

**KAJIAN NUMERIK EFISIENSI KELOMPOK TIANG  
DENGAN BEBAN LATERAL BERDASARKAN FUNGSI  
DEFLEKSI DENGAN ANALISA METODE ELEMEN  
HINGGA 3D**

**TESIS**

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



**Oleh:**

**Michael Sutoyo**

**2017831023**

**Pembimbing 1:**

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

**Pembimbing 2:**

**Aswin Lim, ST., MSc.Eng., Ph.D.**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
AGUSTUS 2019**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**KAJIAN NUMERIK EFISIENSI KELOMPOK TIANG  
DENGAN BEBAN LATERAL BERDASARKAN FUNGSI  
DEFLEKSI DENGAN ANALISA METODE ELEMEN  
HINGGA 3D**



**Oleh:**

**Michael Sutoyo**

**2017831023**

**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang Tesis pada Hari/Tanggal:**

**Jumat, 02 Agustus 2019**

**Pembimbing 1:**

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

**Pembimbing 2:**

**Aswin Lim, ST., MSc.Eng., Ph.D.**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
AGUSTUS 2019**

# **KAJIAN NUMERIK EFISIENSI KELOMPOK TIANG DENGAN BEBAN LATERAL BERDASARKAN FUNGSI DEFLEKSI DENGAN ANALISA METODE ELEMEN HINGGA 3D**

**Michael Sutoyo (NPM: 2017831023)**

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

**Pembimbing 2: Aswin Lim, ST., MSc.Eng., Ph.D.**

**Magister Teknik Sipil**

**Bandung**

**Agustus 2019**

## **ABSTRAK**

Efisiensi lateral suatu kelompok tiang menjadi isu yang krusial ketika menghadapi beban lateral yang besar. Efisiensi lateral suatu kelompok tiang pada umumnya diambil satu nilai generalisasi atau kombinasi efisiensi dari baris-baris di konfigurasi tersebut. FHWA (2010) mengutip Brown et al. (2001), menyatakan baris pertama dari suatu kelompok tiang (terjauh dari arah datangnya beban) memberikan efisiensi terbesar dan yang terkecil terletak pada baris paling belakang (terdekat dengan arah datangnya beban). Namun, hasil pengujian pembebanan lateral yang dilakukan oleh Kawanda (2019) menunjukkan pola yang berbeda. Penelitian ini akan mengkaji efisiensi lateral berdasarkan data pengukuran defleksi dari instrumentasi inklinometer. Kajian dilakukan dengan memodelkan kelompok tiang pada program elemen hingga tiga dimensi yang diverifikasi terhadap hasil pengukuran lapangan, dengan hasil akhir berupa kurva hubungan defleksi terhadap beban. Hasil kajian menunjukkan tiang pada baris paling belakang memberikan nilai efisiensi yang terbesar dibandingkan dengan baris-baris lainnya. Selain itu dibandingkan pula hubungan efisiensi kelompok tiang dan tiang tunggal dimana pada beban kecil (<18 ton), efisiensi kelompok tiang adalah 0.8-0.99 dan 1.01-1.1 untuk beban besar (>18 ton). Sehingga dapat disimpulkan bahwa efisiensi lateral kelompok tiang secara keseluruhan mendekati 1.0 dibandingkan dengan tiang tunggal pada beban yang sama.

**Kata Kunci:** efisiensi lateral, kelompok tiang, inklinometer, kurva defleksi terhadap beban, program elemen hingga tiga dimensi

# **NUMERICAL STUDY ON DISPLACEMENT-BASED PILE GROUP EFFICIENCY UNDER LATERAL LOADING WITH 3D FINITE ELEMENT METHOD**

**Michael Sutoyo (Student ID: 2017831023)**

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

**Advisor 2: Aswin Lim, ST., MSc.Eng., Ph.D.**

**Master of Civil Engineering**

**Bandung**

**August 2019**

## **ABSTRACT**

Lateral efficiency of pile groups is a crucial issue when faced with substantial lateral load. In general, pile group lateral efficiency is determined by one generalized value or a combination of efficiencies between rows. FHWA (2010) quoting Brown et al. (2001), stated that the leading row of a pile group (the farthest from loading position) gives the biggest efficiency value whereas the smallest is located in the last trailing row (the closest from loading position). This research is an effort to prove all the issues by experimental model in the field in comparison with three dimensional model using finite element analysis (PLAXIS 3D 2017). On the contrary with this issue, the result from lateral loading test conducted by Kawanda (2019) shows different behaviours. This research will study the relationship between lateral efficiency and displacement obtained from inclinometer readings. The pile group tested is modelled using a three-dimensional finite element program and will be verified with test results, with main objective to generate a load-displacement curve. The outcome shows that the last trailing row provides the biggest efficiency value compared to other rows. Furthermore, comparing the efficiency between pile group and single pile results in efficiency value of 0.8-0.99 for small load (<18 ton) and 1.01-1.1 for big load (>18 ton). It can be concluded that the lateral efficiency of a pile group comes close to 1.0 compared with single pile under the same load.

**Keywords:** lateral efficiency, pile group, inclinometer, load-displacement curve, three-dimensional finite element program

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yesus Kristus karena atas berkat, cinta, dan kekuatan-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis dengan judul “Kajian Numerik Efisiensi Kelompok Tiang dengan Beban Lateral Berdasarkan Fungsi Defleksi dengan Analisa Metode Elemen Hingga 3D”. Penulisan tesis merupakan salah satu syarat akademik yang harus ditempuh untuk menyelesaikan studi tingkat S-2 (magister) di Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan Pascasarjana.

Penulis menyadari masih terdapat bagian-bagian yang masih dapat dimaksimalkan. Namun dengan berkat Tuhan serta kritik, saran, dan dorongan dari keluarga dan berbagai pihak akhirnya penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan hasil yang terbaik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D. dan Bapak Aswin Lim, Ph.D., selaku pembimbing utama dan ko-pembimbing yang telah memberikan arahan, gagasan, dan bimbingan kepada penulis yang sangat berguna dalam penyusunan tesis ini,
2. Bapak Budijanto Widjaja, Ph.D. dan Ibu Dr. Rinda Karlinasari, selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik yang berguna kepada penulis sehingga penelitian tesis ini dapat diselesaikan dengan lebih baik.

3. Bapak Aksan Kawanda selaku pimpinan PT Geotech Efathama dan mahasiswa program studi Doktor Teknik Sipil di Universitas Katolik Parahyangan yang telah berkenan untuk memberikan data penelitian serta masukan untuk penelitian tesis ini,
4. Papi, Mami, Rafael dan Jesslyn yang senantiasa memberikan doa serta dukungan yang sangat berarti kepada penulis,
5. Regina yang telah memberikan dukungan dan semangat selama proses kuliah hingga penyelesaian tesis ini,
6. Ryan dan Ahiap sebagai teman seperjuangan tesis dan kuliah S2 yang telah bersama melewati berbagai dinamika yang ada,
7. Ko Kirana, ko David, dan Evan yang telah sangat membantu dalam memberikan masukan selama penulis menyusun tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih belum sempurna. Penulis akan sangat mengapresiasi apabila ada saran dan kritik yang membangun agar tesis ini menjadi lebih baik lagi. Dibalik kekurangan tersebut, penulis berharap tesis ini dapat berguna bagi komunitas ilmiah yang membacanya.

Bandung, 2 Agustus 2019



Michael Sutoyo

2017831023



|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.3.3      | <i>Centrifuge</i> Kelompok Tiang Dibebani Secara Lateral (Cox, Dixon dan Murphy, 1984).....                                    | 25        |
| 2.3.4      | Perilaku Kelompok Tiang dengan Beban Lateral (Wang & Reese, 1986).....   | 27        |
| 2.3.5      | <i>Centrifuge</i> Perilaku Kelompok Tiang dengan Beban Lateral (Franke, 1988).....   | 28        |
| 2.3.6      | <i>Full Scale Test</i> Tiang Tunggal dan Kelompok Tiang (Brown et al., 1988).....  | 29        |
| 2.3.7      | <i>Full Scale</i> Perilaku Kelompok Tiang Dibebani Lateral pada Jembatan Roosevelt (Ruesta & Townsend et al., 1997).....       | 30        |
| 2.3.8      | <i>Full Scale Test</i> Tiang Tunggal dan Kelompok Tiang (Rollins et al., 1998).....  | 30        |
| 2.3.9      | Perilaku Kelompok Tiang Dibebani Lateral Statik dan Dinamik Berdasarkan <i>Full Scale Testing</i> (Rollins et al., 2003a)..... | 31        |
| 2.3.10     | Perilaku Kelompok Tiang Akibat Beban Lateral Statik dan Dinamik (Rollins et al., 2003).....                                    | 32        |
| 2.3.11     | Perilaku Lateral Pondasi Tiang pada Tanah Non Kohesif Akibat Beban Vertikal dan Horizontal (Zamri et al., 2005).....           | 33        |
| 2.3.12     | <i>Full Scale</i> Kelompok Tiang dengan Beban Siklik (Rollins et al., 2006).....   | 33        |
| 2.3.13     | Pemodelan Kelompok Tiang dengan Beban Lateral Statik (Larkela et al., 2008).....   | 35        |
| 2.3.14     | Analisis Kelompok Tiang Dibebani Lateral dengan PLAXIS 3D Foundation (Sri Dewi & Gouw Tjie-Liong, 2013).....                   | 36        |
| 2.3.15     | Kesimpulan Penelitian Terdahulu.....   | 36        |
| 2.4        | Instrumentasi Pengukuran Inklinometer.....   | 38        |
| 2.5        | Uji Pembebanan Lateral.....  | 42        |
| <b>3..</b> | <b>BAB 3 METODE ANALISIS</b>   | <b>45</b> |
| 3.1        | Korelasi Parameter Tanah.....  | 45        |
| 3.2        | Program PLAXIS 3D 2017.....  | 49        |
| 3.2.1      | Definisi Umum Tegangan.....  | 50        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2.2    | Definisi Umum Regangan.....  | 52        |
| 3.2.3    | Model <i>Hardening Soil (Isotropic Hardening)</i> .....                              | 54        |
| 3.2.4    | Input Data Tanah .....   | 55        |
| 3.2.5    | Pemodelan Geometri Struktur.....   | 58        |
| 3.2.6    | Diskretisasi Elemen ( <i>Meshing</i> ) .....   | 60        |
| 3.2.7    | Penentuan Fase Konstruksi dan Analisis .....   | 61        |
| 3.2.8    | Output Hasil Analisis.....   | 62        |
| 3.3      | Program Lpile v5.0.46 .....  | 64        |
| 3.3.1    | Input Properti Tiang .....   | 64        |
| 3.3.2    | Input Kondisi Kepala Tiang dan Pembebanan.....                                       | 65        |
| 3.3.3    | Input Data Tanah .....   | 66        |
| <b>4</b> | <b>..BAB 4 HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b>   | <b>68</b> |
| 4.1      | Data Umum Penelitian.....  | 68        |
| 4.2      | Data Pengukuran Instrumentasi Inklinometer.....                                      | 70        |
| 4.2.1    | Inklinometer Tiang Tunggal .....   | 70        |
| 4.2.2    | Inklinometer Kelompok Tiang.....   | 72        |
| 4.3      | Data Tanah .....   | 78        |
| 4.4      | Hasil Pemodelan Tiang Tunggal .....  | 80        |
| 4.4.1    | Hasil Pemodelan Tiang Tunggal pada Lpile v5.0.46 .....                               | 80        |
| 4.4.2    | Hasil Pemodelan Tiang Tunggal pada PLAXIS 3D 2017.....                               | 84        |
| 4.4.3    | Verifikasi Pemodelan Tiang Tunggal dengan Data Inklinometer<br>.....                 | 86        |
| 4.5      | Hasil Pemodelan Kelompok Tiang.....  | 91        |
| 4.5.1    | Hasil Pemodelan Kelompok Tiang pada PLAXIS 3D 2017.....                              | 91        |
| 4.5.2    | Verifikasi Pemodelan Kelompok Tiang dengan Data<br>Inklinometer .....                | 96        |
| 4.5.3    | Estimasi Proporsi Beban Setiap Tiang Hasil Pemodelan pada<br>PLAXIS 3D.....          | 103       |
| 4.6      | Hubungan Antara Defleksi Terhadap Beban ( <i>Load-Displacement<br/>Curve</i> ) ..... | 104       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.6.1 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban untuk Tiang Tunggal .....                    | 105        |
| 4.6.2 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban untuk Kelompok Tiang .....                   | 106        |
| 4.6.3 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban Antar Baris Kelompok Tiang .....             | 110        |
| 4.6.4 Verifikasi Hasil Estimasi Proporsi Beban Setiap Tiang .....                         | 112        |
| 4.6.5 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban Antara Tiang Tunggal dan Kelompok Tiang..... | 116        |
| <b>5.. BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>   | <b>118</b> |
| 5.1 Rangkuman Hasil Penelitian .....  | 118        |
| 5.2 Saran .....   | 119        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>   | <b>xv</b>  |

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

### Daftar Notasi

1.  $p$ : tahanan tanah
2.  $y$ : deformasi arah lateral
3.  $k$ : konstanta spring
4.  $P$ : beban luar
5.  $F$ : gaya
6.  $k_s$ : modulus *subgrade* tanah
7.  $z$ : kedalaman tinjauan
8.  $E$ : modulus elastisitas tiang
9.  $I$ : inersia tiang
10.  $Q$ : beban aksial pada tiang
11.  $V$ : gaya geser pada tiang
12.  $M$ : momen lentur pada tiang
13.  $S$ : putaran sudut pada tiang
14.  $E_s$ : modulus elastisitas tanah
15.  $S_u$ : kuat geser tak teralir
16.  $P_u$ : tahanan ultimit tanah per satuan panjang
17.  $y_{50}$ : defleksi pada saat 50% tahanan ultimit tiang
18.  $\epsilon_{50}$ : regangan pada saat 50% modulus tanah
19.  $\gamma$ : berat isi tanah
20.  $B$ : diameter/sisi tiang
21.  $j_e$ : faktor empirik untuk persamaan  $P_u$  Matlock

22.  $p_m$ : faktor efisiensi kapasitas lateral kelompok tiang
23.  $D$ : diameter tiang
24. LL: batas cair
25.  $c'$ : kohesi efektif
26. A+, A-, B+, B-: arah bacaan pada pipa inklinometer
27.  $P_c'$ : tegangan pra-konsolidasi
28.  $P_o'$ : tegangan *overburden*
29.  $\Phi'$ : sudut geser dalam efektif
30.  $E_{50}^{ref}$ : modulus tanah pada saat 50% beban dalam keadaan tekanan 100 kPa
31.  $E_{oed}^{ref}$ : modulus tanah dari uji oedometer dalam keadaan tekanan 100 kPa
32.  $E_{ur}^{ref}$ : modulus *unloading/reloading* dalam keadaan tekanan 100 kPa
33.  $e$ : angka pori
34.  $\sigma$ : tegangan
35.  $\varepsilon$ : regangan

## **Daftar Singkatan**

- 1.** ASTM: *American Standard of Testing and Material*
- 2.** BH: *Bore Hole*
- 3.** CD: *Consolidated Drained*
- 4.** COL: *Cut-off Level*
- 5.** FDM: *Finite Difference Method*
- 6.** FEM: *Finite Element Method*
- 7.** FHWA: *Federal Highway Administration*
- 8.** MEMS: *Micro Electro-Mechanical Sensor*
- 9.** NC: *Normally Consolidated*
- 10.** NHI: *National Highway Institute*
- 11.** OC: *Over Consolidated*
- 12.** OCR: *Overconsolidation Ratio*
- 13.** SNI: *Standar Nasional Indonesia*
- 14.** SPT: *Standard Penetration Test*
- 15.** UCT: *Unconfined Compression Test*
- 16.** UU: *Unconsolidated Undrained*

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1 Konsep Metode Winkler Balok Diatas Pondasi Elastis (Winkler, 1867).....  | 7  |
| Gambar 2.2 Komsep Umum Metode p-y (Christensen, 2006).....  | 11 |
| Gambar 2.3 Karakteristik Kurva p-y pada Tanah Lempung Lunak dengan Adanya Air Tanah (Matlock, 1970).....  | 13 |
| Gambar 2.4 Karakteristik Kurva p-y pada Tanah Lempung Teguh dengan Adanya Air Tanah (Reese et al., 1975) .....  | 15 |
| Gambar 2.5 Grafik Nilai $A_s$ (Reese et al., 2006).....   | 17 |
| Gambar 2.6 Karakteristik Kurva p-y pada Tanah Lempung Teguh Tanpa Air Tanah (Welch & Reese, 1972).....  | 18 |
| Gambar 2.7 Karakteristik Kurva p-y pada Tanah Pasiran (Cox et al., 1974) .....  | 19 |
| Gambar 2.8 Ilustrasi Zona Geser atau Shear Zone pada Kelompok Tiang (Walsh, 2005).....  | 21 |
| Gambar 2.9 Ilustrasi Perbedaan Kurva p-y pada Kelompok Tiang dan Tiang Tunggal (Brown et al., 1988).....  | 22 |
| Gambar 2.10 Ilustrasi Posisi Tiang dengan Lead Row Merupakan Rangkaian Tiang Terjauh dari Arah Datangnya Beban (Anderson, 2015; mengutip dari <a href="http://slideplayer.com">slideplayer.com</a> )..... | 23 |
| Gambar 2.11 Hasil Eksperimen <i>P-multipliers</i> terhadap Kedalaman (Brown et al., 1988).....  | 29 |
| Gambar 2.12 Tampak Atas Konfigurasi Kelompok Tiang (Rollins et al., 2006) .   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.13 Hasil Penelitian Kurva Hubungan Defleksi Kelompok Tiang Rata-rata terhadap Beban Lateral Rata-rata untuk (a) Konfigurasi 3x3 Spasi 5.65D; (b) Konfigurasi 3x4 Spasi 4.4D; dan (c) Konfigurasi 3x5 Spasi 3.3D dengan Pemandangan Tiang Tunggal (Rollins et al., 2006)..... | 34 |
| Gambar 2.14 Ilustrasi Pipa dan Rod Inklinometer (Geokon, 2018) .....  | 39 |
| Gambar 2.15 Ilustrasi Pemasangan Pipa Inklinometer pada Tiang Bor (Draft Disertasi Kawanda, 2019) .....   | 39 |
| Gambar 2.16 Rod Inklinometer Beserta Kabel dan Alat Baca (Indiamart.com, 2019) .....  | 40 |
| Gambar 2.17 Ilustrasi Mekanisme Pembacaan Inklinasi pada Inklinometer (Geokon, 2018).....   | 40 |
| Gambar 2.18 Hasil Akhir Pengolahan Data Inklinometer Berupa Grafik Defleksi terhadap Kedalaman (Geokon, 2018) .....   | 42 |
| Gambar 2.19 Ilustrasi Uji Pembebanan Lateral (ASTM D3966-81).....   | 43 |
| Gambar 3.1 Korelasi $\Phi'$ Terhadap PI (Bjerrum dan Simons, 1960) .....  | 48 |
| Gambar 3.2 Perjanjian Tanda dan Sistem Koordinat Tiga Dimensi Umum untuk Tegangan .....   | 50 |
| Gambar 3.3 Penentuan Pelapisan Tanah dengan Menu <i>Create Borehole</i> dan <i>Modify Soil Layers</i> .....   | 56 |
| Gambar 3.4 Input Data Tanah pada <i>Tab General</i> untuk Model Material dan Tipe Aliran.....   | 57 |
| Gambar 3.5 Input Data Tanah pada <i>Tab Parameters</i> untuk Kekakuan Tanah dan Kuat Geser .....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.6 Geometri Umum (Tanah) Setelah Proses Input Data Tanah Selesai.   | 58 |
| Gambar 3.7 Geometri Komponen Struktur pada <i>Main Tab Structures</i> .....   | 59 |
| Gambar 3.8 Input Parameter Elemen Pelat .....   | 59 |
| Gambar 3.9 Input Parameter Elemen <i>Embedded Beam</i> .....  | 60 |
| Gambar 3.10 Proses Diskretisasi Elemen pada <i>Main Tab Meshing</i> .....   | 61 |
| Gambar 3.11 Penentuan Fase Konstruksi pada <i>Main Tab Staged Construction</i> ...  | 62 |
| Gambar 3.12 Output Defleksi pada Program PLAXIS 3D 2017 .....   | 63 |
| Gambar 3.13 Output Gaya Geser pada Program PLAXIS 3D 2017 .....   | 63 |
| Gambar 3.14 Output Momen Lentur pada Program PLAXIS 3D 2017 .....   | 64 |
| Gambar 3.15 Input Properti Tiang.....   | 65 |
| Gambar 3.16 Kondisi Batas Kepala Tiang dan Tipe Pembebanan.....   | 66 |
| Gambar 3.17 Input Data Pelapisan Tanah dan Parameter Tanah.....   | 67 |
| Gambar 4.1 Ilustrasi Lapangan Pengujian Tiang Bor dengan Beban Lateral (Draft<br>Disertasi Kawanda, 2019) .....                             | 69 |
| Gambar 4.2 Ilustrasi Tampak Atas Konfigurasi Kelompok Tiang yang Diuji .....  | 69 |
| Gambar 4.3 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang Tunggal pada Beban 1 Ton, 2<br>Ton, dan 3 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019) .....           | 71 |
| Gambar 4.4 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang A-F Pada Beban 1.5 Ton, 3 Ton,<br>4.5 Ton, dan 6 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019).....     | 73 |
| Gambar 4.5 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang A-F Pada Beban 7.5 Ton, 9 Ton,<br>10.5 Ton, dan 12 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019).....   | 74 |
| Gambar 4.6 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang A-F Pada Beban 13.5 Ton, 15<br>Ton, 16.5 Ton, dan 18 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019)..... | 75 |



|   |    |
|---|----|
| Gambar 4.7 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang A-F Pada Beban 19.5 Ton, 21 Ton, 22.5 Ton, dan 24 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019).....  | 76 |
| Gambar 4.8 Pola Pergerakan Inklinometer Tiang A-F Pada Beban 18 Ton Siklus 2, 12 Ton Siklus 2, 6 Ton Siklus 2, dan Akhir Pembebanan 0 Ton (Draft Disertasi Kawanda, 2019) ..... | 77 |
| Gambar 4.9 Stratifikasi Tanah.....  | 79 |
| Gambar 4.10 Grafik Defleksi Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan Lpile v5.0.46 .   | 81 |
| Gambar 4.11 Grafik Momen Lentur Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan Lpile v5.0.46.....  | 81 |
| Gambar 4.12 Grafik Gaya Geser Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan Lpile v5.0.46 .....   | 82 |
| Gambar 4.13 Grafik Tahanan Tanah Termobilisasi Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan Lpile v5.0.46.....   | 82 |
| Gambar 4.14 Kurva Defleksi terhadap Beban Hasil Pemodelan Lpile v5.0.46....   | 83 |
| Gambar 4.15 Grafik Defleksi Sepanjang Tiang Hasil PLAXIS 3D untuk Tiang Tunggal.....  | 84 |
| Gambar 4.16 Grafik Gaya Geser Sepanjang Tiang Hasil PLAXIS 3D untuk Tiang Tunggal.....  | 85 |
| Gambar 4.17 Grafik Momen Sepanjang Tiang Hasil PLAXIS 3D untuk Tiang Tunggal.....   | 85 |
| Gambar 4.18 Kurva Defleksi Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dan Lpile Diverifikasi terhadap Bacaan Inklinometer.....   | 87 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4.19 Kurva Momen Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dan Lpile Diverifikasi terhadap Pengolahan Data Inklinometer dengan FDM....                        | 89 |
| Gambar 4.20 Kurva Gaya Geser Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dan Lpile Diverifikasi terhadap Pengolahan Data Inklinometer dengan FDM .....                 | 89 |
| Gambar 4.21 Kurva Reaksi Tanah Termobilisasi Sepanjang Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dan Lpile Diverifikasi terhadap Pengolahan Data Inklinometer dengan FDM ..... | 90 |
| Gambar 4.22 Kurva Defleksi Sepanjang Tiang untuk Kelompok Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dengan Siklus Beban 6 Ton, 12 Ton, 18 Ton, dan 24 Ton .....                | 92 |
| Gambar 4.23 Kurva Momen Sepanjang Tiang untuk Kelompok Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dengan Siklus Beban 6 Ton, 12 Ton, 18 Ton, dan 24 Ton .....                   | 94 |
| Gambar 4.24 Kurva Gaya Geser Sepanjang Tiang untuk Kelompok Tiang Hasil Pemodelan PLAXIS 3D dengan Siklus Beban 6 Ton, 12 Ton, 18 Ton, dan 24 Ton .....              | 95 |
| Gambar 4.25 Grafik Defleksi terhadap Kedalaman Hasil PLAXIS 3D Dibandingkan dengan Bacaan Inklinometer untuk Beban 6 ton .....                                       | 96 |
| Gambar 4.26 Grafik Defleksi terhadap Kedalaman Hasil PLAXIS 3D Dibandingkan dengan Bacaan Inklinometer untuk Beban 12 ton .....                                      | 97 |
| Gambar 4.27 Grafik Defleksi terhadap Kedalaman Hasil PLAXIS 3D Dibandingkan dengan Bacaan Inklinometer untuk Beban 18 ton .....                                      | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Gambar 4.28 Grafik Defleksi terhadap Kedalaman Hasil PLAXIS 3D<br>Dibandingkan dengan Bacaan Inklinometer untuk Beban 24 ton .....                               | 98  |
| Gambar 4.29 Grafik Momen Lentur terhadap Kedalaman Berdasarkan <i>Finite<br/>Difference Method</i> Dibandingkan dengan Hasil PLAXIS .....                        | 99  |
| Gambar 4.30 Grafik Gaya Geser terhadap Kedalaman Berdasarkan <i>Finite<br/>Difference Method</i> Dibandingkan dengan Hasil PLAXIS .....                          | 100 |
| Gambar 4.31 Grafik Reaksi Tanah terhadap Kedalaman Berdasarkan <i>Finite<br/>Difference Method</i> .....   | 101 |
| Gambar 4.32 Proporsi Beban Dalam Konfigurasi Tiang Berdasarkan PLAXIS 3D<br>2017 .....   | 103 |
| Gambar 4.33 Kurva Defleksi Terhadap Beban untuk Tiang Tunggal .....  | 105 |
| Gambar 4.34 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban Kelompok Tiang dari<br>Pemodelan PLAXIS 3D .....  | 106 |
| Gambar 4.35 Output Grafik Defleksi Sepanjang Tiang dari Program Ensoft<br>GROUP untuk Beban 12 Ton .....   | 107 |
| Gambar 4.36 Hasil Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban dari Program<br>Ensoft GROUP .....  | 108 |
| Gambar 4.37 Kurva Hubungan Defleksi Terhadap Beban Kelompok Tiang dari<br>Pemodelan PLAXIS 3D dan Ensoft GROUP Diverifikasi Terhadap Bacaan<br>Inklinometer..... | 109 |
| Gambar 4.38 Ilustrasi <i>Leading Row</i> , <i>Middle Row</i> , dan <i>Trailing Row</i> pada<br>Penelitian Ini (Draft Disertasi Kawanda, 2019) .....              | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Gambar 4.39 Kurva Defleksi Terhadap Beban Antar Baris pada Kelompok Tiang<br>.....                                   | 111 |
| Gambar 4.40 Proporsi Beban Dalam Konfigurasi Tiang Berdasarkan PLAXIS 3D<br>2017.....                                | 113 |
| Gambar 4.41 Kurva Defleksi Terhadap Beban Tiang A-D Hasil Inklinometer<br>Dibandingkan dengan Pemodelan PLAXIS ..... | 114 |
| Gambar 4.42 Kurva Defleksi Terhadap Beban Tiang E-F Hasil Inklinometer<br>Dibandingkan dengan Pemodelan PLAXIS ..... | 115 |
| Gambar 4.43 Kurva Defleksi Terhadap Beban Antara Tiang Tunggal dan<br>Kelompok Tiang .....                           | 116 |

## DAFTAR TABEL

|  |     |
|--|-----|
| Tabel 2.1 Koefisien A untuk Perhitungan Tiang Panjang dengan Kondisi Kepala<br>Tiang Bebas dengan Beban Lateral (R.J. Woodward et al., 1972).....  | 9   |
| Tabel 2.2 Estimasi nilai $\varepsilon_{50}$ (Matlock, 1970).....   | 14  |
| Tabel 2.3 Rekomendasi Nilai $P_m$ Berdasarkan Jarak Antar Tiang dan Posisi Tiang<br>(Brown et al., 2001; mengutip dari FHWA-NHI-10-016, 2010)..... | 23  |
| Tabel 2.4 Efisiensi Kelompok Tiang <i>in Line</i> (Cox et al., 1984) .....   | 26  |
| Tabel 2.5 Efisiensi Kelompok Tiang <i>Side by Side</i> (Cox et al., 1984) .....  | 27  |
| Tabel 2.6 Efisiensi Kelompok Tiang (Franke, 1988) .....  | 28  |
| Tabel 2.7 <i>P-multipliers</i> Hasil <i>Back Analysis</i> (Rollins et al., 2003).....  | 31  |
| Tabel 2.8 Hasil <i>Back Analysis P-multipliers</i> (Rollins et al., 2003).....   | 33  |
| Tabel 2.9 Tabel Pengolahan Bacaan Inklinometer.....  | 41  |
| Tabel 3.1 Korelasi Nilai Berat Isi Tanah (Look, 2007) .....  | 46  |
| Tabel 3.2 Korelasi Nilai $S_u$ (Look, 2007) .....  | 46  |
| Tabel 3.3 Kohesi Efektif untuk Tanah Lempung NC (Look, 2007).....  | 47  |
| Tabel 4.1 Tabel Set Parameter yang Digunakan untuk Pemodelan .....   | 79  |
| Tabel 4.2 Rataan Proporsi Beban Berdasarkan Pengolahan Gaya Geser dari<br>PLAXIS 3D 2017.....  | 103 |
| Tabel 4.3 Proporsi Beban Tiap Baris Tiang Berdasarkan PLAXIS 3D 2017 .....   | 104 |
| Tabel 4.4 Tabel Rasio Nilai Efisiensi Berdasarkan Kapasitas Rata-rata Kelompok<br>Tiang .....  | 112 |
| Tabel 4.5 Tabel Rasio Nilai Efisiensi Kelompok Tiang Dibandingkan Tiang<br>Tunggal.....  | 117 |

## DAFTAR LAMPIRAN

1. *Boring Log* BH-01 (Draft Disertasi Kawanda, 2019)
2. Rangkuman Hasil Uji Laboratorium BH-01 (Draft Disertasi Kawanda, 2019)

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pondasi tiang pada umumnya didesain sebagai sebuah kelompok tiang dalam satu buah *pile cap*. Dalam mendesain kelompok tiang, faktor reduksi atau yang lebih umum disebut dengan efisiensi memegang peranan penting baik untuk aksial dan lateral. Efisiensi tiang ini akan mempengaruhi jumlah maupun dimensi tiang final yang akan dikonstruksi terutama apabila beban yang dipikul pondasi tiang sangat besar. Dalam aspek lateral, penentuan kapasitas tiang ditentukan dengan syarat defleksi ijin (SNI 8460-2017) atau menggunakan beban *ultimate* rencana.

Dalam desain secara umum, efisiensi lateral sangat jarang digunakan karena para desainer mengacu kepada syarat defleksi ijin. Syarat defleksi ijin pada prinsipnya ditentukan berdasarkan beban *ultimate* yang mampu dipikul oleh kepala tiang bebas dengan hanya menganalisis satu tiang saja (*single pile*). Secara aktual, tiang tunggal sangatlah jarang digunakan dalam konstruksi, sehingga dapat diasumsikan bahwa syarat defleksi ijin yang digunakan menjadi terlalu konservatif apabila diaplikasikan pada kelompok tiang. Pada kelompok tiang, reaksi tanah secara lateral ( $P$ ) sangat bergantung kepada defleksi ( $y$ ) dan modulus *subgrade* ( $k_s / k_h$ ) yang berada di sekitar tiang (Winkler, 1867). Pada saat beban bekerja, maka masing-masing tiang akan menerima proporsi beban yang kurang lebih sama antara satu dengan yang lain, namun yang membedakan adalah kekakuan tanah yang

berada diantara tiang-tiang tersebut. Tiang yang berada di bagian tengah tentu akan mengalami defleksi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan tiang pada sisi terluar akibat adanya tahanan dari tiang di sekelilingnya. Metode lain dalam penentuan efisiensi lateral adalah dengan mengalikan nilai modulus *subgrade* dengan faktor reduksi. Prakash pada tahun 1962 (Poulos, 1980) menganjurkan faktor reduksi sebesar 0.25 untuk jarak tiang sebesar 3D dan membesar (maksimum 1) seiring dengan semakin jauhnya jarak antar tiang (tiang dengan jarak diatas 8D dapat mengabaikan efek lateral kelompok tiang). Apabila dari hasil pengukuran defleksi dapat dikeluarkan hubungan reaksi tiang yang kemudian dapat diolah menjadi efisiensi terhadap defleksi, maka efisiensi aktual kelompok tiang dapat ditentukan pada beban kerja yang terjadi. Maka dari itulah dibutuhkan analisis yang mendalam mengenai hubungan antara defleksi dan efisiensi lateral kelompok tiang untuk memperoleh efisiensi secara lebih aktual.

## **1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian**

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis hubungan antara efisiensi kelompok tiang yang dibebani lateral (enam buah *bored pile* diameter 30 cm dengan kedalaman 5.5 m) dengan hasil pengukuran defleksi. Dilakukan juga pengujian tiang tunggal (diameter 30 cm dan kedalaman 11.5 m) sebagai bahan verifikasi. Keseluruhan data penelitian diperoleh dari Bapak Aksan Kawanda selaku pimpinan PT Geotech Efathama dan mahasiswa doktor teknik sipil Universitas Katolik Parahyangan, yang melaksanakan uji pondasi tiang bor di daerah Legok, Tangerang. Analisis akan dilakukan dengan model tiga dimensi menggunakan program komputer elemen hingga PLAXIS 3D 2017. Defleksi



diperoleh dari uji pembebanan lateral pada kelompok tiang dengan instrumentasi inklinometer. Tujuan penelitian adalah untuk memperoleh bukti dan verifikasi terkait dengan perilaku lateral kelompok tiang dan efisiensinya.

### **1.3 Lingkup Penelitian**

Untuk mencapai tujuan penelitian, lingkup penelitian meliputi:

1. Studi literatur mengenai perilaku dan efisiensi tiang tunggal serta kelompok tiang yang dibebani secara lateral;
2. Mengkaji hasil uji pembebanan lateral, berupa data pengukuran defleksi berupa inklinometer, dan kondisi kelompok tiang pada saat dibebani;
3. Menentukan parameter tanah berdasarkan uji insitu dan hasil uji laboratorium;
4. Melakukan pemodelan tiga dimensi dan analisis numerik kelompok tiang dibebani secara lateral dengan program elemen hingga PLAXIS 3D 2017;
5. Mengkaji perilaku defleksi dan beban yang dapat dipikul tiang melalui kurva hubungan defleksi terhadap beban (*load vs displacement curve*).
6. Verifikasi hasil analisis dan pemodelan terhadap data yang terukur di lapangan untuk mengetahui tingkat akurasi pemodelan yang dilakukan.

### **1.4 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan terdiri atas studi literatur, pengambilan data di lapangan, serta interpretasi dan analisis data yang dijabarkan sebagai berikut.

#### **1.4.1 Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan informasi dari literatur berupa buku teks, jurnal, artikel ilmiah, serta tesis peneliti terdahulu yang relevan sebagai acuan untuk melakukan analisis, pemodelan, dan interpretasi hasil.

#### **1.4.2 Pengumpulan Data**

Pengumpulan data berupa hasil SPT dan uji laboratorium untuk data tanah dan hasil dari pembacaan instrumentasi pada masing-masing tiang berupa inklinometer.

#### **1.4.3 Analisis Perilaku Tiang dan Verifikasi**

Untuk menganalisis perilaku tiang tunggal dan kelompok tiang, dilakukan pemodelan pada program Plaxis 3D 2017. Hasil pemodelan akan kemudian dibandingkan dengan data pengukuran di lapangan untuk mengidentifikasi pola analisis serta pola yang terjadi di lapangan. Data hasil bacaan inklinometer akan diolah untuk menghasilkan defleksi dan momen lentur yang terjadi sepanjang tiang.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

Penulisan penelitian ini dibagi ke dalam lima bab utama sebagai berikut:

**BAB 1 PENDAHULUAN**, menjelaskan latar belakang masalah, tujuan penelitian, lingkup penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

**BAB 2 STUDI LITERATUR**, mencakup kajian pustaka mengenai metode analisis tiang dengan beban lateral, efek lateral pada kelompok tiang, penelitian terdahulu mengenai perilaku lateral kelompok tiang, mekanisme instrumentasi terpasang, serta mekanisme pengujian pembebanan lateral.

BAB 3 METODE ANALISIS, memaparkan metode dan prinsip-prinsip analisis yang digunakan terkait dengan program elemen hingga PLAXIS 3D 2017.

BAB 4 HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN, menampilkan data hasil pengukuran lapangan (*measured data*) dan hasil analisis berdasarkan data yang diperoleh dari pengukuran (*calculated data*). Membandingkan hasil output model numerik dengan hasil bacaan instrumentasi di lapangan dan melakukan interpretasi serta verifikasi berdasarkan fungsi defleksi.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN, menyimpulkan hasil analisis yang telah dilakukan, serta penyampaian saran untuk penelitian selanjutnya.