

**TRANSFER BEBAN PADA FONDASI TIANG BOR DENGAN
KUALITAS BETON BERVARIASI DAN DIANALISIS
BERDASARKAN UJI PEMBEBANAN TIANG
BERINSTRUMEN KABEL *FIBER OPTIC***

TESIS

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Dapat Mengikuti Ujian Sidang
Tesis**



Oleh:

Kevin Martandi Setianto

8101801023

Pembimbing :

Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D

Ko Pembimbing:

Dr. Cecilia Lauw Giok Swan, Ir., M.T.

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN

BANDUNG

MARET 2021

**TRANSFER BEBAN PADA FONDASI TIANG BOR DENGAN
KUALITAS BETON BERVARIASI DAN DIANALISIS
BERDASARKAN UJI PEMBEBANAN TIANG
BERINSTRUMEN KABEL *FIBER OPTIC***

TESIS



Oleh:

Kevin Martandi Setianto

8101801023

Pembimbing :

Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D

Ko Pembimbing:

Dr. Cecilia Lauw Giok Swan, Ir., M.T.

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN

BANDUNG

MARET 2021

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama Lengkap : Kevin Martandi Setianto

NPM : 8101801023

Dengan ini menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul:

“Transfer Beban pada Fondasi Tiang Bor dengan Kualitas Beton Bervariasi dan Dianalisis Berdasarkan Uji Pembebanan Tiang Berinstrumen Kabel *Fiber Optic*”

adalah karya ilmiah yang saya kerjakan sendiri di bawah bimbingan dosen pembimbing dan dosen ko-pembimbing. Serta seluruh data praktikum adalah benar-benar diambil dari praktikum di laboratorium teknik struktur Universitas Katolik Parahyangan, Kota Bandung. Jika di kemudian hari terdapat plagiat dalam tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Bandung, 6 Maret 2021



Kevin Martandi Setianto
8101801023

TRANSFER BEBAN PADA FONDASI TIANG BOR DENGAN KUALITAS BETON BERVARIASI DAN DIANALISIS BERDASARKAN UJI PEMBEBANAN TIANG BERINSTRUMEN KABEL *FIBER OPTIC*

Kevin Martandi Setianto (NPM: 8101801023)

Pembimbing: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.

Ko-Pembimbing: Dr. Cecilia Lauw Giok Swan, Ir., M.T.

Magister Teknik Sipil

Bandung

Maret 2021

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui nilai modulus beton pada suatu fondasi tiang bor berinstrumentasi kabel *fiber optic* dengan perhitungan manual berdasarkan data regangan di sepanjang tiang saat *static loading test*, yang kemudian divalidasi dengan hasil penelitian di laboratorium dan analisis numerik dengan menggunakan *software* Plaxis 2D. Saat perhitungan, fondasi tiang dibagi ke dalam beberapa segmen yang memiliki karakteristik regangan yang sama kemudian dihitung nilai modulus masing-masing segmen. Hasilnya adalah nilai modulus masing-masing segmen tidak sama dan nilai modulus beton berubah seiring dengan peningkatan regangan, kecenderungannya adalah ketika regangan meningkat maka modulus akan menurun. Hal ini berbeda dengan asumsi bahwa modulus beton bernilai tetap yang dapat didekati dengan persamaan $4700\sqrt{f_c}$ (SNI 2847-2013) atau $33w^{1.5}\sqrt{f_c}$ (Pauw, 1960). Dibuat sampel beton silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang pada kedua sisinya dipasang kabel *fiber optic* untuk merekam regangan yang terjadi pada sampel beton silinder saat uji kuat tekan menggunakan *manual testing machine*. Hasilnya adalah benar bahwa nilai modulus menurun ketika regangan meningkat, pada regangan kecil nilai modulus dari persamaan $4700\sqrt{f_c}$ sama dengan nilai modulus aktual, dan pada regangan besar nilai modulus asumsi lebih besar dibandingkan modulus aktual. Dibuat model di Plaxis 2D yang *output* regangan dan penurunan tiangnya sudah dikalibrasi dengan data aktual. Hasilnya nilai modulus tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan manual, yaitu modulus berkurang seiring bertambahnya regangan dan nilai modulus masing-masing segmen pada fondasi tiang bor tidak sama.

Kata kunci: fondasi, tiang bor, fiber optic, beton, regangan, modulus elastisitas

LOAD TRANSFER ON BORED PILE FOUNDATION WITH VARIED CONCRETE QUALITY AND ANALYZED BASED ON STATIC LOADING TEST INSTRUMENTED WITH FIBER OPTIC WIRE

Kevin Martandi Setianto
NPM: 2015410021

Advisor: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.
Co-Advisor: Dr. Cecilia Lauw Giok Swan, Ir., M.T.

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BANDUNG
MARCH, 2021

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the modulus of elasticity of concrete on a bored pile foundation instrumented with fiber optic wire with hand calculation based on strain data along the pile during static loading test, which is validated with the results of research in the structural laboratory and numerical analysis using finite element based computer program Plaxis 2D. The bored pile foundation is divided into 12 segments that have the same strain characteristics and then the modulus of elasticity of concrete of each segment is calculated. The result is that the modulus of elasticity of concrete value of each segment is different and the value of the modulus changes along with the increase in strain. This differs from the theory that the modulus of concrete has a fixed value which can be approximated by empirical equations. A cylindrical concrete sample was made on both sides of which a fiber optic wire was installed to record the strain that occurred during the axial loading test using a manual testing machine. The result is true that the modulus of concrete is not constant but decreases as the strain increases. In low strain condition the modulus elasticity of concrete from empirical equation valued the same with actual condition, but in high strain the modulus elasticity of concrete from empirical equation is higher than actual condition. A model was created in Plaxis 2D for validation, and the results are not much different from the manual calculation, namely the modulus of concrete decreases with increasing strain and the modulus value of each segment on the bored pile foundation is not always the same.

Keywords: foundation, boredpile, fiber optic, concrete, strain, modulus of elasticity

PRAKATA

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Tuhan yang Maha Esa atas berkat rahmatNya penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul Transfer Beban Pada Fondasi Tiang Bor Dengan Kualitas Beton Bervariasi dan Dianalisis Berdasarkan Uji Pembebanan Tiang Berinstrumen Kabel *Fiber Optic*. Tesis ini merupakan salah satu syarat lulus program magister di program studi magister teknik sipil konsentrasi geoteknik, fakultas teknik, Universitas Katolik Parahyangan.

Selama proses penulisan tesis ini, banyak sekali hambatan entah itu yang bersifat fisik maupun emosional dalam skala yang besar ataupun kecil yang dialami oleh penulis. Namun, penulis sangat bersyukur atas hadirnya orang-orang yang sangat membantu penulis untuk mengatasi berbagai hambatan tersebut. Oleh karenanya, penulis mengucapkan terima kasih kepada orang-orang tersebut, yaitu:

1. Papa Ir. Djoko Setianto, Mama Kristiani, dan Cici Elliani Margareta Setianto, S.T. yang selalu memberi dukungan dalam berbagai bentuk dan dalam berbagai situasi dan kondisi.
2. Bapak Prof. Paulus Pramono Rahardjo dan Ibu Dr. Cecilia Lauw Giok Swan selaku dosen pembimbing dan dosen ko-pembimbing yang sudah memberi arahan dan bimbingan dengan baik kepada penulis.
3. Bapak Budijanto Widjaja, Ph.D dan Bapak Aswin Lim, Ph.D selaku komite tesis penulis.
4. Bapak Stefanus Diaz Alvi, S.T., M.T., Bapak Ricky Setiawan, S.T., M.T., Bapak Aflizal Arafianto, S.T., M.T., dan Bapak Sonatha Christianto, S.T., M.T. atas banyak bantuan yang diberikan kepada penulis, semoga Tuhan YME membalas segala kebaikan Anda semua.
5. Seluruh staf dan pimpinan PT. Geotechnical Engineering Consultant, PT. Pakubumi Semesta, PT. Jakarta Propertindo, PT. Wijaya Karya Bangunan Gedung Tbk, PT. Jakarta Konsultindo, PT. Daya Creasi Mitrayasa, dan PT. Beton Elemenindo Perkasa atas bantuannya berupa data-data primer maupun sekunder yang sudah diberikan kepada penulis, semoga perusahaan bapak/ibu sekalian dapat berkembang dengan sangat baik dari waktu ke waktu.

6. Seluruh staf dan pimpinan laboratorium teknik struktur dan geoteknik Universitas Katolik Parahyangan.
7. dr. Martin Adhitya Subagio yang telah membantu penulis dalam hal penggunaan Bahasa Inggris dalam penulisan tesis, jurnal, maupun dalam hal yang lainnya.
8. Rekan-rekan penulis Geraldus Randi Ardanto, Ary Yudhistira, Rovelly Hansel Saputra S.T., Gerardo Michael Saputra S.T., Antonius Aldy Winoto S.T., Vincent Justin S.T., Yonathan Dwitama S.T., Wellyanto Wijaya S.T., Geofanny Ivonne S.T., Wilson Kristanto S.T., Yunan Wijaya S.T., Davis Howie S.T., Vinna Fransiska Chou S.T., Riyanti Teresa S.T., Vincent Pratama S.E., Ryan Alexander Lyman S.T., M.T., dan Albert Johan S.T. atas bantuannya kepada penulis baik dukungan moril maupun materiil.
9. Seluruh civitas akademika Universitas Katolik Parahyangan, khususnya program studi magister teknik sipil.

Penulis menyadari akan kelemahan, kekurangan, dan ketidaksempurnaan yang dilakukan selama proses penulisan tesis ini. Oleh karena itu, penulis sangat membutuhkan kritik dan saran yang membangun agar kedepannya dapat menjadi lebih baik lagi. Terima kasih.

Bandung, Maret 2021



Kevin Martandi Setianto

8101801023

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
PRAKATA	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1-1
1.1 Latar Belakang Permasalahan	1-1
1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	1-3
1.3 Lingkup Penelitian	1-4
1.4 Metode Penelitian	1-4
1.4.1 Studi literatur	1-5
1.4.2 Pengambilan Data.....	1-5
1.4.3 Pengujian laboratorium	1-5
1.4.4 Intepretasi dan analisis data.....	1-5
1.5 Sistematika Penulisan	1-6
1.6 Diagram Alir	1-8
BAB 2 STUDI PUSTAKA	2-1
2.1 Tiang Bor Sebagai Fondasi	2-1
2.2 Mekanisme Pengalihan Beban (Manual Pondasi Tiang, 2017)	2-3
2.3 Pengaruh Metode Konstruksi Terhadap Performa Fondasi Tiang Bor.....	2-5
2.3.1 Pengaruh Pada Tanah Lempung	2-5
2.3.2 Pengaruh Pada Tanah Pasir	2-7
2.4 Studi Kasus Pada Pengaruh Metode Konstruksi Terhadap Performa Fondasi Tiang Bor (Abdrabbo dan Abouseeda, ASCE 2002).....	2-8
2.4.1 Studi Kasus 1	2-8
2.4.2 Studi Kasus 2	2-10
2.5 Uji Pembebanan Fondasi Tiang Aksial Tekan.....	2-12
2.5.1 Uji Pembebanan Fondasi Tiang Aksial Tekan Statik.....	2-13
2.6 Kabel <i>Fiber Optic</i> Sebagai Instrumentasi Uji Pembebanan Tiang Aksial .	2-14
2.7 <i>Vibrating Wire Strain Gauge</i> (VWSG) Sebagai Instrumentasi Uji Pembebanan Tiang	2-17
2.8 Perbandingan Kabel <i>Fiber Optic</i> dan VWSG Sebagai Instrumentasi (Hisham Mohamad <i>et al</i> , 2017)	2-18
2.9 Studi Terdahulu Penggunaan Kabel <i>Fiber Optic</i> dalam Teknik Sipil	2-20
2.9.1 Memonitor Interaksi Dua Terowongan yang Berdekatan dengan Kabel <i>Fiber Optic</i> (Hisham Mohammad <i>et al</i> , 2012)	2-20

2.9.2 Pengukuran Regangan dan Investigasi Kualitas Beton Menggunakan Kabel <i>Fiber Optic</i> (Rahardjo <i>et al</i> , 2017)	2-22
2.10 Metode Elemen Hingga	2-25
2.10.1 Tahapan dalam Metode Elemen Hingga	2-25
2.10.2 Model Axysimmetry	2-28
2.10.3 Interface	2-29
2.11 Pemodelan Tanah Pada <i>Software</i>	2-30
2.11.1 Model Konstitutif Tanah Mohr Coulomb	2-30
2.11.2 Kondisi <i>Undrained</i> Pada Tanah	2-31
BAB 3 METODE PENELITIAN	3-1
3.1 Pengumpulan Data	3-1
3.2 Penelitian Sampel Beton di Laboratorium	3-1
3.3 Penentuan Parameter Tanah	3-4
3.3.1 Berat Isi Tanah	3-4
3.3.2 Kohesi Tak Teralir (S_u)	3-5
3.3.3 Kohesi efektif (c')	3-6
3.3.4 Sudut Geser Dalam Efektif ϕ'	3-7
3.3.5 Sudut Geser Dalam Tanah Pasir, ϕ	3-8
3.3.6 Korelasi Modulus dengan S_u	3-8
3.4 Analisis Transfer Beban dari Data <i>Static Loading Test</i>	3-9
3.4.1 Menentukan Modulus Beton	3-10
3.4.2 Modulus di Sepanjang Tiang	3-11
3.4.3 Analisis Transfer Beban	3-13
3.5 Pemodelan Pada Plaxis 2D	3-14
3.5.1 Mengatur General Setting	3-14
3.5.2 Memodelkan Fondasi dan Stratifikasi Tanah	3-14
3.5.3 Memodelkan Parameter tanah	3-15
3.5.4 Melakukan Mesh	3-16
3.5.5 Pemodelan Tahapan-tahapan Konstruksi	3-17
3.5.6 <i>Output</i> Analisis Plaxis 2D	3-18
BAB 4 DATA DAN ANALISIS DATA	4-1
4.1 Data Proyek	4-1
4.1.1 Lokasi Proyek	4-1
4.1.2 Data Fondasi Tiang	4-2
4.1.3 Data Penyelidikan Tanah	4-2
4.2 Data <i>Static Loading Test</i>	4-2
4.3 Pengolahan Data Lapangan dari Kabel <i>Fiber Optic</i> TIM	4-5
4.3.1 Pembagian Segmen Fondasi Tiang Bor	4-5
4.3.2 Menghitung Modulus Masing-Masing Segmen	4-6
4.3.3 Menentukan Kurva $\tau - z$	4-12
4.3.4 Menentukan Kurva $q - z$	4-15
4.3.5 Menghitung <i>Load Transfer</i>	4-16

4.4	Validasi dengan Data Penelitian di Laboratorium	4-17
4.5	Validasi dengan <i>Software</i> Plaxis 2D.....	4-21
4.5.1	Justifikasi Stratifikasi Tanah	4-22
4.5.2	Justifikasi Parameter Tanah.....	4-23
4.5.3	Perbandingan Regangan Aktual dari Data Kabel <i>Fiber Optic</i> dengan Regangan Hasil Analisis numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D	4-26
4.5.4	Perbandingan Penurunan Tiang Aktual dari Data <i>Static Loading Test</i> dengan Penurunan Tiang Hasil Analisis dengan <i>Software</i> Plaxis 2D.....	4-30
4.5.5	Validasi Nilai Modulus Berdasarkan Hasil Analisis numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D.....	4-31
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	5-1
5.1	Kesimpulan	5-1
5.2	Saran	5-2
DAFTAR PUSTAKA		xix

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

γ	: Berat Isi Natural
γ_{dry}	: Berat Isi Kering
γ_{sat}	: Berat Isi Tanah Jenuh Air
γ_w	: Berat Isi Air Murni
ϕ	: Sudut Geser Dalam
ϕ'	: Sudut Geser Dalam Efektif
σ	: Tegangan Pada Tiang
$\mu\varepsilon$: Regangan dalam mikro
τ	: <i>Unit Skin Friction</i> Pada Tiang
ν	: Angka Poisson
$^{\circ}C$: Derajat Celcius
A	: Luas Area Penampang Tiang
$AASHTO$: <i>American Assosiation for State Highway and Transportation Officials</i>
$ASCE$: <i>American Society of Civil Engineers</i>
$ASTM$: <i>American Standard Testing and Material</i>
BH	: <i>Borhole</i> / Titik Pengeboran
$BOTDA$: <i>Brillouin Optical Time Domain Analysis</i>
$BOTDR$: <i>Brillouin Optical Time Domain Reflectometer</i>
BS	: <i>British Standard</i>
c'	: Kohesi Efektif
C_c	: Koefisien Kurvatur
CH	: <i>High Plasticity Clay</i>
COL	: <i>Cut Off Level</i>
CPT	: <i>Cone Penetration Test</i> / Sondir Mekanis
$CPTu$: <i>Cone Penetration Test and Water Pressure</i>
C_u	: Koefisien Keseragaman
$DFRI$: <i>Deep Foundation Research Institute</i>
$DI Water$: <i>Deionized Water</i>
E_u	: Modulus Tanah <i>undrained</i>

x

E'	: Modulus Tanah <i>drained</i>
E_c	: Modulus Elastisitas Beton
E_{pile}	: Modulus Elastisitas Gabungan Beton dan Tulangan Baja Fondasi Tiang Bor
E_s	: Modulus Elastisitas Tulangan Baja Fondasi Tiang Bor
FO	: <i>Fiber Optic</i>
$FHWA$: <i>Federal Highway Administration</i>
$f'c$: Mutu Beton
g	: Gram
G_s	: Berat Jenis
Hz	: Satuan Frekwensi Gelombang
ISO	: <i>International Standardisation Organisation</i>
kN	: Kilo Newton
kPa	: Kilo Pascal
K_0	: Koefisien Tekanan Tanah Lateral <i>Et Rest</i>
LL	: <i>Liquid Limit</i> /batas cair
MEH	: Metode Elemen Hingga
MN	: Mega Newton
MPa	: Mega Pascal
$NAVFAC$: <i>Naval Facilities Engineering Command</i>
N_{SPT}	: Jumlah Tumbukan dalam Uji <i>Standard Penetration Test</i>
OCR	: <i>Over Consolidation Ratio</i>
PI	: <i>Plasticity Index</i> /PI
PL	: <i>Plastic Limit</i> /PL
q_p	: <i>Pile Toe Resistance</i>
$S1$: Segmen 1 (Berlaku Juga Untuk S2 sampai dengan S12)
SM	: <i>Silty Sand</i>
SNI	: Standar Nasional Indonesia
SPT	: <i>Standard Penetration Test</i>
S_u	: Kohesi <i>Undrained</i>
TIM	: Taman Ismal Marzuki
$TP-01$: <i>Test Pile Number 1</i>

<i>USCS</i>	: <i>Unified Soil Classification System</i>
<i>VWSG</i>	: <i>Vibrating Wire Strain Gage</i>
<i>W_{air}</i>	: Berat Air
<i>W_{solid}</i>	: Berat Fase Solid Tanah
<i>w</i>	: Kadar Air
<i>w/c</i>	: Perbandingan Air dan Semen dalam Beton
<i>z</i>	: <i>Pile Displacement</i>
<i>2D</i>	: 2 Dimensi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Faktor-faktor yang Mengharuskan Designer Menggunakan Fondasi Tiang (National Cooperative Highway Research Program United States of America, 1977).....	2-2
Gambar 2.2 Mekanisme Transfer Beban Pada Fondasi Tiang (DFRI Unpar, 2017)	2-3
Gambar 2.3 Contoh <i>Load-Settlement Curve</i> (DFRI Unpar, 2017)	2-5
Gambar 2.4 Mekanisme Pengalihan Beban Fondasi Tiang oleh Coyle dan Reese	2-5
Gambar 2.5 Hubungan Antara Kuat Geser Tanah dengan Kadar Air Pada London Clay (Skempton, 1959)	2-7
Gambar 2.6 (a) Kurva Penurunan terhadap Beban Pada Tiang (1); (b) Kurva Penurunan terhadap Beban Pada Tiang (2); (c) Kurva Penurunan terhadap Beban Pada Tiang (3).....	2-10
Gambar 2.7 (a) Kurva Penurunan terhadap Beban Pada Tiang Bor; (b) Kurva Penurunan terhadap Beban Pada Tiang Pancang	2-12
Gambar 2.8 Uji Pembebanan Tiang (a) Cara Kentledge (b) Cara Jangkar (ASTM D1143)	2-14
Gambar 2.9 Sketsa Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> (Rahardjo et al, 2017)	2-15
Gambar 2.10 Ilustrasi Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> Pada Tulangan Fondasi Tiang Bor (Rahardjo P.P. et al, 2017).....	2-15
Gambar 2.11 Cara Kerja Sistem BOTDA (Mohamad dan Tee, 2015)	2-16
Gambar 2.12 <i>Frequency Shift</i> Pada Kabel <i>Fiber Optic</i> (Peled et al, 2012).....	2-16
Gambar 2.13 Contoh Identifikasi Kerusakan Tiang dari Hasil Pembacaan Kabel <i>Fiber Optic</i> (DFRI Unpar, 2017)	2-17
Gambar 2.14 (a) Contoh VWSG (geonor.com); (b) Sketsa Pemasangan VWSG (DFRI Unpar, 2017).....	2-18
Gambar 2.15 Sketsa Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> dan VWSG (Mohamad et al, 2017)	2-19
Gambar 2.16 Hasil Pembacaan Kabel <i>Fiber Optic</i> (Mohamad et al, 2017).....	2-19
Gambar 2.17 Perbandingan Hasil Pembacaan Kabel <i>Fiber Optic</i> dengan VWSG Pada Kedalaman yang Sama Di Bawah Berbagai Besaran Beban (Mohamad et al, 2017)	2-20
Gambar 2.18 Sketsa Pembangunan Terowongan (Mohamad, 2012).....	2-21
Gambar 2.19 (a) Tata Letak Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> dan Penomoran <i>Gage</i> ; (b) Dimensi Katrol dan Kabel <i>Fiber Optic</i> yang Digunakan (Mohamad, 2012).....	2-22
Gambar 2.20 Regangan yang Terjadi Pada <i>Lining</i> Terowongan (Mohamad, 2012)	2-22
Gambar 2.21 Deformasi Terowongan (Mohamad et al, 2012).....	2-22

Gambar 2.22 Hasil Pembacaan Regangan dari Kabel <i>Fiber Optic</i> (Rahardjo <i>et al</i> , 2017).....	2-24
Gambar 2.23 (a) Sketsa Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> ; (b) Prediksi Defleksi Tiang (Rahardjo <i>et al</i> , 2017).....	2-24
Gambar 2.24 Kerusakan Pada Tiang (Rahardjo <i>et al</i> , 2017).....	2-25
Gambar 2.25 Contoh Diskretisasi Elemen (Jagota <i>et al</i> , 2013)	2-26
Gambar 2.26 Ilustrasi Fungsi Aproksimasi Metode Elemen Hingga (Alvi, 2018) 2-26	
Gambar 2.27 Contoh kasus sumbu simetri : pondasi tangki, sampel triaksial, dan hollow pile	2-28
Gambar 2.28 Tegangan-tegangan yang bekerja pada sumbu simetri	2-28
Gambar 2.29 Ilustrasi Elemen <i>Interface</i>	2-29
Gambar 2.30 Model Mohr-Coulomb (Gouw, 2014)	2-31
Gambar 2.31 Hubungan Antara Kondisi <i>Effective Stress</i> dengan Kuat Geser Tanah Dalam Kondisi <i>Undrained</i> (Gouw, 2014)	2-32
Gambar 3.1 Sketsa Pemasangan Kabel <i>Fiber Optic</i> Pada Sampel.....	3-3
Gambar 3.2 Sampel Beton Silinder yang Sudah Dipasangi Kabel <i>Fiber Optic</i> ...	3-3
Gambar 3.3 Proses Pengecoran	3-4
Gambar 3.4 Proses Uji Tekan Sampel Beton Silinder	3-4
Gambar 3.5 Korelasi Nilai N_{SPT} dengan Kohesi Tak Teralir (Terzaghi & Peck, 1967; Sowers, 1979).....	3-6
Gambar 3.6 Hubungan Kohesi Kondisi <i>Drained</i> dengan Kohesi Kondisi <i>Undrained</i> (Sorensen & Okkels, 2013)	3-7
Gambar 3.7 Hubungan Indeks Plastisitas dengan Sudut Geser Dalam Efektif (<i>after</i> Bjerrum dan Simons, 1960).....	3-7
Gambar 3.8 Korelasi Nilai ϕ Untuk Tanah Pasir (Durgunoglu, H.T. dan Mitchell, J.K.)	3-8
Gambar 3.9 Korelasi nilai S_u dengan Modulus Tak Teralir (Duncan & Buchignani, 1976).....	3-9
Gambar 3.10 Contoh Hubungan Modulus dengan Regangan	3-11
Gambar 3.11 Ilustrasi Menghitung Modulus Beton di Sepanjang Tiang	3-12
Gambar 3.12 Contoh Analisis Transfer Beban.....	3-13
Gambar 3.13 General Settings di Plaxis 2D	3-14
Gambar 3.14 Pemodelan Material Beton dan Tanah.....	3-15
Gambar 3.15 Pemodelan Pada Plaxis 2D	3-16
Gambar 3.16 Mesh Pada Model Penelitian	3-17
Gambar 3.17 Pemodelan Tahapan Konstruksi Pada <i>Software</i> Plaxis 2D.....	3-17
Gambar 4.1 Lokasi Proyek Revitalisasi Taman Ismail Marzuki.....	4-1
Gambar 4.2 Lokasi Tiang Uji	4-1
Gambar 4.3 Lokasi Pengeboran dan Uji N_{SPT} Titik BH-01, BH-02, BH-03, dan BH-04	4-2

Gambar 4.4 Regangan di Sepanjang Tiang Saat <i>Static Loading Test</i> (PT Geotechnical Engineering Consultant, 2019)	4-3
Gambar 4.5 Kurva Penurunan Fondasi Terhadap Beban dan Waktu (PT Paku Bumi Semesta, 2019)	4-4
Gambar 4.6 Pembagian Segmen Untuk Menghitung Modulus Fondasi Tiang ...	4-5
Gambar 4.7 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 1	4-6
Gambar 4.8 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 2	4-7
Gambar 4.9 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 3	4-7
Gambar 4.10 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 4	4-7
Gambar 4.11 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 5	4-7
Gambar 4.12 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 6	4-8
Gambar 4.13 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 7	4-8
Gambar 4.14 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 8	4-8
Gambar 4.15 Kurva Hubungan Modulus – Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 9	4-8
Gambar 4.16 Kurva Hubungan Modulus–Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 10	4-9
Gambar 4.17 Kurva Hubungan Modulus–Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 11	4-9
Gambar 4.18 Kurva Hubungan Modulus–Regangan Pada Fondasi Tiang Bor Data FO Segmen 12	4-9
Gambar 4.19 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 1	4-12
Gambar 4.20 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 2	4-12
Gambar 4.21 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 3	4-12
Gambar 4.22 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 4	4-13
Gambar 4.23 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 5	4-13
Gambar 4.24 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 6	4-13
Gambar 4.25 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 7	4-13
Gambar 4.26 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 8	4-14
Gambar 4.27 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 9	4-14
Gambar 4.28 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 10	4-14
Gambar 4.29 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 11	4-14
Gambar 4.30 Kurva $\tau - z$ Pada Fondasi Tiang Bor Segmen 12	4-15
Gambar 4.31 Kurva $q - z$ Pada Fondasi Tiang Bor	4-15

Gambar 4.32 Kurva <i>Load Transfer</i> Pada Fondasi Tiang Bor	4-16
Gambar 4.33 Sampel Beton Silinder yang Pecah.....	4-18
Gambar 4.34 Regangan di Sepanjang Kabel <i>Fiber Optic</i> Saat Uji Pembebanan Sampel Beton Silinder	4-19
Gambar 4.35 Pembagian Segmen Pada Sampel Beton Silinder.....	4-19
Gambar 4.36 Kurva Modulus vs Regangan Sampel Beton Silinder Segmen 1 .	4-19
Gambar 4.37 Kurva Modulus vs Regangan Sampel Beton Silinder Segmen 2 .	4-20
Gambar 4.38 Kurva Modulus vs Regangan Sampel Beton Silinder Segmen 3 .	4-20
Gambar 4.39 Kurva Modulus vs Regangan Sampel Beton Silinder Segmen 4 .	4-20
Gambar 4.40 Justifikasi Stratifikasi Tanah	4-22
Gambar 4.41 Korelasi N_{SPT} dengan Kohesi <i>Undrained</i>	4-23
Gambar 4.42 Korelasi Empiris Nilai Indeks Plastisitas (PI) dengan Sudut Geser Dalam Efektif Untuk Tanah Kohesif.....	4-24
Gambar 4.43 Kurva Regangan Hasil Analisis Numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D: a.) Beban 240 ton, b.) Beban 320 ton, c.) Beban 400 ton.....	4-27
Gambar 4.44 Kurva Regangan Hasil Analisis Numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D: a.) Beban 480 ton, b.) Beban 560 ton, c.) Beban 640 ton.....	4-28
Gambar 4.45 Kurva Regangan Hasil Analisis Numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D: a.) Beban 720 ton, b.) Beban 800 ton, c.) Beban 880 ton.....	4-29
Gambar 4.46 Kurva Regangan Hasil Analisis Numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D: a.) Beban 960 ton, b.) Beban 1040 ton	4-30
Gambar 4.47 Perbandingan Kurva Load – Settlement yang Didapat dari Analisis numerik dengan <i>Software</i> Plaxis 2D dengan Load – Settlement Aktual dari Data <i>Static Loading Test</i>	4-31
Gambar 4.48 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 1	4-32
Gambar 4.49 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 2	4-32
Gambar 4.50 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 3	4-32
Gambar 4.51 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 4	4-32
Gambar 4.52 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 5	4-33
Gambar 4.53 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 6	4-33
Gambar 4.54 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 7	4-33
Gambar 4.55 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 8	4-33
Gambar 4.56 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis 2D Segmen 9	4-34

Gambar 4.57 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis2D Segmen 10	4-34
Gambar 4.58 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis2D Segmen 11	4-34
Gambar 4.59 Perbandingan Modulus Aktual dengan Hasil Analisis Numerik Plaxis2D Segmen 12	4-34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Besarnya R_{inter} (Brinkgreeve dan Shen, 2011)	2-29
Tabel 3.1 Daftar berat isi tanah (NAVFAC, 1986)	3-5
Tabel 3.2 Kohesi dan sudut geser dalam efektif tanah kohesif (Look, 2007)	3-7
Tabel 3.3 Korelasi nilai N_{SPT} dengan ϕ (Budhu, 2010)	3-8
Tabel 3.4 Contoh pembacaan regangan di beberapa kedalaman tiang	3-10
Tabel 4.1 Data Fondasi Tiang.....	4-2
Tabel 4.2 Pembagian segmen fondasi tiang bor	4-6
Tabel 4.3 Resume parameter tanah yang digunakan untuk analisis dengan <i>software</i> Plaxis 2D	4-25

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 Data Bor dan Uji N_{SPT}	L1-1
LAMPIRAN 2 Data Uji Laboratorium.....	L2-1
LAMPIRAN 3 Data <i>Static Loading Test</i>	L3-1

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Permasalahan

Dalam proses desain sebuah fondasi tiang bor, biasanya nilai modulus beton yang digunakan akan selalu sama/konstan. Biasanya nilai modulus dapat didekati dengan persamaan $4700\sqrt{f_c}$ (SNI 2847-2013) atau persamaan lain misalnya yang dikembangkan oleh Pauw (1960) yang mengatakan bahwa besarnya nilai modulus adalah $E_{\text{concrete}} = 33 w^{1.5}\sqrt{f_c}$ dalam satuan psi. Jika dilihat dari persamaan-persamaan tersebut di atas, maka nilai modulus semata-mata hanya tergantung dan dipengaruhi oleh mutu atau kualitas beton itu sendiri yang dilambangkan dengan nilai f_c .

Permasalahan lainnya yang sering terjadi adalah nilai modulus akan dianggap sama atau menerus dari atas sampai dasar fondasi tiang bor. Padahal jika dilihat lebih jauh, proses pengerjaan fondasi tiang bor dilakukan di lapangan langsung yang mana penuh dengan ketidakpastian / *uncertainty* dan permasalahan-permasalahan teknis lainnya. Salah satu permasalahan pada konstruksi tiang bor adalah adanya lumpur, tanah sisa pengeboran, dan deposit sedimen dari *slurry* di dasar lubang yang tidak dibersihkan dengan baik sesaat setelah proses pengeboran selesai dilaksanakan (DFRI Unpar, 2017). Sebetulnya permasalahan ini bisa diatasi dengan menggunakan pipa tremi saat proses pengecoran; pipa tremi dimasukkan sampai menyentuh dasar lubang baru kemudian beton dituang. Namun, terkadang

prosedur ini tidak dilakukan dengan baik sehingga akibatnya akan ditemui beton yang terkontaminasi dengan lumpur atau tanah sisa pengeboran tersebut.

Dengan adanya kontaminasi pada beton kualitas beton akan rusak dan kekuatannya akan menurun (Amran, 1992). Beton yang terkontaminasi bisa terdapat di bagian dasar tiang dan/atau di bagian ujung tiang bagian atas dan/atau di bagian mana saja. Bila beton yang terkontaminasi berada di dasar tiang kemungkinan disebabkan oleh pipa tremi yang tidak dimasukkan sampai dasar tiang ketika pengecoran, sehingga beton hanya ditumpahkan begitu saja dari ketinggian tertentu dan alhasil beton pada dasar lubang akan bercampur dengan tanah atau lumpur; masalah lain yang mungkin timbul adalah mengenai segregasi pada beton (DFRI Unpar, 2017). Bila beton yang terkontaminasi berada di bagian ujung atas tiang, kemungkinan disebabkan bagian yang bercampur dengan lumpur tidak dibuang; maksudnya adalah seharusnya beton terus dimasukkan melalui pipa tremi yang kemudian akan mendorong beton yang terkontaminasi tanah atau lumpur dari dasar tiang sampai tumpah ke luar lubang, dan akan didapatkan beton yang relatif homogen dari dasar sampai atas tiang.

Setelah proses pengecoran selesai, harus ditunggu sampai 28 hari agar mutu beton mencapai mutu desain (SNI 03-2847-2002), kemudian dilakukan pengujian pembebanan tiang, untuk mengetahui perilaku tiang ketika dibebani. Tiang-tiang yang akan diuji seharusnya adalah tiang-tiang berinstrumentasi, misalnya pada tiang yang sudah dipasang *strain gauge* atau yang jauh lebih modern adalah dengan menggunakan kabel *fiber optic*. Baik *strain gauge* maupun kabel *fiber optic* keduanya adalah untuk mengukur regangan yang terjadi ketika tiang dibebani, bedanya adalah *strain gauge* hanya dipasang di titik-titik tertentu sehingga

regangan yang terbaca pun hanya pada titik-titik itu saja, untuk kedalaman-kedalaman yang lainnya tinggal dihubungkan besarnya regangan antar titik; sedangkan kabel *fiber optic* bisa dipasang di sepanjang tiang, sehingga regangan regangan di sepanjang tiang juga dapat diukur.

Dari pengujian pembebanan tiang, akan terbaca jika diaplikasikan beban sebesar x % dari beban rencana, maka penurunan tiang yang terjadi seberapa besar dan regangan di sepanjang tiang seperti apa. Data regangan sepanjang tiang yang diperoleh, kemudian bisa digunakan untuk melakukan analisis transfer beban. Bisa kemudian dilihat bagaimana distribusi tahanan yang ada di sepanjang tiang bor. Berdasarkan Hukum Hooke yang dikemukakan pada tahun 1678, jika nilai regangan sudah terukur kemudian diketahui nilai modulus maka akan bisa diperoleh besarnya tegangan, dan jika diketahui luas yang menerima tegangan maka akan bisa didapatkan berapa gaya yang terjadi. Oleh karena hal-hal tersebut di atas penelitian ini dilakukan.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah:

1. Mendeteksi modulus sepanjang fondasi tiang bor berdasarkan hasil uji pembebanan menggunakan instrumentasi kabel *fiber optic*.
2. Membuat kurva analisis transfer beban pada fondasi tiang bor.
3. Membandingkan nilai modulus pada fondasi tiang dari data aktual di lapangan dari kabel *fiber optic* dengan hasil penelitian di laboratorium dan pemodelan atau analisis balik (analisis numerik) di *software* yang berbasis Metode Elemen Hingga.

1-4

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui hal selain mutu beton yang memengaruhi nilai modulus beton.
2. Mengetahui perilaku beton pada fondasi tiang bor dengan melakukan pengujian di laboratorium dan pemodelan dengan *software* komputer.
3. Mengetahui nilai modulus beton sepanjang fondasi tiang bor.

1.3 Lingkup Penelitian

Lingkup dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan uji laboratorium untuk mendapatkan data kualitas beton yang dengan ketentuan sebagai berikut:
 - a) Mutu beton didesain dengan $f_c' = 30$ MPa menggunakan beton instan dari PT Beton Elemenindo Perkasa
 - b) Uji tekan terhadap seluruh sampel dilakukan pada umur beton 28 hari di laboratorium teknik struktur menggunakan *manual testing machine*.
 - c) Instrumentasi yang digunakan untuk mengukur regangan pada sampel adalah kabel *fiber optic*.
 - d) Membuat korelasi antara Modulus dengan Regangan akibat beban tertentu pada fondasi tiang.
 - e) Membandingkan nilai modulus antar segmen pada fondasi tiang dari data data aktual dengan data laboratorium dan hasil analisis balik.
2. Analisis balik menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga Plaxis 2 dimensi.

1.4 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1.4.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan adalah untuk mendapatkan pengetahuan dasar dan mendalam mengenai metode pengujian di laboratorium, sistem dan cara kerja sekaligus cara mengolah data yang diperoleh dari pembacaan kabel *fiber optic*, analisis transfer beban, serta hal lain yang dapat berguna untuk mencapai tujuan penelitian. Literatur yang digunakan berasal dari buku teks, *ebook*, jurnal internasional maupun nasional, *proceeding*, laporan penelitian ilmiah, thesis master, disertasi doktoral, dan semua materi perkuliahan yang relevan dengan topik penelitian.

1.4.2 Pengambilan Data

Data berupa laporan hasil uji pembebanan pada fondasi tiang dan juga data hasil penyelidikan lapangan pada lokasi proyek didapatkan langsung dari kontraktor proyek.

1.4.3 Pengujian laboratorium

Pengujian ini dilakukan di laboratorium teknik struktur yaitu dengan membuat sampel beton dengan spesifikasi tersebut di atas. Sampel beton yang digunakan adalah sampel dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm. Pemasangan instrumentasi kabel *fiber optic* juga dilakukan untuk mengukur regangan yang terjadi akibat pembebanan.

1.4.4 Interpretasi dan analisis data

Data yang sudah didapat dari penelitian di laboratorium kemudian diolah dan dianalisis untuk mencapai tujuan penelitian.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini ditulis dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 - PENDAHULUAN

Pada bab ini penulis akan menjabarkan mengenai latar belakang masalah, tujuan penelitian, lingkup penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 – STUDI PUSTAKA

Pada bab ini akan dijabarkan mengenai teori-teori yang diperlukan untuk menunjang penelitian, yaitu teori mengenai jenis fondasi, metode pelaksanaan konstruksi fondasi tiang, pengujian berat jenis tanah, pengujian kadar air, analisis saringan dan hidrometer, pengujian batas-batas Atterberg, alat uji *Universal Testing Machine*, material beton, konsep dasar mengenai kegunaan kabel *fiber optic* hubungannya dengan pembacaan regangan, dan analisis transfer beban.

BAB 3 – METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai beberapa hal yaitu langkah-langkah pengujian sampel tanah di laboratorium geoteknik, langkah-langkah pembuatan sampel beton, langkah-langkah pengujian sampel beton, langkah-langkah pembacaan kabel *fiber optic*, dan juga metode analisis.

BAB 4 – ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, akan dilakukan analisis transfer beban pada salah satu tiang uji (*test pile*) pada proyek Revitalisasi Taman Ismail Marzuki, Jakarta Pusat, DKI Jakarta, Indonesia. Data yang tersedia adalah data regangan sepanjang tiang saat uji pembebanan statik dari pembacaan kabel *fiber optic*.

BAB 5 – SIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini akan dituliskan hal-hal apa saja yang dapat disimpulkan dari penelitian ini. Akan dituliskan juga beberapa saran yang sekiranya akan berguna bila akan dilakukan penelitian selanjutnya.

1.6 Diagram Alir

Berikut adalah diagram alir yang menggambarkan proses penelitian ini.

