model elastoplastik digunakan untuk menggambarkan perilaku *interface*. Perilaku elastis dari *interface* harus memperhitungkan perbedaan perpindahan (*displacement*) tiang/*rock bolt* dan rata-rata perpindahan tanah/batuan pada arah keluar bidang (Plaxis, 2021a).

2.4. UJI *PILE DRIVING ANALYZER (PDA)*

Dalam beberapa dekade sejak awal penelitian mengenai pengujian dinamik modern pada tiang, banyak peningkatan alat-alat yang dibuat untuk digunakan sebagai alat uji kapasitas pondasi seperti *Pile Driving Analyzer (PDA)* dan *Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP)* (Likins dan Rausche, 2008). Menurut Baker dkk (1984), Likins (1984), Fakharian (2000), Yang dan Ramakrishna (2010), dan Lee dkk (2013) pengujian kapasitas pondasi tiang menggunakan PDA telah mendapatkan popularitas dalam beberapa tahun terakhir karena relatif hemat biaya, menghemat waktu, dan mudah dilakukan.

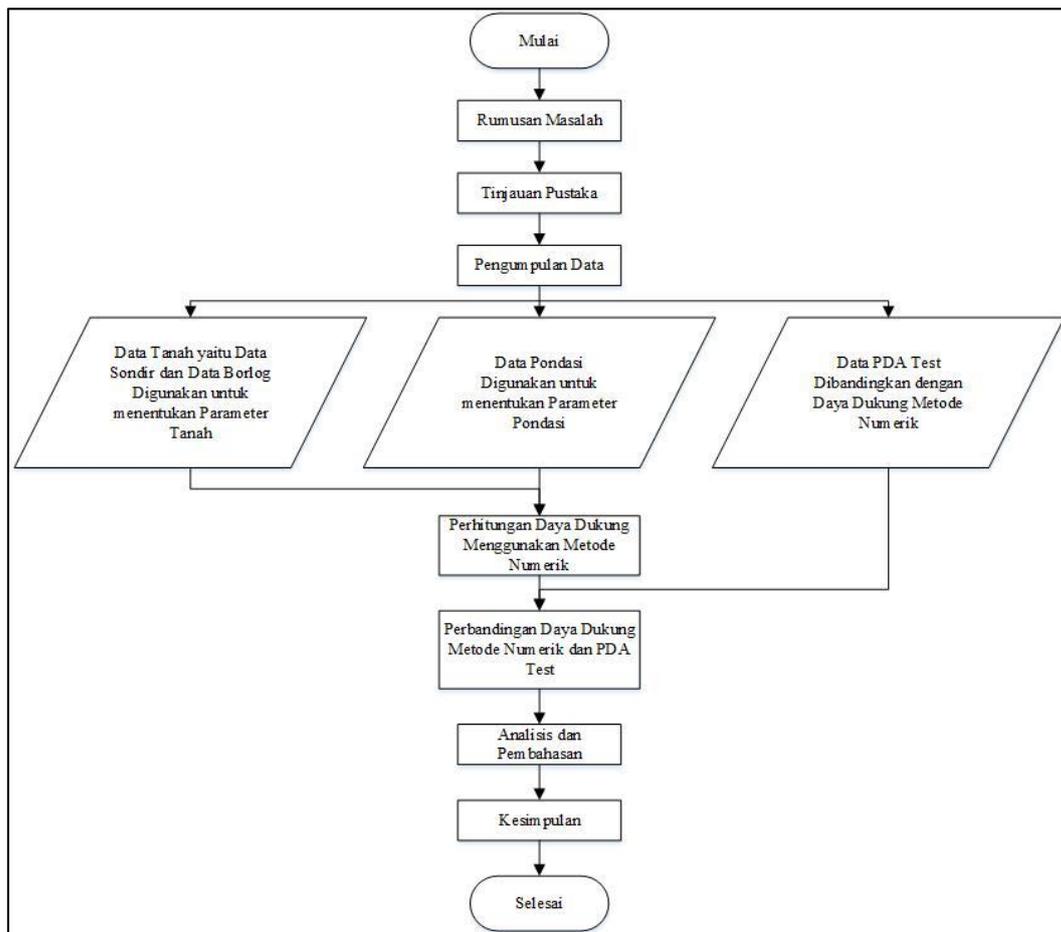
Saat ini, pengujian PDA banyak dilakukan untuk fondasi tiang tekan hidrolik *precast pile*, *steel pile*, dan *spun pile* dengan menggunakan palu dari alat pancangnya sendiri sehingga sangat praktis dan ekonomis. Tujuan pengujian dinamis ini adalah untuk mengetahui besarnya daya dukung ultimit tiang tekan hidrolik tunggal yang dilakukan di lapangan dengan berbagai dimensi dan karakteristik tiang yang telah ditentukan melalui perencanaan sebelumnya, baik untuk pemilihan tiang maupun lokasinya.

Perangkat lunak Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) digunakan untuk analisis data dari uji lapangan PDA, melalui CAPWAP diperoleh data kapasitas mobilisasi tiang, *skin friction*, *end bearing*, dan *settlement* pada beban kerja dan beban uji. Kapasitas tiang yang diperoleh dari analisis CAPWAP pada hasil pengujian PDA dianggap dapat dimobilisasi penuh jika hanya dicapai net set 3 mm pada saat pengujian (Moayedid dkk, 2017).

Moayedidkk (2017) melakukan penelitian yang membandingkan antara pengujian PDA dan MLT (*Maintained Load Test*). Moayedidkk menyatakan bahwa pengujian dinamis pada tiang membutuhkan pengukuran gaya dan kecepatan tiang selama tumbukan palu. Karena biayanya, yang jauh lebih murah dibandingkan dengan MLT, PDA dapat dilakukan pada tiang pancang beton bertulang (*RC pile*), sehingga memberikan sampel tiang yang diuji lebih besar. Namun, keakuratan data dari pengujian PDA terkadang diragukan. Karena kedua metode memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing, kombinasi data yang diperoleh dari pengujian MLT dan PDA diusulkan untuk memberikan gambaran yang jelas tentang daya dukung tiang RC dan penurunan yang diharapkan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa untuk semua tiang yang dianalisis, kapasitas tiang pancang yang diperoleh dari metode pengujian PDA lebih tinggi dibandingkan dengan kapasitas yang diperoleh melalui pengujian MLT. Namun, hasil analisis dari pengujian PDA dan MLT untuk besar penurunan tiang tidak menunjukkan konsistensi.

METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian pada tugas akhir ini dijabarkan ke dalam bentuk bagan alir pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

3.1 Parameter Tanah

Parameter tanah pada pemodelan diperoleh melalui korelasi jenis tanah pada hasil penyelidikan tanah yang telah dilakukan pada proyek pembangunan PT. Daya Adicipta Mustika. Pada **Tabel 8** dan **Tabel 9** menunjukkan nilai parameter tanah yang dipakai pada pemodelan.

Tabel 8. Data Parameter Tanah *Mohr Coulomb*

Parameter Tanah	Lempung dan Lanau	Pasir	Satuan
Model	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	-
Tipe Drainase	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	-
γ_{unsat}	16	20	kN/m ³
γ_{sat}	17	21	kN/m ³
E	6125	60000	kN/m ²
ν	0,3	0,3	-
c'	15	5	kN/m ²
φ	25	45	°

Tabel 9. Data Parameter Tanah *Hardening Soil*

Parameter Tanah	Lempung dan Lanau	Pasir	Satuan
Model	Hardening Soil	Hardening Soil	-
Tipe Drainase	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	-
γ_{unsat}	16	20	kN/m ³
γ_{sat}	17	21	kN/m ³
$E_{50\ ref}$	6125	60000	kN/m ²
$E_{oed\ ref}$	4900	48000	kN/m ²
$E_{ur\ ref}$	18375	180000	kN/m ²
ν	0,3	0,3	-
c'	15	5	kN/m ²
φ	25	45	°

3.2 Parameter Tiang Bor

Tiang bor pada PLAXIS 3D dimodelkan dengan menggunakan *Soil Cluster* dan *Embedded Beam* dengan diameter tiang sebesar 1 m. Data parameter tiang bor yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 10** di bawah ini.

Tabel 10. Data Parameter Tiang Bor

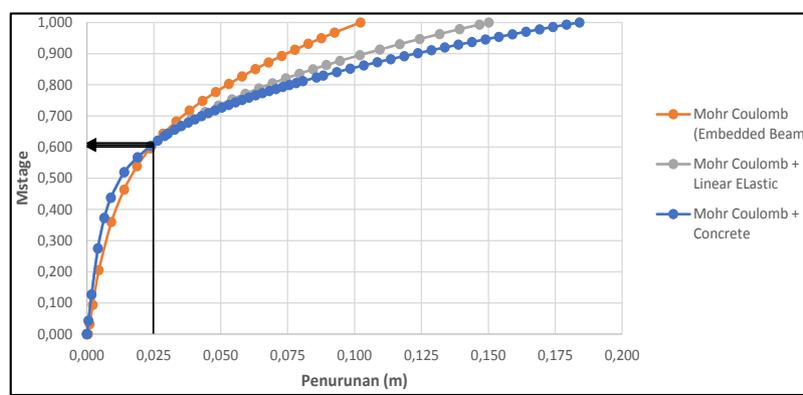
Parameter Pondasi	<i>Linear Elastic</i>	<i>Concrete</i>	<i>Embedded Beam</i>	Satuan
Tipe	<i>Non-Porous</i>	<i>Non-Porous</i>	<i>Elastic</i>	-
γ_{unsat}	24	24	24	kN/m ³
γ_{sat}	24	24	-	kN/m ³
f_c	30	30	30	MPa
E	13240000	13240000	13240000	kN/m ²
ν	0,15	0,15	0,15	-
f_{c28}, f_{t28}	-	30000	-	kN/m ²
f_{c0n}	-	0,1	-	-
f_{cfn}	-	0,1	-	-
f_{cun}	-	0,1	-	-
f_{tun}	-	0	-	-
G_{c28}, G_{t28}	-	11190000	-	kN/m
φ	-	35	-	°
Y_{fc}, Y_{ft}	-	1	-	-
$T_{skin, start}$	-	-	5,598	kN/m
$T_{skin, end}$	-	-	1268	kN/m
F_{max}	-	-	3008	kN

3.3 Pembebanan

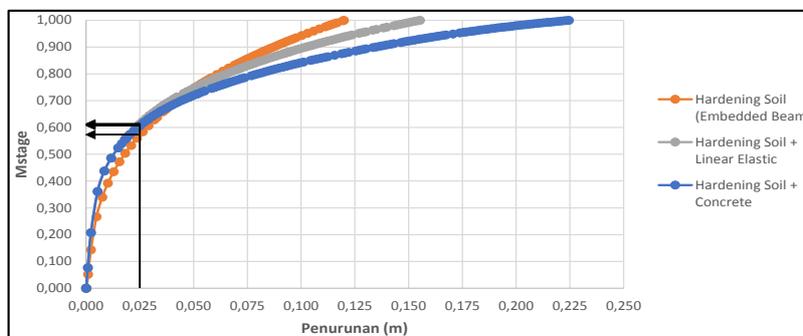
Pembebanan yang dimasukkan pada pemodelan PLAXIS 3D diperoleh berdasarkan *Static Loading Test*. Nilai beban rencana 100% pada *Static Loading Test* yaitu 250 Ton. Menurut SNI 8460:2017, besar beban percobaan pada pelaksanaan uji pembebanan tiang yang bersifat "used pile" (*used pile* = tiang yang akan menjadi bagian dari fondasi bangunan) adalah 200% dari beban rencana. Beban yang di-*input* pada aplikasi PLAXIS 3D adalah 1000 Ton.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

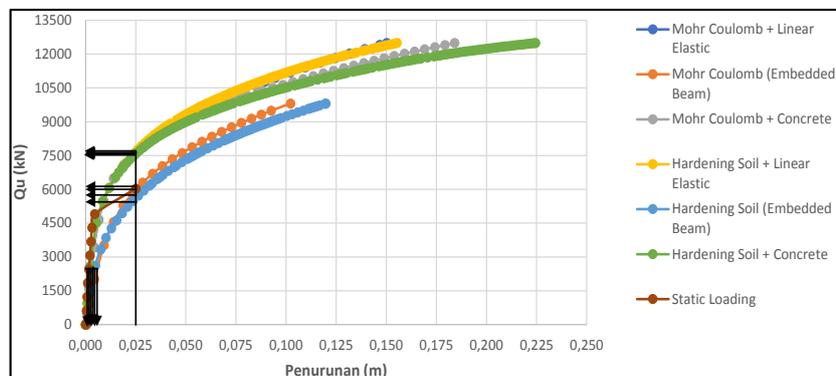
Hasil pemodelan pada pondasi tiang bor dengan material model *Mohr Coulomb*, *Hardening Soil*, *Linear Elastic*, dan *Concrete* menghasilkan nilai penurunan dan daya dukung yang disajikan pada **Gambar 2** hingga **Gambar 5** dan ditunjukkan pula pada **Tabel 11** hingga **Tabel 15**.



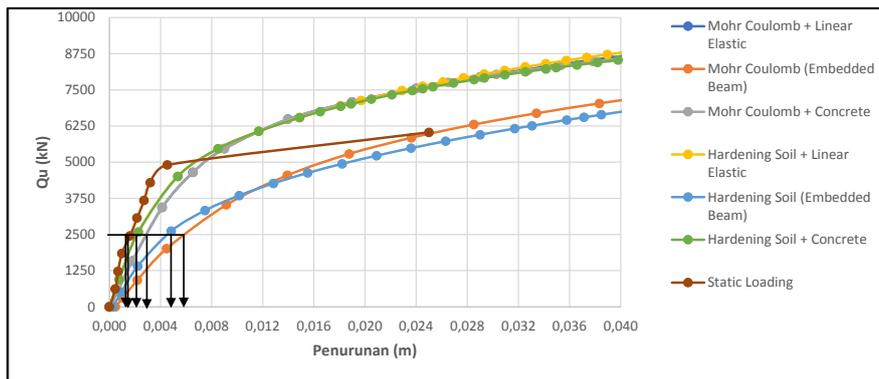
Gambar 2. Grafik Mstage material model *Mohr Coulomb*



Gambar 3. Grafik Mstage material model *Hardening Soil*



Gambar 4. Grafik hubungan Mstage dan Penurunan beberapa material model dan *Static Loading*



Gambar 5. Grafik penurunan antara beberapa material model dan *Static Loading*

Tabel 11. Rekapitulasi Nilai Daya Dukung

Material Tanah	Material Tiang	Daya Dukung [kN]		
		Hasil Analisis	Uji PDA	Uji Beban Statik
Mohr Coulomb	Embedded Beam	5972,463		
	Linear Elastic	7631,363	12297	6031,09
	Concrete	7630,114		
Hardening Soil	Embedded Beam	5609,604		
	Linear Elastic	7670,088	12297	6031,09
	Concrete	7582,644		

Tabel 12. Persentase Perbedaan Nilai Daya Dukung

Material Tanah	Material Tiang	Persentase Perbedaan Daya Dukung [%]	
		Hasil Analisis	Beban Statik
Mohr Coulomb	Embedded Beam	51,43	
	Linear Elastic	37,94	50,96
	Concrete	37,95	
Hardening Soil	Embedded Beam	54,38	
	Linear Elastic	37,63	50,96
	Concrete	38,34	

Tabel 13. Rekapitulasi nilai penurunan

Material Tanah	Material Tiang	Penurunan [mm]		
		Hasil Analisis	Uji PDA	Uji Beban Statik
Mohr Coulomb	Embedded Beam	6,80		
	Linear Elastic	4,35	9	1,61
	Concrete	4,34		
Hardening Soil	Embedded Beam	5,42		
	Linear Elastic	3,33	9	1,61
	Concrete	3,33		

Tabel 14. Persentase perbedaan nilai penurunan

Material Tanah	Material Tiang	Persentase Perbedaan Penurunan [%]	
		Hasil Analisis	Beban Statik
Mohr Coulomb	Embedded Beam	24,42	
	Linear Elastic	51,72	82,11
	Concrete	51,73	
Hardening Soil	Embedded Beam	39,78	
	Linear Elastic	63,02	82,11
	Concrete	63,03	

Tabel 15. Rekapitulasi nilai gaya dalam *Mohr Coulomb* dan *Hardening Soil*

Material Tanah	Material Tiang	Gaya Dalam		
		Axial Force [kN]	Shear Force [kN]	Bending Moment [kN m]
Mohr Coulomb	Embedded Beam	9724	406,3	117,7
	Linear Elastic	8847	669	977,9
	Concrete	8848	586,7	923,1
Hardening Soil	Embedded Beam	9761	504,4	126,1
	Linear Elastic	8861	541,9	1065
	Concrete	8866	665,2	827,7

SIMPULAN

5.1 Simpulan

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil analisis menggunakan metode elemen hingga dengan beban 1000 Ton didapatkan nilai daya dukung terbesar terjadi pada pemodelan *Soil Cluster* dengan material model *soil Hardening Soil* dengan material model *pile Linear Elastic* yaitu 7670,088 kN. Daya dukung yang mendekati nilai PDA Test adalah menggunakan material model *soil Hardening Soil* dan material model *pile Linear Elastic* dengan persentase 58,717%. Sedangkan daya dukung yang mendekati nilai *Static Loading* adalah menggunakan material model *soil Mohr Coulomb* dengan pemodelan *Embedded Beam* yaitu 6,99%.
2. Hasil analisis menggunakan metode elemen hingga dengan beban 250 Ton didapatkan nilai penurunan terbesar terjadi pada pemodelan *Embedded Beam* dengan material model *Mohr Coulomb* yaitu 6,802 mm. Penurunan yang mendekati nilai PDA Test adalah menggunakan material model *Mohr Coulomb* dan pemodelan *Embedded Beam* dengan persentase 75,578%. Sedangkan penurunan yang mendekati nilai *Static Loading* adalah menggunakan material model *soil Hardening Soil* dan material model *pile Concrete* yaitu 51,61%.
3. Daya dukung menggunakan PLAXIS 3D dengan beberapa macam material model dan 2 cara pemodelan lebih kecil dari daya dukung pengujian PDA Test (QPLAXIS < QPDA Test). Untuk nilai penurunan menggunakan beberapa material model lebih kecil dari penurunan pengujian PDA Test.
4. Perbedaan hasil antara analisis dan PDA Test disebabkan karena beberapa asumsi parameter yang dimasukkan kedalam material model menggunakan nilai korelasi *trial and error*.
5. Perbedaan hasil dari setiap pemodelan disebabkan karena pengaruh parameter yang dimiliki setiap material model berbeda. Pada material model *Hardening Soil* memiliki beberapa nilai E yaitu E50 ref, Eoed ref, dan Eur ref, sedangkan material model *Mohr Coulomb* hanya memiliki satu nilai E. Hal ini berpengaruh pada hasil penurunan, nilai penurunan menggunakan material model *Hardening Soil* lebih kecil dari material model *Mohr Coulomb*.

DAFTAR RUJUKAN

- Baars, S. v., & Niekerk, W. v. (1999). Numerical modelling of tension piles. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of PLAXIS International* (hal. 1-10). Rotterdam,: Balkema.
- Baker, V. A., Thomsen, N. A., Nardi, C. R., & Talbot, M. J. (1984). Pile foundation design using pile driving analyzer. *Proc. Analysis and Design of Pile Foundation* (hal. 350-372). ASCE.
- Briaud, J. L. (2013). *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Fakharian, K. (2000). Case study on the application of Pile Driving Analyzer (PDA) and CAPWAP analysis to bearing capacity of piles. *Proc. The 10th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., International Society of Offshore and Polar Engineers*, (hal. 403-409).
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan Fondasi Bagian I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Lee, C., An, S., & Lee, W. (2013). Real-time monitoring of SPT donut hammer motion and SPT energy transfer ratio using digital line-scan camera and pile driving analyzer. *Acta Geotechnica*, 1-10.
- Likins, G. E. (1984). Field measurements and the pile driving analyzer. *Proc. 2nd Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory on Piles* (hal. 298-305). Millpress.
- Likins, G. E., & Rausche, F. (2008). What constitutes a good PDA test. *Proc. of the 8th International Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Poles* (hal. 403-407). Millpress: Ios Press.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Mankbadi, R., Ramakrishna, A., & Yang, K. Y. (2010). Reliability of pile driving analyzer for determination of axial capacity of largediameter cylindrical pile: Case history. *Transportation Research Board*, 32-36.
- Moayedi, H., Mosallanezhad, M., & Nazir, R. (2017). EVALUATION OF MAINTAINED LOAD TEST (MLT) AND PILE DRIVING ANALYZER (PDA). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54 (3), 150-154.
- Murthy, V. S. (2006). *Geotechnical Engineering Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Plaxis. (2021a). *PLAXIS 2D-Reference Manual*. Netherlands: Bentley Systems, Incorporated.
- Plaxis. (2021b). *Scientific Manual*. Netherlands: Bentley Systems, Incorporated.
- Schmertmann, J. H. (1970). Static cone to compute static settlement over sand. *J. Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE*, 3, 1011-1012.