

**STUDI NUMERIK PERILAKU GALIAN DALAM DENGAN
PROTEKSI *SECANT PILE* MENGGUNAKAN *SOIL NAILING*
PADA TANAH LEMPUNG**

TESIS

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



Oleh:

Ryan Alexander Lyman

2017831019

Pembimbing 1:

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

Pembimbing 2:

Aswin Lim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN

BANDUNG

AGUSTUS 2019

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI NUMERIK PERILAKU GALIAN DALAM DENGAN PROTEKSI
SECANT PILE MENGGUNAKAN *SOIL NAILING* PADA TANAH
LEMPUNG**



Oleh:

Ryan Alexander Lyman

2017831019

**Disetujui Untuk Diajukan Mengikuti Ujian Sidang Tesis Pada
Hari/Tanggal:**

Jumat, 02 Agustus 2019

Pembimbing 1:

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

Pembimbing 2:

Aswin Lim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN

BANDUNG

AGUSTUS 2019

**STUDI NUMERIK PERILAKU GALIAN DALAM DENGAN PROTEKSI
SECANT PILE MENGGUNAKAN SOIL NAILING PADA TANAH
LEMPUNG**

Ryan Alexander Lyman (NPM: 2017831019)

Pembimbing 1: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.

Pembimbing 2: Aswin Lim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

Magister Teknik Sipil

Bandung

Agustus 2019

ABSTRAK

Pergerakan yang terjadi akibat pekerjaan galian pada daerah perkotaan menjadi perhatian utama. Penentuan parameter tanah khususnya kekakuan tanah menjadi parameter yang berperan penting dalam suatu analisis deformasi. Selain itu, pemilihan sistem pengaku turut mempertimbangkan keterbatasan lahan konstruksi daerah perkotaan. *Soil nailing* sebagai sistem pengaku dapat menjadi salah satu solusi mengatasi masalah keterbatasan lahan dan banyak digunakan di seluruh dunia. Studi parametrik untuk mengetahui perilaku dan mekanisme deformasi *secant pile* dan penurunan tanah akibat galian yang diperkuat dengan *soil nailing* dilakukan dengan melakukan variasi panjang (L_n), kemiringan sudut (θ_n), spasi vertikal (S_h) *soil nailing* serta elevasi muka air tanah (H_w), kedalaman galian (H_e), tebal lapisan lempung (H_c) dan kuat geser *undrained* lempung (S_u) melalui model numerik 2D yang berdasarkan konsep perhitungan elemen hingga. Seluruh hasil pemodelan numerik terangkum dalam beberapa kelompok data yang disajikan dalam beberapa *chart design*. *Chart design* yang dihasilkan untuk memprediksi deformasi yang terjadi dengan berbagai skenario galian yang ada terverifikasi dengan melalui studi kasus dengan data penyelidikan geoteknik dan data monitoring inklinometer yang relatif baik. Besarnya deformasi lateral maksimum pada *secant pile* (δ_{hm}) hasil studi parametrik, studi kasus dan monitoring berturut-turut adalah 49.20 mm, 47.54 mm dan 45.98 mm. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa *chart design* yang dikembangkan dapat digunakan dalam mengestimasi besarnya deformasi dalam waktu yang relatif singkat dengan tingkat toleransi yang wajar.

Kata Kunci: galian dalam, *soil nailing*, deformasi lateral, studi parametrik, elemen hingga

NUMERICAL STUDY OF SECANT PILE DEEP EXCAVATION BEHAVIOR REINFORCED BY SOIL NAILING IN CLAYEY SOIL

Ryan Alexander Lyman (Student ID: 2017831019)

Advisor 1: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.

Advisor 2: Aswin Lim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.

Master Program of Civil Engineering

Bandung

August 2019

ABSTRACT

The movements due to excavation in urban areas are major concerns. Determination of soil parameters namely soil stiffness plays an important role in the deformation analysis. Furthermore, the selection of appropriate support systems also considers the limitations space of the urban area. Soil nailing as a support system can be the solution to overcome limited space in urban areas' problem and has been widely used worldwide. A series of parametric studies were conducted to determine the behavior and mechanism of secant pile deformation and ground surface settlement due to excavation reinforced by soil nailing, varying length (L_n), inclination (θ_n), vertical spacing (S_n) of soil nailing, groundwater level (H_w), excavation's depth (H_e), clay's thickness (H_c) and undrained shear strength (S_u) based on a 2D numerical finite element models. The results of numerical modelling are summarized in several groups that presented in several design charts. The design charts can be used to predict the deformations of various excavation scenarios that have been verified through case studies with relatively well noted geotechnical investigation and well-monitored inclinometer. The maximum lateral deformation of secant pile (δ_{lm}) obtained from parametric studies, case studies and inclinometer is 49.20 mm, 47.54 mm and 45.98 mm respectively. Hence it is concluded that the developed charts for the purpose of pre-design or just estimated can be conducted in much shorter time using the charts easily with sufficient tolerance.

Keywords: deep excavation, *soil nailing*, lateral deformation, parametric study, finite element

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis yang berjudul “STUDI NUMERIK PERILAKU GALIAN DALAM DENGAN PROTEKSI *SECANT PILE* MENGGUNAKAN *SOIL NAILING* PADA TANAH LEMPUNG”. Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat S-2 (master) di Fakultas Teknik Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Penulis menyadari dalam menyusun tesis ini telah terkendala banyak masalah. Namun berkat kritik, saran dan dorongan semangat dari berbagai pihak maka akhirnya tesis ini dapat diselesaikan. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D. dan Bapak Aswin Lim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah mencurahkan perhatian, waktu, tenaga dan membagikan ilmu pengetahuan yang berguna bagi penulis dalam menyelesaikan tesis ini tanpa lelah dan tidak patah semangat dalam membimbing penulis;
2. Bapak Budijanto Widjaja, Ph.D dan Ibu Dr. Rinda Karlinasari selaku dosen penguji yang telah berkenan memberikan saran dan kritik kepada penulis sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan lebih baik;
3. Ibu Anastasia Sri Lestari, Ir., M.T., Ibu Siska Rustiani, Ir., M.T. dan Bapak Soeryadedi Sastraatmadja, Ir yang memberikan ilmu dan dukungan kepada penulis selama pembelajaran di kampus UNPAR serta selama proses penyusunan tesis ini;
4. Papa, Mama, Om Indra, Reyner Alexander Lyman dan Regan Alexander Lyman yang selalu memberikan dukungan dan semangat terutama doa tiada henti sehingga penulis tetap semangat dalam pengerjaan tesis ini;
5. Aflizal Arafianto, Albert Johan, Andrianto, Evelyn, Felix Fernando, Jericko, Nisa Utami, Stefanus Diaz Alvi dan Steven Sutanto yang telah

membantu penulis menghadapi berbagai masalah selama menjalani proses perkuliahan;

6. Rekan-rekan seperjuangan: Andreas Erdian Wijaya dan Michael Sutoyo yang telah banyak berdiskusi serta bertukar pikiran selama perkuliahan dan dalam proses penyusunan tesis ini;
7. Rekan-rekan PT Geotechnical Engineering Consultant untuk bantuannya dalam pengumpulan data untuk analisis;
8. Alyta Tjhai, Darius Darmawan, Endrick Andrian Lie, Jessica Astrella, Ricki Setiawan; Viro Fernando; Wilonia Deana; Ce Ratna Dewi dan Ko Tobing Tandoko yang telah banyak memberikan canda, semangat dan bantuan kepada penulis selama proses penyusunan tesis ini;
9. Rekan-rekan PT LAPI Ganeshatama Consulting khususnya Kak Sekar, Kak Rizky, Karina, Husain, Hamzah, Ardian, Yuni, Vino, Beauti, Astrid, Erwin, Fenita dan Clarissa atas dorongan semangat yang diberikan kepada penulis selama proses penyusunan tesis ini;
10. Karyawan Tata Usaha Fakultas Teknik UNPAR yang telah membantu penulis dalam mengurus hal-hal administratif selama proses perkuliahan;
11. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Penulis sangat berterima kasih apabila terdapat saran dan kritik yang dapat membuat tesis ini akan menjadi lebih baik lagi. Dibalik kekurangan tersebut, penulis berharap tesis ini dapat berguna bagi rekan-rekan dan semua orang yang membacanya.

Bandung, 02 Agustus 2019

Ryan Alexander Lyman
2017831019

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| KATA PENGANTAR..... | i |
| DAFTAR ISI..... | iii |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | ix |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xvii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.3 Lingkup Penelitian | 3 |
| 1.4 Metode Penelitian..... | 4 |
| 1.4.1 Studi Literatur | 4 |
| 1.4.2 Pengambilan dan Pengumpulan Data | 5 |
| 1.4.3 Interpretasi, Analisis dan Pengolahan Data | 5 |
| 1.4.4 Studi Kasus | 5 |
| 1.4.5 Studi Parametrik | 5 |
| 1.5 Sistematika Penulisan..... | 6 |
| BAB 2 STUDI PUSTAKA | 9 |
| 2.1 Pendahuluan | 9 |
| 2.2 Studi Terdahulu Mengenai Pekerjaan Galian Dalam..... | 10 |
| 2.3 Kinerja Pekerjaan Galian Dalam..... | 12 |
| 2.4 Faktor Pengaruh Kinerja Pekerjaan Galian Dalam | 13 |
| 2.4.1 Jenis dan Perilaku Mekanis Tanah | 13 |
| 2.4.2 Sistem Pendukung Galian Dalam | 14 |
| 2.4.3 Elevasi Muka Air Tanah..... | 15 |
| 2.4.4 Tegangan Awal Tanah (<i>Initial Stresses</i>)..... | 15 |
| 2.4.5 Kekakuan Sistem Struktur Penahan Tanah dan Pendukung Lateral | 15 |
| 2.4.6 Tahapan dan Metode Konstruksi | 17 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.7 Keahlian Pekerja Konstruksi (<i>Workmanship</i>)..... | 17 |
| 2.4.8 Temperatur | 17 |
| 2.5 Karakteristik Deformasi Struktur Penahan dan Penurunan Tanah Akibat Penggalian..... | 18 |
| 2.5.1 Deformasi Struktur Penahan | 18 |
| 2.5.2 Penurunan Tanah..... | 20 |
| 2.6 <i>Soil Nailing</i> Sebagai Komponen Pendukung Lateral Pekerjaan Galian Dalam..... | 25 |
| 2.7 Uji Pressuremeter..... | 29 |
| 2.8 Inklinometer..... | 32 |
| 2.9 Model Konstitutif Tanah..... | 35 |
| 2.9.1 <i>Hardening Soil Model</i> | 36 |
| 2.9.2 Perilaku <i>Undrained</i> Tanah Lempung..... | 38 |
| 2.10 Metode Elemen Hingga | 40 |
| BAB 3 METODE ANALISIS | 43 |
| 3.1 Analisis Galian Dalam Dengan Perkuatan <i>Soil Nailing</i> | 43 |
| 3.1.1 Tahap Pra-Analisis | 43 |
| 3.1.2 Tahap Analisis..... | 46 |
| 3.1.3 Tahap Pasca-Analisis | 47 |
| 3.2 Pemodelan Galian Dalam Menggunakan PLAXIS 2D | 47 |
| 3.3 Pemodelan Menggunakan PLAXIS 2D..... | 49 |
| 3.3.1 Pra-Analisis: Pemodelan dan Penentuan Parameter Design | 50 |
| 3.3.2 Analisis: Pemodelan dan Analisis Tahapan Konstruksi..... | 59 |
| 3.3.3 Pasca-Analisis: Hasil Analisis Model | 67 |
| 3.4 <i>Multivariabel Statistical Analysis</i> | 69 |
| BAB 4 STUDI PARAMETRIK..... | 71 |
| 4.1 Pendahuluan..... | 71 |
| 4.2 Variabel yang Berpengaruh Terhadap Mekanisme Interaksi Tanah-Struktur | 72 |
| 4.3 Variasi Nilai Variabel dan Kelompok Variabel Tak Berdimensi..... | 73 |
| 4.4 Analisis Statistik: <i>Multivariable Statistical Analysis</i> | 75 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.5 | Efek Panjang <i>Soil Nailing</i> Terhadap Deformasi Lateral dan Vertikal | 78 |
| 4.6 | Hubungan Momen Lentur Terhadap Deformasi Lateral | 80 |
| BAB 5 STUDI KASUS: GKM OFFICE TOWER | | 83 |
| 5.1 | Deskripsi Proyek | 83 |
| 5.2 | Kondisi Geologi Regional | 85 |
| 5.3 | Data Uji Lapangan | 85 |
| 5.3.1 | Uji Penetrasi Standar (SPT) | 85 |
| 5.3.2 | Uji Pressuremeter (PMT) | 87 |
| 5.4 | Data Monitoring Inklinometer | 88 |
| 5.5 | Data Uji Laboratorium | 89 |
| 5.5.1 | <i>Index Properties</i> | 89 |
| 5.5.2 | Permeabilitas Tanah | 91 |
| 5.5.3 | Kuat Geser Tanah | 92 |
| 5.5.4 | <i>Over Consolidation Ratio (OCR)</i> | 93 |
| 5.5.5 | Modulus Elastisitas Tanah | 95 |
| 5.6 | Rekapitulasi Parameter Tanah | 96 |
| 5.7 | Penentuan Parameter Struktur | 97 |
| 5.7.1 | <i>Secant Pile</i> | 97 |
| 5.7.2 | <i>Soil Nailing</i> | 97 |
| 5.8 | Analisa Galian Dalam Menggunakan Metode Elemen Hingga | 98 |
| 5.9 | Perbandingan Hasil Analisis | 101 |
| 5.10 | Implementasi Hasil Studi Parametrik Terhadap Studi Kasus | 102 |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN | | 105 |
| 6.1 | Kesimpulan | 105 |
| 6.2 | Saran | 106 |
| DAFTAR PUSTAKA | | xix |

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Daftar Notasi

| | |
|----------------|--|
| E_s | = Modulus Elastisitas Tanah |
| E_c | = Modulus Elastisitas Beton |
| S_u | = Kuat Geser Tanah Tak Teralir |
| ν | = Angka <i>Poisson's</i> |
| c | = Kohesi Tanah |
| ϕ | = Sudut Geser Dalam Tanah |
| γ | = Berat Isi Tanah |
| γ_{sat} | = Berat Isi Tanah Jenuh |
| γ_w | = Berat isi Air |
| H_c | = Kedalaman Tanah Galian |
| B | = Lebar Galian |
| δ_{hm} | = Deformasi Lateral Maksimum <i>Secant Pile</i> |
| δ_{vm} | = Penurunan Muka Tanah |
| R^2 | = Koefisien Determinasi |
| E_{eq} | = Modulus Elastisitas Ekuivalen Komposit <i>Soil Nailing</i> |
| E_n | = Modulus Elastisitas <i>Soil Nailing</i> |
| E_g | = Modulus Elastisitas Material Grouting |
| A_n | = Luas Penampang Tulangan Baja <i>Soil Nailing</i> [m ²] |
| A | = Luas Penampang <i>Soil Nailing</i> [m ²] |
| D_{DH} | = Diameter Lubang Bor <i>Soil Nailing</i> |

Daftar Singkatan

| | |
|--------|--|
| SNI | = Standar Nasional Indonesia |
| ASTM | = <i>American Standard Testing and Material</i> |
| NAVFAC | = <i>Naval Facilities Engineering Command</i> |
| SPT | = <i>Standar Penetration Test</i> |
| USCS | = <i>Unified Soil Classification System</i> |
| BH | = <i>Bore Hole</i> |
| FHWA | = <i>Federal Highway Administration</i> |
| ACI | = <i>American Concrete Institute</i> |
| PMT | = <i>Pressuremeter</i> |
| SE | = <i>Standard Error</i> |
| SPSS | = <i>Statistical Package for The Social Sciences</i> |
| ESUA | = <i>Effective Stress Undrained Analysis</i> |
| TSUA | = <i>Total Stress Undrained Analysis</i> |
| SIZ | = <i>Secondary Influence Zone</i> |
| PIZ | = <i>Primary Influence Zone</i> |
| MSA | = <i>Multivariable Statistical Analysis</i> |
| OCR | = <i>Over Consolidated Ratio</i> |
| UDS | = <i>Undisturbed Sample</i> |
| NC | = <i>Normally Consolidated</i> |
| OC | = <i>Over Consolidated</i> |
| HS | = <i>Hardening Soil</i> |
| MC | = <i>Mohr-Coulomb</i> |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Hubungan Jarak Horizontal Terhadap Penurunan Tanah Berdasarkan Jenis Konsistensi Tanah (Peck, 1969)..... | 13 |
| Gambar 2.2 | Hubungan Bentuk Deformasi Sistem Struktur Penahan Terhadap Tingkat Kekakuan <i>Struts</i> Tinggi Ketika: (a) Galian Tahap 1, (b) Galian Tahap 2, (c) Galian Tahap 3 (Ou, 2006) | 16 |
| Gambar 2.3 | Hubungan Bentuk Deformasi Sistem Struktur Penahan Terhadap Tingkat Kekakuan <i>Struts</i> Rendah Ketika: (a) Galian Tahap 1, (b) Galian Tahap 2, (c) Galian Tahap 3 (Ou, 2006) | 16 |
| Gambar 2.4 | Hubungan Antara Deformasi Maksimum Struktur Penahan, Kekakuan Sistem Pengaku dan Faktor Keamanan Terhadap <i>Basal Heave</i> (Clough <i>et al</i> , 1989) | 19 |
| Gambar 2.5 | Hubungan Deformasi Maksimum Struktur Penahan Terhadap Kedalaman Galian (Ou <i>et al</i> , 1993) | 19 |
| Gambar 2.6 | Tipe Penurunan Muka Tanah (Ou, 2006) | 21 |
| Gambar 2.7 | Bentuk Deformasi Struktur Penahan Saat: (a) Gali Tahap 1 dan (b) Gali Tahap Akhir (Ou, 2006)..... | 21 |
| Gambar 2.8 | Hubungan Tipe Penurunan Muka Tanah Terhadap Bentuk Deformasi Lateral Struktur Penahan (Hsieh and Ou, 1998) | 22 |
| Gambar 2.9 | <i>Primary Influence Zone</i> (PIZ ₂) Pada Tanah Lempung Lunak (Ou, 2006) | 23 |
| Gambar 2.10 | Hubungan Antara Penurunan Maksimum Muka Tanah Terhadap Deformasi Lateral Struktur Penahan Tanah (Ou <i>et al</i> , 1993) | 24 |
| Gambar 2.11 | Detail Tipikal Sistem Struktur <i>Soil Nailing</i> (Ghareh, 2015)..... | 26 |
| Gambar 2.12 | Mode Kegagalan Pada Sistem Struktur <i>Soil Nailing</i> (Seo <i>et al</i> , 2008) | 29 |
| Gambar 2.13 | Perangkat dan Skematik Alat Uji <i>Pre-bored</i> Pressuremeter (ASTM D4719-00) | 30 |
| Gambar 2.14 | Koreksi Data Pada Pengujian Pressuremeter (Modifikasi dari ASTM 4719-00)..... | 32 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 2.15 | Prinsip Perhitungan Pergerakan Lateral Menggunakan Inklinometer (Ou, 2006)..... | 33 |
| Gambar 2.16 | Komponen Alat Monitoring Inklinometer (ASTM D6230-13)... | 34 |
| Gambar 2.17 | Perjanjian Tanda Pada <i>Probe</i> Inklinometer (Ou, 2006) | 35 |
| Gambar 2.18 | Hubungan Tegangan-Regangan Model Hiperbola (Schanz <i>et al</i> , 1999)..... | 37 |
| Gambar 2.19 | Lintasan Tegangan Kondisi Efektif dan Total Pada Tanah (Gouw, 2014)..... | 39 |
| Gambar 3.1 | Penentuan <i>Initial Stress Condition</i> Berdasarkan Konsep: (a) <i>Ko-procedure</i> dan (b) <i>Gravity Loading</i> (Gouw, 2014) | 46 |
| Gambar 3.2 | Pemodelan <i>Plane Strain</i> dan <i>Axisymmetric</i> (<i>Reference Manual</i> PLAXIS, 2017)..... | 49 |
| Gambar 3.3 | Input Judul Proyek Pada Tab Project | 50 |
| Gambar 3.4 | Pengaturan Global Pada Tab Model..... | 50 |
| Gambar 3.5 | Pengaturan Nilai Konstanta Dalam Analisis | 51 |
| Gambar 3.6 | Lokasi Titik <i>Borehole</i> Dalam Desain | 51 |
| Gambar 3.7 | Input Pelapisan dan Elevasi Muka Air Tanah Pada <i>Borehole</i> | 52 |
| Gambar 3.8 | Input Parameter Tanah..... | 52 |
| Gambar 3.9 | Input Parameter Berat Jenis Tanah (<i>Tab General</i>)..... | 53 |
| Gambar 3.10 | Input Parameter Modulus dan Kekuatan Geser Tanah (<i>Tab Parameters</i>) | 53 |
| Gambar 3.11 | Input Parameter Permeabilitas Tanah (<i>Tab Groundwater</i>) | 54 |
| Gambar 3.12 | Input Parameter Tanah (<i>Tab Thermal</i>) | 54 |
| Gambar 3.13 | Input Parameter $R_{interface}$ Tanah (<i>Tab Interfaces</i>)..... | 55 |
| Gambar 3.14 | Input Parameter OCR (<i>Tab Initial</i>)..... | 55 |
| Gambar 3.15 | Pelapisan Tanah..... | 56 |
| Gambar 3.16 | Input Parameter Struktur (<i>Secant Pile</i>)..... | 56 |
| Gambar 3.17 | Input Parameter Struktur (<i>Soil Nailing</i>)..... | 57 |
| Gambar 3.18 | Penggambaran Geometri Model Galian Dalam..... | 57 |
| Gambar 3.19 | <i>Generate Meshing</i> Model Galian Dalam..... | 58 |
| Gambar 3.20 | <i>Output Meshing</i> Model Galian Dalam..... | 58 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 3.21 | <i>Generate Flow Condition Model Galian Dalam</i> | 59 |
| Gambar 3.22 | Tahapan Konstruksi: <i>Initial Phase</i> | 60 |
| Gambar 3.23 | K_0 <i>Procedure</i> Pada Tahapan <i>Initial Phase</i> | 60 |
| Gambar 3.24 | Tahapan Konstruksi: <i>Reset Displacement</i> | 61 |
| Gambar 3.25 | <i>Reset Displacement to Zero</i> | 61 |
| Gambar 3.26 | Tahapan Konstruksi: Instalasi <i>Secant Pile</i> | 62 |
| Gambar 3.27 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 1 (1 st <i>Excavation</i>)..... | 62 |
| Gambar 3.28 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 2 (2 nd <i>Excavation</i>) | 63 |
| Gambar 3.29 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 3 (3 rd <i>Excavation</i>)..... | 63 |
| Gambar 3.30 | Tahapan Konstruksi: Instalasi <i>Soil Nailing</i> | 64 |
| Gambar 3.31 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 4 (4 th <i>Excavation</i>)..... | 64 |
| Gambar 3.32 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 5 (5 th <i>Excavation</i>) | 65 |
| Gambar 3.33 | Tahapan Konstruksi: Penggalian Tahap 6 (6 th <i>Excavation</i>)..... | 65 |
| Gambar 3.34 | Tahapan Konstruksi: Analisis Faktor Keamanan Global..... | 66 |
| Gambar 3.35 | Proses Perhitungan Tahapan-Tahapan Konstruksi..... | 66 |
| Gambar 3.36 | <i>Output</i> Analisis: <i>Defrom Mesh</i> Model Galian Dalam..... | 67 |
| Gambar 3.37 | <i>Output</i> Analisis: Profil Defleksi <i>Secant Pile</i> | 67 |
| Gambar 3.38 | <i>Output</i> Analisis: Kontur Penurunan Muka Tanah..... | 68 |
| Gambar 3.39 | <i>Output</i> Analisis: Profil Bending Momen Pada <i>Secant Pile</i> | 68 |
| Gambar 3.40 | <i>Output</i> Analisis: Profil Gaya Geser Pada <i>Secant Pile</i> | 68 |
| Gambar 4.1 | Skematik Interaksi Tanah-Struktur Pada Studi Parametrik | 72 |
| Gambar 4.2 | Perbandingan Deformasi Lateral Maksimum Ternormalisasi Hasil Prediksi Menggunakan Persamaan Empirik Terhadap Deformasi Lateral Maksimum Ternormalisasi Hasil Perhitungan PLAXIS Pada Kondisi Panjang <i>Soil Nailing</i> (L_n) dan Elevasi Muka Air Tanah (H_w) yang Bervariasi | 77 |
| Gambar 4.3 | <i>Chart Design</i> Untuk Memprediksi Besaran Deformasi Lateral Maksimum (δ_{hm}) dan Grafik Hubungan Defromasi Lateral Maksimum (δ_{hm}) Terhadap Penurunan Tanah Maksimum (δ_{vm}) Pada Kondisi Panjang <i>Soil Nailing</i> (L_n) dan Elevasi Muka Air Tanah (H_w) yang Bervariasi | 80 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Gambar 4.4 | Hubungan Antara Deformasi Lateral Maksimum Terhadap Momen Lentur Maksimum Saat Kondisi Elevasi Muka Air Tanah: (a) H_w : 6 m dan (b) H_w : 10 m..... | 81 |
| Gambar 5.1 | Lokasi Tinjauan Studi Kasus (Lim <i>et al</i> , 2017)..... | 83 |
| Gambar 5.2 | Potongan Struktur Bangunan..... | 84 |
| Gambar 5.3 | Tampak Atas Susunan <i>Secant Pile</i> dan <i>Soil Nailing</i> (Lim <i>et al</i> , 2017)..... | 84 |
| Gambar 5.4 | Peta Geologi Lokasi Tinjauan GKM Office Tower (Peta Geologi Regional Jakarta dan Kepulauan Seribu)..... | 85 |
| Gambar 5.5 | Persebaran N_{value} Pada BH-01 dan BH-02..... | 86 |
| Gambar 5.6 | Hubungan Tekanan dan Radius dari Uji Pressuremeter BH-01 dan BH-02 | 87 |
| Gambar 5.7 | (a) Titik Inklinometer Lokasi Proyek dan (b) Profil Defleksi Inklinometer SP-142..... | 89 |
| Gambar 5.8 | Persebaran data batas-batas <i>Atterberg</i> : (a) Kadar Air Alami (W_n), Batas Plastis (PL), Batas Cair (LL); (b) Indeks Plastisitas (IP) dan (c) Indeks Kecairan (LI) Terhadap Kedalaman..... | 90 |
| Gambar 5.9 | Persebaran data <i>Indeks Properties</i> : (a) Berat Isi (γ_s); (b) Berat jenis (G_s) dan (c) Angka Pori (e) Terhadap Kedalaman | 91 |
| Gambar 5.10 | <i>Cassagrande's Plasticity Chart</i> | 91 |
| Gambar 5.11 | Hubungan Indeks Plastisitas dan Sudut Geser Dalam (after Bjerrum and Simons, 1960)..... | 93 |
| Gambar 5.12 | Hubungan OCR dan Kedalaman | 94 |
| Gambar 5.13 | Hubungan Modulus Elastisitas Tanah (E_M) dan Kedalaman..... | 95 |
| Gambar 5.14 | <i>Meshing</i> Elemen Hingga Untuk Analisis <i>Plane Strain 2D</i> | 99 |
| Gambar 5.15 | Profil Deformasi Lateral (δ_h) Sistem Struktur Penahan dan Penurunan Muka Tanah (δ_v) Sekitar Lokasi Galian Untuk Setiap Tahapan Konstruksi..... | 100 |
| Gambar 5.16 | Profil Gaya-gaya Dalam Untuk Setiap Tahapan Konstruksi: (a) Momen Lentur; (b) Gaya Geser dan (c) Gaya Normal..... | 100 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Gambar 5.17 | Perbandingan Hasil Analisis Terhadap Pembacaan Alat Monitoring Inklinometer SP-142 | 102 |
| Gambar 5.18 | <i>Chart Design</i> dengan Kondisi Panjang <i>Soil Nailing</i> 12 m dan Elevasi Muka Air Tanah 10 m | 103 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|---|-----|
| Tabel 2.1 | Parameter Input Perilaku <i>Undrained</i> Tanah Lempung Pada Program Komputer PLAXIS (Gouw, 2014) | 39 |
| Tabel 3.1 | Rentang Nilai Koefisien Determinasi (Moore <i>et al</i> , 2013) | 70 |
| Tabel 4.1 | Variasi Variabel yang Digunakan Dalam Studi Parametrik..... | 73 |
| Tabel 4.2 | Persamaan Empirik Hasil <i>Multivariabel Statistical Analysis</i> Untuk Berbagai Variasi Kemiringan Sudut Pada Kondisi Panjang <i>Soil Nailing</i> (L_n) dan Elevasi Muka Air Tanah (H_w) yang Bervariasi | 75 |
| Tabel 4.3 | Tabulasi Konstanta Hasil <i>Multivariabel Statistical Analysis</i> Untuk Kondisi L_n : 8 m | 76 |
| Tabel 4.4 | Tabulasi Konstanta Hasil <i>Multivariabel Statistical Analysis</i> Untuk Kondisi L_n : 12 m | 76 |
| Tabel 4.5 | Tabulasi Konstanta Hasil <i>Multivariabel Statistical Analysis</i> Untuk Kondisi L_n : 16 m | 76 |
| Tabel 5.1 | Pelapisan dan Kondisi Tanah Secara Umum di Jakarta Selatan | 87 |
| Tabel 5.2 | Parameter Tanah Hasil Uji Pressuremeter | 88 |
| Tabel 5.3 | Koefisien Permeabilitas untuk Beberapa Jenis Tanah (Budhu, 2011) | 92 |
| Tabel 5.4 | Parameter Berat Isi dan Koefisien Permeabilitas Tanah..... | 96 |
| Tabel 5.5 | Parameter Kuat Geser dan Modulus Elastisitas Tanah | 96 |
| Tabel 5.6 | Parameter Struktur Untuk <i>Secant Pile</i> | 97 |
| Tabel 5.7 | Parameter Struktur Untuk <i>Soil Nailing</i> | 98 |
| Tabel 5.8 | Rekapitulasi Hasil Analisis Pada Setiap Tahapan Konstruksi | 101 |

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Analisis Statistik: *Multivariable Statistical Analysis*

Lampiran 2 Profil Defleksi Dan Penurunan Permukaan Tanah

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan fasilitas umum dapat berupa sistem kereta bawah tanah, pembangunan *underpass* untuk mengurai kemacetan hingga konstruksi *basement* sebagai solusi ketersediaan lahan parkir yang cukup untuk gedung bertingkat tinggi (*high rise building*) dan infrastruktur lain sebagainya tentu pada umumnya akan melibatkan pekerjaan galian serta sistem proteksi galian dalam yang perlu di desain dengan baik dan aman (Farzi *et al*, 2018).

Modulus elastisitas tanah (E) menjadi salah satu parameter yang sangat penting dalam suatu analisis deformasi khususnya pada pekerjaan galian dalam (Lim and Ou, 2017). Penentuan modulus elastisitas tanah secara praktis hanya berdasarkan hasil uji N_{SPT} (ASTM D 1586-11) ataupun berasal dari korelasi kuat geser *undrained* (S_u) tanah yang melibatkan suatu nilai konstanta (α) sebagai suatu faktor pengali untuk memperoleh nilai modulus tanah yang dipergunakan sebagai set parameter dalam desain (Briaud, 2013). Pada umumnya, besarnya nilai α bersifat empiris sehingga modulus tanah yang dihasilkan tentunya akan berbeda-beda sehingga tidak dapat secara akurat merepresentasikan modulus tanah pada kondisi sesuai dengan tanah di lapangan.

Melalui uji Pressuremeter (ASTM D 4719-00), dapat ditentukan besarnya modulus elastisitas tanah yang merupakan salah satu input parameter yang cukup

berperan penting pada analisa pekerjaan dalam ilmu geoteknik yang berhubungan dengan deformasi seperti pekerjaan pondasi pada tanah ekspansif (Rahardjo, P.P. and Tamsir, P., 2018), pekerjaan galian dalam (Lim *et al*, 2017) dan lain sebagainya.

Hardening soil model dinilai dapat merepresentasikan perilaku tanah sebenarnya sesuai dengan kondisi lapangan karena model konstitutif ini menggunakan nilai modulus tanah yang bervariasi sehingga dapat memprediksi besarnya deformasi dinding, penurunan muka tanah dan *heaving* pada dasar galian yang lebih akurat dan realistis apabila dibandingkan dengan model konstitutif yang relatif sederhana seperti *Mohr-Coulomb* (Gouw, 2014).

Soil nailing menjadi salah satu metode perkuatan yang dinilai cukup efektif untuk menjaga stabilitas dari pekerjaan galian dalam dan stabilitas lereng sehingga banyak dipergunakan di seluruh dunia (Ghareh, 2015). Komponen *soil nailing* pada umumnya menggunakan material perkuatan seperti baja tulangan. Berdasarkan penelitian Dai *et al*, 2016 material moso bambu dapat juga digunakan sebagai pengganti baja tulangan dan menjadi salah satu inovasi sistem struktur penahan. Selain itu, berdasarkan penelitian Lim *et al*, 2017 mobilisasi friksi *soil nailing* pada dinding penahan *secant pile* akan mencapai kondisi efektif apabila *soil nailing* terpasang dengan sudut kemiringan sebesar 45° .

Namun, penelitian terdahulu belum membahas secara detail mengenai perilaku *soil nailing* sebagai alternatif perkuatan pada struktur dinding *secant pile* terhadap variasi variabel panjang (L_n), kemiringan sudut (θ_n), elevasi (H_n) dan spasi vertikal (S_h) sehingga dianggap perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui efek pengaruhnya terhadap besar deformasi lateral struktur penahan

tanah dan penurunan muka tanah di sekitar lokasi pekerjaan galian dalam ketika terjadi mobilisasi friksi secara menyeluruh.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui perilaku dan mekanisme deformasi *secant pile* yang diperkuat dengan *soil nailing* melalui studi parametrik;
2. Melakukan interpretasi nilai modulus hasil uji Pressuremeter input parameter kekakuan tanah pada model konstitutif *hardening soil*;
3. Melakukan *back analysis* parameter tanah berdasarkan model konstitutif *hardening soil*;
4. Melakukan verifikasi output hasil studi parametrik menggunakan studi kasus dengan sistem proteksi galian dalam menggunakan *secant pile* yang diperkuat menggunakan *soil nailing*.

1.3 Lingkup Penelitian

Untuk mencapai tujuan dari penelitian yang ada, adapun lingkup dari penelitian meliputi:

1. Menentukan parameter tanah berdasarkan hasil uji laboratorium maupun uji lapangan (*in-situ*) yaitu uji N_{SPT} dan uji Pressuremeter meliputi parameter *index properties*, parameter kuat geser tanah dan parameter kekakuan tanah;

2. Menentukan parameter struktur *secant pile* dan *soil nailing* berdasarkan spesifikasi yang sesuai;
3. Melakukan interpretasi pergerakan lateral *secant pile* dari hasil monitoring menggunakan alat instrumentasi inklinometer;
4. Melakukan pemodelan numerik elemen hingga menggunakan program komputer PLAXIS 2D untuk keperluan *back analysis* dan studi parametrik;
5. Melakukan studi parametrik dengan memvariasikan variabel panjang (L_n), kemiringan sudut (θ_n), elevasi (H_n), spasi vertikal (S_h) *soil nailing* serta elevasi muka air tanah (H_w), kedalaman galian (H_e), tebal lapisan tanah lempung (H_c) dan konsistensi tanah yang dilambangkan dengan parameter kuat geser *undrained* (S_u).
6. Mengkaji pergerakan lateral *secant pile* hasil pemodelan numerik baik untuk studi kasus maupun studi parametrik terhadap hasil monitoring inklinometer.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan terdiri atas studi literatur; pengumpulan data lapangan; interpretasi, analisis dan pengolahan data; studi kasus serta studi parametrik.

1.4.1 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini digunakan untuk memperoleh pemahaman yang lebih dengan cara menghimpun data-data yang berhubungan dengan topik yang diangkat dalam penelitian ini. Studi literatur dapat diperoleh dari berbagai sumber referensi antara lain berasal dari *text book*, *e-book*, jurnal penelitian,

tulisan/makalah ilmiah dan materi perkuliahan yang relevan sebagai acuan dalam melakukan pemodelan, analisis dan interpretasi hasil.

1.4.2 Pengambilan dan Pengumpulan Data

Pengambilan data tanah dilakukan dengan cara dilaksanakannya pengujian *in-situ* berupa uji N_{SPT} dan uji Pressuremeter langsung di lapangan serta melakukan uji laboratorium untuk memperoleh parameter-parameter tanah yang dapat digunakan dalam pemodelan numerik.

1.4.3 Interpretasi, Analisis dan Pengolahan Data

Parameter tanah sebagai input pada tahapan analisis untuk keperluan pemodelan dalam studi kasus maupun studi parametrik menggunakan program komputer PLAXIS 2D diperoleh dari hasil korelasi dan interpretasi hasil uji lapangan dan uji laboratorium. Khusus untuk studi parametrik, dilakukan juga pengolahan data menggunakan analisis statistik: *Multivariable Statistical Analysis* serta *Dimensionless Analysis*.

1.4.4 Studi Kasus

Studi kasus dilaksanakan dengan cara melakukan *back analysis* parameter tanah hasil korelasi uji lapangan dan uji laboratorium serta melakukan verifikasi hasil pembacaan alat monitoring inklinometer dengan hasil analisis model numerik.

1.4.5 Studi Parametrik

Studi parametrik dilaksanakan dengan cara melakukan variasi terhadap variabel panjang (L_n), kemiringan sudut (θ_n), elevasi pemasangan (H_n), spasi vertikal (S_n) *soil nailing* serta elevasi muka air tanah (H_w), kedalaman galian (H_e), tebal lapisan tanah lempung (H_c) dan konsistensi tanah yang dilambangkan dengan

parameter kuat geser *undrained* (S_u) berdasarkan model numerik yang dikembangkan.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dibagi ke dalam 6 (enam) bab sebagai berikut:

BAB 1 – PENDAHULUAN

Pada bab ini, penulis akan menjelaskan latar belakang masalah, tujuan dari penelitian, lingkup penelitian, metode penelitian serta sistematika penulisan.

BAB 2 – STUDI PUSTAKA

Pada bab ini, penulis akan menjabarkan dan menjelaskan dasar teori mengenai sistem pendukung galian menggunakan *soil nailing*, karakteristik deformasi dan penurunan akibat pekerjaan galian, alat uji Pressuremeter, alat monitoring inklinometer, model konstitutif tanah dan metode elemen hingga.

BAB 3 – METODE ANALISIS

Pada bab ini, penulis akan memaparkan metode analisis yang digunakan termasuk didalamnya penjelasan mengenai tahapan analisis numerik galian dalam termasuk pemodelan parameter struktur (*secant pile* dan *soil nailing*) dan tahapan-tahapan pemodelan galian dalam menggunakan bantuan program komputer PLAXIS 2D serta teori dasar metode analisis statistik: *Multivariable Statistical Analysis*.

BAB 4 – STUDI PARAMETRIK

Pada bab ini, penulis akan melakukan studi parametrik pengaruh panjang (L_n), kemiringan sudut (θ_n), elevasi (H_n), spasi vertikal (S_n) *soil nailing* serta

elevasi muka air tanah (H_w), kedalaman galian (H_e), tebal lapisan tanah lempung (H_c) dan konsistensi tanah yang dilambangkan dengan parameter kuat geser *undrained* (S_u) untuk mengetahui perilaku *soil nailing* terhadap deformasi maksimum struktur penahan tanah dan penurunan maksimum tanah menggunakan model numerik serta pengolahan data hasil pemodelan berbagai skenario galian dengan menggunakan metode statistik: *Multivariable Statistical Analysis*. Melakukan pengembangan *chart design* menggunakan konsep *Dimensionless Analysis*.

BAB 5 – STUDI KASUS: *GKM OFFICE TOWER*

Pada bab ini, penulis akan menjabarkan kondisi geologis dan deskripsi lokasi proyek, memaparkan stratifikasi dan pelapisan tanah, menurunkan parameter tanah berdasarkan model konstitutif *hardening soil*, menurunkan parameter struktur (*secant pile* dan *soil nailing*), melakukan *back analysis* parameter tanah dengan model 2D elemen hingga untuk memperoleh defleksi struktur penahan dan penurunan tanah serta melakukan verifikasi hasil pembacaan monitoring inklinometer lapangan terhadap hasil analisis program komputer PLAXIS 2D serta verifikasi hasil studi parametrik melalui studi kasus yang ada.

BAB 6 – KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, penulis akan menyimpulkan hasil analisis studi kasus dan studi parametrik yang telah dilakukan serta menyampaikan saran untuk penelitian selanjutnya.

