



TESIS - RC 142501

**STUDI PENGARUH PEMANCANGAN DENGAN METODE  
INJEKSI TERHADAP EKSES TEKANAN AIR PORI  
DAN PERGERAKAN TANAH DENGAN PEMODELAN  
MENGUNAKAN PROGRAM PLAXIS 2D DAN 3D**

Arik Triarso  
NRP. 3113 201 001

Dosen Pembimbing :  
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.  
M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN GEOTEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



THESIS - RC 142501

**STUDY OF THE EFFECT OF INJECTION PILE ON EXCESS  
PORE WATER PRESSURE AND SOIL MOVEMENT WITH  
MODELING USING PLAXIS 2D AND 3D**

Arik Triarso  
NRP. 3113 201 001

Supervisor :  
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.  
M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D

**POST GRADUATE PROGRAM  
MASTER PROGRAM OF GEOTECHNIC  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh  
gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
oleh :

Arik Triarso  
Nrp. 3113201001

Tanggal Ujian : 06 November 2015  
Periode Wisuda : Maret 2016

Disetujui oleh:

  
1. Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA  
NIP: 19501011 198203 1 002

(Pembimbing I)

  
2. M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D  
NIP: 19721223 199803 1 002

(Pembimbing II)

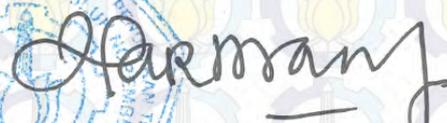
  
3. Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M.Eng  
NIP: 19560119 198601 2 001

(Penguji)

  
4. Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si , M.Si  
NIP: 19760123 200003 1 001

(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,

  
Prof. Diauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D  
NIP. 19601202 198701 1 001

# STUDI PENGARUH PEMANCANGAN DENGAN METODE INJEKSI TERHADAP EKSES TEKANAN AIR PORI DAN PERGERAKAN TANAH DENGAN PEMODELAN MENGGUNAKAN PROGRAM PLAXIS 2D DAN 3D

Nama Mahasiswa : Arik Triarso  
NRP : 3113201 001  
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.  
M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D

## ABSTRAK

Pemancangan tiang sistem injeksi pada tanah lunak (lempung) dapat mengakibatkan pergerakan tanah dan ekses tekanan air pori di sekitar tiang, serta dapat menyebabkan potensi kerusakan struktur di sekitarnya, contohnya pergerakan tanah yang terjadi pada proyek SL dan proyek yang dibangun di suatu lahan bekas pertokoan di Surabaya. Hingga saat ini prediksi pergerakan tanah dan ekses tekanan air pori akibat pemancangan masih terus dilakukan untuk pengkajian, pengembangan, dan penelitian lebih lanjut, terutama untuk pemancangan kelompok tiang ( $> 1$  Tiang).

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan pemancangan tiang tunggal dan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) untuk mendapatkan tren perpindahan lateral tanah dan ekses tekanan air pori, serta untuk mengetahui pengaruh diameter tiang, jumlah tiang, dan alur pemancangan tiang terhadap perpindahan lateral tanah dan ekses tekanan air pori tersebut. Pemodelan dilakukan dengan metode *Displacement - Controlled Cavity Expansion (DCCE)* menggunakan program Plaxis 2D dan 3D. Verifikasi model dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan tiang tunggal dengan teori *Cylindrical Cavity Expansion (CCE)*.

Dari hasil pemodelan diketahui bahwa pemodelan numerik pemancangan sistem injeksi pada tanah lempung (kondisi *Undrained*) dapat dilakukan menggunakan metode *DCCE* dengan *prescribed displacement*  $0,21d - 0,25d$  dan model tanah Mohr-Coulomb, pemodelan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) dapat dimodelkan menggunakan PLAXIS 3D. Selisih perbedaan perpindahan lateral tanah antara teori *CCE* dan hasil PLAXIS dengan jaring elemen yang halus adalah  $< 10\%$ , selisih perbedaan ekses tekanan air pori antara hasil PLAXIS dan teori *CCE* adalah  $< 20\%$ , selisih perbedaan tersebut tergantung dari tingkat kehalusan jaring elemen. Tren perpindahan lateral tanah di zona plastis pada setiap kedalaman relatif seragam, sedangkan tren ekses tekanan air pori tergantung dari parameter tanah disetiap kedalaman. Saat diameter semakin besar maka perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori semakin besar. Saat jumlah tiang semakin bertambah maka perpindahan lateral ( $\rho$ ) dan ekses tekanan air pori juga semakin bertambah. Peningkatan perpindahan lateral antar fase penambahan tiang ( $\Delta\rho$ ) di titik yang didekati semakin bertambah, sedangkan  $\Delta\rho$  di titik yang

ditinggalkan semakin berkurang. Hasil simulasi tiang berdasarkan data proyek SL untuk simulasi 9 tiang memberikan perpindahan lateral tanah di titik IN-01 sebesar 22 mm dan ekses tekanan air pori di titik IN-01 pada kedalaman 3 m sebesar 6 kPa.

**Kata kunci** : pergerakan tanah, ekses tekanan air pori, PLAXIS 2D dan 3D, tanah lunak, pemancangan sistem injeksi, *Cylindrical Cavity Expansion, Displacement - Controlled Cavity Expansion*.

# **STUDY OF THE EFFECT OF INJECTION PILE ON EXCESS PORE WATER PRESSURE AND SOIL MOVEMENT WITH MODELING USING PLAXIS 2D AND 3D**

By : Arik Triarso  
Student Identity Number : 3113201 001  
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.  
M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRACT**

*Injection pile on soft soil (clay) can cause ground movement and excess pore water pressure around the pile, and can cause potential damage to the surrounding structures, such as ground movement that occurs in the project SL and project built in the area of former shopping complex in Surabaya. Until now, the prediction of ground movement and excess pore water pressure due to the installation of pile is still underway for the assessment, development, and further research, especially for installation of pile group ( $> 1$  pile).*

*This study aims to model installations of single pile and pile groups ( $> 1$  pile) to obtain trends lateral displacement of soil and excess pore water pressure, as well as to determine influence the pile diameter, number of pile and Pile installations direction against lateral displacement of soil and excess pore water pressure. Modeling in this study was conducted using Cavity Displacement-Controlled Expansion method (DCCE) with PLAXIS 2D and 3D program. Verification of the model is done by comparing the single pile model results and the cylindrical cavity expansion theory (CCE).*

*From the modeling results it is known that numerical modeling Injection Pile on clay (undrained conditions) can be performed using the DCCE method with prescribed displacement  $0,21d - 0,25d$  and Mohr-Coulomb soil model, modeling of Pile group ( $> 1$  pile) can be modeled using PLAXIS 3D. The difference of lateral displacement between theory CCE and output from PLAXIS with fine mesh is 10%, The difference of excess pore water pressure between output from PLAXIS and theory CCE is 20%, this difference depend generated mehs. Trends lateral displacement of soil in plastic zone is relatively uniform at any depth, while the trend of excess pore water pressure depends on soil parameters at each depth. when the diameter increases, the lateral displacement and excess pore water pressure increases. When the number of pile increases, the lateral displacement ( $\rho$ ) and the excess pore water pressure also increases, Increased lateral displacement between the phase of the addition of the pile ( $\Delta\rho$ ) at the point of being approached increasing, while  $\Delta\rho$  at the point of diminishing abandoned. Pile installation simulation results based on data of project SL for the installation 9 pile, providing lateral displacement of the ground at the point of*

*IN-01 by 22 mm and the excess pore water pressure at the point of IN-01 at depth of 3 m by 6 kPa.*

**Key words** : *soil movement, excess pore water pressure, PLAXIS 2D and 3D, soft soil, injection pile, Cylindrical Cavity Expansion, Displacement - Controlled Cavity Expansion.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan anugerah-Nya yang telah diberikan sehingga penyusun dapat menyelesaikan tesis dengan baik dan tepat waktu. Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (M.T) pada Bidang Keahlian Geoteknik Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyelesaian tesis ini tidak dapat dipungkiri bahwa penyusun sering menemui beberapa kendala dalam pengerjaannya. Namun berkat bimbingan, bantuan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya penyusun dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik. Oleh karena itu, penyusun tidak lupa mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang terkait dalam penyusunan proposal tugas akhir ini, yaitu kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA. dan Bapak M. Farid Ma'ruf, ST., MT.,Ph.D., selaku dosen pembimbing dan dosen penguji selama pengerjaan tesis ini yang dengan sangat sabar meluangkan waktunya demi terselesaikannya tesis ini.
2. Ibu Dr. Ir. Ria A.A. Soemitro., M.Eng. dan Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si., M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak koreksi dan masukannya.
3. Ibunda dan Ayahanda tercinta yang selalu memberikan dukungan moral dalam mengerjakan tesis, serta kakak – kakak saya yang selalu memberikan doa dan dukungannya kepada penulis.
4. Dirjen DIKTI, yang telah memberikan Beasiswa S2 kepada penulis.
5. Seluruh teman – teman S2 Geoteknik 2013 ITS, yang telah banyak memberikan dukungan, masukan, dan motivasi hingga mampu memberikan kekuatan dan Semangat bagi penulis.
6. Pihak-pihak lain yang telah banyak membantu, yang tidak dapat penyusun sebutkan satu persatu, atas segala kebaikan, doa serta bantuannya selama ini.

Penyusun menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Sehingga, besar harapan adanya koreksi maupun masukan dari semua pihak untuk kesempurnaan tesis ini. Penyusun berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2016  
Penulis

Arik Triarso

## DAFTAR ISI

|   |       |
|---|-------|
| JUDUL PENELITIAN .....  | i     |
| LEMBAR PENGESAHAN .....   | iii   |
| ABSTRAK .....   | v     |
| KATA PENGANTAR.....   | ix    |
| DAFTAR ISI .....  | xi    |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xv    |
| DAFTAR TABEL.....   | xxiii |
| DAFTAR SIMBOL.....  | xxv   |
| DAFTAR ISTILAH .....  | xxvii |
| <br>  |       |
| BAB 1.PENDAHULUAN .....   | 1     |
| 1.1 Latar Belakang .....  | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah .....   | 4     |
| 1.3 Tujuan .....  | 4     |
| 1.4 Manfaat .....   | 5     |
| 1.5 Batasan Penelitian .....  | 5     |
| <br>  |       |
| BAB 2.TINJAUAN PUSTAKA .....  | 7     |
| 2.1. Tanah Lempung.....   | 7     |
| 2.1.1.Sifat dan Perilaku Tanah Lempung.....                         | 7     |
| 2.1.2.Tegangan dan Tekanan Air Pori.....                            | 8     |
| 2.2. PondasiTiang .....   | 8     |
| 2.2.1.Metode Pemancangan Pondasi Tiang .....                        | 9     |
| 2.2.2.Pemancangan Sistem Injeksi.....                               | 9     |
| 2.2.3.Teori <i>Cylindrical Cavity Expansion</i> ( <i>CCE</i> )..... | 11    |
| 2.2.4.Pergerakan Lateral Pada Tanah Saat Pemancangan.....           | 13    |
| 2.2.5.EksesTekanan Air Pori yang Timbul Selama Pemancangan .....    | 18    |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3. Pemodelan Numerik .....   | 26        |
| 2.3.1. Model Elasto - Plastis dengan Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb.....                           | 27        |
| 2.3.2. Simulasi Numerik dengan Metode <i>K-Pressure</i> .....  | 28        |
| 2.3.3. Simulasi Numerik dengan Metode <i>Displacement - Controlled Cavity Expansion (DCCE)</i> ..... | 31        |
| 2.3.4. <i>Mesh Generation – Mesh Mode</i> Pada PLAXIS.....   | 32        |
| 2.4. Korelasi Parameter Tanah .....  | 34        |
| 2.4.1. Kuat Geser <i>Undrained</i> .....   | 34        |
| 2.4.2. Modulus Elastisitas dan Modulus Geser .....   | 36        |
| 2.4.3. Angka Poisson .....   | 38        |
| <b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>  | <b>41</b> |
| 3.1 Tahapan Penelitian.....  | 41        |
| 3.2 Verifikasi Model.....  | 44        |
| 3.3 Simulasi Numerik Pada Plaxis .....   | 44        |
| 3.3.1 Metode Simulasi .....  | 44        |
| 3.3.2 Pembentukan Jaring Elemen .....  | 45        |
| 3.3.3 Perpindahan awal.....  | 45        |
| 3.4 Parameter Tanah dan Tiang.....   | 48        |
| 3.4.1 Parameter Tiang Pondasi .....  | 48        |
| 3.4.2 Parameter Tanah Homogen.....   | 48        |
| 3.4.3 Paramter Tanah Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3 .....                                  | 49        |
| 3.4.4 Paramter Tanah Berdasarkan Berdasarkan Data Penelitian dari Pestana et al (2002) .....         | 50        |
| 3.5 Pemodelan Tiang Tunggal .....  | 51        |
| 3.5.1 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Parameter Tanah Homogen .....                        | 51        |
| 3.5.2 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3 .....              | 53        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.5.3 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Penelitian dari Pestana et al (2002)..... | 54        |
| 3.5.4 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 3D dengan Parameter Tanah Homogen.....                        | 56        |
| 3.6 Pemodelan Kelompok Tiang 3D dengan Parameter Tanah Homogen .....                                | 56        |
| 3.6.1 Geometri dan Tahapan Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 1 x 6 (6 Tiang).....              | 56        |
| 3.6.2 Geometri dan Tahapan Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 3 x 6 (9 Tiang).....              | 58        |
| 3.7 Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013 Proyek SL.....                 | 60        |
| 3.7.1 Pemilihan Parameter Tanah.....  | 61        |
| 3.7.2 Geometri dan Alur Pemancangan Tiang Pada Tanggal 22 Juni 2013 .....                           | 61        |
| 3.7.3 Data <i>Inclinometer-01</i> dan <i>Piezometer-01</i> Pada Tanggal 21 dan 22 Juni 2013 .....   | 64        |
| 3.8 Analisis.....   | 66        |
| 3.9 Jadwal Penelitian .....   | 67        |
| <b>BAB 4. HASIL dan PEMBAHASAN.....</b>   | <b>67</b> |
| 4.1. Hasil Pemodelan Tiang Tunggal.....   | 67        |
| 4.1.1 Hasil Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Parameter Tanah Homogen .....                          | 67        |
| 4.1.2 Hasil Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3 .....                | 76        |
| 4.1.3 Perbandingan Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Data Penelitian dari Pestana (2002) .....       | 84        |
| 4.1.4 Perbandingan Simulasi Tiang Tunggal PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D .....                             | 87        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.2. Hasil Pemodelan Kelompok Tiang 3D dengan Parameter Tanah Homogen.....                 | 89  |
| 4.2.1 Hasil Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 1 x 6.....                              | 89  |
| 4.2.2 Hasil Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 3 x 3.....                              | 110 |
| 4.3. Hasil Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013 Proyek SL..... | 114 |
| BAB 5. KESIMPULAN dan SARAN.....   | 121 |
| 5.1. Kesimpulan.....   | 121 |
| 5.2. Saran.....  | 122 |
| DAFTAR PUSTAKA.....  | 125 |
| LAMPIRAN 1 . Data Tanah.....   | 129 |
| LAMPIRAN 2 . Data Pemancangan & Data Instrumen Geoteknik.....                              | 143 |
| LAMPIRAN 3 . Perhitungan Radial dan Ekses Tekanan Air Pori.....                            | 153 |
| LAMPIRAN 4 . <i>Output</i> PLAXIS).....  | 169 |

## DAFTAR GAMBAR

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1  | Tipikal <i>jacked pile rig</i> , (Poulos, 1994).....  | 10 |
| Gambar 2.2  | <i>Cylindrical Cavity Expansion</i> (Binkgreve <i>et al.</i> 2002) .....  | 11 |
| Gambar 2.3  | Perbandingan perpindahan radial tanah antara hasil teori <i>Cylindrical Cavity Expansion</i> dan pengukuran lapangan (Pestana <i>et al.</i> , 2002).....  | 14 |
| Gambar 2.4  | Perbandingan antara hasil pengukuran dan teori perpindahan radial tanah (Randolph <i>et al.</i> , 1979a).....   | 14 |
| Gambar 2.5  | Perpindahan radial tanah akibat pemancangan tiang (Poulos, 1994).....   | 16 |
| Gambar 2.6  | Analisa masalah dasar, $C_u$ : kuat geser <i>undrained</i> , $E$ : Modulus elastisitas dari tiang, $N_c$ : faktor kapasitas daya dukung lateral, $p_y$ : batas gaya tekan lateral (Poulos, 1994). ..... | 17 |
| Gambar 2.7  | Perhitungan gerakan horisontal tanah akibat pemancangan tiang. $L = 15$ meter; $d = 0,5$ meter (Poulos, 1994).....  | 17 |
| Gambar 2.8  | Terbentuknya distribusi tekanan air pori eksis didekat tiang akibat perpindahan tiang yang besar (Swan) .....   | 18 |
| Gambar 2.9  | Tegangan radial total dan eksis tekanan air pori didekat tiang ( $r = 1,15 r_0$ ) selama <i>cavity expansion</i> (Randolph <i>et al.</i> , 1979a) ...   | 20 |
| Gambar 2.10 | Eksis tekanan air pori didekat tiang ( $r = 1,15 r_0$ ) dengan fungsi OCR (Randolph <i>et al.</i> , 1979a).....   | 21 |
| Gambar 2.11 | Tegangan dan Eksis tekanan air pori di sekitar tiang setelah pemancangan, OCR = 1 (Randolph <i>et al.</i> , 1979a).....   | 21 |
| Gambar 2.12 | Tegangan dan Eksis tekanan air pori di sekitar tiang setelah pemancangan, OCR = 8 (Randolph <i>et al.</i> , 1979a).....   | 22 |
| Gambar 2.13 | Variasi eksis tekanan air pori dengan jarak horisontal (Jun-wei <i>et.al.</i> , 2012). .....  | 25 |
| Gambar 2.14 | Model elasto – plastis (Binkgreve <i>et al.</i> , 2012).....  | 27 |
| Gambar 2.15 | Kriteria keruntuhan dan lingkaran Mohr-Coulombs (Das, 1985).  |    |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.16 | Lingaran Mohr untuk tegangan total dan garis keruntuhan yang disebut garis $\phi = 0$ (Das, 1985).....  | 28 |
| Gambar 2.17 | Geometri dan <i>finite element mesh</i> (Satibi <i>et.al</i> , 2007).....   | 29 |
| Gambar 2.18 | Tegangan di kedalaman 4m setelah diterapkan <i>K-Pressure</i> dengan $K = 3,5$ menggunakan Model <i>HS</i> (Satibi <i>et.al</i> , 2007)....   | 30 |
| Gambar 2.19 | (a) Tegangan vertical tanah, (b) tegangan geser dengan model parameter <i>MC-Correction</i> (Satibi <i>et.al</i> , 2007).....   | 30 |
| Gambar 2.20 | (a) Tegangan radial <i>interface</i> dan (b) <i>K-Values</i> .....  | 31 |
| Gambar 2.21 | (a) Tegangan vertikal dengan model parameter <i>HS</i> menggunakan metode <i>Displacement-Controlled Cavity Expansion</i> , (b) Tegangan vertikal dengan model parameter <i>MC-Correction</i> menggunakan metode <i>K-Pressure</i> (Satibi <i>et.al</i> , 2007) | 32 |
| Gambar 2.22 | Elemen didalam PLAXIS 3D 2012 (Brinkgreve <i>et al.</i> , 2012).....  | 33 |
| Gambar 2.23 | Jumlah Elemen didalam Jaring Elemen Hingga Selama Perhitungan di dalam PLAXIS 3D Foundation (Paulina dan Johanna, 2011).....  | 34 |
| Gambar 2.24 | Jumlah Elemen Yang Diplot Selama Perpindahan Pada <i>Support</i> 3 Setelah empat Fase Pemancangan (Paulina dan Johanna, 2011).....  | 34 |
| Gambar 2.25 | <i>Results from plate loading test after Duncan &amp; Buchignani</i> (1976).....  | 37 |
| Gambar 3.1  | Diagram alir penelitian.....  | 41 |
| Gambar 3.2  | (a) Ilustrasi denah dan potongan sebelum tiang masuk ke dalam tanah; (b) Ilustrasi denah dan potongan setelah tiang masuk ke dalam tanah.....   | 46 |
| Gambar 3.3  | Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan radial terhadap jari-jari tiang.....  | 47 |
| Gambar 3.4  | <i>Summary of cone penetration testing and total unit weight</i> (Pestana <i>et al</i> , 2002).....   | 50 |
| Gambar 3.5  | (a) Geometri dan (b)Jaring elemen simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen: (a) $L= 5$ m, (b) $L=15$ m, dan (c) $L = 30$ m.....  | 52 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 3.6  | (a) Geometri dan (b) Jaringan elemen simulasi tiang dengan variasi parameter tanah (BM1, BM2, dan BM3).....   | 54 |
| Gambar 3.7  | (a) Geometri dan (b) Jaringan elemen simulasi tiang tunggal berdasarkan data Pestana .....  | 55 |
| Gambar 3.8  | Geometri model simulasi tiang tunggal PLAXIS 3D .....   | 56 |
| Gambar 3.9  | Denah model kelompok tiang 1 x 6 ( 6 buah tiang).....   | 57 |
| Gambar 3.10 | Geometri pemodelan kelompok tiang 1 x 6 .....   | 57 |
| Gambar 3.11 | Denah model kelompok tiang 3 x 3 ( 9 buah tiang).....   | 59 |
| Gambar 3.12 | Geometri pemodelan kelompok tiang 3 x 3 (9 Tiang).....  | 59 |
| Gambar 3.13 | Denah Model 1: Pemancangan 11 Tiang pada tanggal 22 Juni 2013 .....   | 62 |
| Gambar 3.14 | Geometri Model-1 (Pemodelan 11 Tiang Pada PLAXIS 3D) .....  | 62 |
| Gambar 3.15 | Denah Model 2: Pemancangan pada tanggal 22 Juni 2013 jika dua pemancangan tiang terakhir diabaikan .....  | 63 |
| Gambar 3.16 | Geometri Model-2 (Pemodelan 9 Tiang Pada PLAXIS 3D) .....   | 63 |
| Gambar 3.17 | Data <i>Inclinometer</i> -01 pada 22 Juni 2013 ( Laporan Proyek SL) .   | 65 |
| Gambar 3.18 | Data <i>Piezometer</i> -01 pada Tanggal 22 Maret 2013 Sampai Dengan 22 Juni 2013 ( Laporan Proyek SL).....  | 66 |
| Gambar 4.1  | Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d = 50$ cm ) .....   | 68 |
| Gambar 4.2  | Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d = 40$ cm ) .....   | 69 |
| Gambar 4.3  | Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d = 30$ cm ) .....   | 70 |
| Gambar 4.4  | Hubungan antara jarak $r$ dan perpindahan radial permukaan tanah, hasil simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen .....   | 70 |
| Gambar 4.5  | Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan permukaan tanah terhadap jari-jari tiang, hasil simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen. .... | 71 |
| Gambar 4.6  | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 50$ cm ) .....   | 72 |
| Gambar 4.7  | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 40$ cm ) .....   | 73 |
| Gambar 4.8  | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 30$ cm ) .....   | 74 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.9  | Hubungan antara jarak $r$ dan ekses tekanan air pori di kedalaman $0,5L$ , hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm dengan parameter tanah homogen. ....   | 74 |
| Gambar 4.10 | Hubungan antara rasio jarak $r$ terhadap diameter tiang dan rasio ekses tekanan air pori terhadap kuat geser <i>undrainned</i> di kedalaman $0,5L$ , hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen .....                  | 75 |
| Gambar 4.11 | Perpindahan radial tanah dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm dengan kedalaman 30 m dengan parameter tanah BM1. ....   | 76 |
| Gambar 4.12 | Hubungan antara jarak $r$ dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm dengan parameter tanah BM1.....   | 77 |
| Gambar 4.13 | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang, hasil simulasi tiang tunggal $d = 50$ cm, $L = 30$ m dengan parameter tanah BM1. ....   | 78 |
| Gambar 4.14 | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang, hasil simulasi tiang tunggal $d = 50$ cm, $L = 30$ m dengan parameter tanah BM2. ....   | 79 |
| Gambar 4.15 | Ekses tekanan air pori di sekitar tiang, hasil simulasi tiang tunggal $d = 50$ cm, $L = 30$ m dengan parameter tanah BM3. ...  | 80 |
| Gambar 4.16 | Hubungan antara jarak $r$ dan ekses tekanan air pori di lapisan ke 2 kedalaman 7,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.....  | 81 |
| Gambar 4.17 | Hubungan antara jarak $r$ dan ekses tekanan air pori di lapisan ke 2 kedalaman 12,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.....   | 81 |
| Gambar 4.18 | Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio ekses tekanan air pori terhadap kuat geser <i>undrainned</i> di lapisan ke 2 kedalaman 7,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3. .... | 82 |
| Gambar 4.19 | Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter dan rasio ekses tekanan air pori terhadap kuat geser <i>undrainned</i> di lapisan ke 3 kedalaman 12,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3. ....      | 83 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.20 | Hubungan antara jarak $r$ dan perpindahan radial tanah, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 60 cm. ....  | 84 |
| Gambar 4.21 | Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan radial terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 60 cm. ....   | 84 |
| Gambar 4.22 | Perbandingan perpindahan radial tanah antara hasil simulasi tiang tunggal (PLAXIS 2D) dan data dari Pestana 2002. (a) Pot.1-1'; (b) Pot. 2-2'; (c) Pot 3-3' . ....  | 85 |
| Gambar 4.23 | Nilai tekanan air pori hasil simulasi tiang tunggal dan data dari pestana 2002. (a) $r = 0,9$ m , (b) $r = 1,5$ m. ....   | 86 |
| Gambar 4.24 | Ekses tekanan air pori antara hasil simulasi tiang tunggal dan data dari pestana 2002. (a) $r = 0,9$ m , (b) $r = 1,5$ m. ....  | 86 |
| Gambar 4.25 | Perpindahan radial tanah disekitar tiang pada jarak $r$ : (a) $r = 2d$ ; (b) $r = 4d$ ; (c) $r = 6d$ , hasil dari simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D untuk diameter 50 cm, kedalaman 5 m dengan paramater tanah homogen. .... | 87 |
| Gambar 4.26 | Hubungan antara jarak $r$ dan perpindahan radial permukaan tanah, hasil dari simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D untuk diameter 50 cm, kedalaman 5 m dengan paramater tanah homogen. ....                                      | 88 |
| Gambar 4.27 | Hubungan antara jarak $r$ dan ekses tekanan air pori di kedalaman $0,5L$ , hasil dari simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D untuk diameter 50 cm, kedalaman 5 m dengan paramater homogen. ....                                   | 88 |
| Gambar 4.28 | Perpindahan lateral di titik A pada jarak: (a) $r_A = 2d$ ; (b) $r_A = 4d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm ....  | 90 |
| Gambar 4.29 | Perpindahan lateral ke arah titik A pada jarak: (a) $r_A = 2d$ ; (b) $r_A = 4d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm ....   | 91 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.30 | Perpindahan lateral ke arah titik A pada jarak: (a) $r_A = 2d$ ; (b) $r_A = 4d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm dan spasi $3d$ . .....  | 91 |
| Gambar 4.31 | (a) Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_A$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm ..... | 92 |
| Gambar 4.32 | (a) Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_A$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm.....  | 94 |
| Gambar 4.33 | (a) Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_A$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm.....  | 95 |
| Gambar 4.34 | Perbandingan distribusi horisontal perpindahan lateral ke arah titik A yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3 . .....   | 96 |
| Gambar 4.35 | Perbandingan rasio perpindahan lateral tanah ke arah titik A terhadap jari-jari tiang yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3 . .....  | 97 |
| Gambar 4.36 | Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a) $r_B = 17d$ ; (b) $r_B = 19d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm .....   | 98 |
| Gambar 4.37 | Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a) $r_B = 17d$ ; (b) $r_B = 19d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm .....   | 99 |
| Gambar 4.38 | Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a) $r_B = 17d$ ; (b) $r_B = 19d$ dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm .....   | 99 |

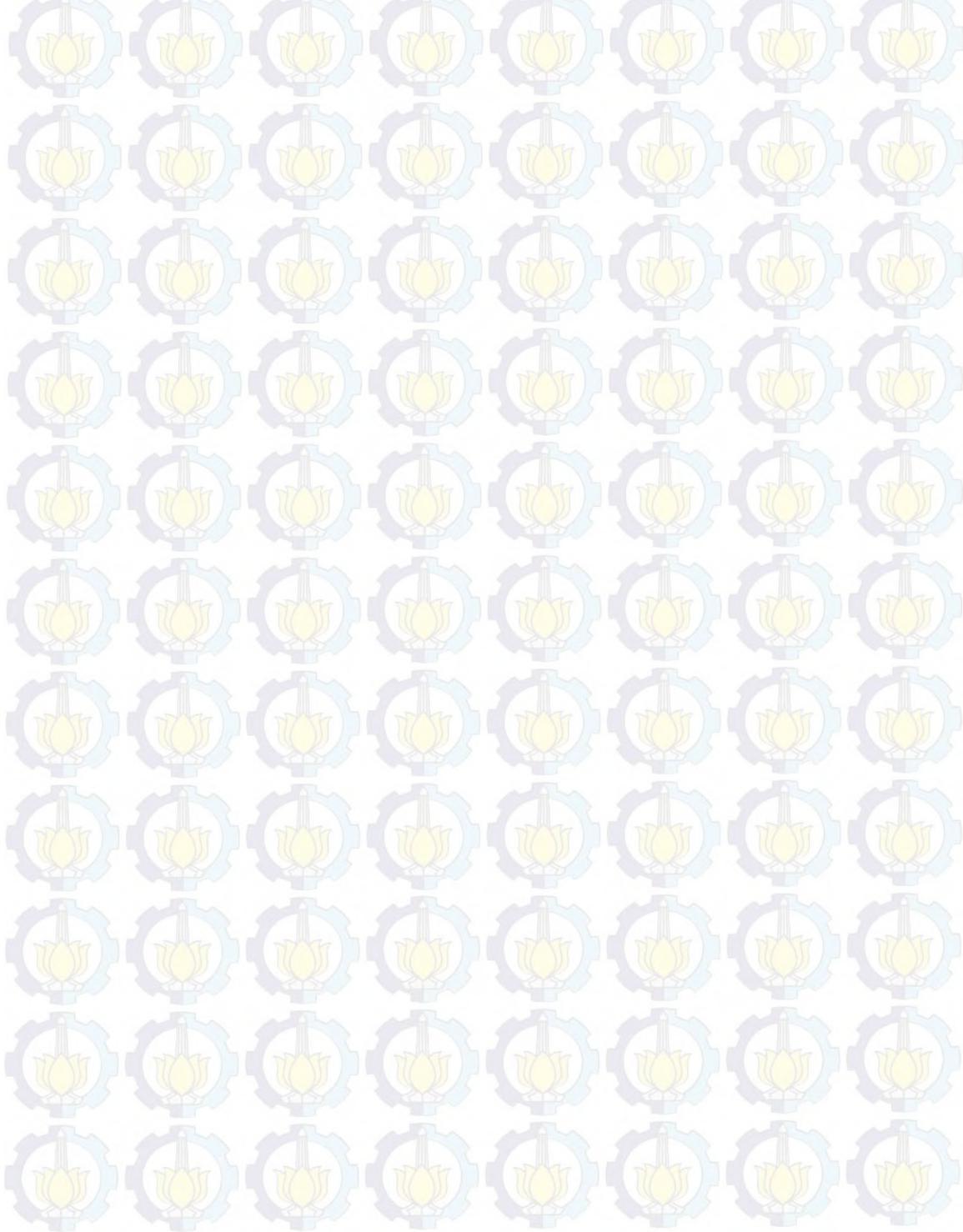
|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Gambar 4.39 | (a) Hubungan antara jarak $r_B$ dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_B$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm.....                        | 100 |
| Gambar 4.40 | (a) Hubungan antara jarak $r_B$ dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_B$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm .....                       | 102 |
| Gambar 4.41 | (a) Hubungan antara jarak $r_B$ dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_B$ terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm.....                        | 103 |
| Gambar 4.42 | Perbandingan distribusi horisontal perpindahan lateral ke arah titik B yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3 .....   | 104 |
| Gambar 4.43 | Perbandingan Rasio Perpindahan Lateral ke Arah Titik B dari Simulasi Kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter Tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) Fase 1 dan 6, (b) Fase 3 .....   | 105 |
| Gambar 4.44 | Tampak atas ( $z = -3$ m) bidang penyebaran eksese tekanan air pori dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter 40 cm; spasi $3d$ . (a) tiang P1, (b) Tiang P1-P3, (c) Tiang P1-P6. ....  | 106 |
| Gambar 4.45 | (a) Hubungan antara jarak $r_A$ dan eksese tekanan air pori ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_A$ terhadap diameter tiang dan rasio eksese tekanan air pori terhadap kuat geser <i>undrained</i> , hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm ..... | 107 |
| Gambar 4.46 | (a) Hubungan antara jarak $r_B$ dan eksese tekanan air pori ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak $r_B$ terhadap diameter tiang dan rasio eksese tekanan air pori terhadap kuat geser <i>undrained</i> , hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm ..... | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Gambar 4.47 (a) Hubungan antara jarak elemen tanah ke as P1 dan ekses tekanan air pori saat simulasi tiang P1, (b) hubungan antara jarak elemen tanah ke as P1 dan ekses tekanan air pori saat simulasi tiang P6 . | 109 |
| Gambar 4.48 Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan lateral ke arah A (Potongan A-A'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm.  | 110 |
| Gambar 4.49 Hubungan antara jarak $r_B$ dan perpindahan lateral ke arah B (Potongan B-B'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm.  | 111 |
| Gambar 4.50 Hubungan antara jarak $r_A$ dan ekses tekanan air pori ke arah A (Potongan A-A'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm.   | 112 |
| Gambar 4.51 Hubungan antara jarak $r_B$ dan ekses tekanan air pori ke arah B (Potongan B-B'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm.   | 113 |
| Gambar 4.52 Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang P1 pada model – 1.   | 115 |
| Gambar 4.53 Perpindahan lateral di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P11 pada model-1.  | 115 |
| Gambar 4.54 Ekses tekanan air pori di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P11 pada model-1.   | 116 |
| Gambar 4.55 Hubungan antara jarak $r_A$ dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang P1 pada model – 2.   | 117 |
| Gambar 4.56 Perpindahan lateral di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P9 pada model-2.   | 118 |
| Gambar 4.57 Ekses tekanan air pori di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P9 pada model-2.  | 119 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1. Persamaan Untuk Perhitungan Perpindahan Radial Berdasarkan Teori <i>Cylindrical Cavity Expansion</i> .....                   | 12 |
| Tabel 2.2. Pengukuran dan Prediksi nilai $a$ dan $b$ untuk tanah <i>CDG</i> .....   | 24 |
| Tabel 2.3. Rekomendasi untuk Faktor Cone $N_{kt}$ .....   | 35 |
| Tabel 2.4. Rentang Nilai Modulus Elastisitas.....   | 37 |
| Tabel 2.5. Rentang Nilai untuk Rasio Poisson.....   | 38 |
| Tabel 3.1 Parameter Tiang.....  | 48 |
| Tabel 3.2 Parameter Tanah Homogen.....  | 48 |
| Tabel 3.3 Data Tanah BM1.....   | 49 |
| Tabel 3.4 Data Tanah BM2.....   | 49 |
| Tabel 3.5 Data Tanah BM3.....   | 49 |
| Tabel 3.6 Modulus Elastisitas Tanah Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3.....   | 50 |
| Tabel 3.7 Korelasi data tanah dari Pestana (2002).....  | 51 |
| Tabel 3.8 Simulasi Tiang Tunggal 2D Pada Tanah Homogen.....   | 52 |
| Tabel 3.9 Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3.....  | 53 |
| Tabel 3.10 Simulasi Kelompok Tiang Formasi 1 x 6.....   | 57 |
| Tabel 3.11 Tahapan Simulasi Numerik Kelompok Tiang dengan Formasi 1 x 6   |    |
| Tabel 3.12 Tahapan Simulasi Nunerik Kelompok Tiang dengan Formasi 3 x 3   |    |
| Tabel 3.13 Tahapan Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013.....  | 58 |
| Tabel 3.14 Jadwal penelitian.....   |    |
| Tabel 4.1. Perpindahan radial untuk diameter tiang 50 cm, hasil perhitungan berdasarkan teori <i>cylindrical cavity expansion</i> ..... | 67 |
| Tabel 4.2. Perpindahan radial untuk diameter tiang 40 cm, hasil perhitungan berdasarkan teori <i>cylindrical cavity expansion</i> ..... | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Tabel 4.3. Perpindahan radial untuk diameter tiang 30 cm, hasil perhitungan berdasarkan teori <i>cylindrical cavity expansion</i> ..... | 68 |
| Tabel 4.4. Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori ( $\Delta u$ ) .....  | 72 |
| Tabel 4.5. Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori $\Delta u$ (Kedalaman 7,5 m) .....  | 78 |
| Tabel 4.6. Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori $\Delta u$ (Kedalaman 12,5 m) .....   | 78 |



## DAFTAR SIMBOL

|               |  |
|---------------|--|
| $C_u$         | : kohesi dalam kondisi <i>undrained</i> (kuat geser <i>undrained</i> ) |
| $d$           | : diameter tiang   |
| $D_r$         | : kepadatan relatif  |
| $e$           | : angka pori   |
| $E$           | : modulus elastisitas  |
| $F_c, F_q$    | : faktor <i>cavity expansion</i>                                       |
| $G$           | : modulus geser  |
| $H$           | : kedalaman tanah  |
| $L$           | : panjang tiang tertanam   |
| $I_r$         | : indek kekakuan   |
| $k$           | : koefisien premeabilitas  |
| $K$           | : koefisien tegangan tanah   |
| $LL$          | : batas cair   |
| $N_c$         | : faktor cone teoritis   |
| $N_{ki}$      | : faktor cone empiris  |
| $P_u$         | : tekanan ultimate   |
| $p_y$         | : batas gaya tekan lateral   |
| $PI$          | : indeks plastis   |
| $PL$          | : batas plastis  |
| $q_t$         | : tahanan cone terkoreksi  |
| $r$           | : jarak elemen tanah ke as tiang                                       |
| $r_0$         | : jari-jari tiang  |
| $r_p$         | : radius zona plastis  |
| $r_m$         | : radius efektif   |
| $R_a$         | : jari – jari ekspansi rongga silinder                                 |
| $S_u$         | : kuat geser <i>undrained</i>  |
| $u$           | : tegangan air pori (hidrostatik)                                      |
| $\nu$         | : angka poisson  |
| $z$           | : tebal lapisan tanah  |
| $\Delta u$    | : eksese tekanan air pori  |
| $\varepsilon$ | : regangan   |
| $\phi$        | : sudut geser  |



- $\gamma$  : berat-volume tanah
- $\gamma_w$  : berat-volume air
- $\rho$  : perpindahan radial atau lateral
- $\rho_0$  : perpindahan rongga silinder
- $\rho_p$  : perpindahan di batas zona plastis
- $\sigma_0$  : tegangan total
- $\sigma'_0$  : tegangan efektif
- $\tau_f$  : tahanan geser (kekuatan geser)

## DAFTAR ISTILAH

### ***CCE***

*Cylindrical Cavity Expansion* merupakan teori yang dapat digunakan untuk menganalisa perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori akibat pemancangan tiang

### ***DCCE***

*Displacement – Controlled Cavity Expansion* merupakan metode yang dapat digunakan untuk memodelkan pemancangan tiang di dalam program PLAXIS

### **Disipasi**

Proses menurunnya eksese tekanan air pori

### ***Displacement pile***

Tiang padat atau ujung tertutup yang dimasukkan ke tanah sehingga menggantikan volume tanah yang setara dengan volume tiang tersebut ( baik yang mengalami pemadatan maupun perpindahan )

### **Ekses tekanan air pori**

Tekanan air pori berlebih / melebihi kondisi hidrostatik

### ***Incompressible***

Kondisi saat tanah tidak mengalami perubahan volume akibat pembebanan.

### ***FE***

Elemen hingga merupakan salah satu dari solusi perhitungan numerik

### **Perpindahan radial atau lateral**

Perpindahan elemen tanah ke arah radial atau lateral

### **Perpindahan rongga silinder**

Perpindahan elemen tanah di area dinding rongga yang mewakili tiang ( yang berjarak  $r = r_0$  )

## **PLAXIS**

Program (software) geoteknik yang berdasarkan solusi numerik elemen hingga

## **Premeabilitas**

Kemampuan tanah untuk meloloskan air di dalam tanah

## ***Prescribed displacement***

Salah satu perintah di dalam program PLAXIS pada sub-menu kondisi batas yang dapat diberikan pada suatu model untuk mengatur perpindahan suatu titik.

## **RAM**

*Random Access Memori* adalah sebuah perangkat keras komputer yang berfungsi sebagai penyimpanan sementara berbagai data instruksi program pada saat dijalankan

## **Regangan volumetrik**

Perbandingan antara perubahan volume terhadap volume total

## ***Set up***

Proses terdispasinya eksese tekanan air pori

## ***Undrained***

Kondisi saat tidak ada aliran air ke dalam atau keluar dari massa tanah dalam jangka waktu tertentu pada tanah yang dikenakan beberapa perubahan beban. Perubahan beban pada tanah tersebut menyebabkan perubahan tekanan air di dalam rongga tanah, karena air tidak bisa bergerak atau keluar dari dalam pori tanah pada saat itu.

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pemancangan tiang sistem injeksi pada tanah lunak / sangat lunak (lempung) dapat mengakibatkan pergerakan tanah dan eksese tekanan air pori di sekitar tiang, serta dapat menyebabkan potensi kerusakan struktur di sekitarnya, contohnya adalah pergerakan tanah yang terjadi pada proyek SL (komunikasi pribadi). Pergerakan tanah juga terjadi di proyek yang dibangun di suatu lahan bekas pertokoan di Surabaya, sehingga pada saat itu dinding cagar budaya yang berada di dekat proyek tersebut menjadi miring dan perlu diberi penyangga. Kejadian pergerakan tanah tersebut juga dapat terjadi di proyek – proyek lainnya, baik yang terpublikasi dan yang tidak terpublikasi.

Poulos (1994) menjelaskan bahwa pergerakan horisontal tanah di sekitar tiang relatif seragam. Jun *et al* (2011) dalam penelitiannya melakukan pengujian lapangan untuk memonitor perpindahan tanah selama pemancangan sistem injeksi pada pipa beton ujung terbuka ke dalam lapisan tanah terutama yang terdiri dari tanah lempung. Besarnya perpindahan menurun sesuai dengan kedalaman dan tidak ada defleksi di bawah ujung tiang.

Teori *Cylindrical Cavity Expansion* (Vesic, 1972) memberikan perpindahan radial yang sesuai dengan teori *plane strain* bersamaan dengan data pengukuran yang dilakukan oleh Cooke (1973) serta oleh Randolph *et al* (1979b). Chai *et al* (2009) memberikan ringkasan sejumlah persamaan yang diakibatkan oleh ekspansi rongga (*cavity expansion*) berdasarkan teori yang diusulkan oleh Vesic (1972).

Francescon (1983) melakukan eksperimen pemancangan tiang di dalam model pengujian pada tanah lempung. Pestana *et al* (2002) melakukan eksperimen pemancangan tiang tunggal di lapangan yang dilengkapi dengan inklinometer di sekitar tiang. Kedua eksperimen tersebut menghasilkan perpindahan tanah yang sesuai dengan teori *Cylindrical Cavity Expansion* (Vesic, 1972).

Tekanan air pori yang melebihi tekanan hidrostatik atau disebut eksese tekanan air pori sering terjadi pada saat pemancangan di tanah lempung. Secara umum tren disipasi eksese tekanan air pori yang disebabkan oleh pemancangan sistem injeksi di tanah berbutir (*granular*) seperti yang diamati oleh Yu (2004) menghasilkan disipasi eksese tekanan air pori yang lebih cepat bila dibandingkan dengan disipasi eksese tekanan air pori yang terdeteksi di tanah lempung (Xu *et al*, 2006). Eksese tekanan air pori berhubungan erat dengan perubahan tegangan dan deformasi tanah di sekitar tiang (Yu, 2004). Untuk memodelkan eksese tekanan air pori, *Cylindrical Cavity Expansion* memungkinkan untuk dapat digunakan sebagai prediksi yang dapat diterima dan rasional untuk eksese tekanan air pori akibat pemancangan sistem injeksi dengan ujung tertutup atau *solid* (Randolph *et al*, 1979a). Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Yu (2004) menghasilkan eksese tekanan air pori maksimum (*a*) dan distribusi eksese tekanan air pori (*b*) yang sesuai dengan pengembangan teori *Cylindrical Cavity Expansion* dari Randolph dan Wroth (1979).

Jun-wei *et al* (2012) melakukan pengujian lapangan yang dilengkapi dengan uji laboratorium untuk mengamati kinerja pemancangan sistem injeksi pada pipa beton ujung terbuka dalam tanah lunak. Hasilnya menunjukkan bahwa eksese tekanan air pori dapat dimodelkan dengan teori *Cylindrical Cavity Expansion*.

Dewasa ini beberapa peneliti (Broere, 2006; Satibi *et al*, 2007; Pham, 2009; dan Maryono 2014) melakukan penelitian mengenai pemodelan numerik menggunakan program (PLAXIS) untuk dapat memodelkan simulasi pemancangan tiang dan mengetahui efek pemancangan tiang terhadap tanah di sekitarnya.

Broere (2006) melakukan simulasi pemancangan tiang tunggal pada tanah pasir untuk mendapatkan daya dukung tiang terutama tahanan selimut tiang ( $Q_s$ ), simulasi tersebut menggunakan PLAXIS 2D dengan model *axisymmetry* dan pada dinding sepanjang rongga yang mewakili tiang diterapkan perpindahan (*prescribed displacement*) kemudian dibandingkan dengan hasil *Centrifuge Test*. Pham (2009) juga melakukan hal tersebut untuk mendapatkan angka pori dan tegangan radial akibat pemancangan sistem injeksi.

Satibi *et al* (2007) melakukan penelitian tentang simulasi pemancangan tiang tunggal di tanah pasir untuk mendapatkan daya dukung tiang yang dilakukan dengan 3 (tiga) metode yaitu: metode *K-pressure*, metode *Displacement-Controlled Cavity Expansion*, dan metode peningkatan  $K_o$ . Simulasi tersebut menggunakan bantuan PLAXIS 2D dengan model *axisymmetry*. Hasilnya: untuk metode *K-pressure* dan *Displacement - Controlled Cavity Expansion (DCCE)* menjadi metode yang tepat untuk simulasi pemancangan *displacement pile* sedangkan metode peningkatan  $K_o$  menjadi metode yang kurang tepat. Metode peningkatan  $K_o$  menghasilkan medan tegangan yang tidak realistis di sekitar tiang setelah proses pemancangan.

Maryono (2014) dalam penelitiannya melakukan analisis deformasi tanah lunak akibat pemancangan, beberapa tiang ( $> 1$  tiang) dimodelkan menggunakan PLAXIS 2D. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa jarak yang berpengaruh akibat pemancangan ditentukan oleh urutan pemancangan.

Berdasarkan beberapa permasalahan dan dampak seperti yang dijelaskan serta dari pengkajian beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, maka dapat diketahui hingga saat ini prediksi besarnya pergerakan / perpindahan tanah akibat pemancangan tiang masih terus dilakukan untuk pengkajian, pengembangan, dan penelitian lebih lanjut.

Simulasi pemancangan tiang tunggal yang telah dilakukan sebelumnya memberikan pemahaman tentang pemodelan numerik untuk pemancangan tiang menggunakan PLAXIS di tanah pasir dengan pendekatan teori *Cylindrical Cavity Expansion*, sedangkan pergerakan tanah juga sering terjadi di tanah lempung, maka pemodelan numerik pada tanah lempung atau tanah lunak juga diperlukan. Pemodelan numerik untuk kelompok tiang ( $> 1$  tiang) juga diperlukan untuk memberikan gambaran mengenai perubahan perpindahan tanah dan eksese tekanan air pori akibat penambahan jumlah tiang, oleh karena itu pemodelan numerik dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan program PLAXIS 2D & 3D.

Tren perpindahan lateral tanah dan eksese tekanan air pori akibat pemancangan sistem injeksi dalam hal ini sangatlah penting untuk dapat diketahui atau diprediksi karena perpindahan tanah untuk tanah lunak (lempung) memiliki hubungan yang erat dengan perubahan tekanan air pori, maka dari itu hasil

pemodelan di dalam penelitian ini akan difokuskan pada perpindahan lateral tanah dan eksese tekanan air pori.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Bagaimanakah pemodelan numerik pemancangan sistem injeksi tiang tunggal dan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) pada tanah lempung?
- b. Berapakah selisih perbedaan antara hasil pemodelan numerik dan teori *Cylindrical Cavity Expansion* ?
- c. Bagaimanakah tren perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori akibat simulasi pemancangan sistem injeksi ?
- d. Bagaimanakah pengaruh diameter tiang terhadap perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori ?
- e. Bagaimanakah pengaruh penambahan jumlah tiang terhadap perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori ?
- f. Bagaimanakah pengaruh alur pemancangan terhadap eksese tekanan air pori dan pergerakan tanah ?
- g. Bagaimanakah perbandingan antara hasil pemodelan numerik (PLAXIS) dan kondisi lapangan ?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Untuk mendapatkan pemodelan numerik pemancangan sistem injeksi tiang tunggal dan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) pada tanah lempung.
- b. Untuk mengetahui selisih perbedaan antara hasil pemodelan numerik dan teori *Cylindrical Cavity Expansion*.
- c. Untuk mengetahui tren perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori akibat simulasi pemancangan sistem injeksi tiang tunggal dan kelompok tiang ( $> 1$  tiang).
- d. Untuk mengetahui pengaruh diameter tiang terhadap perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori.

- e. Untuk mengetahui pengaruh jumlah tiang terhadap perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori.
- f. Untuk mengetahui pengaruh alur pemancangan terhadap perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori.
- g. Untuk mendapatkan perbandingan antara hasil pemodelan numerik (PLAXIS) dan kondisi lapangan.

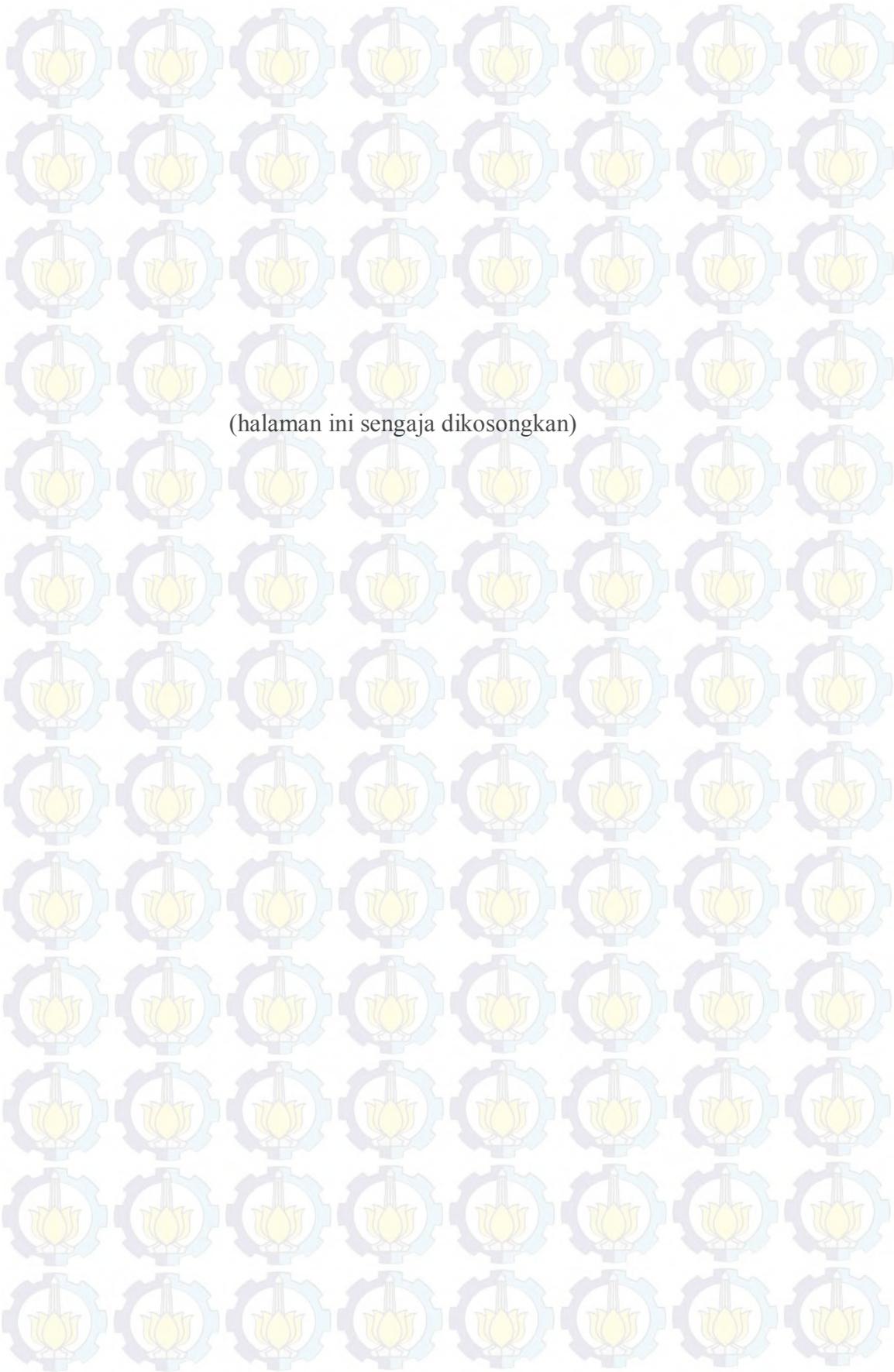
#### 1.4 Manfaat

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai cara pendekatan pemodelan numerik PLAXIS 2D dan 3D untuk menganalisis perpindahan lateral tanah dan ekses tekanan air pori pada tanah lunak (lempung) akibat pemancangan sistem injeksi tiang tunggal dan kelompok tiang (> 1 tiang).

#### 1.5 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian ini, maka beberapa batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 2D dan 3D
- b. Jenis tanah dalam penelitian ini adalah tanah lempung (tanah lunak) kondisi *undrained* dan tidak kompresif (*incompressible*) dengan  $\phi = 0$  dan  $C = C_u$
- c. Parameter tanah dimodelkan menggunakan model Mohr Coulomb
- d. Hasil yang dianalisa adalah perpindahan lateral tanah dan ekses tekanan air pori.
- e. Metode simulasi numerik yang digunakan sebagai pendekatan untuk pemodelan adalah metode *Displacement - Controlled Cavity Expansion (DCCE)*.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tanah Lempung

Tanah lempung sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang berbentuk lempengan – lempengan pipih dan merupakan partikel – partikel dari mika, mineral – mineral lempung, dan mineral – mineral yang sangat halus lainnya. Mineral lempung ialah partikel – partikel mineral tertentu yang menghasilkan sifat – sifat plastis pada tanah bila bercampur dengan air. Ukuran butiran lempung kurang dari 0,002 milimeter. Umumnya partikel – partikel tanah lempung mempunyai muatan negatif pada permukaannya (Das, 1985).

##### 2.1.1 Sifat dan Perilaku Tanah Lempung

Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 1999):

- Ukuran butir halus
- Permeabilitas rendah
- Proses konsolidasi lambat
- Kenaikan air kapiler tinggi
- Bersifat sangat kohesif
- Kadar kembang susut yang tinggi

Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser. Secara umum kuat geser tanah dibagi menjadi dua kondisi yaitu kuat geser *undrained* dan *drained*. Untuk tanah lempung karena memiliki permeabilitas rendah ( $k < 10^{-6}$  cm/s), waktu yang diperlukan untuk mengecilkan eksese tekanan air pori yang timbul karena adanya beban atau tekanan (misal dari pondasi) mungkin akan lama sekali. Untuk hal ini, kondisi *undrained* mungkin terjadi, baik

selama melaksanakan pekerjaan maupun setelah pekerjaan tersebut selesai dilaksanakan. Jadi, kondisi  $\phi = 0$  mungkin lebih tepat bagi kasus tanah lempung tersebut (Das, 1985).

### 2.1.2 Tegangan dan Tekanan Air Pori

Partikel tanah mengalami tegangan dalam tiga arah utama. Tegangan vertikal total dapat ditentukan pada persamaan 2.1 (Bowles, 1997) :

$$\sigma_{v0} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i \quad (2.1)$$

dimana notasi  $\sigma_{v0}$  adalah tegangan vertikal total,  $z_i$  adalah tebal lapisan,  $\gamma_i$  adalah berat volume tanah, dan  $n$  adalah jumlah lapisan.

Total tegangan vertikal dibagi menjadi tegangan efektif yaitu tegangan yang dibawa oleh partikel atau butiran dan tekanan pori seperti pada persamaan 2.2 . Bila tekanan air pori adalah hidrostatik, maka tekanan pori dapat ditentukan dalam persamaan 2.3. Saat ketinggian air dalam tabung *piezometer* berada di atas muka air tanah, hal ini dapat dikatakan terjadi eksese tekanan air pori, sehingga dapat ditulis pada persamaan 2.4 (Bowles, 1997).

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u \quad (2.2)$$

$$u = H \cdot \gamma_w \quad (2.3)$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u - \Delta u \quad (2.4)$$

dimana notasi  $\sigma_0$  adalah tegangan total,  $\sigma'_0$  adalah tegangan efektif,  $u$  adalah tekanan air pori (hidrostatik),  $\Delta u$  adalah eksese tekanan air pori,  $\gamma_w$  adalah berat volume air, dan  $H$  adalah kedalaman.

## 2.2 Pondasi Tiang

Tiang pancang adalah bagian-bagian konstruksi yang terbuat dari kayu, beton, dan atau baja, yang digunakan untuk meneruskan (mentransmisikan) beban ke kedalaman tanah (Bowles, 1997). Secara teoritis pondasi tiang dikategorikan

sebagai pondasi dalam apabila perbandingan antara kedalaman ( $H$ ) dengan diameternya ( $d$ ) adalah lebih besar atau sama dengan 10 ( $H / d \geq 10$ ). Jarak optimal antara tiang adalah  $2,5d - 3,5d$ .

### 2.2.1 Metode Pemancangan Pondasi Tiang

Tiang pondasi dapat dimasukkan ke dalam tanah melalui sejumlah metode sebagai berikut (Bowles, 1997):

- a. Pemancangan dengan pukulan di atas tiang pondasi menggunakan *hamer pile*. Metode ini menghasilkan getaran dan suara yang cukup keras
- b. Pemancangan menggunakan perangkat penggetar yang melekat pada bagian atas tiang pondasi. Metode ini biasanya relatif tenang dan getaran pemancangan mungkin tidak berlebihan. Metode ini lebih cocok untuk tanah sedikit kohesi.
- c. Pemancangan sistem injeksi
- d. Pengeboran lubang dan memasukkan tiang pondasi ke dalamnya atau lebih umum mengisi lubang dengan adukan beton yang menghasilkan tiang pondasi saat adukan beton tersebut mengeras.

### 2.2.2 Pemancangan Sistem Injeksi

Selama beberapa tahun terakhir telah dikembangkan peralatan untuk pemancangan tiang-tiang pracetak dengan menggunakan sistem injeksi. Gambar 2.1. menunjukkan tipikal *jacking rig*, yang memiliki fitur sebagai berikut :

- Berat mesin biasanya memiliki berat 400 – 600 ton dan di dukung oleh dua track (biasanya lebar 2 meter, panjang 10 meter), sehingga dapat memancang tiang ke permukaan tanah dengan tekanan 200 kpa dan 300 kpa.
- Tiang pancang dipegang dengan klem, kemudian di dorong ke dalam tanah, dan dengan kecepatan penetrasi sesuai dengan yang diizinkan. Biasanya untuk panjang 15 – 20 meter dapat dipancang dalam waktu 15 – 20 menit.

- Gaya yang dibutuhkan untuk memancang tiang dipantau secara terusmenerus dan dapat dianggap sebagai tes beban (*loading test*), meskipun ada sejumlah keterbatasan dari kemampuan pengukuran untuk menunjukkan akurasi kapasitas statis tiang dalam jangka panjang.

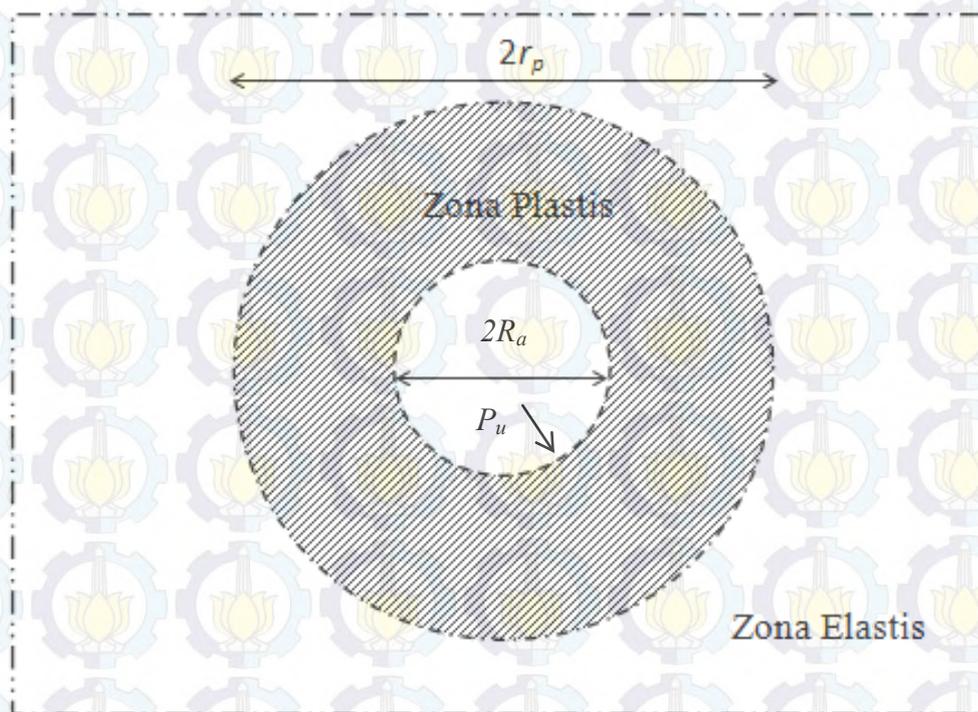


Gambar 2.1 Tipikal *jacked pile rig*, (Poulos, 1994)

### 2.2.3 Teori *Cylindrical Cavity Expansion (CCE)*

Ketika tiang dimasukkan ke dalam tanah, awalnya ada volume tanah yang tergantikan sebesar volume tiang yang masuk. Pada penetrasi kecil (kurang dari 10 kali jari-jari tiang), terjadi *heave* di permukaan tanah (Cooke, 1973). Pada kedalaman / penetrasi tiang yang lebih besar, tanah berpindah (terdesak oleh tiang) ke arah radial, hal ini menyebabkan proses pemancangan tiang dapat dimodelkan sebagai *Cylindrical Cavity Expansion* (Butterfield, 1970).

Gambar 2.2 menunjukkan *Cylindrical Cavity Expansion* pada tanah kohesif, radius batas antara zona plastis dan zona elastis yang dinyatakan dalam parameter  $r_p$ . Rongga silindris (tiang) dengan jari-jari atau radius awal  $r_0$  dikembangkan hingga radius  $R_a$  dengan memberikan tekanan internal  $P_u$  pada dinding rongga silinder. Tanah diasumsikan tidak kompresif (*incompressible*) dengan sudut geser nol ( $\phi = 0$ ) dan koheksi sebesar  $C$ .



Gambar 2.2 *Cylindrical Cavity Expansion* (Binkgreve et al, 2002)

Chai et al (2009) telah merangkum sejumlah persamaan (Tabel 2.1) untuk menghitung perpindahan lateral yang diakibatkan oleh ekspansi rongga (*cavity expansion*) berdasarkan teori yang diusulkan oleh Vesic, dimana sejumlah persamaan yaitu Persamaan 2.5 sampai dengan Persamaan 2.10 untuk kondisi tanah *undrained* dengan sudut geser  $\phi = 0$  dan untuk regangan volumetrik di dalam zona plastis 0.

Tabel 2.1. Persamaan Untuk Perhitungan Perpindahan Radial Berdasarkan Teori *Cylindrical Cavity Expansion*

| Nomor Pers. | Uraian  | Persamaan   | Referensi               |
|-------------|---|---|-------------------------|
| (2.5)       | Radius of plastic zone, $r_p$                                       | $r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0$ $I_r = \frac{E}{2(1+\nu)C_u} = \frac{G}{C_u}$          |                         |
| (2.6)       | Limiting cavity pressure, $P_u$                                     | $P_u = C_u \cdot F_c + P_0 \cdot F_q$ $F_q = 1$ $F_c = \ln(I_r) + 1$                | Vesic (1972)            |
| (2.7)       | Pressure, $P_p$<br>(at $r = r_p$ )                                  | $P_p = P_u - 2C_u \ln(r_p / r_0)$   |                         |
| (2.8)       | Displacement, $\rho_p$<br>(at $r = r_p$ )                           | $\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p (P_p - P_0)$ $\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot C_u$ |                         |
| (2.9)       | Displacement in plastic zone, $\rho$<br>(at $r_0 \leq r \leq r_p$ ) | $\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p / r} \rho_p$                     | Chai et al (2005, 2007) |
| (2.10)      | Displacement in elastic zone, $\rho$<br>(at $r \geq r_p$ )          | $\rho = \frac{r_p}{r} \rho_p = \frac{r_p^2}{2r}$                                    |                         |

Sumber : Chai et al (2009)

Notasi  $E$  adalah modulus elastisitas pada tanah;  $G$  adalah modulus geser pada tanah;  $C_u$  adalah tegangan geser *undrained*;  $\nu$  = Angka poisson pada tanah;  $P_0$  = Tegangan utama inisial rata-rata di dalam tanah;  $I_r$  adalah indek kekakuan;  $F_c$  dan  $F_q$  adalah faktor *cavity expansion*.

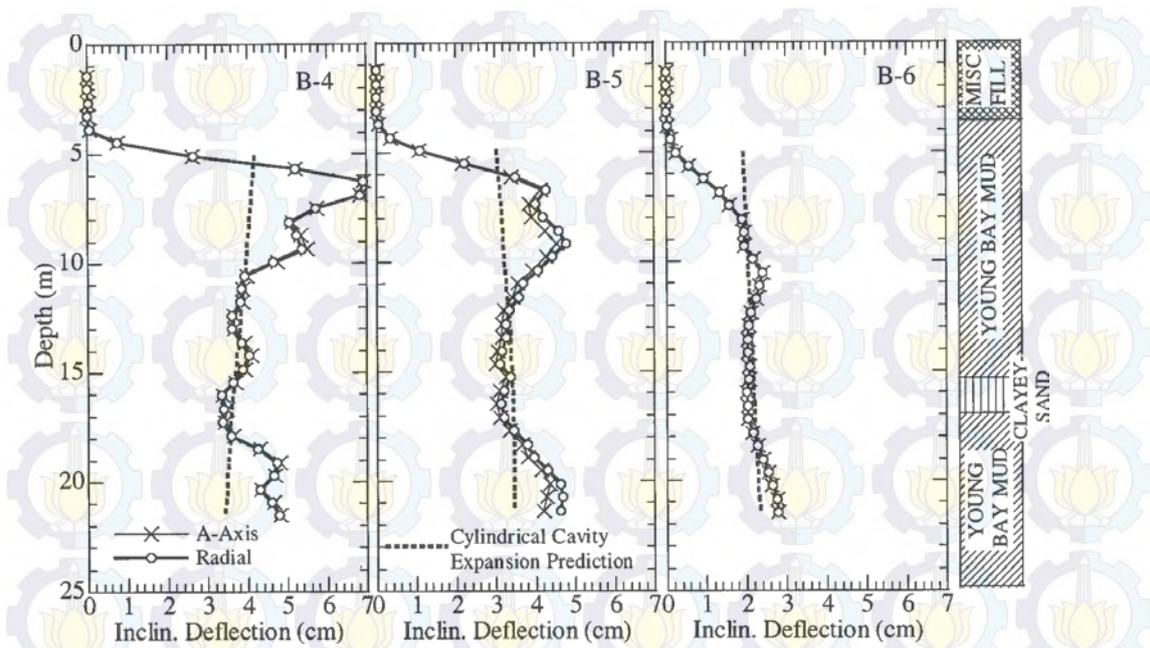
#### 2.2.4 Pergerakan Lateral Tanah Saat Pemancangan Tiang

Suatu eksperimen mengenai pemancangan tiang (*displacement pile*) dilakukan oleh Pestana *et al* (2002) dengan sejumlah inklinometer yang dipasang di sekitar tiang. Pengujian tersebut menunjukkan pengukuran perpindahan radial di sekitar tiang pada saat pemancangan ke dalam tanah lunak jenuh. Perbandingan hasil pengukuran inklinometer tersebut dengan suatu metode untuk memprediksi perpindahan radial di dalam lapisan tanah lempung lunak akibat pemancangan tiang dalam kondisi *undrained* yaitu dengan menggunakan teori *Cylindrical Cavity Expansion* (Vesic, 1972) yang diberikan pada Persamaan (2.11).

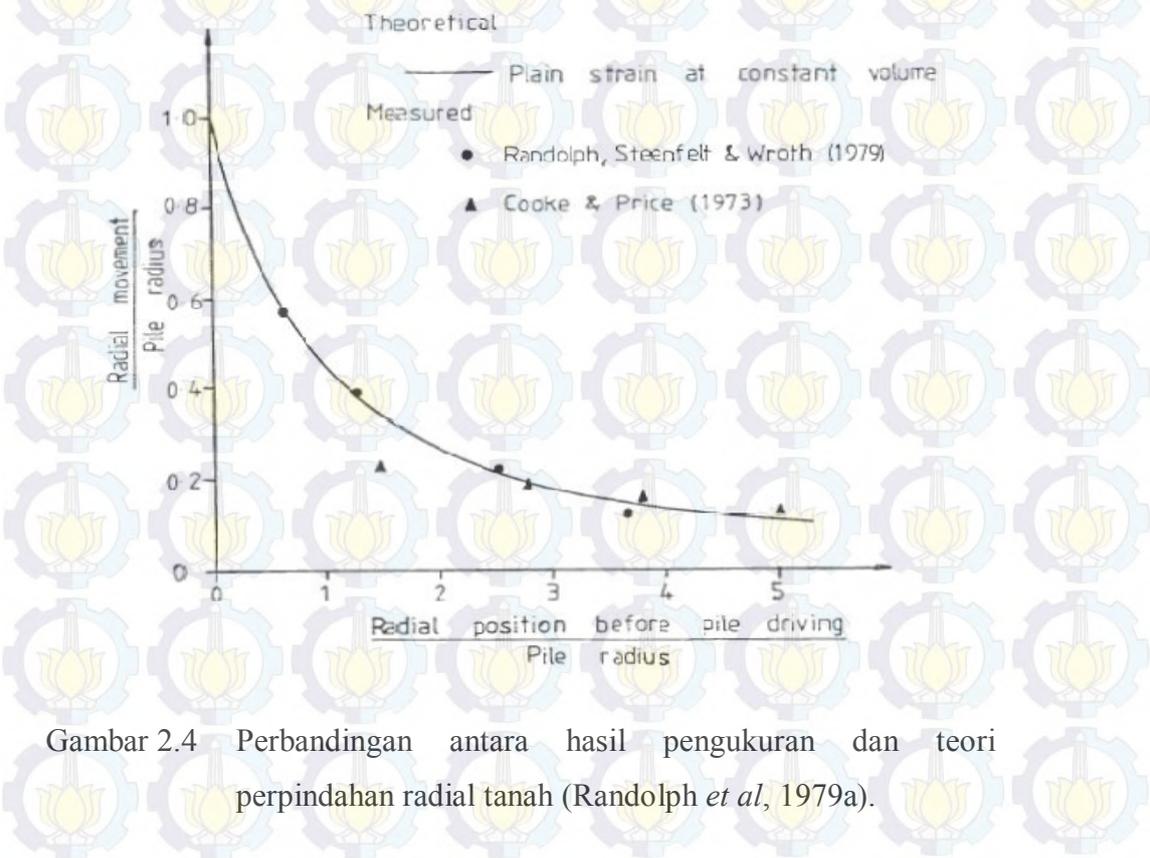
$$\frac{\rho}{r_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2} - \frac{r}{r_0} \quad (2.11)$$

dimana notasi  $\rho$  adalah perpindahan radial,  $r_0$  adalah radius silinder atau jari-jari tiang, dan  $r$  adalah jarak antara titik pusat tiang dengan sebuah partikel tanah yang berada di sekitar tiang. Pada pemancangan tiang sebuah partikel tanah yang berada pada radius inisial  $r$  dari pusat tiang silinder mengalami perpindahan menuju ke radius  $r + \rho$  akibat pengembangan silinder yang mewakili tiang.

Gambar 2.3 menunjukkan perbandingan antara hasil teoritis dan pengukuran perpindahan radial selama pemancangan yang dilakukan oleh Pestana *et al* (2002), dimana data inklinometer diambil segera saat setelah selesai pemancangan pada waktu 16 jam atau kurang dari 1 hari. Data tersebut sesuai dengan prediksi teoritis, adapun adanya perbedaan pada kedalaman 5 m sampai dengan kedalaman 9 m adalah karena kondisi batas, yaitu *preaugering* dan pengisian *casing* serta sedikit penyesuaian pada keselarasan tiang dalam beberapa meter pertama saat pemancangan seperti yang dijelaskan oleh Pestana (2002). Pestana *et al* (2002) juga menjelaskan bahwa teori *Cylindrical Cavity Expansion* (Vesic, 1972) memberikan prediksi yang sangat baik dan menghasilkan nilai rata-rata cukup akurat dalam setiap lapisan tanah.



Gambar 2.3 Perbandingan perpindahan radial tanah antara hasil teori *Cylindrical Cavity Expansion* dan pengukuran lapangan (Pestana *et al*, 2002).



Gambar 2.4 Perbandingan antara hasil pengukuran dan teori perpindahan radial tanah (Randolph *et al*, 1979a).

Randolph *et al* (1979a) menyajikan perbandingan antara hasil pengukuran dan teoritis pergerakan tanah secara radial selama pemancangan yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, dimana pengukuran perpindahan radial tanah dilakukan di dekat tiang yang dimodelkan oleh Randolph *et al* (1979b), bersamaan dengan beberapa pengukuran yang dilakukan oleh Cooke dan Price (1973). Kedua data pengukuran tersebut cukup sesuai dengan prediksi teoritis dengan mengasumsikan “*plane strain*” dan terjadi deformasi secara radial pada volume konstan yang dinyatakan oleh Randolph *et al* (1979b).

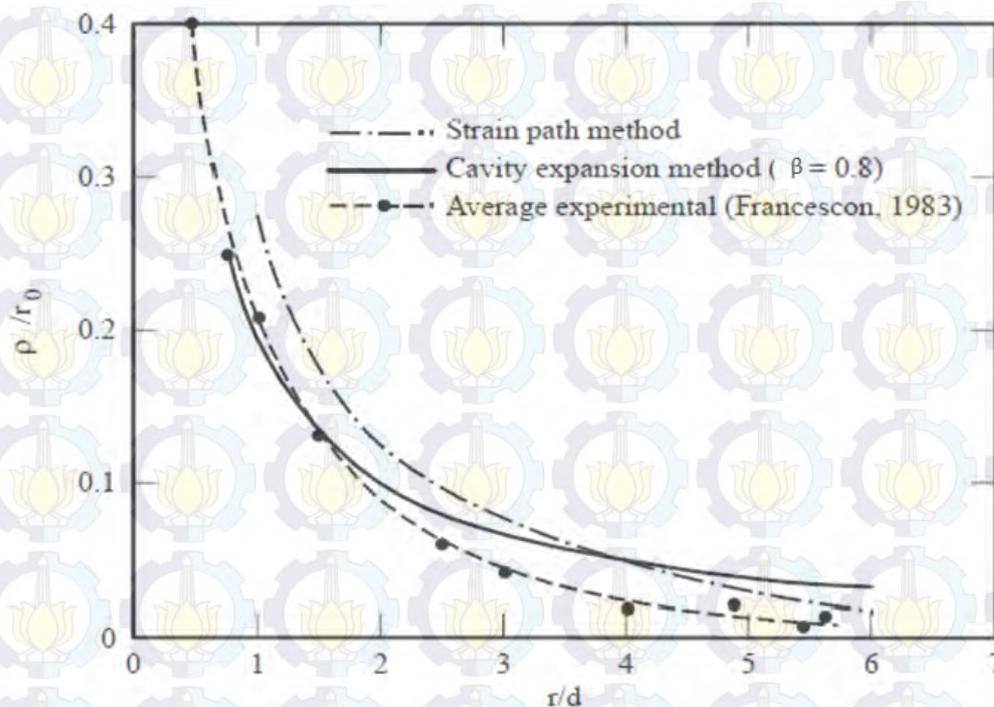
Data dari eksperimen tentang pergerakan tanah yang timbul akibat dari pemancangan tiang dalam model pengujian telah dilakukan oleh Francescon (1983). Pengujian tersebut menunjukkan pengukuran gerakan horisontal di sekitar tiang pada saat pemancangan ke dalam tanah lempung jenuh, sesuai dengan prediksi dari teori *CCE* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$\rho = (r^2 + \beta r_o^2)^{1/2} - r \quad (2.12)$$

Notasi  $\beta$  adalah rasio perpindahan yang merupakan rasio bersih terhadap luas kotor (brutto) pada daerah pemancangan, dimana  $\beta = 1$  untuk tiang ujung tertutup (*closed-ended pile*), Francescon (1983) menemukan bahwa nilai  $\beta = 0,8$  memberikan hasil yang sesuai dengan data model laboratorium pada yang dilakukannya.

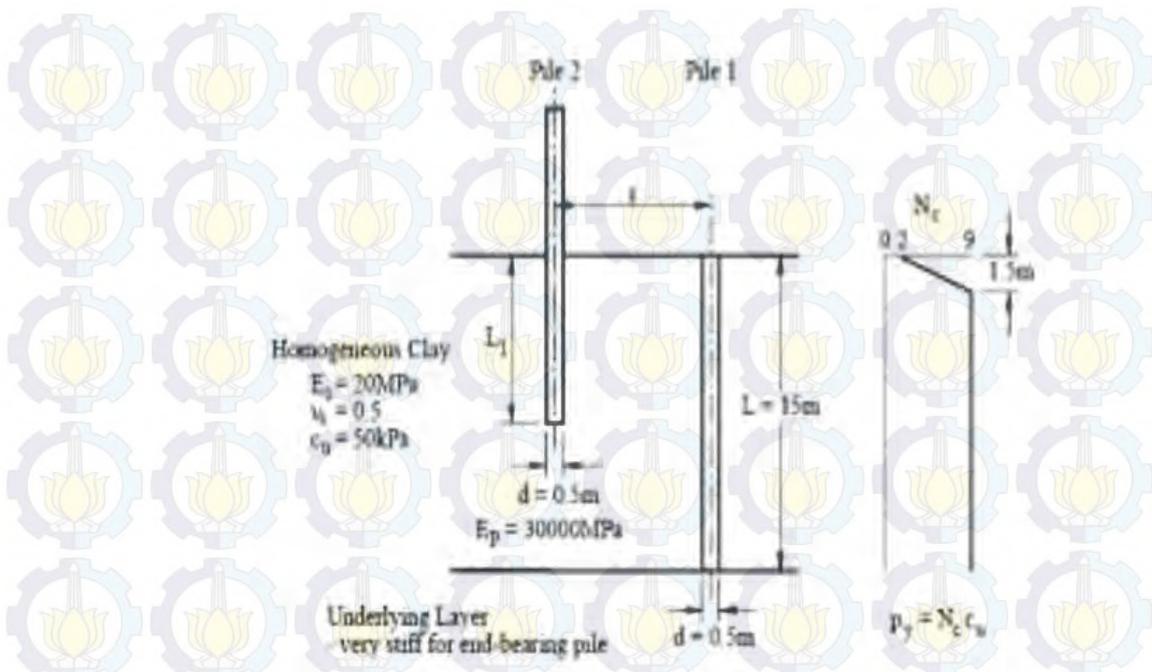
Steenfelt *et al* (1981) mencoba beberapa kajian di laboratorium menggunakan teknik X-Ray, untuk mengukur perpindahan tanah akibat pemancangan tiang. Model tiang dimasukan (*jacked*) ke dalam tanah lempung. Contoh tanah dengan perbedaan rasio overkonsolidasi dibuat dari kaolin. Contoh dibuat bermacam-macam dari tanah yang normal konsolidasi sampai yang over konsolidasi dengan rasio lebih dari 8. Pergerakan radial tanah yang diakibatkan oleh pemancangan ditemukan sampai sekitar 12 radius tiang dari as atau pusat pada model pondasi tiang dan cukup mendekati dengan prediksi teori *Cylindrical Cavity Expansion*. Hasil tersebut juga memberikan tekanan air pori di dalam tanah yang cukup mendekati dengan prediksi teori *Cylindrical Cavity Expansion*.

Poulos (1994) menyajikan grafik perbandingan antara perkiraan perpindahan tanah dalam arah radial dari solusi Metode *Strain Path* dan dari solusi teori *Cylindrical Cavity Expansion* yang diperoleh dari Persamaan 2.6 dengan data rata-rata eksperimental model uji tiang yang dilakukan oleh Francescon (1983) yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.

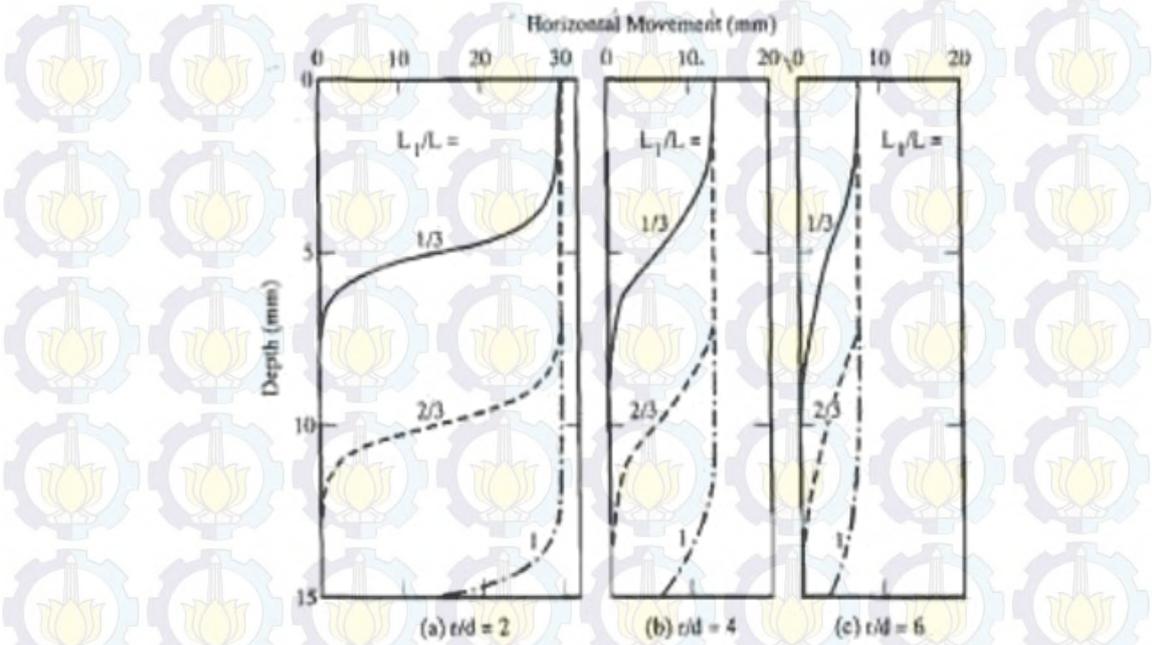


Gambar 2.5 Perpindahan r adial t tanah akibat pemancangan tiang (Poulos, 1994).

Pada Gambar 2.6 memperlihatkan suatu masalah dasar yang harus dipertimbangkan dengan tiang eksisting yang berjarak  $r$  dari sumbu tiang yang baru dipancang. Dua tiang tersebut panjangnya 15 m dengan diameter 0,5 m. Diasumsikan dipancang sedalam 15 meter pada lapisan tanah lempung homogen dengan bagian ujung tiang berdiri pada lapisan lempung yang kaku. Tiang nomer 1 sudah selesai dipancang, sedang tiang nomer 2 sedang dipancang.



Gambar 2.6 Analisa masalah dasar,  $C_u$ : kuat geser *undrained*,  $E$ : Modulus elastisitas dari tiang,  $N_c$  : faktor kapasitas daya dukung lateral,  $p_y$  : batas gaya tekan lateral (Poulos, 1994).



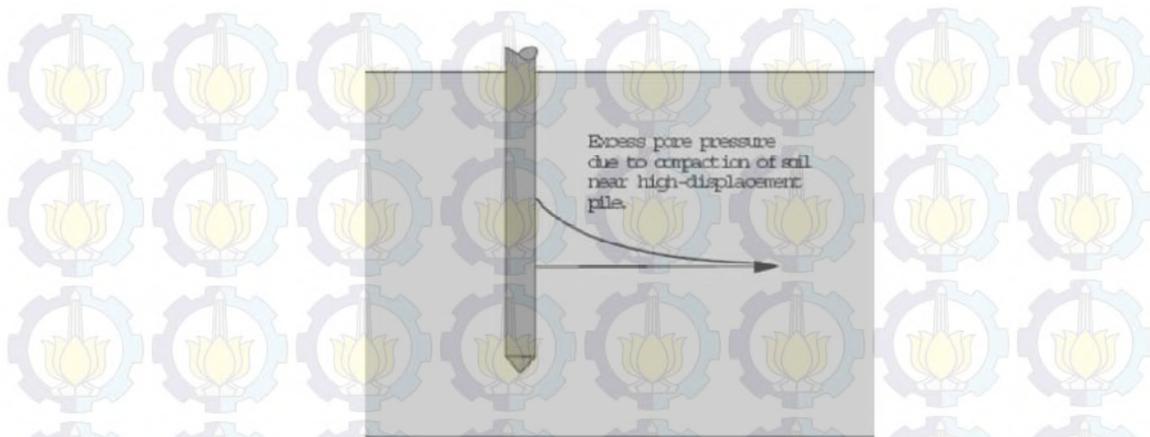
Gambar 2.7 Perhitungan gerakan horisontal tanah akibat pemancangan tiang.  $L = 15$  meter;  $d = 0,5$  meter (Poulos, 1994).

Poulos (1994) menyajikan serangkaian solusi untuk respon tiang pada saat pemancangan untuk satu atau lebih tiang yang berdekatan. Gambar 2.7 menunjukkan perhitungan gerakan horisontal akibat pemancangan nomor 2. Gambar tersebut menjelaskan, sebagai berikut:

- Pergerakan horisontal tanah relatif seragam sampai kedalaman sekitar  $0.8L_1$ , dimana  $L_1$  adalah kedalaman penetrasi tiang pada saat pemancangan.
- Pergerakan tanah dibawah ujung tiang menurun secara cepat sesuai dengan kedalamannya dan,
- Gerakan maksimal (yang diluar) tidak tergantung pada kedalaman penetrasi dan menurun sesuai dengan jaraknya dari tiang

#### 2.2.5 Ekses Tekanan Air Pori yang Timbul Selama Pemancangan

Swan menjelaskan tentang terjadinya distribusi tekanan air pori ekses didekat tiang akibat perpindahan tiang yang besar (Gambar 2.8). Pemancangan dengan perpindahan yang besar akan memberikan tekanan yang kuat pada tanah di sekitarnya dan menyebabkan ekses tekanan air pori. Pada beberapa tanah lempung yang sensitif terjadi tekanan air pori ekses sementara, yang menyebabkan tanah kehilangan sebagian kekuatan geser dalam jangka pendek. Tekanan air pori ekses akan terdisipasi selama kurun waktu beberapa minggu atau beberapa bulan. Karena terjadi disipasi maka tanah di sekitarnya akan terkonsolidasi dan kekuatan tanah akan meningkat. Kekuatan akhir dapat melebihi kekuatan geser *undisturb* awal tanah tersebut. Perilaku ini mencerminkan sifat *thixotropic* dari kebanyakan tanah lempung. Sehingga pada tanah lempung jenuh tiang akan mudah masuk (terdorong) ke dalam tanah, setelah beberapa saat tanah *set up* atau memadat akibat terdisipasinya ekses tekanan air pori.



Gambar 2.8 Terbentuknya distribusi tekanan air pori eksess didekat tiang akibat perpindahan tiang yang besar (Swan)

Randolph *et al* (1979a) menjelaskan bahwa pemodelan pemancangan tiang (*displacement pile*) sebagai *Cylindrical Cavity Expansion* memungkinkan untuk memperkirakan perubahan tegangan total dan tegangan efektif selama pengembangan rongga dan selama konsolidasi di sekitar tiang. Modifikasi model *Cam-Clay* digunakan untuk menginvestigasi bagaimana perilaku tanah selama proses ini terpengaruh oleh histori tegangan sebelumnya di dalam tanah.

Dari pertimbangan mengenai teori *Cylindrical Cavity Expansion* untuk memprediksi perpindahan radial, hal ini memungkinkan untuk menjelaskan bahwa perubahan tegangan di dalam tanah lebih banyak pada sepanjang tiang, dengan mengabaikan area didekat permukaan tanah dan ujung tiang, akan mirip dengan teori *Cylindrical Cavity Expansion*. Sisa tegangan geser pada *interface* antara tiang dan tanah akan diabaikan. Dengan asumsi ini, hal ini dapat ditunjukkan (Randolph dan Wroth, 1979) bahwa pemancangan tiang (*displacement pile*) ke dalam tanah dimodelkan sebagai material elasto-plastis sempurna, sehingga eksess tekanan air pori dapat dilihat pada Persamaan 2.13

$$\Delta u = 2 C_u \ln (r_p / r), \quad r_0 \leq r \leq r_p \quad (2.13)$$

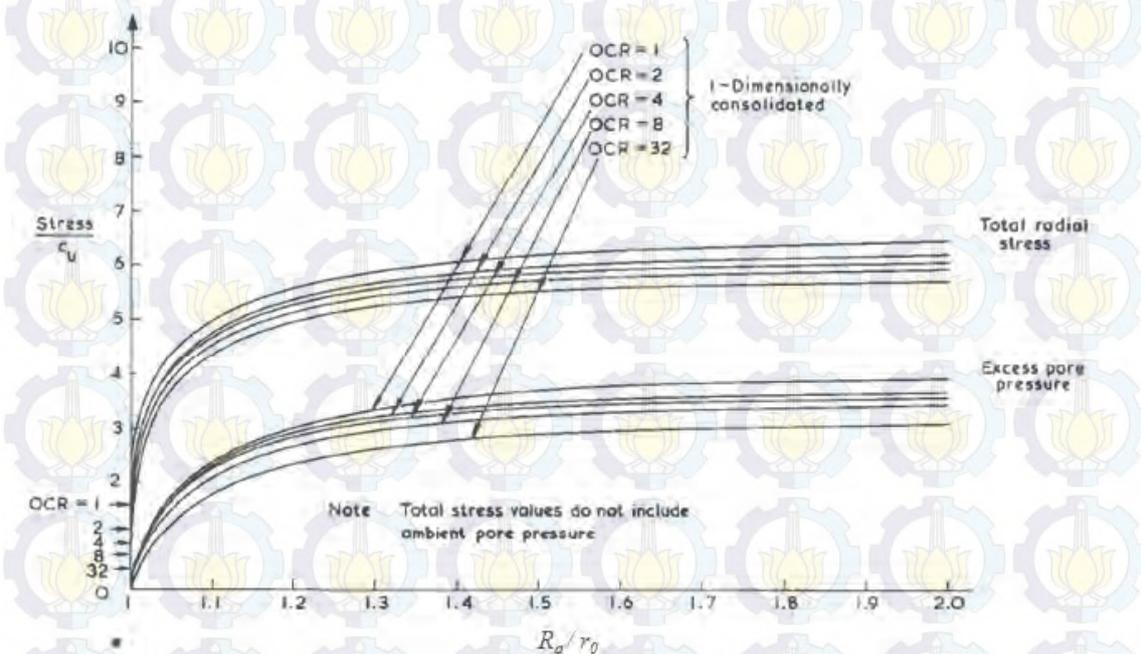
dimana:

$$r_p^2 = \left( \frac{G}{C_u} \right) \cdot r_0^2 \quad (2.14)$$

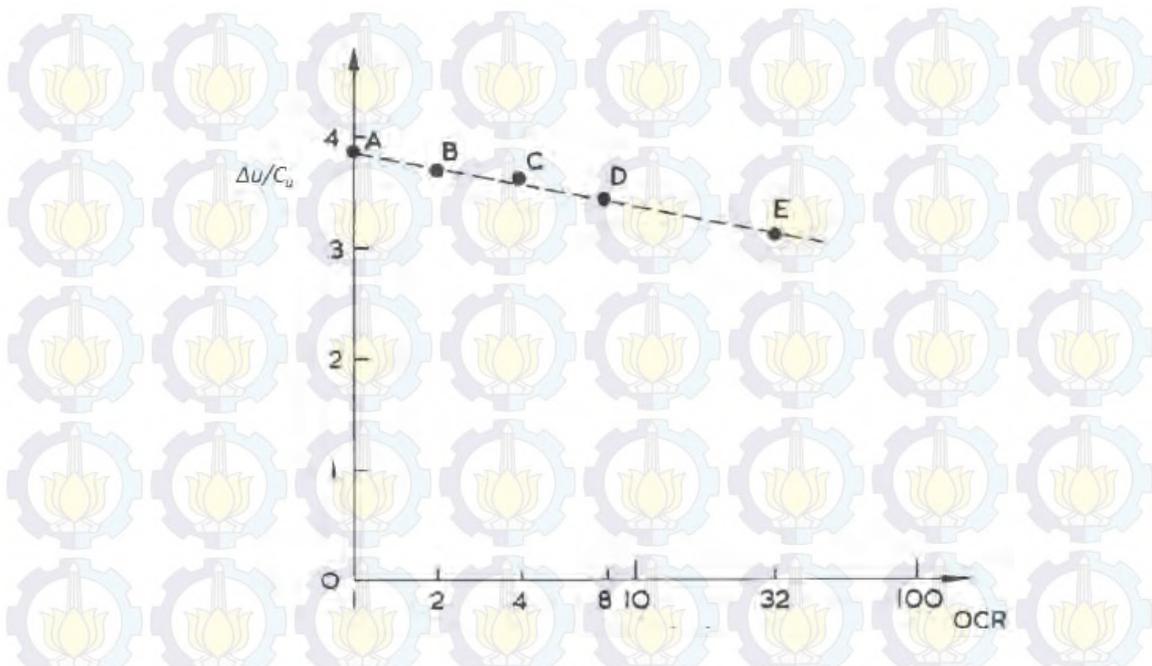
di dalam praktis, eksese tekanan air pori maksimum di selimut tiang adalah

$$\Delta u_{max} = C_u \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{C_u}\right) \quad (2.15)$$

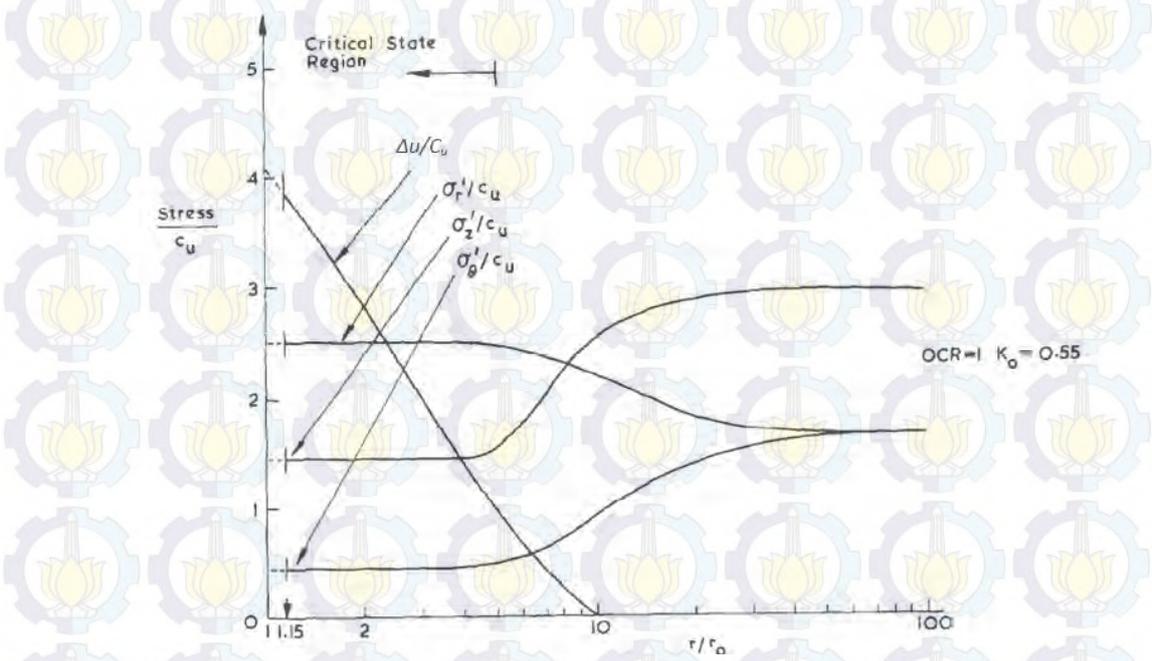
Gambar 2.9 menunjukkan plot pada tegangan radial total  $\sigma_r$  dan eksese tekanan air pori  $\Delta u$  pada rongga silinder (seperti pada radius rongga  $r_0$ ). Di dalam *case*  $\sigma_r$  dan  $\Delta u$  didekati dengan nilai batas oleh perkalian ukuran rongga. Untuk kepentingan praktis sebuah observasi bahwa rasio nilai batas ini untuk kuat geser *undrained* inisial  $C_u$  pada tanah yang sering tidak dipengaruhi oleh satu dimensi histori konsolidasi dibutuhkan untuk mencapai nilai  $C_u$ , yaitu geser *undrained* yang disebabkan oleh pemancangan tiang secara efektif menghilangkan riwayat tegangan pada tanah didekat tiang. Gambar 2.10 menunjukkan eksese tekanan air pori (dinormalisasi oleh  $C_u$ ) didekat tiang selama pemancangan sebagai fungsi OCR. Hanya sedikit penurunan diamati saat nilai OCR besar.



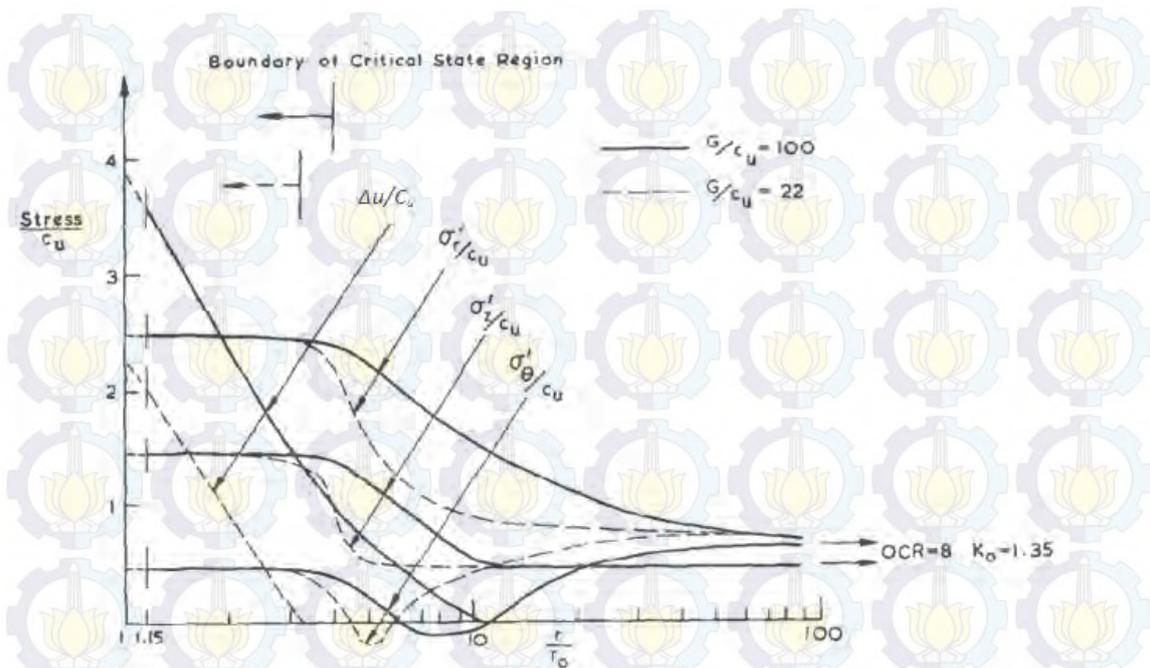
Gambar 2.9 Tegangan radial total dan eksese tekanan air pori didekat tiang ( $r = 1,15 r_0$ ) dari teori *Cylindrical Cavity Expansion* (Randolph et al, 1979a)



Gambar 2.10 Ekses tekanan air pori didekat tiang ( $r = 1,15 r_0$ ) dengan fungsi OCR (Randolph *et al*, 1979a)



Gambar 2.11 Tegangan dan Ekses tekanan air pori di sekitar tiang setelah pemancangan,  $OCR = 1$  (Randolph *et al*, 1979a)



Gambar 2.12 Tegangan dan Ekses tekanan air pori di sekitar tiang setelah pemancangan, OCR = 8 (Randolph *et al*, 1979a)

Randolph *et al* (1979) juga menyajikan plot grafik distribusi tegangan pada akhir perluasan rongga silinder yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 dan 2.12 untuk tanah dengan OCR = 1 dan 8. Ekses tekanan air pori tergantung terhadap nilai kuat geser *undrained*  $C_u$  tanah, untuk nilai OCR = 1 (Gambar 2.11) nilai ekses tekanan air pori paling besar terjadi di muka dinding tiang sekitar  $4,1C_u$  dan turun dengan cepat menuju nol pada jarak sekitar  $10 r_0$ .

Pengaruh modulus geser  $G$  ditunjukkan pada Gambar 2.12 untuk OCR = 8 dimana dua nilai  $G$  yang berbeda digunakan, suatu proposional untuk maksimum sebelumnya dan satu untuk mempresentasikan tegangan efektif utama, nilai rasio untuk  $G$  adalah 100 dan 22. Kuat geser *undrained* dan semua parameter model lainnya adalah sama untuk kedua tanah. Tanah dengan rasio modulus geser elastis  $G/C_u = 100$  meningkatkan ekses tekanan air pori sekitar  $3,8 C_u$  dan turun dengan cepat menuju nol pada jarak sekitar  $11 r_0$ , sedangkan tanah dengan rasio modulus geser elastis  $G/C_u = 22$  meningkatkan ekses tekanan air pori sekitar  $2,3 C_u$  dan turun dengan cepat menuju nol pada jarak sekitar  $2,5 r_0$ , hal ini menunjukkan bahwa untuk  $C_u$  dan OCR sama, saat nilai  $G/C_u$  semakin kecil maka nilai ekses

tekanan air dan radius zona ekses tekanan air pori menjadi semakin kecil. Saat modulus geser  $G$  semakin besar maka tekanan batas  $\sigma_r$  juga semakin besar. Dari Gambar 2.12 ini dapat dilihat bahwa tegangan efektif sama di dalam daerah runtuh pada tanah untuk dua nilai  $G$  yang berbeda. Ini memberikan konsekuensi pada kuat geser undrained menjadi sama pada setiap kasus.

Yu (2004) menjelaskan tentang hubungan antara  $(\Delta u / 0,01\sigma_v')$  dan  $\ln(r/r_m)$  terlihat linier meskipun ada suatu data yang tersebar, dimana  $r_m$  di definisikan sebagai radius efektif yang diperoleh dari equivalen luas yang membungkus persegi pada tiang profil H. Garis regresi lurus di plot dan dapat dijadikan penyelesaian secara matematis dalam Persamaan 2.16. Dimana  $a$  adalah ekses tekanan air pori maksimum dan  $b$  adalah *attention rate* ekses tekanan air pori.

$$\frac{\Delta u}{\sigma_v'} = a + b \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r}\right) \quad (2.16)$$

Upaya untuk menginterpretasikan penetrasi induksi ekses tekanan air pori oleh metode *cavity expansion* telah dibuat di dalam literatur seperti Roy et al (1981) dan Lee et al (2004). Dengan mempertimbangkan sebuah rongga silinder yang mempunyai jari-jari  $r_0$ , induksi inisial ekses tekanan air pori di dalam material ideal elastis dan plastis sempurna diberikan oleh Randolph dan Wroth (1979) dapat dilihat pada persamaan 2.17.

$$\Delta u = C_u \cdot \ln\left(\frac{G}{C_u}\right) + 2 C_u \cdot \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.17)$$

Substitusi antara Persamaan 2.17 dan 2.18 dari Yu (2004) diperoleh persamaan untuk nilai  $a$  dan  $b$  yaitu:

$$a = \frac{C_u}{\sigma_v'} \cdot \ln\left(\frac{G}{C_u}\right) \quad (2.18)$$

$$b = \frac{2 \cdot C_u}{\sigma_v'} \quad (2.19)$$

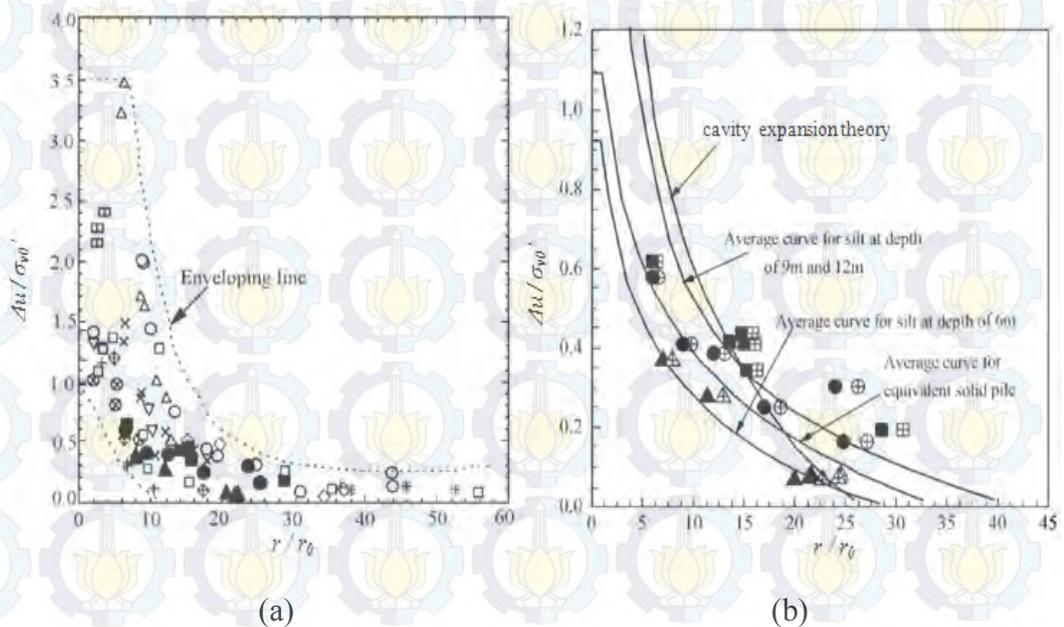
Yu (2004) menunjukkan hasil eksperimen mengenai perilaku *large capacity jacked pile* dengan penampang tiang persegi menggunakan profil H pada tanah *Completely Decomposed Granite (CDG)* yang berada pada kedalaman dibawah lapisan *alluvium*. Permeabilitas *CDG* lebih kecil daripada lapisan di atasnya. Hasil observasi atau pengukuran eksese tekanan air pori maksimum  $a$  dan *attention rate* eksese tekanan air pori  $b$  dibandingkan dengan prediksi berdasarkan teori dari Randolph dan Worth (1979). Tabel 2.2 merupakan tabulasi nilai  $a$  dan  $b$ . Perbandingan pengukuran dan prediksi nilai  $a$  dan  $b$  untuk M2, M3, dan M4 memberikan hasil yang sesuai dengan baik (cocok), namun untuk M5 terdapat perbedaan, dimana M2, M3, M4, M5 adalah piezometer yang terpasang didekat tiang dengan jarak dan kedalaman dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Pengukuran dan Prediksi nilai  $a$  dan  $b$  untuk tanah *CDG*

| Piezometer                         | M2    | M3    | M4    | M5    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Jarak dari as tiang (m)            | 1,75  | 1,37  | 1,37  | 1,37  |
| Kedalaman (m)                      | 20    | 9,5   | 14,5  | 19,5  |
| SPT-N                              | 58    | 24    | 39    | 60    |
| $\sigma_v'$ (kPa)                  | 189,4 | 95,8  | 146,8 | 197,7 |
| $p'$                               | 98,6  | 48,5  | 75,5  | 102,8 |
| $D_r$                              | 0,775 | 0,591 | 0,677 | 0,78  |
| $G$ (MPa)                          | 12,8  | 8,3   | 10,7  | 13,1  |
| $C_u$ (kPa)                        | 27,8  | 14,1  | 21,6  | 29,1  |
| Beban di ujung tiang (kN)          | 987   | 7     | 149   | 464   |
| $\Delta u_{max}$ (kPa)             | 86,3  | 88,8  | 205   | 409,5 |
| $\Delta u_{max} / \sigma_v'$ (kPa) | 0,46  | 0,93  | 1,40  | 2,07  |
| $t_{90}$ (min)                     | 19,2  | 42,8  | 38,7  | 21,5  |
| Pengukuran nilai $a$               | 0,90  | 1,11  | 1,19  | 1,52  |
| Pengukuran nilai $b$               | 0,27  | 0,24  | 0,28  | 0,41  |
| Prediksi nilai $a$                 | 0,90  | 0,94  | 0,91  | 0,90  |
| Prediksi nilai $b$                 | 0,29  | 0,29  | 0,29  | 0,29  |

Sumber : Yu (2004)

Riwayat kasus pemancangan sistem injeksi tiang ujung terbuka dilakukan oleh Jun-wei (2012), dimana studi mengkondisikan program uji lapangan yang komprehensif dilengkapi dengan uji laboratorium untuk mengamati performa pada injeksi tiang pipa ujung terbuka ke dalam lapisan lanau. Ekses tekanan air pori dan tegangan radial total di dalam tanah adalah sensitif terhadap prosedur pemancangan sistem injeksi. Ekses tekanan air pori dapat dimodelkan oleh teori *Cylindrical Cavity Expansion*.



- Note:
- 12m in depth
  - 9m in depth
  - ▲ 6m in depth
  - Reese and seed, soft clay, driven close-ended model pile, 1955
  - Bjerrum and Johannessen, marine clay, driven steel pile, 1960
  - ◇ Soderman and Milligan, varved clay, driven pile, 1961
  - Lo and Stermac, soft/firm silt/clay, driven close-ended/H pile, 1965
  - ⊞ For equivalent soil pile
  - ⊕ For equivalent soil pile
  - ⊠ For equivalent soil pile
  - # D'Appolonia and Lambe, Boston blue clay, driven pile, 1971
  - ▽ Hwang et al., underconsolidated clay, driven pile, 1994
  - × Hwang et al., gray silty sand, driven PC pile, 2001
  - △ Hwang et al., soft clay, driven PC pile, 2001
  - Pestana et al. Young Bay Mud, driven steel pipe pile, 2002
  - ⊕ Tang et al. soft clay, driven steel pipe pile, 2002
  - + Xu et al. soft clay, vibro-driven pile, 2006

Gambar 2.13 Variasi ekses tekanan air pori dengan jarak horisontal (Jun-wei *et.al*, 2012).

Ekses tekanan pori maksimum  $\Delta u$  dapat berkorelasi dengan jarak horisontal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Notasi  $r$  dan  $r_0$

menunjukkan jarak horisontal antara *piezometer* ke pusat tiang dan jari-jari luar tiang.

Sejumlah data dari publikasi ( Reese and Seed, 1955; Bjerrum and Johannessen, 1960 ; Soderman and Milligan, 1961 ; Lo and Stermac, 1965 ; D'Appolonia and Lambe , 1971 ; Hwang et al. , 1994 ; Pestana et al., 2002 ; Tang et al., 2002; Xu et al. , 2006 ) di diberikan oleh Jun-wei (2012) pada Gambar 2.13a. Meskipun penyebaran data besar pada data memungkinkan karena pada tanah dengan karakteristik yang berbeda dan pemancangan, semua titik data dibatasi dalam lingkup zona dan memunculkan pendekatan distribusi logaritma.

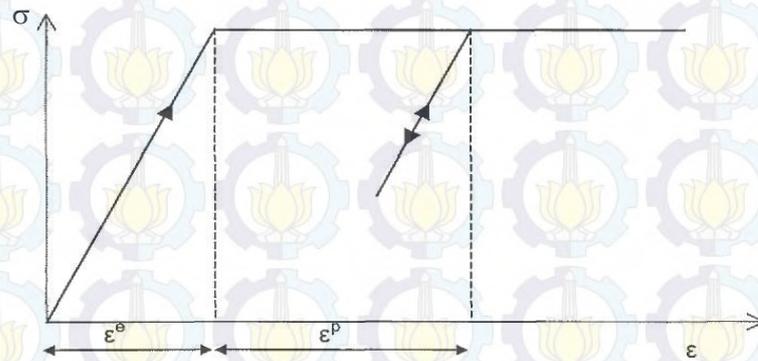
Gambar 13b menunjukkan perbandingan antara hasil uji lapangan eksese tekanan air pori yang dilakukan oleh Jun-wei (2012) dan hasil perhitungan yang berdasarkan pada metode *Cylindrical Cavity Expansion* (Randolph dan Wroth 1979), dimana parameter tanah rasio modulus geser  $G / C_u$  adalah 510. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan metode *Cylindrical Cavity Expansion* tersebut memberikan hasil yang rasional untuk memperoleh eksese tekanan air pori akibat pemancangan tiang ujung tertutup ataupun terbuka dengan dengan sistem injeksi.

### 2.3 Pemodelan Numerik

Analisis elemen hingga (*FE*) merupakan salah satu dari solusi perhitungan numerik. Salah satu program untuk perhitungan numerik adalah PLAXIS yang terdiri dari PLAXIS 2D dan 3D. Pemodelan dengan menggunakan PLAXIS 2D untuk kasus pemancangan tiang (*displacement pile*) telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Pham et al, 2009; Satibi et al , 2007; Brore dan Van, 2006). PLAXIS 3D adalah suatu program perhitungan numerik geoteknik dalam tiga dimensi penuh yang memungkinkan objek untuk dimasukkan dalam model. Lapisan tanah didifinisikan dengan menu *boreholes* dan profil tekanan air pori (Binkgreve et al, 2012).

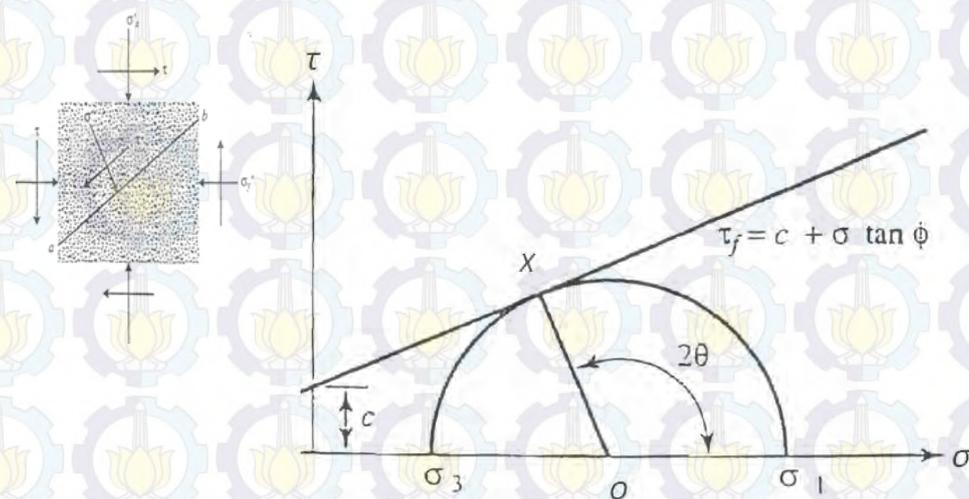
### 2.3.1 Model Elasto – Plastis dengan Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Dalam model elasto - plastis yang ideal perilaku bahan dibagi menjadi dua bagian yaitu elastis dan plastis. Hubungan tegangan ( $\sigma$ ) dan regangan ( $\epsilon$ ) ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Model elasto - plastis (Binkgreve et al, 2012)

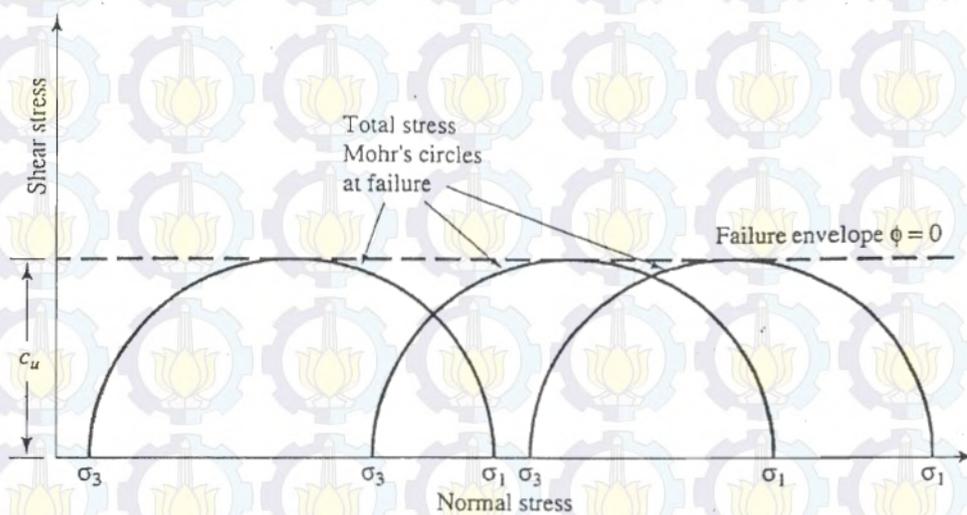
Sebuah metode yang umum digunakan untuk memodelkan tanah adalah dengan menggunakan model elasto - plastis dengan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb. Gambar 2.15 menunjukkan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb yang menggambarkan perbatasan antara perilaku linier elastis dan plastik. Kriteria kegagalan Mohr-Coulomb adalah hubungan antara parameter kekuatan dalam tanah yaitu; kekuatan geser ( $\tau_f$ ), kohesi ( $C$ ), dan sudut geser ( $\phi$ ).



Gambar 2.15 Kriteria keruntuhan dan lingkaran Mohr-Coulombs (Das, 2006)

Ketika perbedaan antara tegangan mayor,  $\sigma_1$ , dan tegangan minor,  $\sigma_3$ , (Gambar 2.15), saat jari-jari meningkat, lingkaran akan meningkat sampai lingkaran menyentuh garis runtuh. Kombinasi tegangan ini akan mengakibatkan keruntuhan geser.

Pada saat tanah dalam kondisi *undrained* dan tidak terkonsolidasi, tegangan air pori akan meningkat saat pemberian tegangan deviator. Tambahan tegangan pada saat mencapai keruntuhan akan selalu sama. Garis keruntuhan untuk tegangan total dari lingkaran Mohr berbentuk horisontal dan disebut garis  $\phi = 0$  dan kuat geser *undrained*  $\tau_f = C_u$  seperti pada Gambar 2.16 (Das, 2006).

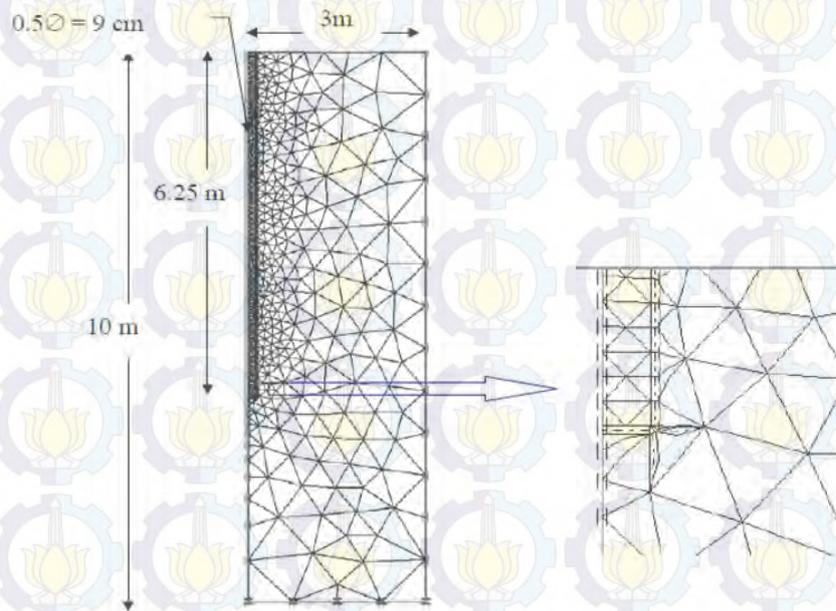


Gambar 2.16 Lingkaran Mohr untuk tegangan total dan garis keruntuhan yang disebut garis  $\phi = 0$  (Das, 2006)

### 2.3.2 Simulasi Numerik dengan Metode *K-Pressure*

Simulasi pemancangan tiang sistem injeksi dapat di dimodelkan dengan metode *K-Pressure*. Suatu asumsi untuk peningkatan tegangan radial akibat pemancangan tiang (*displacement pile*) adalah tegangan radial meningkat sesuai dengan nilai  $K$  yang konstan dikali tegangan vertikal ( $\sigma_{v0}$ ), di mana  $K$  adalah  $\sigma'_r / \sigma_{v0}$ . Tegangan radial meningkat linear sesuai dengan kedalaman mengikuti nilai  $K$  yang konstan setelah pemancangan. Peningkatan tegangan radial karena

pemancangan tiang dapat dibuat dengan menerapkan tekanan horisontal yaitu  $\sigma'_r = K \cdot \sigma_{vo}$ .

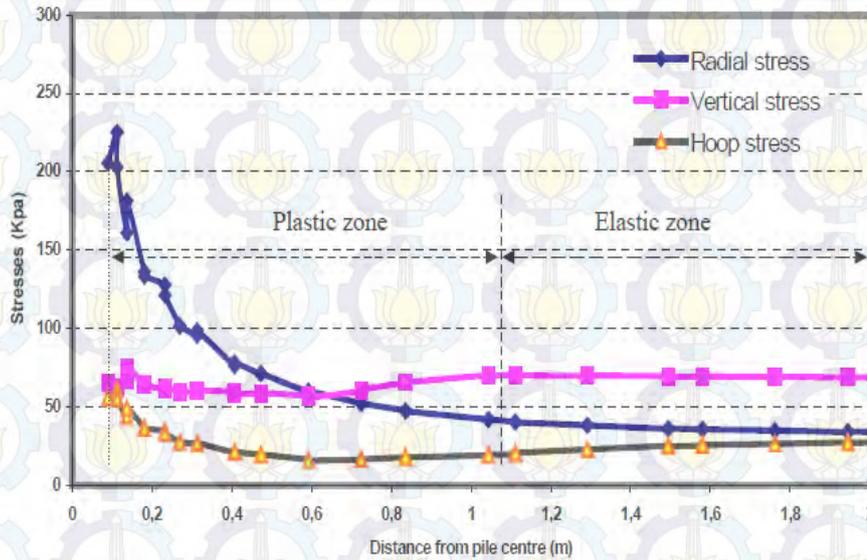


Gambar 2.17 Geometri dan *finite element mesh* (Satibi *et.al*, 2007)

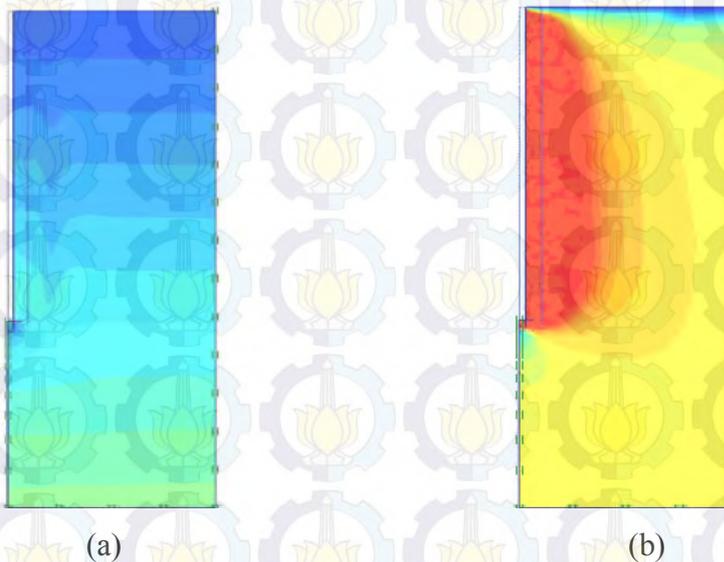
Satibi *et.al* (2007) menjelaskan proses metode *K-Pressure* adalah sebagai berikut: Pertama kondisi awal tanah ditetapkan dengan geometri seperti pada Gambar 2.17. Setelah itu, elemen yang mewakili tiang dihilangkan untuk menciptakan rongga di sepanjang garis tengah dan kemudian tegangan radial diterapkan pada dinding rongga. Tegangan radial ini meningkat sesuai dengan kedalaman sebesar  $\sigma'_r = K \cdot \sigma_{vo}$ . Selain penentuan tegangan radial, di bagian bawah rongga diterapkan tegangan vertikal  $\sigma_v = \gamma_{unsat} L$ , dimana  $L$  adalah panjang tiang tertanam.

Gambar 2.18 menunjukkan tegangan radial dan tegangan vertikal pada zona plastis dan zona elastis di kedalaman 4 m setelah diterapkan *K-Pressure* dengan  $K = 3,5$  menggunakan Model *HS*. Tegangan radial berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dari as tiang, sedangkan tegangan vertikal pada zona plastis mengalami penurunan, namun penurunan ini belum realistis. Pada Gambar 2.19

menunjukkan *shading* tegangan vertical tanah dan tegangan geser dengan model parameter *MC-Correction*.



Gambar 2.18 Tegangan di kedalaman 4m setelah diterapkan *K-Pressure* dengan  $K = 3,5$  menggunakan Model *HS* (Satibi *et.al*, 2007)

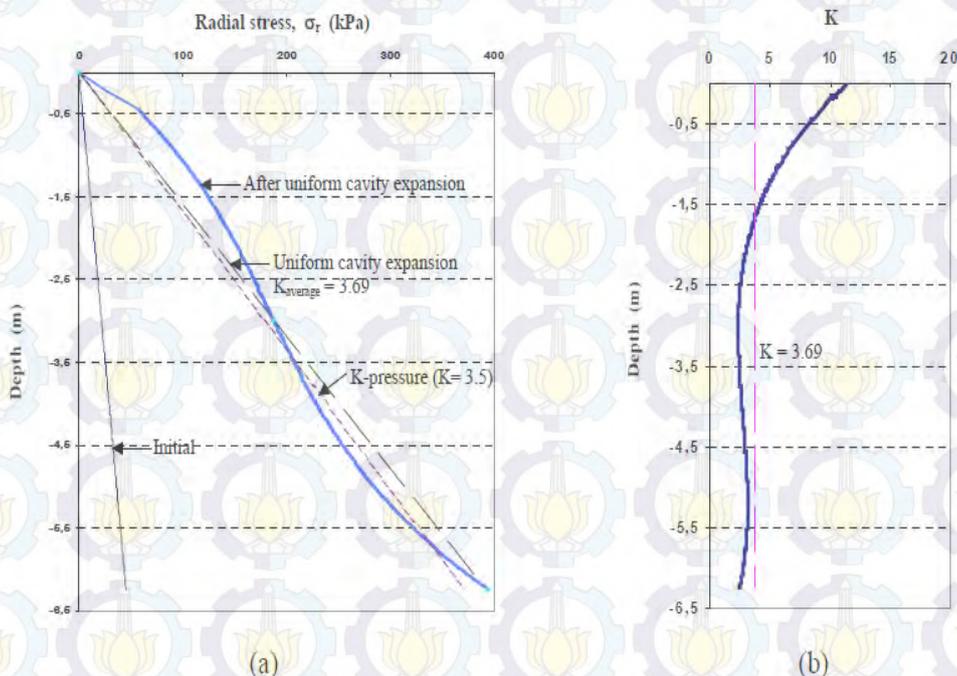


Gambar 2.19 (a) Tegangan vertical tanah, (b) tegangan geser dengan model parameter *MC-Correction* (Satibi *et.al*, 2007).

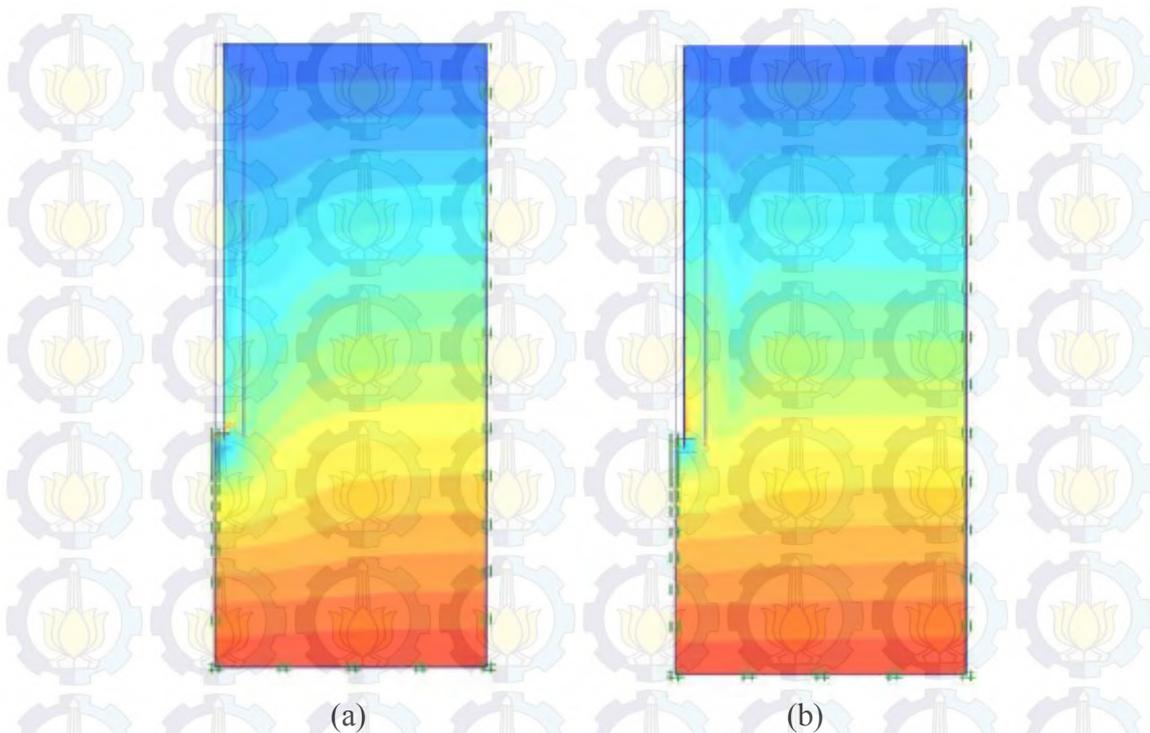
### 2.3.3 Simulasi Numerik Metode *Displacement – Controlled Cavity Expansion*

Satibi *et.al* (2007) menjelaskan proses metode *Displacement – Controlled Cavity Expansion* adalah sebagai berikut: proses dimulai dengan menetapkan kondisi awal. Setelah itu, elemen tiang dihapus untuk menciptakan rongga di sepanjang garis tengah, kemudian menerapkan *priscibe displacement* arah horisontal secara seragam pada dinding rongga. Selain itu, tegangan vertikal ( $\sigma_v = \gamma_{unsat} L$ ) juga diterapkan di bagian bawah rongga, di mana  $L$  adalah panjang tiang tertanam.

Setelah proses *Displacement – Controlled Cavity Expansion* dilakukan, bahan tiang ditempatkan ke dalam rongga. Saat melakukannya, perpindahan horisontal yang ditentukan serta tegangan vertikal di bagian bawah rongga dihapus. Dalam proses ini, model *Hardening soil* diterapkan langsung selama proses pemancangan (*displacement pile*). Hal ini dilakukan karena ini adalah prosedur pemancangan sederhana dan *cavity expansion* yang diberlakukan adalah seragam.



Gambar 2.20 (a) Tegangan radial *interface* dan (b) *K-Values* (Satibi *et.al*, 2007).



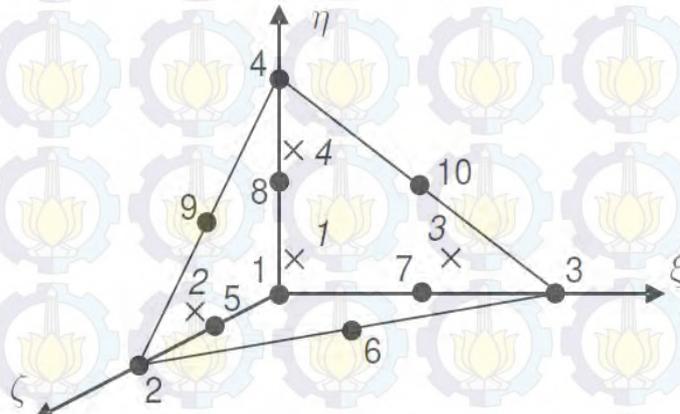
Gambar 2.21 (a) Tegangan vertikal dengan model parameter *HS* menggunakan metode *Displacement-Controlled Cavity Expansion*, (b) Tegangan vertikal dengan model parameter *MC-Correction* menggunakan metode *K-Pressure* (Satibi *et.al*, 2007)

Seperti dapat dilihat pada Gambar 2.20, tegangan radial karena *Displacement – Controlled Cavity Expansion* tidak meningkat secara linear dengan kedalaman seperti pada *K-pressure*, namun memberikan rata-rata yang hampir sama antara keduanya. Tegangan radial sedikit lebih tinggi di bagian atas tiang dan *K-value* sesuai pada setiap kedalaman tidak konstan. Nilai *K* yang sesuai dengan tekanan radial, secara signifikan sedikit lebih tinggi di bagian atas tiang dan penurunan ke nilai yang relatif konstan dengan kedalaman di bagian bawah tiang. Pada Gambar 2.21 a dan b berikut menunjukkan suatu perbandingan antara tegangan vertikal setelah diterapkan *Displacement – Controlled Cavity Expansion* dan *MC-Correction* dalam metode *K-pressure*.

#### 2.3.4 Mesh Generation – Mesh Mode Pada PLAXIS

Untuk melakukan perhitungan elemen hingga, geometri dibagi menjadi elemen dan unsur-unsur yang dihubungkan oleh jaring elemen hingga (Brinkgreve

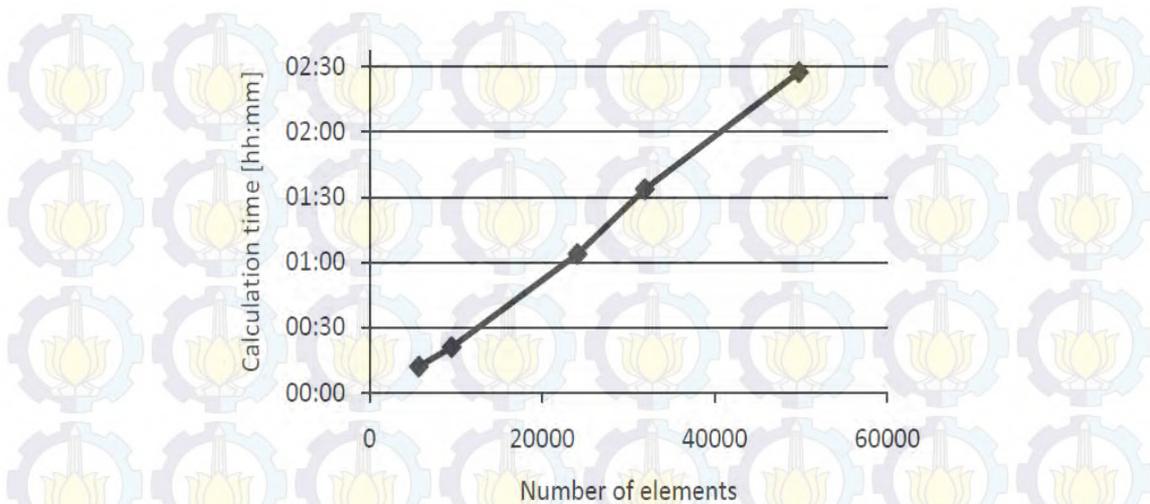
et al, 2007). Pengaturan jaring elemen di dalam PLAXIS 3D 2012 dapat dilakukan dengan pengaturan global dan lokal. Elemen tanah pada elemen hingga 3D terdiri 10 *node tetrahedran* seperti diunjukkan pada Gambar 2.22.



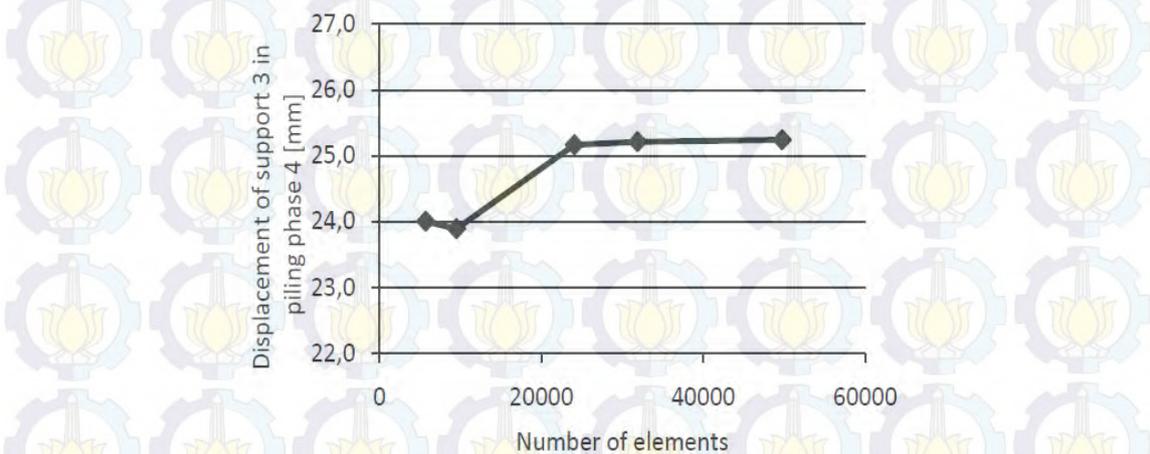
Gambar 2.22 Elemen di dalam PLAXIS 3D 2012 (Brinkgreve et al., 2012) .

Paulina dan Johanna (2011) menjelaskan bahwa kesulitan untuk menemukan jaring elemen yang cukup halus pada PLAXIS 3D Foundation untuk memberikan hasil yang akurat tetapi tidak terlalu halus mengingat bahwa waktu perhitungan menjadi tidak wajar atau model menjadi memerlukan RAM komputer yang terlalu besar.

Paulina dan Johanna (2011) melakukan beberapa kali perhitungan dengan jaring elemen yang semakin diperhalus untuk mendapatkan ukuran jaring elemen yang cocok. Setiap perhitungan diplot terhadap jumlah elemen dalam Gambar 2.23 . Pada Gambar 2.24 menunjukkan hubungan antara perpindahan untuk *support* 3 setelah empat fase pemancangan tiang terhadap jumlah simpul (node). Saat jumlah elemen 20400 menjadi sekitar 50000 elemen, perpindahan yang dihasilkan dalam analisis hampir konstan (Gambar 2.24), dapat diasumsikan bahwa *mesh* dengan 20400 elemen memberikan hasil yang dapat diterima dan tidak perlu disempurnakan lebih lanjut.



Gambar 2.23 Jumlah Elemen di dalam Jaringan Elemen Hingga Selama Perhitungan di dalam PLAXIS 3D Foundation (Paulina dan Johanna, 2011).



Gambar 2.24 Jumlah Elemen Yang Diplot Selama Perpindahan Pada *Support 3* Setelah empat Fase Pemancangan (Paulina dan Johanna, 2011).

## 2.4 Korelasi Parameter Tanah

### 2.4.1 Kuat Geser *Undrained*, $C_u$

*Cone penetration testing (CPT)* telah banyak digunakan selama ini dalam eksplorasi tanah dan kuat geser *undrained* pada tanah lunak ( Zsolt, 2012 ). Kuat geser *undrained* dapat diperoleh dalam persamaan umum seperti pada Persamaan 2.20.

$$C_u = (q_u - \sigma_0) / N_c \quad (2.20)$$

Dimana:

$C_u$  = kuat geser *undrained*

$N_c$  = faktor cone teoritis,

$\sigma_0$  = tegangan utama atau total tegangan horisontal, vertikal.

Persamaan 2.20 telah sedikit dimodifikasi menjadi Persamaan 2.21 dengan menggunakan nilai tahanan ujung yang dikoreksi untuk efek tekanan pori ( $q_t$ ), sebagai penggunaan Uji CPTu yang menjadi lebih umum di seluruh dunia (Zsolt, 2012).

$$C_u = (q_t - \sigma_0) / N_{kt} \quad (2.21)$$

Dimana  $N_{kt}$  adalah faktor cone empiris.

Tabel 2.3. Rekomendasi untuk Faktor Cone  $N_{kt}$

| $N_{kt}$ value range | Reference test  | Comments   | Reference                    |
|----------------------|---|--|------------------------------|
| 8-16                 | triaxial compression, triaxial extension and direct shear | For clays ( $3\% < I_p < 50\%$ ) $N_{kt}$ increases with $I_p$ | Aas et al. (1986)            |
| 11-18                |   | Found no correlation between $N_{kt}$ and $I_p$                | La Rochelle et al. (1988)    |
| 8-29                 | Triaxial compression                                      | $N_{kt}$ varies with OCR                                       | Rad and Lunne (1988)         |
| 10-20                | Triaxial compression                                      |  | Powell and Quarterman (1988) |
| 6-15                 | Triaxial compression                                      | $N_{kt}$ decreases with $B_q$                                  | Karlsrud (1996)              |
| 7-20                 | Triaxial compression                                      | Busan clay, Korea<br>$25\% < I_p < 40\%$                       | Hong et al. (2010)           |
| 4-16                 | Vane shear  | High plasticity, soft clay,<br>$42\% < I_p < 400\%$            | Almeida et al. (2010)        |

Sumber : Zsolt ( 2012 )

Penggunaan tekanan air pori yang mengkoreksi tahanan ujung adalah sangat penting dalam kasus tanah lempung lunak, dimana tekanan pori yang terukur

hampir sebesar tahanan ujung yang terukur, perbedaan antara  $q_c$  dan  $q_t$  ini bisa jadi penting ( Zsolt, 2012 ).

Ada sejumlah besar studi yang tersedia tentang nilai-nilai dari  $N_{kt}$  berdasarkan pengalaman di dalam kondisi geologi berbeda-beda yang dapat dilihat pada Tabel 2.3, dimanana notasi  $I_p$  adalah indek plastis.

Atkinson (1978) menjelaskan bahwa kuat geser *undrained* pada tanah lempung konsolidasi normal (NC) adalah dikarenakan kedalaman dibawah permukaan tanah. Secara praktis, muka air tanah adalah tidak biasanya berada di permukaan tanah, dan ini lebih mudah untuk menjelaskan hasil dinyatakan bahwa rasio  $C_u / \sigma_v'$  pada kuat geser *undrained*  $C_u$  terhadap tegangan vertikal efektif  $\sigma_v'$  adalah konstan untuk suatu partikel lempung, meskipun nilai konstan akan berbeda untuk setiap lempung yang berbeda. Nilai  $C_u / \sigma_v'$  untuk tanah lempung konsolidasi normal (NC) dihubungkan dengan indek plastis (PI) oleh Skempton (1957) sebagai berikut:

$$\frac{C_u}{\sigma_v'} = 0,11 + 0,0037 PI \quad (2.22)$$

#### 2.4.2 Modulus Elastisitas, $E$ dan Modulus Geser, $G$

Di dalam manual PLAXIS bahwa modulus geser  $G$  dapat diperoleh dari hubungan antara modulus elastisitas  $E$  dan angka poisson  $\nu$  yang dapat dilihat pada Persamaan 2.23 dan 2.24.

$$E' = \frac{2(1+\nu')}{3} E_u \quad (2.23)$$

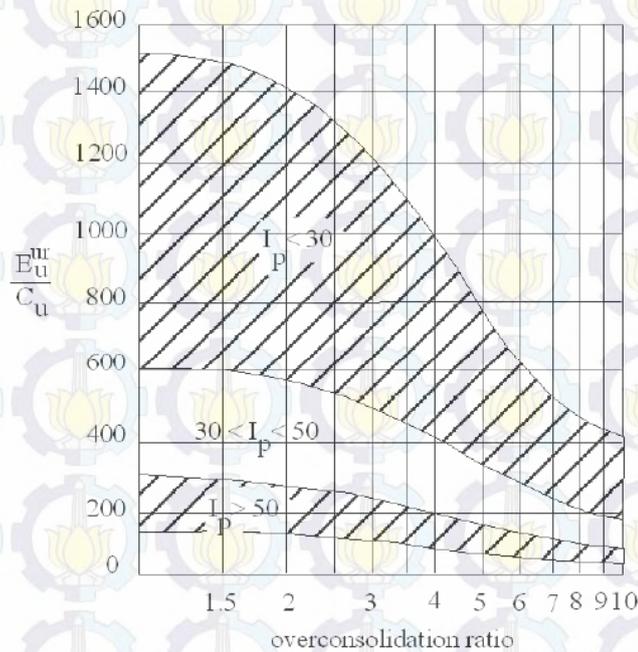
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{E'}{2(1+\nu')} \quad (2.24)$$

dimana modulus elastisitas  $E$  dapat diperoleh dari grafik berdasarkan hasil *loading plate* yang diberikan oleh Duncan & Buchignani (1976) dapat dilihat pada Gambar 2.25. Untuk angka poisson dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.4. Rentang Nilai Modulus Elastisitas

| Soil            | $E_s$ , MPa |
|-----------------|-------------|
| Clay            |             |
| Very soft       | 2-15        |
| Soft            | 5-25        |
| Medium          | 15-50       |
| Hard            | 50-100      |
| Sandy           | 25-250      |
| Glacial till    |             |
| Loose           | 10-150      |
| Dense           | 150-720     |
| Very dense      | 500-1440    |
| Loess           | 15-60       |
| Sand            |             |
| Silty           | 5-20        |
| Loose           | 10-25       |
| Dense           | 50-81       |
| Sand and gravel |             |
| Loose           | 50-150      |
| Dense           | 100-200     |
| Shale           | 150-5000    |
| Silt            | 2-20        |

Sumber : Bowles (1997)



Gambar 2.25 Results from plate loading test after Duncan & Buchignani (1976)

Tabel 2.4 memberikan rentang nilai modulus elastisitas  $E$  yang mungkin diperoleh, namun dapat diperhatikan bahwa rentang nilai  $E$  tersebut terlalu besar. Dengan ini berbagai nilai pembaca tidak harus mencoba untuk menggunakan "rata-rata" nilai-nilai dari tabel ini untuk desain, tapi bisa digunakan sebagai kontrol perkiraan dalam menentukan modulus elastisitas  $E$ .

### 2.4.3 Angka Poisson, $\nu$

Tabel 2.5 dan 2.6 adalah rentang nilai angka poissin untuk berbagai jenis tanah yang disajikan oleh Bowles (1997).

Tabel 2.5a Rentang Nilai untuk Rasio Poisson

| Type of soil                         | $\mu$   |
|--------------------------------------|---|
| Clay, saturated                      | 0.4–0.5                                       |
| Clay, unsaturated                    | 0.1–0.3                                       |
| Sandy clay                           | 0.2–0.3                                       |
| Silt                                 | 0.3–0.35                                      |
| Sand, gravelly sand<br>commonly used | – 0.1–1.00<br>0.3–0.4                         |
| Rock                                 | 0.1–0.4 (depends somewhat on<br>type of rock) |
| Loess                                | 0.1–0.3                                       |
| Ice                                  | 0.36  |
| Concrete                             | 0.15  |
| Steel                                | 0.33  |

Sumber: Bowles (1997)

Tabel 2.5b Rentang Nilai untuk Rasio Poisson

| $\mu$     | Soil type                     |
|-----------|-------------------------------|
| 0.4–0.5   | Most clay soils               |
| 0.45–0.50 | Saturated clay soils          |
| 0.3–0.4   | Cohesionless—medium and dense |
| 0.2–0.35  | Cohesionless—loose to medium  |

Sumber: Bowles (1997)

Pada kondisi *undrained* angka poisson dinyatakan dengan parameter  $\nu_u$ . Perilaku yang sama sekali tidak kompresibel diperoleh dengan menggunakan  $\nu_u = 0,5$ . Di dalam PLAXIS akan muncul peringatan jika angka poisson  $> 0,35$  digunakan pada material dengan perilaku *undrained*. Untuk memperoleh perhitungan yang realistis, modulus bulk dari air harus lebih tinggi dibandingkan modulus bulk dari butiran tanah yaitu agar  $K_w > n K'$ . Dengan demikian modulus bulk dari air secara otomatis akan ditambahkan pada matrik kekakuan dari tanah untuk perilaku material *undrained*. Nilai modulus bulk dapat dicari dengan Persamaan 2.25, kondisi ini dapat tercapai dengan menggunakan  $\nu' \leq 0,35$ .

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3 \cdot (\nu_u - \nu')}{(1 - 2 \cdot \nu_u) \cdot (1 + \nu')} \cdot K' = 300 \cdot \frac{0,495 - \nu'}{1 + \nu'} \cdot K' > 30 \cdot K' \quad (2.25)$$

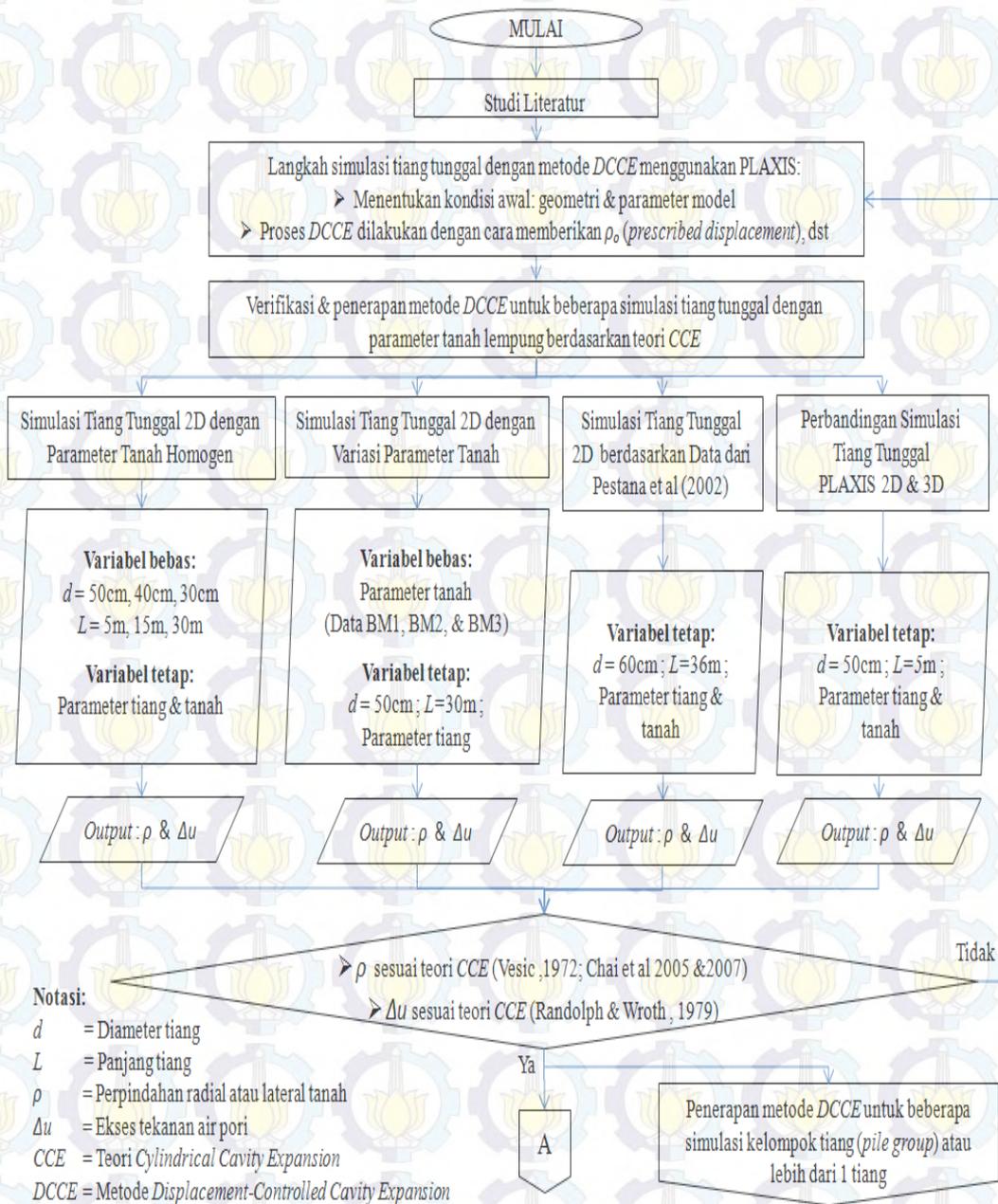


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

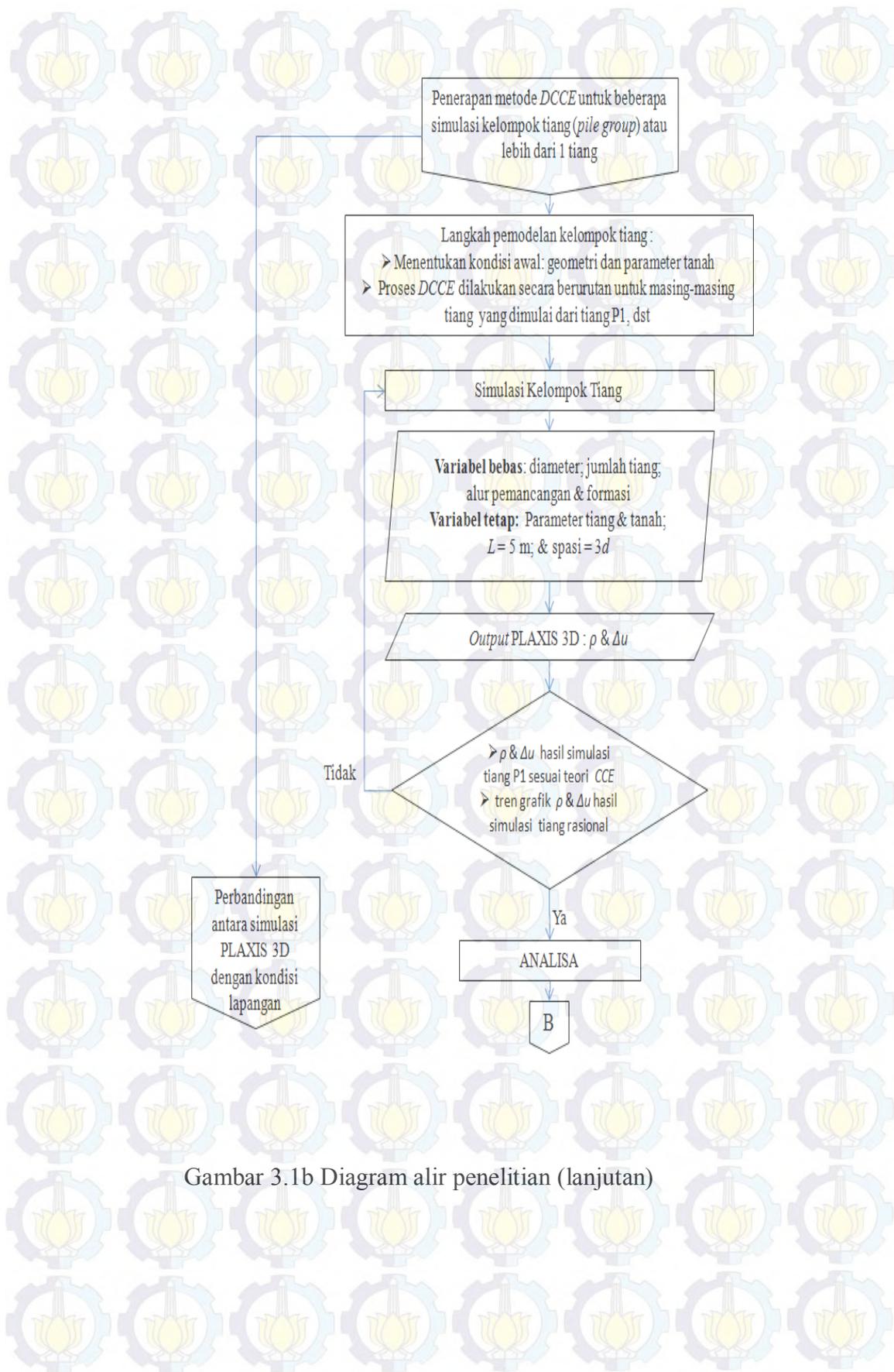
## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

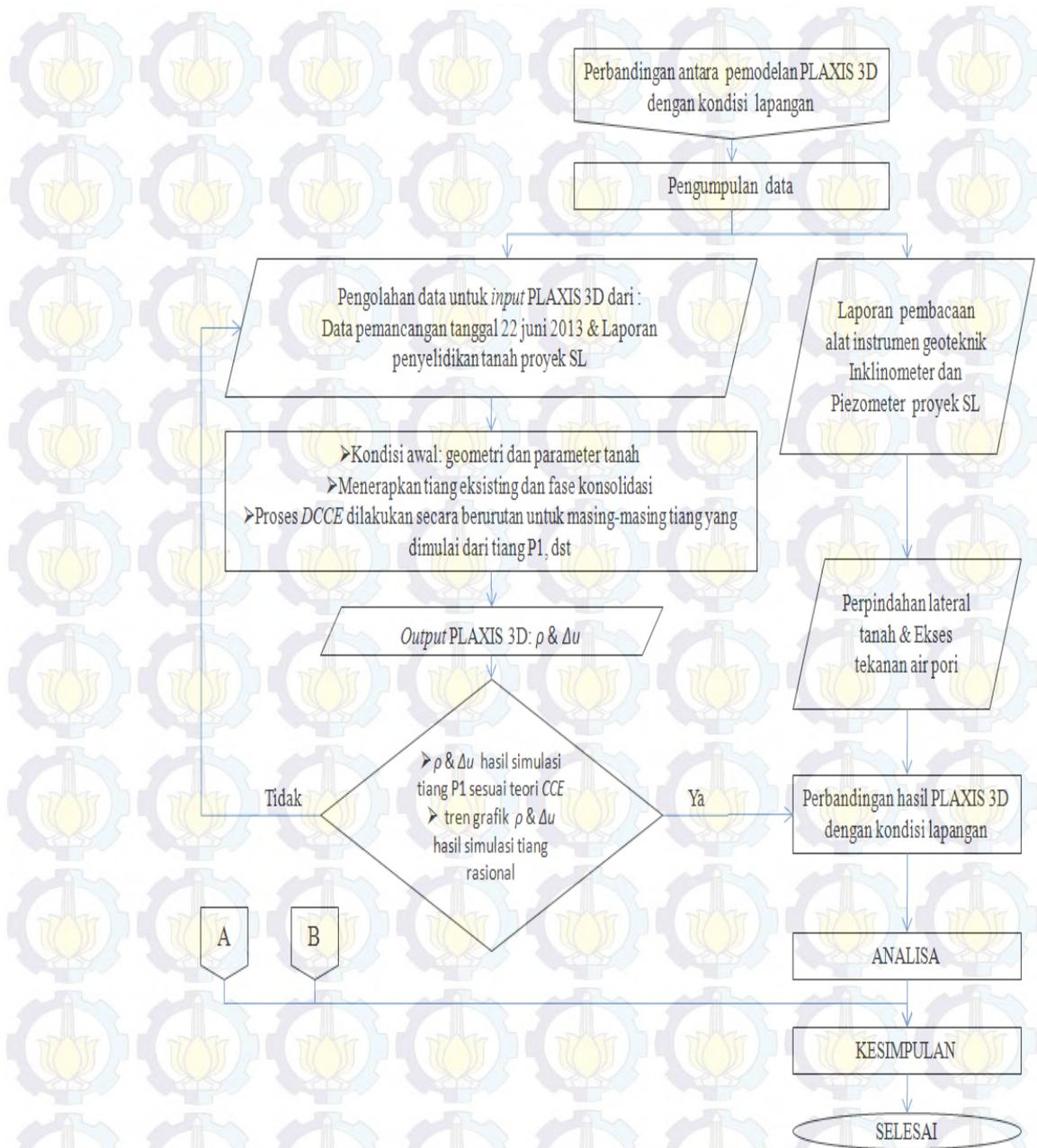
Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1a Diagram alir penelitian



Gambar 3.1b Diagram alir penelitian (lanjutan)



Gambar 3.1c Diagram alir penelitian (lanjutan)

Penelitian ini dilakukan dengan membuat pemodelan numerik pada program PLAXIS 2D dan 3D. Diagram alir penelitian pada Gambar 3.1a bertujuan untuk / sebagai verifikasi metode DCCE yang dilakukan dengan cara menerapkan metode tersebut pada beberapa simulasi tiang tunggal serta untuk mengetahui pengaruh beberapa parameter yang berpengaruh terhadap perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori yang dihasilkan dari simulasi

(PLAXIS) dengan metode *DCCE* tersebut. Gambar 3.1b bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah tiang terhadap perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori. Sedangkan Gambar 3.1c bertujuan untuk memodelkan tiang berdasarkan data lapangan sekaligus membandingkan hasil simulasi PLAXIS dengan kondisi lapangan.

### 3.2 Verifikasi Model

Verifikasi model dalam penelitian ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi numerik tiang tunggal dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *Cylindrical Cavity Expansion (CCE)*. Untuk perpindahan radial tanah hasil simulasi numerik (PLAXIS) dibandingkan dengan persamaan dari Vesic (1972), sedangkan untuk eksese tekanan air pori dibandingkan dengan persamaan dari Randolph dan Wroth (1979), persamaan – persamaan tersebut dapat dilihat pada Bab 2.

### 3.3 Simulasi Numerik Pada PLAXIS

#### 3.3.1 Metode Simulasi

Metode yang digunakan untuk simulasi pemancangan sistem injeksi adalah metode *Displacement-Controlled Cavity Expansion (DCCE)*. Tahapan simulasi dengan metode tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Kondisi awal (*Initial condition*):
  - Geometri
  - Parameter tanah dan bahan
  - Elevasi muka air tanah
- b. Setelah menentukan kondisi awal maka langkah berikutnya adalah membuat rongga (*cavity*) dengan cara menghilangkan bagian elemen yang mewakili elemen tiang
- c. Menerapkan ekspansi rongga (*cavity expansion*) dengan cara menerapkan perpindahan tertentu (*prescribed displacement*) arah horisontal di sepanjang dinding ekspansi rongga

- d. Memberikan tegangan pada dasar tiang sebesar  $\sigma_0 = \gamma \cdot L$ , dengan  $L$  adalah panjang tiang yang tertanam
- e. Menerapkan parameter tiang pada bagian elemen yang mewakili elemen tiang
- f. Tahap perhitungan (*Calculation phase*)

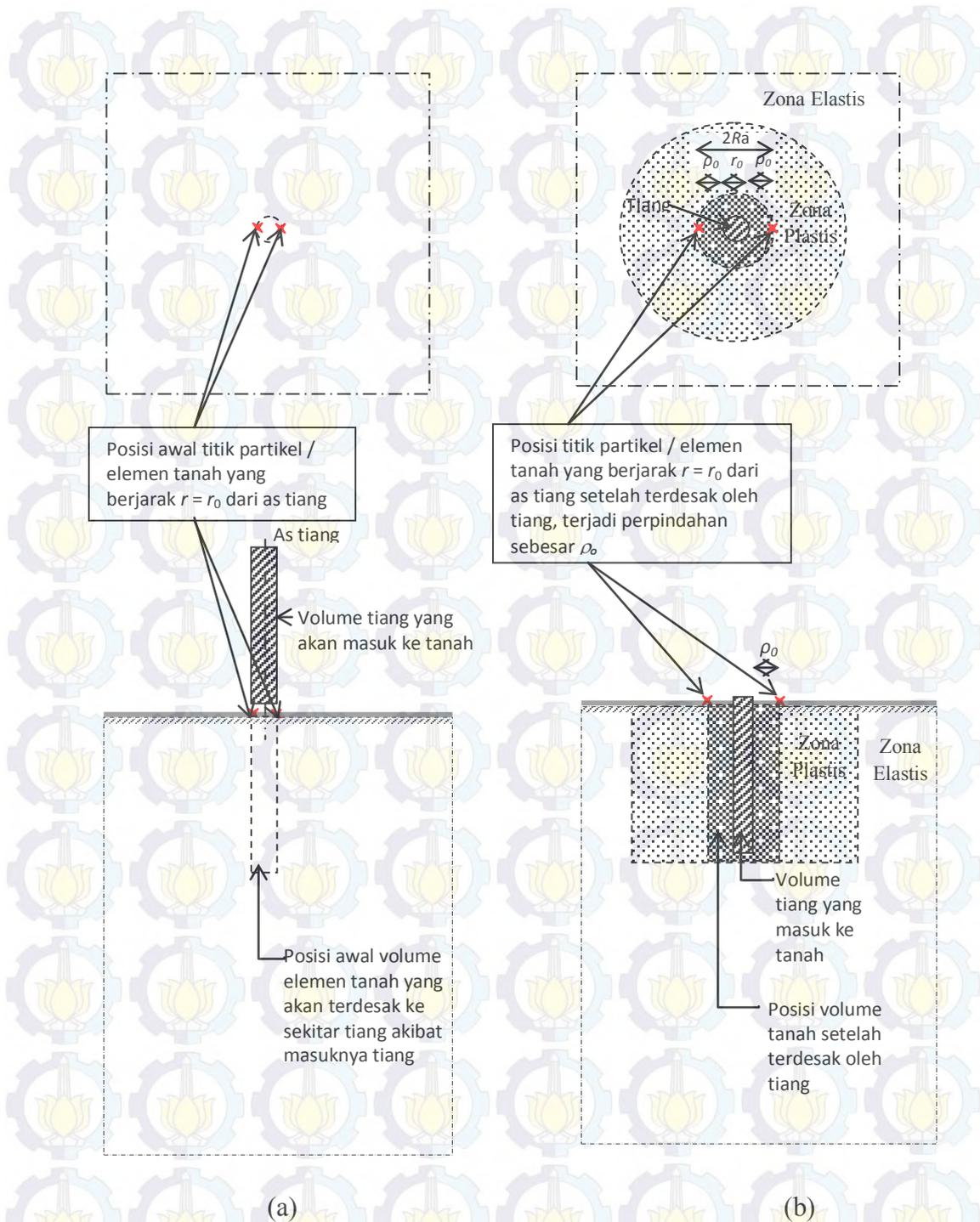
Di dalam PLAXIS 2D, simulasi tiang tunggal dilakukan dengan menggunakan model *axisymmetry*. Di dalam PLAXIS 3D, simulasi tiang dapat dilakukan dengan memodelkan geometri tiang secara penuh atau keseluruhan.

### 3.3.2 Pembentukan Jaring Elemen

Untuk melakukan perhitungan elemen hingga di dalam PLAXIS, geometri dibagi menjadi beberapa elemen yang membentuk jaring elemen. Kesulitan dalam pembentukan jaring elemen di dalam PLAXIS terutama PLAXIS 3D adalah menemukan jaring elemen yang cukup untuk memberikan hasil yang akurat tetapi tidak begitu halus mengingat bahwa pemodelan PLAXIS 3D membutuhkan spesifikasi komputer yang sangat besar dan memerlukan waktu yang sangat lama atau bahkan membutuhkan waktu yang tidak wajar dan model menjadi terlalu besar untuk RAM komputer. Oleh karena itu ketika membuat jaring elemen di PLAXIS, ukuran jaring elemen disesuaikan pada elemen di dekat tiang yang memerlukan ukuran jaring elemen yang cukup halus sehingga mendapatkan hasil yang sesuai.

### 3.3.3 Perpindahan rongga silinder ( $\rho_0$ )

Gambar 3.2 menunjukkan bahwa saat volume tiang masuk ke dalam tanah, ada volume tanah terdesak dan berpindah secara radial ke sekeliling tiang saat tiang masuk ke dalam tanah. Partikel / elemen tanah yang awalnya berada di jarak  $r = r_0$  dari as tiang mengalami ekspansi secara radial (*Cylindrical Cavity Expansion*) dan terjadi perpindahan yang dalam penelitian ini disebut perpindahan rongga silinder ( $\rho_0$ ), dimana  $r_0$  adalah jari-jari tiang atau rongga silinder. Luas *Cylindrical Cavity Expansion* dapat ditentukan dengan fungsi radius *Cylindrical Cavity Expansion* ( $R_a$ ), dimana  $R_a = r_0 + \rho_0$ .

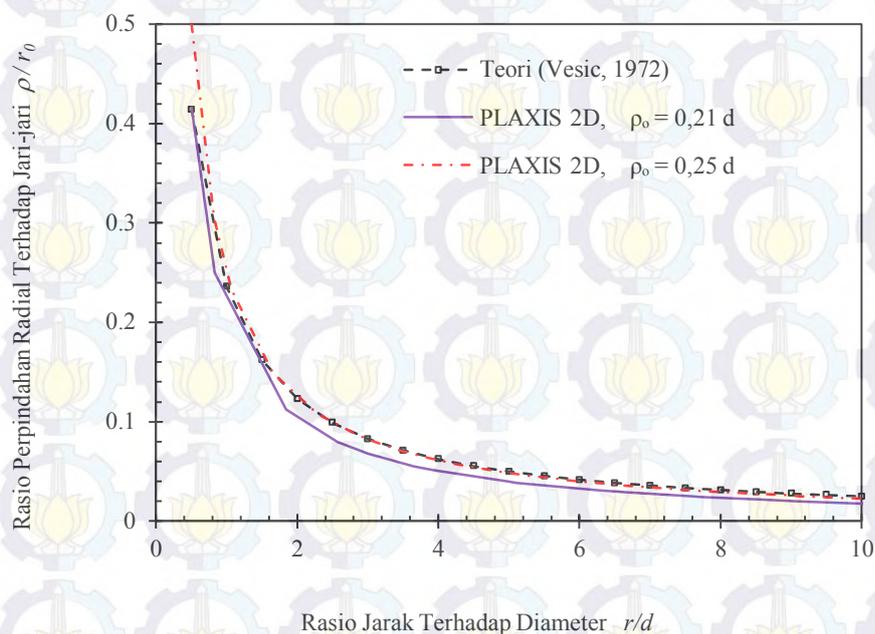


Gambar 3.2 (a) Denah dan potongan sebelum tiang masuk ke dalam tanah; (b) Denah dan potongan setelah tiang masuk ke dalam tanah

Untuk tanah lunak (lempung) dalam kondisi *undrained* dan *incompressible* dengan regangan volume nol, sudut geser nol, dan  $C = C_u$ , luas

*Cylindrical Cavity Expansion* didekati dengan luas sebesar 2 kali luas tiang, dengan demikian perpindahan rongga silinder ( $\rho_0$ ) dapat didekati dengan nilai sebesar  $0,42r_0$  atau  $0,21d$ , nilai ini mewakili nilai volume tanah yang terdesak ke arah radial akibat volume tiang yang masuk ke dalam tanah.

Di dalam metode *Displacement-Controlled Cavity Expansion* menggunakan program PLAXIS, perpindahan rongga silinder  $\rho_0$  dilakukan dengan menerapkan perpindahan tertentu (*prescribed displacement*) di dinding rongga silinder, sehingga jari-jari awal  $r_0$  dan mengalami ekspansi menjadi  $R_a$ .



Gambar 3.3 Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan radial terhadap jari-jari tiang

Perpindahan rongga silinder  $\rho_0$  di sepanjang rongga silinder sebesar  $0,21d$  dalam simulasi PLAXIS memberikan grafik (Gambar 3.3) yang cukup sesuai saat dibandingkan dengan teori CCE dari Vesic (1972), namun ada sedikit perbedaan yang terjadi karena pada kondisi sebenarnya tanah mempunyai area yang tak terhingga sedangkan di dalam PLAXIS dimodelkan dengan batasan area / geometri, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik maka geometri perlu dimodelkan secara luas (lebih dari 100 m untuk 1 tiang diameter 50 cm) namun hal itu akan membuat proses perhitungan membutuhkan RAM yang besar

terutama untuk PLAXIS 3D, sehingga cara lain untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dengan merubah perpindahan rongga silinder  $\rho_0$  sebesar  $0,25d$ .

### 3.4 Parameter Tanah dan Tiang

Material tiang pondasi dimodelkan sebagai linier elastis. Kondisi tanah dalam penelitian ini adalah *undrained-B* ( $\phi = 0$  dan  $c = S_u$ ) dengan menggunakan model Mohr-Coulomb, angka Poisson  $\nu$  pada kondisi *undrained* adalah 0,5 sedangkan Angka Poisson efektif  $\nu'$  adalah 0,35.

#### 3.4.1 Parameter Tiang Pondasi

Parameter tiang pondasi untuk semua simulasi numerik dalam penelitian ini ditentukan seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Tiang

| Parameter                   | Satuan            | Nilai |
|-----------------------------|-------------------|-------|
| Berat Volume ( $\gamma$ )   | kN/m <sup>3</sup> | 24    |
| Angka Poisson ( $\nu$ )     | -                 | 0,2   |
| Modulus Elastisitas ( $E$ ) | MPa               | 23500 |

#### 3.4.2 Parameter Tanah Homogen

Parameter tanah untuk simulasi numerik dengan profil tanah yang seragam (homogen) ditentukan seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Tanah Homogen

| Parameter                    | Satuan            | Nilai |
|------------------------------|-------------------|-------|
| Berat Volume ( $\gamma$ )    | kN/m <sup>3</sup> | 15,66 |
| Angka Poisson ( $\nu'$ )     | -                 | 0,35  |
| Modulus Elastisitas ( $E'$ ) | kPa               | 3300  |
| Kohesi ( $c_u$ )             | kPa               | 11    |

### 3.4.3 Parameter Tanah Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3

Berdasarkan laporan penyelidikan tanah pada proyek SL (Lampiran 1), didapat parameter tanah BM1, BM2, dan BM3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3, 3.4, dan 3.5.

Tabel 3.3 Data Tanah BM1

| Kedalaman | $C_u$<br>kPa | $\phi$<br>( $^\circ$ ) | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | $e$   | $k$<br>10 <sup>-6</sup> cm/s | $LL$<br>(%) | $PL$<br>(%) | Lempung<br>(%) | Lanau<br>(%) |
|-----------|--------------|------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| 2,5       | 10,7         | 0,6                    | 16,13                         | 1,321 | 0,45                         | 80,12       | 31,08       | 76,60          | 23,40        |
| 5         | 12           | 0,5                    | 15,15                         | 1,462 | 0,84                         | 64,85       | 30,58       | 77,60          | 22,40        |
| 10        | 15,6         | 0,9                    | 15,18                         | 1,449 | 9,61                         | 88,78       | 31,05       | 72,60          | 27,40        |
| 15        | 18,6         | 1,7                    | 16,30                         | 1,338 |                              | 119,25      | 34,02       | 77,60          | 22,40        |
| 20        | 73,9         | 3,4                    | 16,42                         | 1,373 |                              | 117,35      | 30,47       | 60,58          | 20,63        |
| 25        | 74,7         | 5,1                    | 16,58                         | 1,130 |                              | 68,00       | 28,32       | 59,07          | 21,19        |

Sumber: Laporan Penyelidikan Tanah Proyek SL

Tabel 3.4 Data Tanah BM2

| Kedalaman | $C_u$<br>kPa | $\phi$<br>( $^\circ$ ) | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | $e$   | $k$<br>10 <sup>-6</sup> cm/s | $LL$<br>(%) | $PL$<br>(%) | Lempung<br>(%) | Lanau<br>(%) |
|-----------|--------------|------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| 2,5       | 10,4         | 1,5                    | 16,82                         | 1,125 | 0,44                         | 68,58       | 34,21       | 62,14          | 21,16        |
| 5         | 4,7          | 0,9                    | 15,21                         | 1,460 | 0,21                         | 98,68       | 41,98       | 73,60          | 26,40        |
| 10        | 11,5         | 0,7                    | 15,53                         | 1,405 | 6,26                         | 95,00       | 35,83       | 78,60          | 21,40        |
| 15        | 17,9         | 1,2                    | 15,16                         | 1,467 |                              | 107,45      | 36,14       | 79,60          | 20,40        |
| 20        | 59,7         | 2,6                    | 16,82                         | 1,208 |                              | 68,71       | 34,34       | 76,60          | 23,40        |
| 25        | 79           | 3,9                    | 16,80                         | 1,105 |                              | 65,55       | 27,64       | 77,60          | 22,40        |

Sumber: Laporan Penyelidikan Tanah Proyek SL

Tabel 3.5 Data Tanah BM3

| Kedalaman | $C_u$<br>kPa | $\phi$<br>( $^\circ$ ) | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | $e$   | $k$<br>10 <sup>-6</sup> cm/s | $LL$<br>(%) | $PL$<br>(%) | Lempung<br>(%) | Lanau<br>(%) |
|-----------|--------------|------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| 2,5       | 11           | 0,8                    | 15,66                         | 1,429 | 0,28                         | 82,00       | 33,02       | 25,40          | 74,60        |
| 5         | 9            | 0,3                    | 15,20                         | 1,400 | 1,73                         | 63,00       | 32,64       | 24,40          | 75,60        |
| 10        | 13,6         | 1,6                    | 16,02                         | 1,379 | 0,21                         | 95,15       | 35,83       | 23,40          | 76,60        |
| 15        | 15,5         | 1,8                    | 15,12                         | 1,461 |                              | 111,00      | 36,17       | 22,40          | 77,70        |
| 20        | 94,8         | 4,8                    | 16,37                         | 1,35  |                              | 103,55      | 30,87       | 21,40          | 78,60        |
| 25        |              |                        |                               |       |                              | 64,35       | 33,68       | 79,60          | 20,40        |

Sumber: Laporan Penyelidikan Tanah Proyek SL

Data tanah tersebut digunakan sebagai variasi parameter tanah pada simulasi numerik yang akan dijelaskan pada Sub-Bab selanjutnya (Sub-Bab 3.5.2). Dari data tanah tersebut didapat parameter-parameter sebagai data *input* di dalam PLAXIS, sedangkan parameter yang belum ada ditentukan berdasarkan

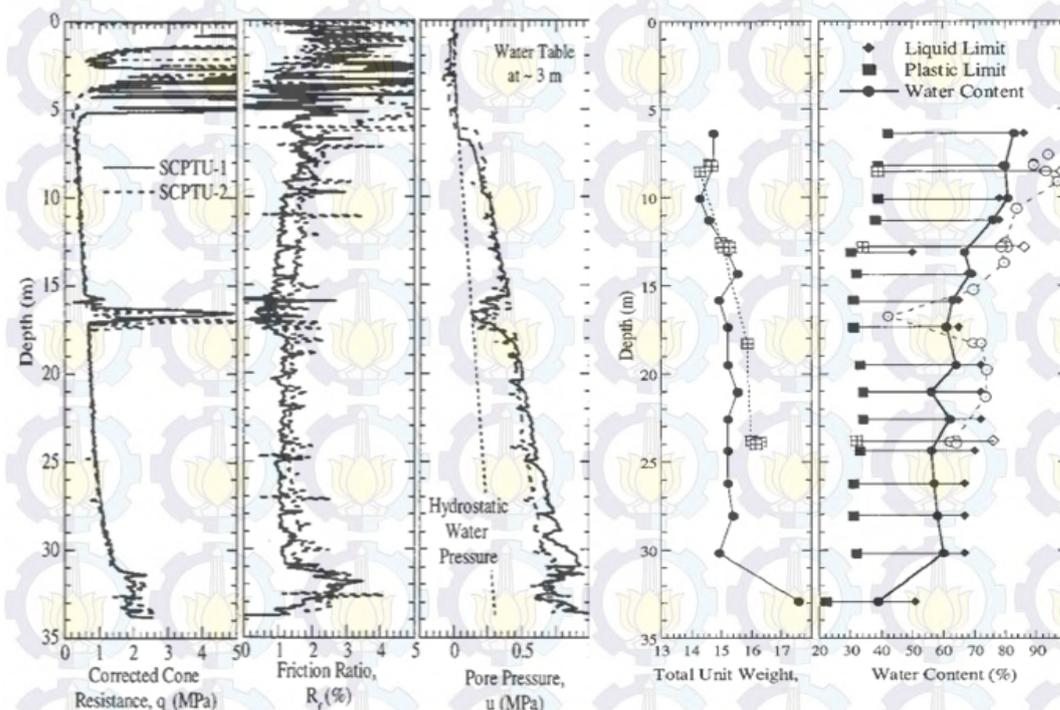
korelasi. Nilai modulus elastisitas (Tabel 3.6) ditentukan berdasarkan grafik yang diberikan oleh Duncan dan Buchignani (1976), yaitu pada tanah lempung dengan rasio konsolidasi  $OCR$  1 s/d 1,5 dan  $30\% < PI < 50\%$  nilai modulus elastisitas  $E$  dapat diambil sebesar  $300C_u$  s/d  $600C_u$ .

Tabel 3.6 Modulus Elastisitas Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3

| Kedalaman | Data Tanah BM1 |             |            | Data Tanah BM2 |             |            | Data Tanah BM3 |             |            |
|-----------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|----------------|-------------|------------|
|           | $E_u/C_u$      | $E_u$ (kPa) | $E'$ (kPa) | $E_u/C_u$      | $E_u$ (kPa) | $E'$ (kPa) | $E_u/C_u$      | $E_u$ (kPa) | $E'$ (kPa) |
| 2,5       | 314            | 3364        | 3027       | 534            | 5558        | 5002       | 315            | 3468        | 3121       |
| 5         | 536            | 6431        | 5788       | 265            | 1243        | 1119       | 595            | 5351        | 4816       |
| 10        | 260            | 4053        | 3648       | 254            | 2915        | 2623       | 253            | 3454        | 3108       |
| 15        | 176            | 3273        | 2946       | 210            | 3765        | 3388       | 200            | 3107        | 2796       |
| 20        | 173            | 12759       | 11483      | 536            | 32023       | 28820      | 206            | 19565       | 17608      |
| 25        | 455            | 33974       | 30576      | 481            | 38027       | 34223      | 590            | 55927       | 50334      |

### 3.4.4 Parameter Tanah Berdasarkan Data Penelitian Pestana *et al* (2002)

Data tanah dari penelitian sebelumnya mengenai pengukuran perpindahan radial dan tekanan air pori akibat pemancangan tiang tunggal secara experimental di lapangan yang dilakukan Pestana *et al* (2002) dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Summary of cone penetration testing and Summary of index tests results (Pestana *et al*, 2002)

Dari data tanah tersebut diperoleh parameter tanah sebagai data *input* ke dalam PLAXIS. Parameter yang belum ada ditentukan berdasarkan korelasi. Nilai kuat geser  $C_u = (q_t - \sigma_{v0})/N_{kt}$ , dimana  $q_t$  adalah tahanan konus terkoreksi dan  $N_{kt}$  adalah faktor konus sebesar 8 - 16 untuk tanah lempung dengan  $PI = 3\%$  s/d  $50\%$  (Aas et al, 1986) seperti yang dijelaskan pada Sub-Bab 2.4 pada Tabel 2.3. Nilai modulus elastisitas (Tabel 3.6) ditentukan berdasarkan grafik yang diberikan oleh Duncan dan Buchignani (1976).

Dari korelasi tersebut didapat parameter tanah seperti pada Tabel 3.7. Parameter tersebut digunakan sebagai data *input* untuk simulasi numerik yang akan dijelaskan pada Sub-Bab selanjutnya (Sub-Bab 3.5.3) sebagai perbandingan antara hasil PLAXIS dengan hasil yang diperoleh dari penelitian sebelumnya mengenai pengukuran perpindahan radial dan tekanan air pori akibat pemancangan tiang tunggal yang dilakukan oleh Pestana *et al* (2002).

Tabel 3.7 Korelasi data tanah dari Pestana *et al* (2002)

| Kedalaman<br>(m) | Data Pestana <i>et al</i> (2002) |                                  |             | Parameter Korelasi |                |               |
|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|--------------------|----------------|---------------|
|                  | $q_t$<br>(MPa)                   | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $PI$<br>(%) | $N_{kt}$           | $C_u$<br>(kPa) | $E'$<br>(kPa) |
| 6                | 0,31                             | 14,70                            | 41,96       | 14,62              | 15,10          | 6090          |
| 8                | 0,35                             | 15,00                            | 37,75       | 14,62              | 16,71          | 7638          |
| 10               | 0,41                             | 14,25                            | 36,73       | 13,91              | 19,42          | 9126          |
| 11,25            | 0,44                             | 14,60                            | 37,63       | 13,73              | 19,77          | 9068          |
| 13               | 0,50                             | 15,40                            | 34,92       | 13,89              | 23,10          | 11389         |
| 14,25            | 0,53                             | 15,60                            | 34,57       | 13,43              | 24,30          | 12091         |
| 15,75            | 0,62                             | 14,90                            | 30,35       | 13,37              | 30,81          | 16986         |
| 17,25            | 0,68                             | 15,20                            | 31,24       | 12,65              | 33,30          | 17983         |
| 19               | 0,74                             | 15,20                            | 36,13       | 12,80              | 33,57          | 16037         |
| 21               | 0,79                             | 15,50                            | 35,83       | 13,63              | 35,07          | 16888         |
| 22,5             | 0,84                             | 15,50                            | 36,45       | 13,58              | 36,54          | 17304         |
| 24,25            | 0,92                             | 15,25                            | 36,63       | 13,69              | 40,67          | 19167         |
| 26,25            | 0,99                             | 15,20                            | 33,33       | 13,72              | 45,03          | 23120         |
| 28               | 1,10                             | 15,20                            | 32,88       | 13,15              | 51,97          | 26977         |
| 30               | 1,31                             | 15,50                            | 31,89       | 13,08              | 66,56          | 35393         |

### 3.5 Pemodelan Tiang Tunggal

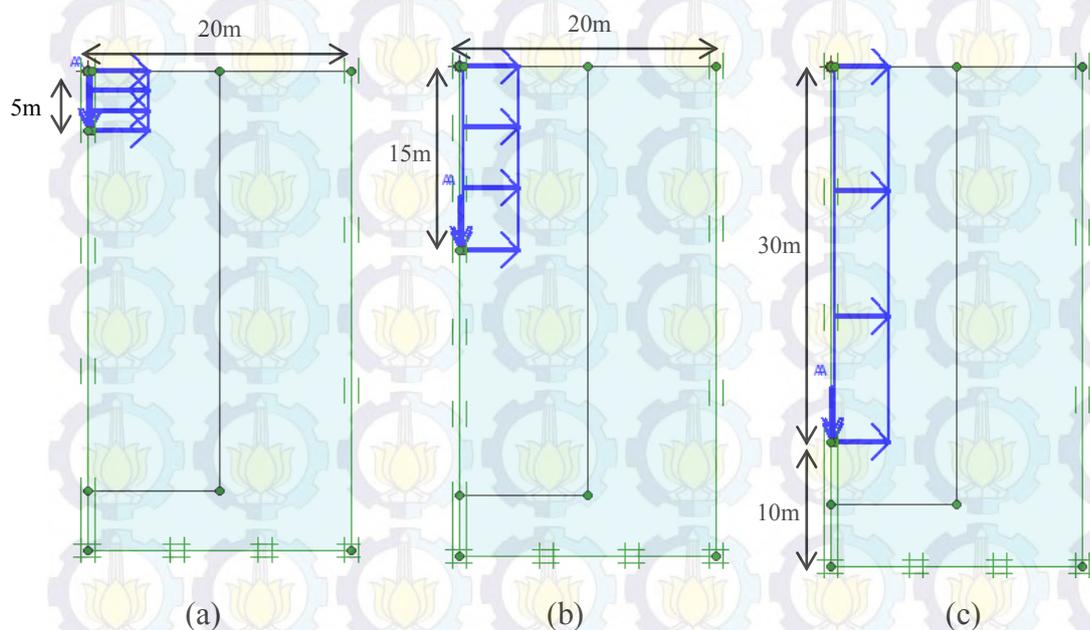
#### 3.5.1 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D Pada Tanah Homogen

Simulasi ini dilakukan dengan 9 tipe simulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.8. Simulasi 2D-1 sampai dengan simulasi 2D-9 adalah simulasi

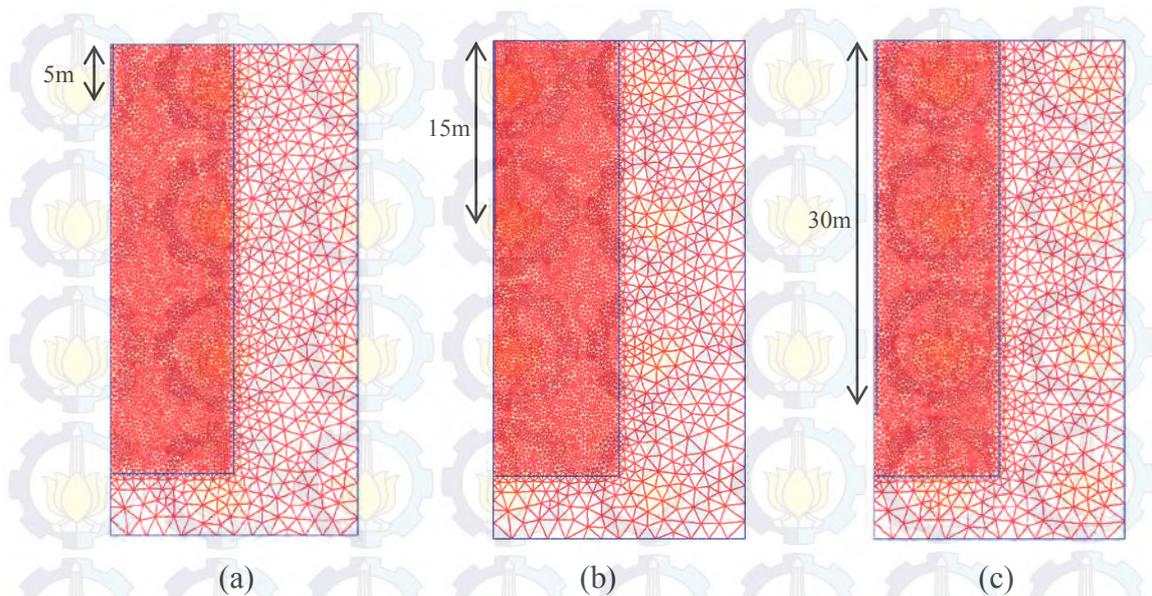
tiang tunggal dengan parameter tanah homogen seperti pada Tabel 3.1 yang dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.2. Variasi diameter tiang adalah 50cm, 40cm, dan 30cm, sedangkan variasi panjang tiang adalah 5 m, 15 m, dan 30 m, sehingga pengaruh dari diameter dan panjang tiang terhadap perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori bisa didapatkan dari simulasi ini. Geometri simulasi ini dimodelkan dengan menggunakan PLAXIS 2D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5a dengan profil tanah adalah seragam. Jaring elemen pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar. 3.5b.

Tabel 3.8 Simulasi Tiang Tunggal 2D Pada Tanah Homogen

| No | Tipe Simulasi | Diameter Tiang (cm) | Panjang Tiang (m) |
|----|---------------|---------------------|-------------------|
| 1  | Simulasi 2D-1 | 30                  | 5                 |
| 2  | Simulasi 2D-2 | 30                  | 15                |
| 3  | Simulasi 2D-3 | 30                  | 30                |
| 4  | Simulasi 2D-4 | 40                  | 5                 |
| 5  | Simulasi 2D-5 | 40                  | 15                |
| 6  | Simulasi 2D-6 | 40                  | 30                |
| 7  | Simulasi 2D-7 | 50                  | 5                 |
| 8  | Simulasi 2D-8 | 50                  | 15                |
| 9  | Simulasi 2D-9 | 50                  | 30                |



Gambar 3.5a Geometri simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen: (a)  $L = 5$  m, (b)  $L = 15$  m, dan (c)  $L = 30$  m



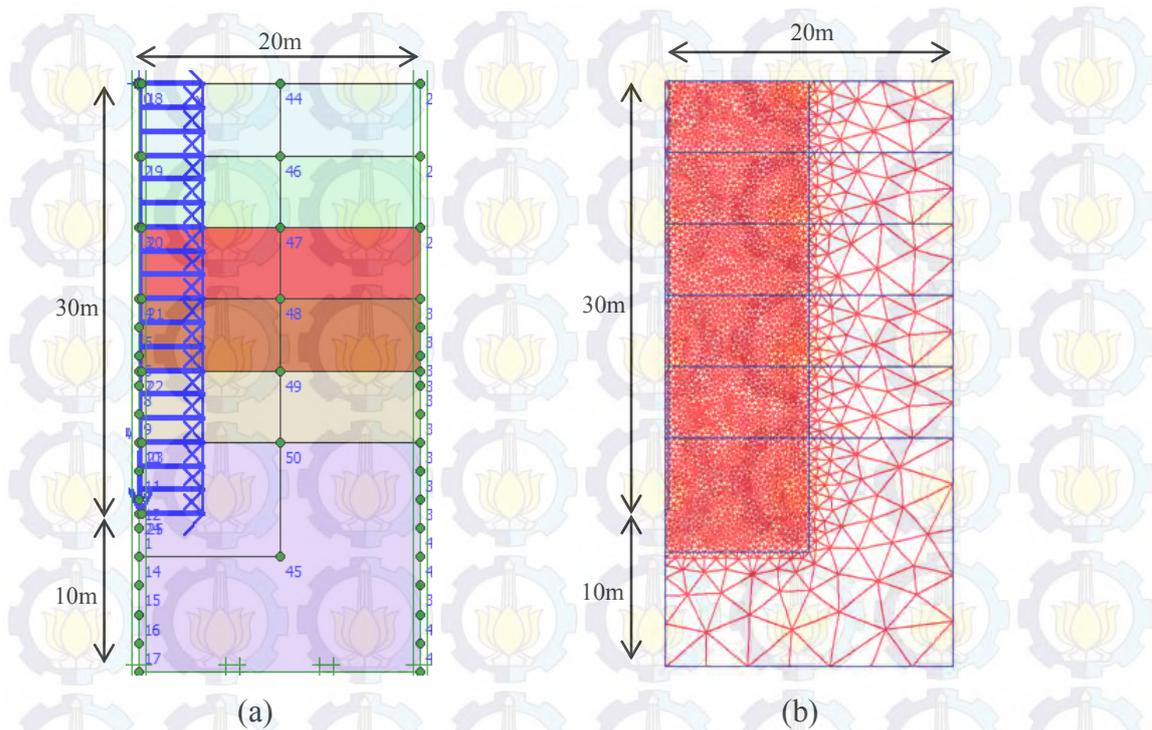
Gambar 3.5b Jaringan elemen simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen: (a)  $L = 5$  m, (b)  $L = 15$  m, dan (c)  $L = 30$  m

### 3.5.2 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3

Simulasi ini dilakukan dengan 3 tipe simulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.9. Simulasi 2D-10 sampai dengan simulasi 2D-12 adalah simulasi tiang tunggal dengan variasi parameter tanah berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3, 3.4, 3.5, dan 3.6 yang dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.3, sehingga pengaruh dari parameter tanah terhadap perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori bisa didapatkan dari simulasi ini. Diameter tiang 50 cm dan panjang tiang 30 m dimodelkan di dalam PLAXIS 2D dengan geometri seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6a. Jaringan elemen pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar. 3.6b.

Tabel 3.9 Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3

| No | Tipe Simulasi  | Diameter Tiang (cm) | Panjang Tiang (m) | Data Tanah |
|----|----------------|---------------------|-------------------|------------|
| 1  | Simulasi 2D-10 | 50                  | 30                | BM1        |
| 2  | Simulasi 2D-11 | 50                  | 30                | BM2        |
| 3  | Simulasi 2D-12 | 50                  | 30                | BM3        |

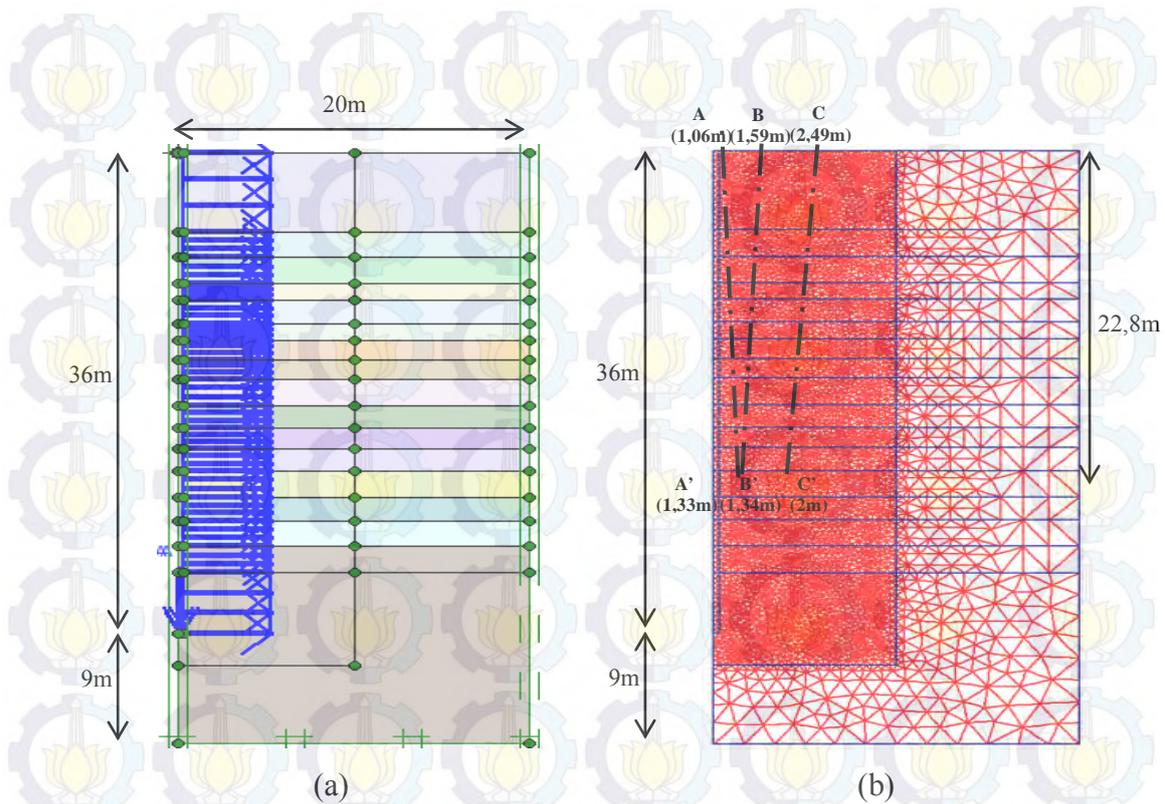


Gambar 3.6 (a) Geometri dan (b) Jaring elemen simulasi tiang dengan variasi parameter tanah (BM1, BM2, dan BM3)

### 3.5.3 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Penelitian dari Pestana et al (2002)

Simulasi ini dilakukan sebagai perbandingan antara hasil simulasi PLAXIS dengan data penelitian sebelumnya mengenai pengukuran perpindahan radial dan tekanan air pori akibat pemancangan tiang tunggal secara experimental di lapangan yang dilakukan Pestana et al (2002). Parameter tanah untuk simulasi ini telah dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.4 (Tabel 3.7).

Geometri simulasi ini disesuaikan dengan data ukuran tiang dan profil tanah pada penelitian yang dilakukan Pestana et al (2002) dengan diameter tiang 60 cm dan panjang tiang 36 m. Geometri ini dimodelkan di dalam PLAXIS 2D dengan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7a. Jaring elemen pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar. 3.7b.



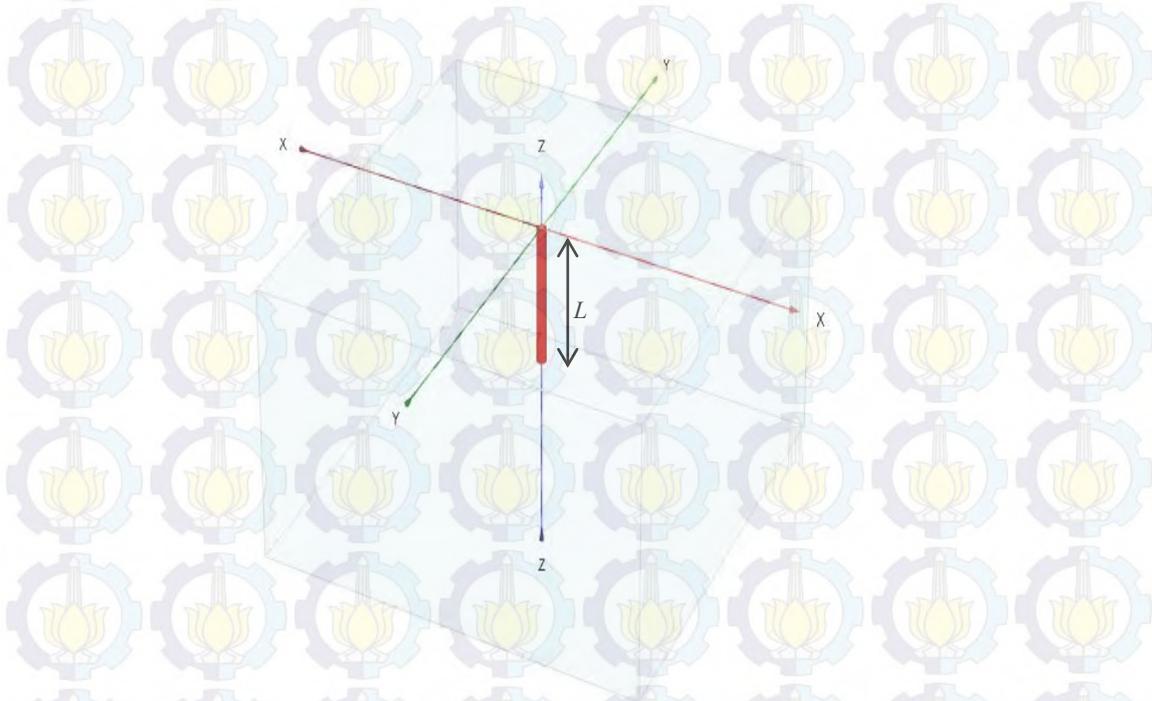
Gambar 3.7 (a) Geometri dan (b) Jaring elemen simulasi tiang tunggal berdasarkan data Pestana

Garis potongan A-A', B-B', dan C-C' pada Gambar 3.7b merupakan garis potong untuk melihat distribusi vertikal perpindahan radial, posisi garis potongan tersebut disesuaikan dengan posisi inklinometer dititik B4, B5, dan B6 pada penelitian yang dilakukan oleh Pestana (2002).

### 3.5.4 Geometri Simulasi Tiang Tunggal 3D dengan Parameter Tanah Homogen

Simulasi ini dilakukan sebagai perbandingan antara hasil simulasi PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D 2012. Parameter tanah untuk simulasi ini telah dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.2 (Tabel 3.2). Mengingat proses penyusunan jaring elemen hingga dan proses perhitungan di dalam PLAXIS 3D 2012 membutuhkan RAM yang besar dan waktu yang lama, maka simulasi untuk perbandingan dilakukan dengan 1 tipe simulasi saja yang mirip dengan simulasi 2D-1 dengan diameter tiang 50cm dan panjang tiang adalah 5m. Geometri

simulasi ini dimodelkan dengan menggunakan PLAXIS 3D 2012 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8 dengan profil tanah homogen (Tabel 3.2).



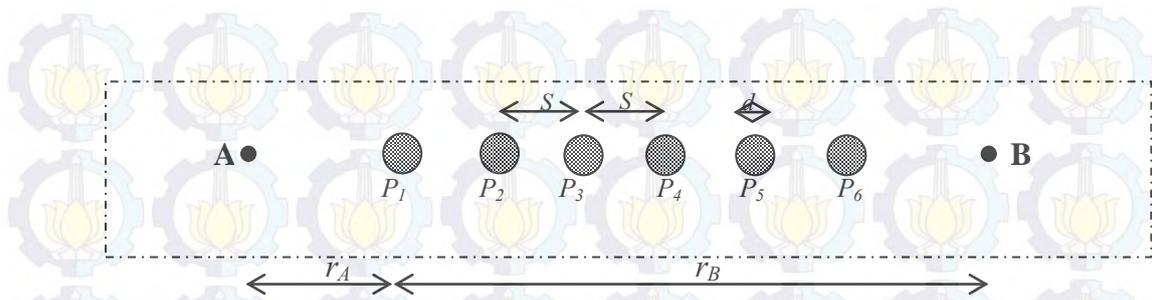
Gambar 3.8 Geometri model simulasi tiang tunggal PLAXIS 3D

### 3.6 Pemodelan Kelompok Tiang Pada Tanah Homogen

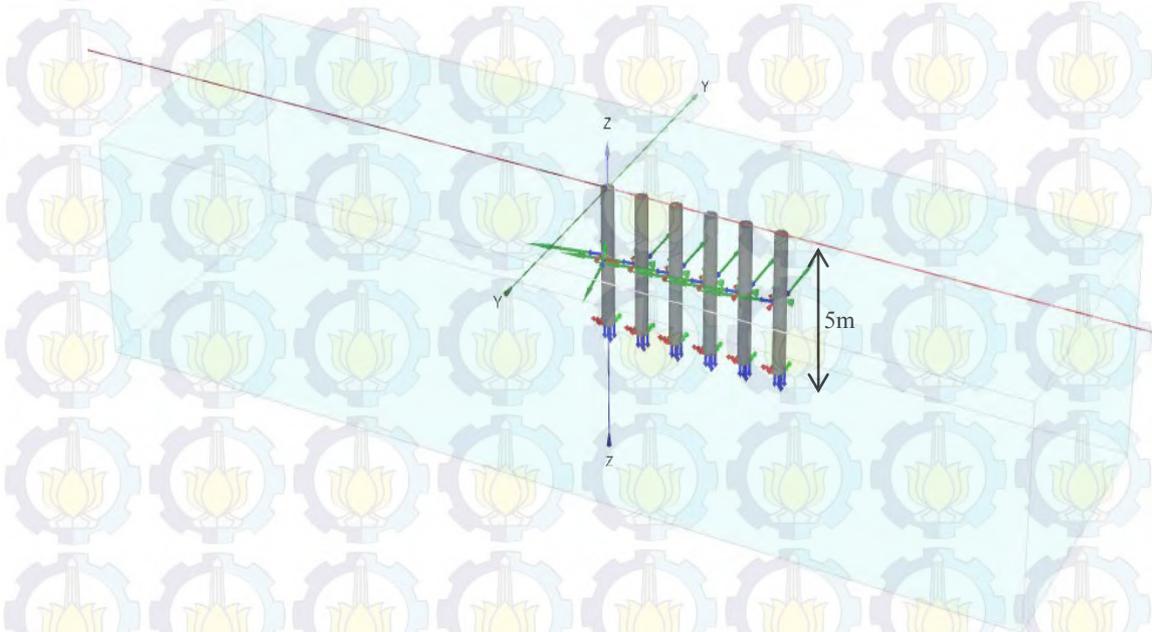
#### 3.6.1 Geometri dan Tahapan Simulasi Kelompok Tiang Formasi 1 x 6

Pemodelan kelompok tiang 1 baris ini dimodelkan dengan PLAXIS 3D yang terdiri dari 3 tipe simulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.10. Parameter tanah untuk simulasi ini telah dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.2 (Tabel 3.2).

Kelompok tiang dimodelkan dengan formasi 1 x 6 berjumlah 6 tiang seperti pada Gambar 3.9. Diameter tiang  $d$  adalah 30 cm, 40 cm, dan 50 cm dengan panjang tiang  $L$  adalah 5 m, Spasi antar tiang  $S$  tiang diambil sebesar  $3d$ . Perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori ke arah titik A dan B ditinjau pada saat simulasi tiang. Jarak  $r_A$  (jarak antara titik A ke as tiang P1) dan jarak  $r_B$  (jarak antara titik A ke as tiang P1) bervariasi. Geometri model untuk simulasi ini dimodelkan seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.9 Denah Model Kelompok tiang 1 x 6 ( 6 buah tiang)



Gambar 3.10 Geometri Pemodelan Kelompok Tiang 1 x 6

Tabel 3.10 Simulasi Kelompok Tiang Formasi 1 x 6

| Tipe Simulasi     | Diameter $d$ , cm |
|-------------------|-------------------|
| Simulasi 3D – 2.1 | 50                |
| Simulasi 3D – 2.2 | 40                |
| Simulasi 3D – 2.3 | 30                |

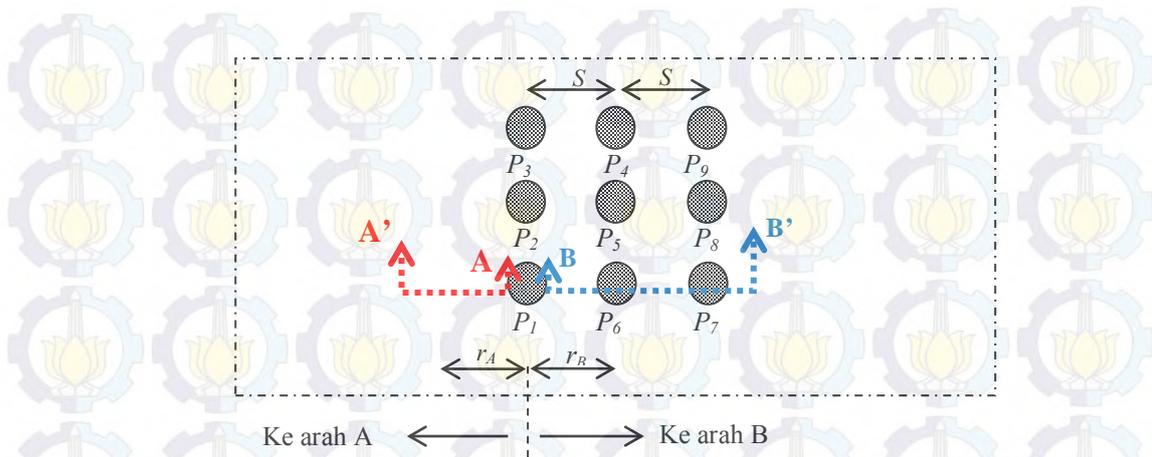
Tahapan simulasi numerik ini terdiri dari 6 Fase dimulai dari Fase-1 untuk tiang P1 hingga Fase-6 untuk tiang P6 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.11 dengan arah/alur pemancangan dimulai dari titik P1 meninggalkan titik A dan mengarah ke titik B. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui perpindahan lateral dan tekanan air pori akibat simulasi kelompok tiang dalam 1 baris, arah pemancangan searah dengan sumbu X saja.

Tabel 3.11 Tahapan Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 1 x 6

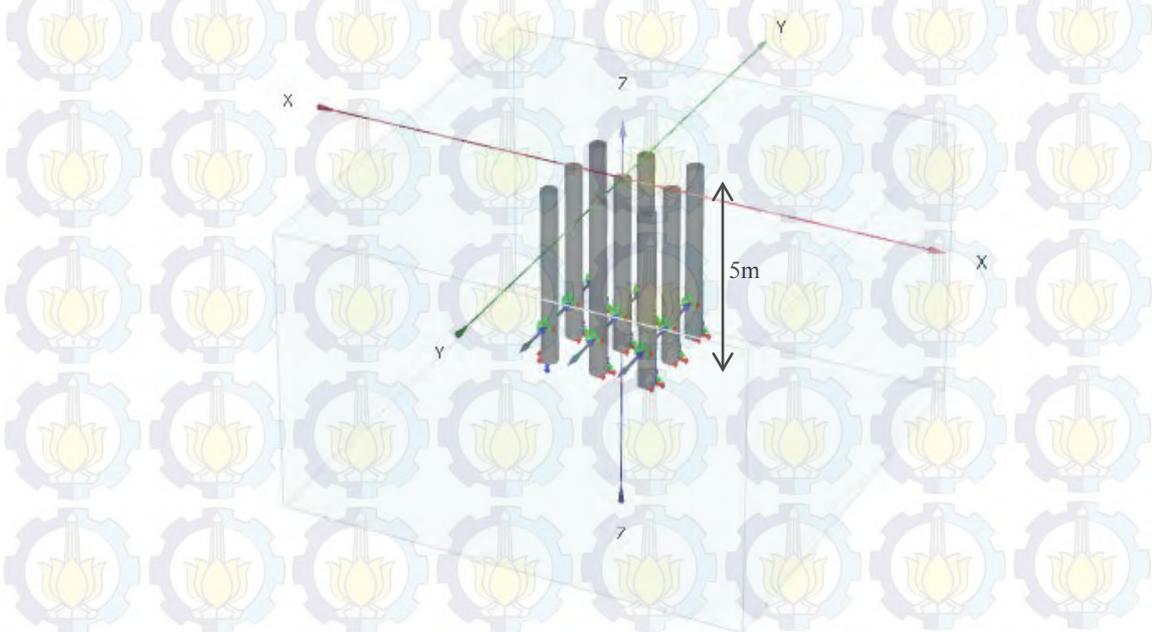
| Fase    | Tahapan Simulasi  |
|---------|---|
| Inisial | Kondisi Inisial   |
| Fase 1  | Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P1.   |
| Fase 2  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P1. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P2.       |
| Fase 3  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P2. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan untuk tiang P3. |
| Fase 4  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P3. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan untuk tiang P4. |
| Fase 5  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P4. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan untuk tiang P5. |
| Fase 6  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P5. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan untuk tiang P6. |

### 3.6.2 Geometri dan Tahapan Simulasi Kelompok Tiang Formasi 3 x 3

Simulasi Kelompok tiang 3 x 3 (9 tiang) ini dimodelkan dengan PLAXIS 3D seperti pada Gambar 3.11 dan 3.12. Formasi kelompok tiang terdiri dari 3 baris, di setiap 1 baris terdiri dari 3 tiang dengan spasi antar tiang  $3d$ . Pada Gambar 3.11 dapat dilihat Potongan A-A' dan Potongan B-B' yang ditinjau perpindahan lateralnya pada saat simulasi pemancangan tiang. Diameter tiang  $d$  adalah 50 cm dengan panjang tiang  $L$  adalah 5m. Parameter tanah untuk simulasi ini telah dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.2.2 (Tabel 3.2)



Gambar 3.11 Denah model kelompok tiang 3 x 3 ( 9 buah tiang)



Gambar 3.12 Geometri Pemodelan Kelompok tiang 3 x 3 (9 Tiang)

Tahapan simulasi numerik ini terdiri dari 9 Fase dimulai dari Fase 1 untuk tiang P1 hingga Fase 1 untuk tiang P9 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.12, arah/alur pemancangan dimulai dari titik P1 sampai dengan P9 sesuai dengan urutan tiang pada Gambar 3.11. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui perpindahan lateral dan tekanan air pori akibat simulasi kelompok tiang lebih dari 1 baris dengan formasi 3 x 3, arah/arahnya meliputi arah sumbu X dan Y.

Tabel 3.12 Tahapan Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 3 x 3

| Fase                    | Tahapan Simulasi  |
|-------------------------|---|
| Inisial                 | Menentukan Kondisi Inisial  |
| Fase 1                  | Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P1.   |
| Fase 2                  | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P1. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P2. |
| Fase 3<br>s/d<br>Fase 9 | Fase 3 sampai dengan Fase 9 dilakukan dengan cara yang sama seperti Fase sebelumnya.                                    |

### 3.7 Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013 Proyek SL

Pada pemodelan ini simulasi tiang dilakukan berdasarkan data pemancangan di sebagian area proyek SL (komunikasi pribadi) pada tanggal 22 juni 2013, dimana pengambilan data ini diambil berdasarkan pertimbangan sebagai berikut:

- a. Alat instrumentasi geoteknik (Inklinometer dan Piezometer) sudah terpasang sehingga pergerakan tanah dan tekanan air pori dapat direkam oleh alat tersebut.
- b. Posisi titik pemancangan yang dilakukan pada tanggal tersebut berada cukup dekat dengan alat instrumentasi yang ada.
- c. Pemancangan pada tanggal tersebut dilakukan 1 unit mesin injeksi sehingga tidak menimbulkan kesulitan dalam menentukan urutan pemancangan.
- d. Pada tanggal tersebut terjadi pergerakan yang cukup untuk dilakukan analisa dibandingkan dengan data pada tanggal sebelumnya.
- e. Posisi titik pemancangan yang dilakukan pada tanggal tersebut berada cukup dekat dengan alat instrumentasi yang ada.
- f. Batasan area pemancangan dan jumlah tiang ditentukan dengan mempertimbangkan keterbatasan program PLAXIS 3D, jika batasan

area terlalu luas dan tiang yang banyak akan sulit (bahkan tidak bisa) dilakukan proses *generated meshing* dikarenakan jumlah elemen yang harus dibagi terlalu banyak sehingga melampaui kemampuan RAM. Walaupun proses *generated meshing* bisa dilakukan, batasan area yang terlalu luas dan jumlah tiang yang banyak akan mempengaruhi proses perhitungan pada PLAXIS, yaitu RAM yang diperlukan sangat besar dan waktu yang dibutuhkan untuk perhitungan tersebut akan menjadi tidak wajar, selain itu hasil yang diperoleh juga tidak maksimal.

### **3.7.1 Pemilihan Parameter Tanah**

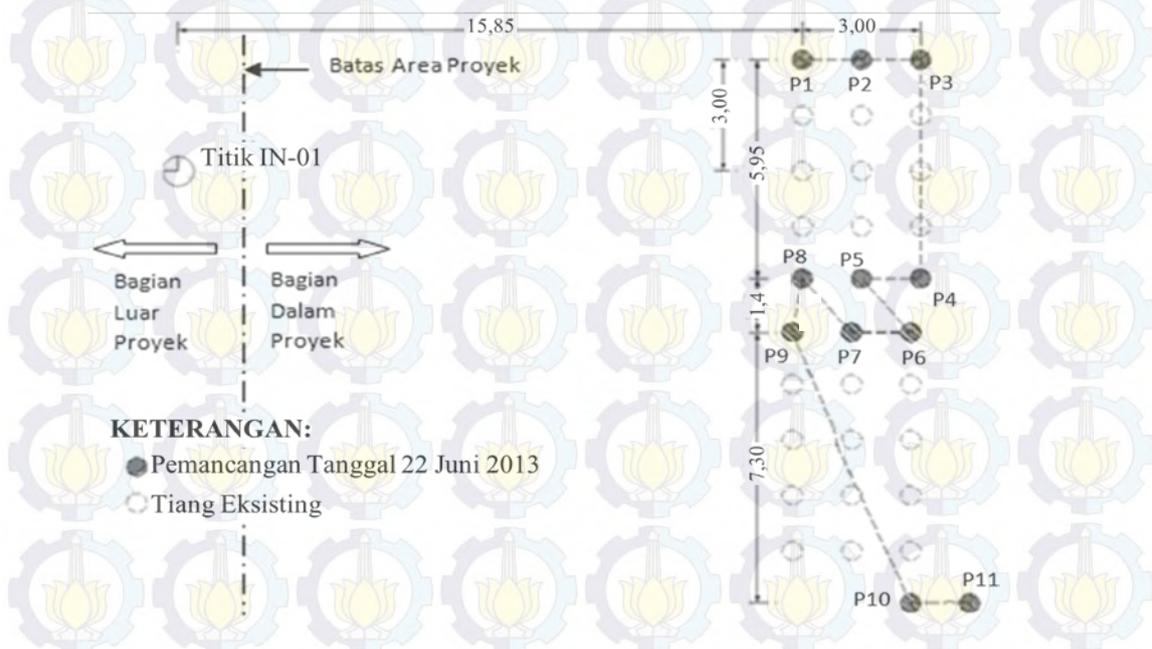
Pada proyek SL terdapat beberapa data penyelidikan tanah diantaranya adalah uji di lapangan dan uji laboratorium. Tabel 3.2, Tabel 3.3, dan Tabel 3.4 merupakan data tanah dari uji laboratorium berdasarkan sampel tanah yang diambil pada titik BM1, BM2, dan BM3. Diantara ketiga titik tersebut, titik BM2 terletak cukup dekat dengan area pemancangan tiang pada tanggal 22 Juni 2013, parameter tanah yang belum diketahui ditentukan dengan korelasi. Oleh karena itu data tanah pada Tabel 3.3 dipilih sebagai parameter tanah dalam simulasi sub bab ini, kondisi tanah dipertimbangkan dalam kondisi *undrained B* dengan menggunakan model Mohr-Coulomb. Tiang pondasi dimodelkan sebagai linier elastis seperti yang disajikan pada Tabel 3.5.

### **3.7.2 Geometri dan Alur Pemancangan Tiang Pada Tanggal 22 Juni 2013**

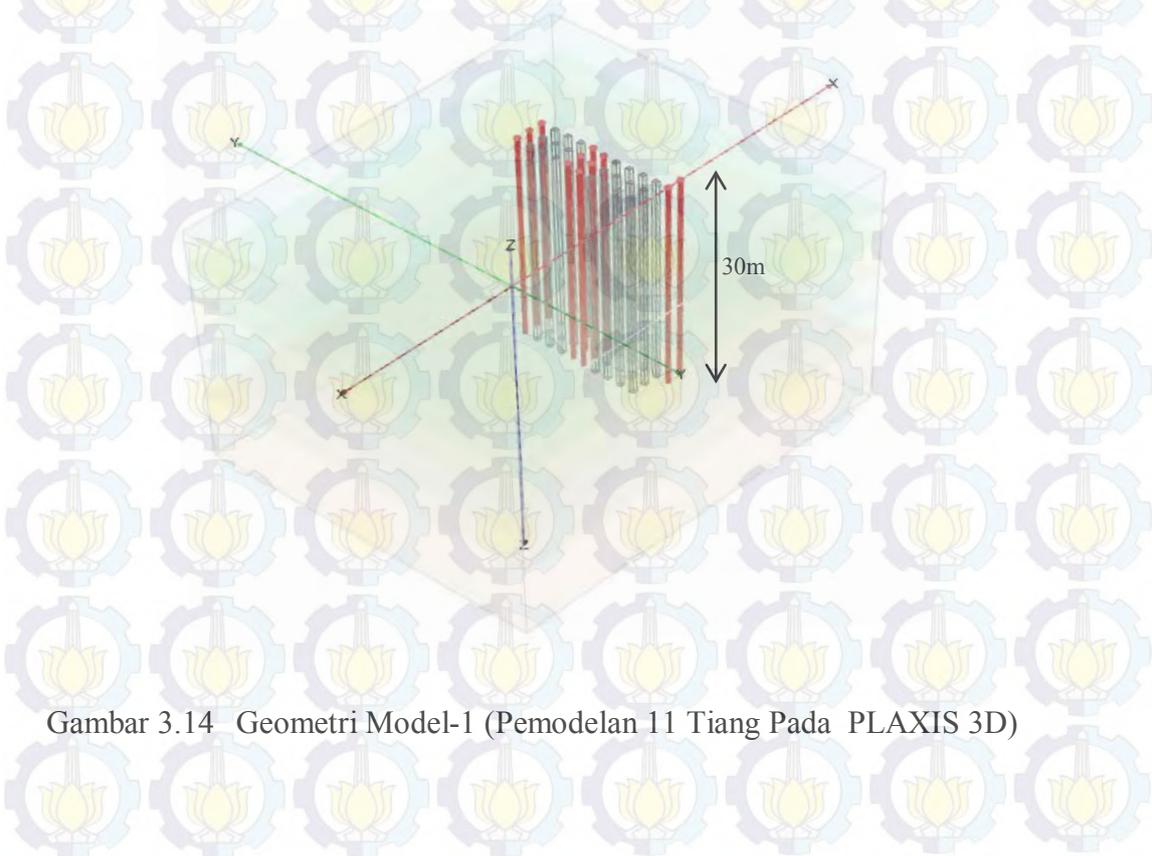
Ada 2 bentuk geometri yang akan disimulasikan. Geometri yang pertama adalah terdiri dari 11 tiang (P1 s/d P11) berdasarkan denah dan data pemancangan pada tanggal 22 Juni 2013 di area yang terletak didekat alat inklinometer-01 pada proyek SL dapat dilihat pada Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.

Pada Model-1 tersebut (Gambar 3.14), jaring elemen diatur dengan ukuran sedang kemudian diperhalus (*refine 0,275*) untuk area sekitar tiang dan untuk pengaturan toleransi kesalahan dalam proses perhitungan pada PLAXIS dapat

dibuat menjadi 5% karena perhitungan membutuhkan kapasitas RAM komputer yang sangat besar saat toleransi kesalahan 1 % dalam geometri tersebut.



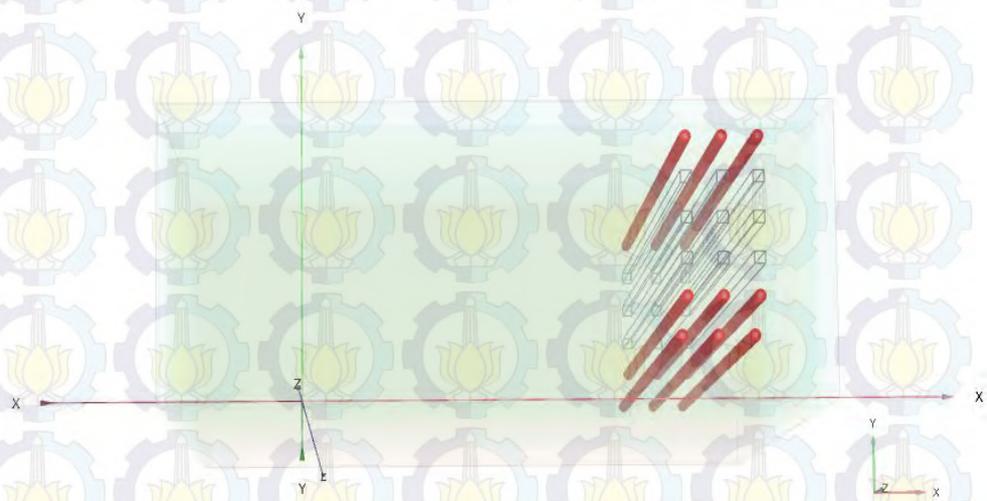
Gambar 3.13 Denah Model 1: Pemancangan 11 Tiang pada tanggal 22 Juni 2013



Gambar 3.14 Geometri Model-1 (Pemodelan 11 Tiang Pada PLAXIS 3D)



Gambar 3.15 Denah Model 2: Pemancangan pada tanggal 22 Juni 2013 jika dua pemancangan tiang terakhir diabaikan



Gambar 3.16 Geometri Model-2 (Pemodelan 9 Tiang Pada PLAXIS 3D)

Model-2 adalah terdiri dari 9 tiang (P1 s/d P9) yang sebelumnya beberapa tiang (P10 dan P11) pada Gambar 3.13 dihilangkan dengan tujuan untuk mendapatkan jaring elemen yang lebih halus dari Model-1, tiang P110 dan P11 terletak cukup jauh dari titik IN-01 yaitu sekitar lebih dari 21m atau  $42d$  dan adanya tiang eksisting yang cukup banyak dianggap akan memberikan

perpindahan lateral yang sangat kecil sehingga keberadaannya untuk hal ini diabaikan, sehingga untuk model geometri pemancangan pada tanggal 22 juni hanya melibatkan 9 tiang dari 11 tiang yang ada. Geometri simulasi model-2 ini dapat dilihat pada Gambar 3.15 dan 3.16. Dengan Model-2 ini (Gambar 3.15), jaring elemen dapat dibuat lebih halus dibandingkan Model-2 (Gambar 3.14) yang sesuai dengan kapasitas RAM komputer yang ada dan dengan waktu yang wajar, disamping itu pengaturan toleransi kesalahan dalam proses perhitungan pada PLAXIS dapat dibuat menjadi 1%.

Tahapan simulasi numerik ini dimulai dari menentukan kondisi insial hingga Fase 11 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Tahapan Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013

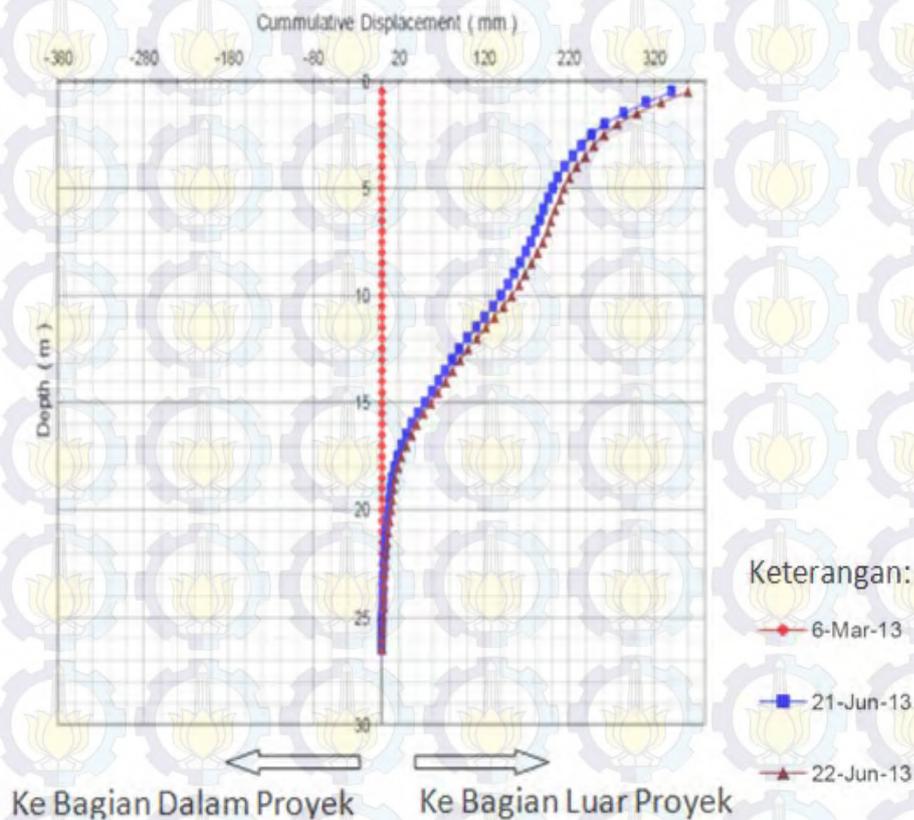
| Fase                                       | Tahapan Simulasi  |
|--|---|
| Inisial                                    | Menentukan Kondisi Inisial<br>Menerapkan tiang eksisting yang sudah ada sebelumnya.<br>Tahapan konsolidasi 250 hari     |
| Fase 1                                     | Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P1.   |
| Fase 2                                     | Menerapkan material tiang dan menghapus perpindahan untuk tiang P1. Membuat rongga dan menerapkan perpindahan tiang P2. |
| Fase 3<br>s/d<br>Fase 9<br>atau<br>Fase 11 | Fase 3 sampai dengan Fase terakhir dilakukan dengan cara yang sama seperti Fase sebelumnya.                             |

### 3.7.3 Data Inklinometer-01 dan Piezometer-01 Pada Tanggal 22 Juni 2013

Dari data inklinometer (Lampiran 2) dapat diketahui besarnya pergerakan (*displacement*) yang terjadi pada tanah akibat pemancangan. Alat inklinometer-01 terpasang hingga kedalaman 26,5 m. Berdasarkan data inklinometer-01 (Gambar

3.17) pada tanggal 21 dan 22 Juni 2013 tanah mengalami perpindahan lateral akibat pemancangan.

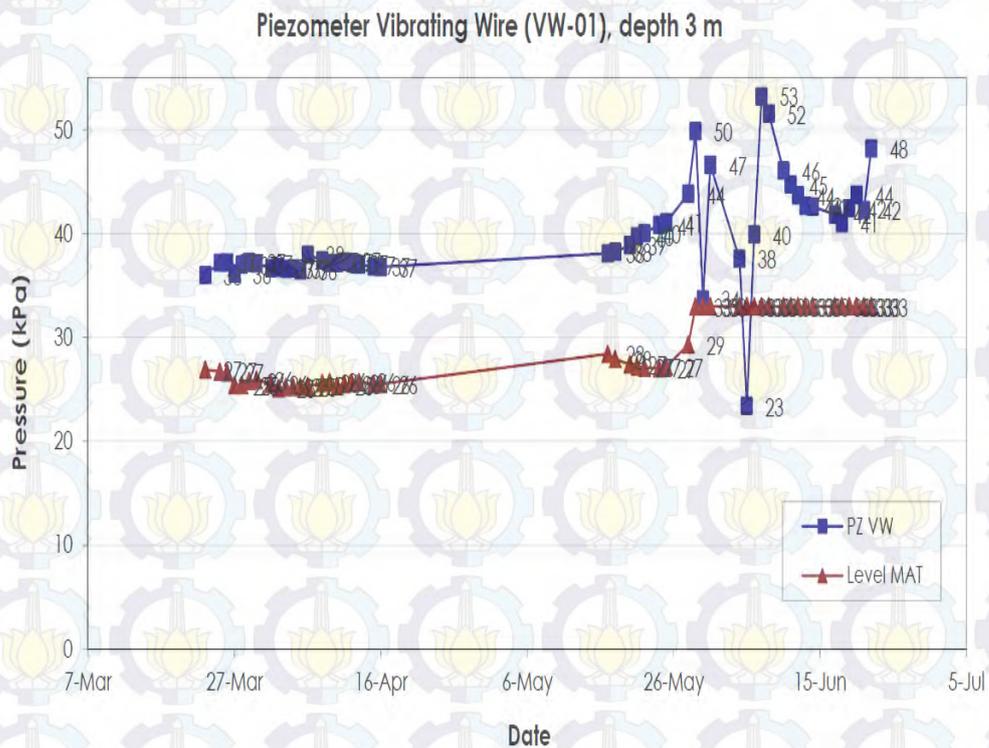
Total perpindahan lateral di permukaan tanah dari awal pemasangan inklinometer-01 pada tanggal 6 maret 2013 sampai dengan tanggal 21 Juni 2013 adalah 340 mm, sedangkan pada tanggal 22 Juni 2013 perpindahan lateral menjadi 360 mm. Peningkatan perpindahan lateral ini diperkirakan terjadi akibat adanya penambahan pemancangan 11 tiang yang di lakukan pada tanggal 22 Juni 2013 sehingga perpindahan lateral di permukaan tanah mengalami peningkatan / bertambah sebesar 20 mm dari sebelumnya.



Gambar 3.17 Data inklinometer-01 Pada 22 Juni 2013 ( Laporan Proyek SL)

Dari laporan data Piezometer-01 (Gambar 3.18) dapat dilihat nilai tekanan air pori akibat pemancangan mulai tanggal 22 maret 2012 sampai dengan tanggal

22 Juni 2013 dikedalaman 3 m. Nilai ekses tekanan air pori tersebut bervariasi, pada 2 pembacaan terakhir dari grafik tersebut menunjukkan bahwa tekanan air pori pada tanggal 21 dan 22 Juni berturut-turut bernilai 42 kPa dan 48 kPa. Tekanan air pori hidrostatik yang diakibatkan oleh muka air tanah pada elevasi  $\pm 0,00$  dipermukaan tanah pada tanggal tersebut adalah 33 kPa.



Gambar 3.18 Data Piezometer-01 Pada Tanggal 22 Maret 2013 Sampai Dengan 22 Juni 2013 ( Laporan Proyek SL)

### 3.8 Analisis

Dari pemodelan dan perhitungan numerik dari program PLAXIS akan mendapatkan hasil (*output data*). Hasil dari perhitungan yang akan dianalisa adalah Perpindahan tanah arah lateral dan Ekses tekanan air pori.

## BAB 4 HASIL dan PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Pemodelan Tiang Tunggal

Hasil pemodelan tiang tunggal dalam penelitian ini diuraikan dalam beberapa sub-bab yang diperoleh dari beberapa simulasi tiang tunggal yang dijelaskan sebelumnya pada Bab 3. Simulasi ini menghasilkan perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori di sekitar tiang.

#### 4.1.1 Hasil Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Parameter Tanah Homogen

Hasil simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen diperoleh dari PLAXIS 2D dengan jaring elemen sangat halus di dekat tiang. Parameter tanah dan geometri simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.4 yang sebelumnya dibahas pada Sub-Bab 3.5.1 dengan variasi diameter tiang yaitu 50 cm, 40 cm, dan 30 cm serta variasi panjang tiang yaitu 5 m, 15 m, dan 30 m.

Tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 adalah hasil perhitungan perpindahan radial menggunakan persamaan berdasarkan teori *CCE* dari Vesic (1972). Notasi  $r$  adalah jarak antara posisi awal titik partikel / elemen tanah (titik yang ditinjau) ke as (pusat) tiang, sedangkan  $r_0$  menunjukkan jari-jari tiang, dan  $d$  adalah diameter tiang. Hasil perhitungan yang diperoleh dari kedua persamaan tersebut memberikan hasil yang sesuai di antara keduanya.

Tabel 4.1 Perpindahan radial untuk diameter tiang 50 cm

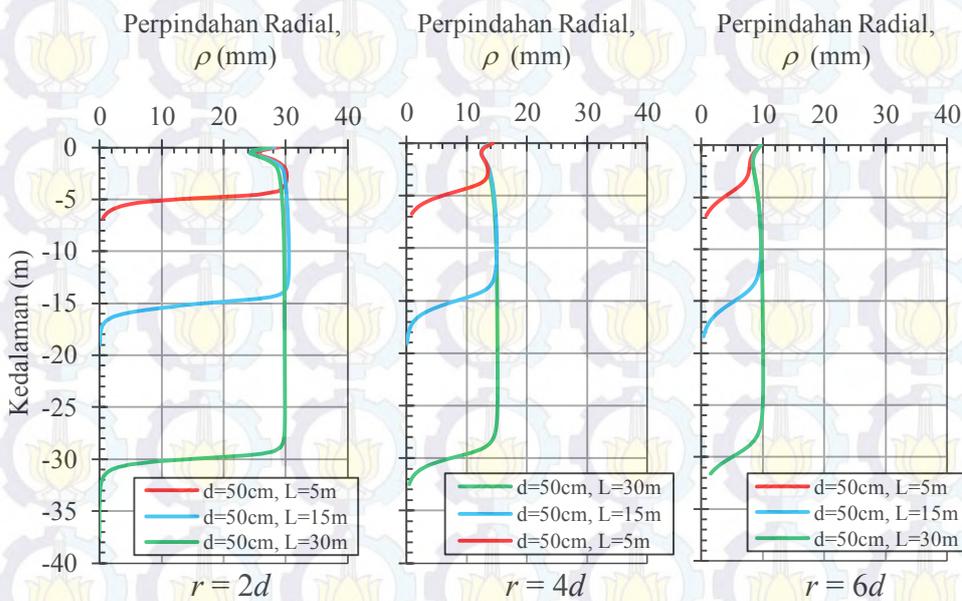
| — | —  | $r$ (m) | Perhitungan berdasarkan teori<br><i>Cylindrical Cavity Expansion</i> |              |                            |              |
|---|----|---------|--|--------------|----------------------------|--------------|
|   |    |         | Vesic,<br>1972   |              | Chai et al,<br>2005 & 2007 |              |
|   |    |         | $\rho$ (m)   | $\rho / r_0$ | $\rho$ (m)                 | $\rho / r_0$ |
| 1 | 2  | 0,5     | 0,059  | 0,24         | 0,059                      | 0,24         |
| 2 | 4  | 1       | 0,031  | 0,12         | 0,031                      | 0,12         |
| 3 | 6  | 1,5     | 0,021  | 0,08         | 0,021                      | 0,08         |
| 4 | 8  | 2       | 0,016  | 0,06         | 0,016                      | 0,06         |
| 5 | 10 | 2,5     | 0,012  | 0,05         | 0,012                      | 0,05         |
| 6 | 12 | 3       | 0,010  | 0,04         | 0,010                      | 0,04         |

Tabel 4.2 Perpindahan radial untuk diameter tiang 40 cm

| $\frac{r}{d}$ | $\frac{r}{r_0}$ | $r$ (m) | Perhitungan berdasarkan teori<br><i>Cylindrical Cavity Expansion</i> |              |                         |              |
|---------------|-----------------|---------|--|--------------|-------------------------|--------------|
|               |                 |         | Vesic, 1972  |              | Chai et al, 2005 & 2007 |              |
|               |                 |         | $\rho$ (m)   | $\rho / r_0$ | $\rho$ (m)              | $\rho / r_0$ |
| 1             | 2               | 0,4     | 0,047  | 0,24         | 0,047                   | 0,24         |
| 2             | 4               | 0,8     | 0,025  | 0,12         | 0,025                   | 0,12         |
| 3             | 6               | 1,2     | 0,017  | 0,08         | 0,017                   | 0,08         |
| 4             | 8               | 1,6     | 0,012  | 0,06         | 0,012                   | 0,06         |
| 5             | 10              | 2       | 0,010  | 0,05         | 0,010                   | 0,05         |
| 6             | 12              | 2,4     | 0,008  | 0,04         | 0,008                   | 0,04         |

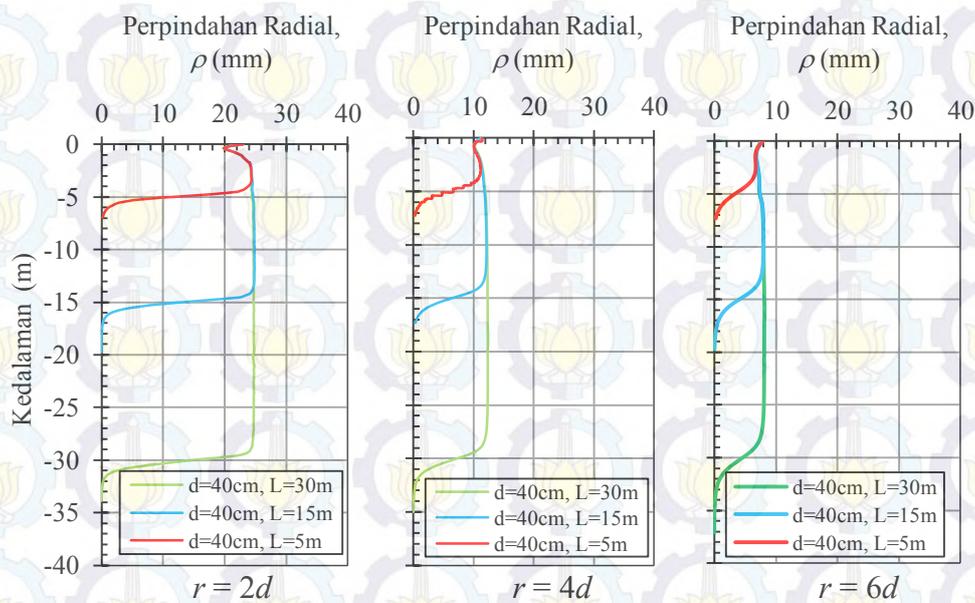
Tabel 4.3 Perpindahan radial untuk diameter tiang 30 cm

| $\frac{r}{d}$ | $\frac{r}{r_0}$ | $r$ (m) | Perhitungan berdasarkan teori<br><i>Cylindrical Cavity Expansion</i> |              |                         |              |
|---------------|-----------------|---------|--|--------------|-------------------------|--------------|
|               |                 |         | Vesic, 1972  |              | Chai et al, 2005 & 2007 |              |
|               |                 |         | $\rho$ (m)   | $\rho / r_0$ | $\rho$ (m)              | $\rho / r_0$ |
| 1             | 2               | 0,3     | 0,035  | 0,24         | 0,035                   | 0,24         |
| 2             | 4               | 0,6     | 0,018  | 0,12         | 0,018                   | 0,12         |
| 3             | 6               | 0,9     | 0,012  | 0,08         | 0,012                   | 0,08         |
| 4             | 8               | 1,2     | 0,009  | 0,06         | 0,009                   | 0,06         |
| 5             | 10              | 1,5     | 0,007  | 0,05         | 0,007                   | 0,05         |
| 6             | 12              | 1,8     | 0,006  | 0,04         | 0,006                   | 0,04         |



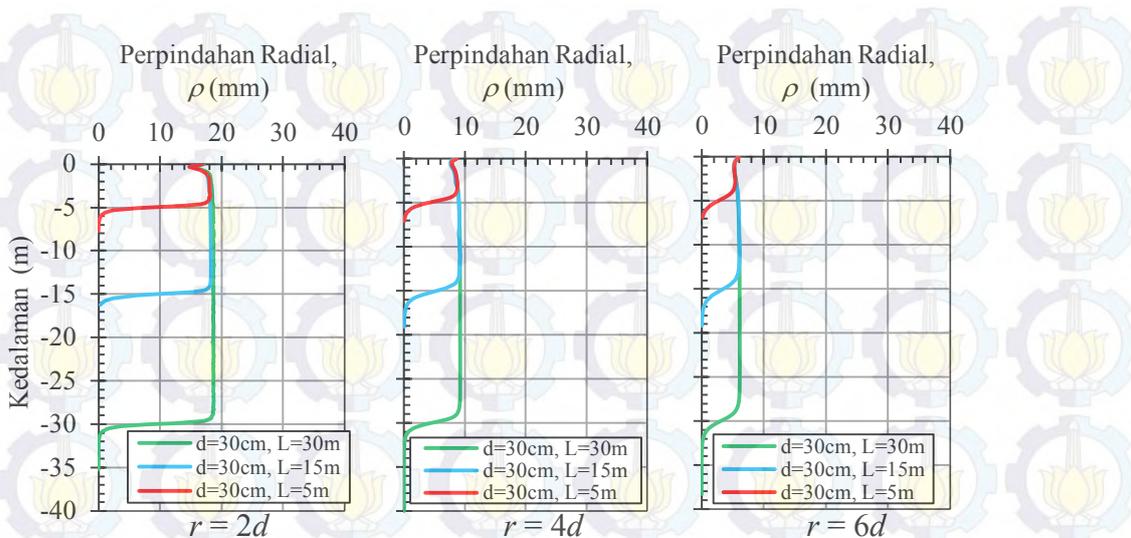
Gambar 4.1 Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d = 50$  cm)

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara kedalaman dan perpindahan radial tanah di sekitar tiang pada jarak  $r$  yaitu  $2d$ ,  $4d$ , dan  $6d$  dari as tiang yang diperoleh dari perhitungan simulasi tiang tunggal menggunakan PLAXIS untuk diameter tiang 50 cm dengan variasi panjang tiang  $L$  adalah 5 m, 15 m, dan 30 m. Tren perpindahan tanah sesuai dengan penjelasan yang diberikan oleh Poulos (1994) yaitu pergerakan horisontal tanah relatif seragam di setiap kedalaman penetrasi tiang, pergerakan tanah dibawah ujung tiang menurun secara cepat sesuai dengan kedalamannya, gerakan maksimum tidak tergantung pada kedalaman penetrasi dan menurun sesuai dengan jaraknya dari tiang. Kesesuaian ini terjadi karena pemodelan dilakukan dengan kondisi *undrained* sehingga teori *CCE* dapat berlaku pada kondisi ini. Perpindahan tanah saat  $r = 2d$  adalah 31 mm, sedangkan saat  $r = 4d$  adalah 16 mm, dan saat  $r = 6d$  adalah 10 mm.



Gambar 4.2 Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d = 40 \text{ cm}$ )

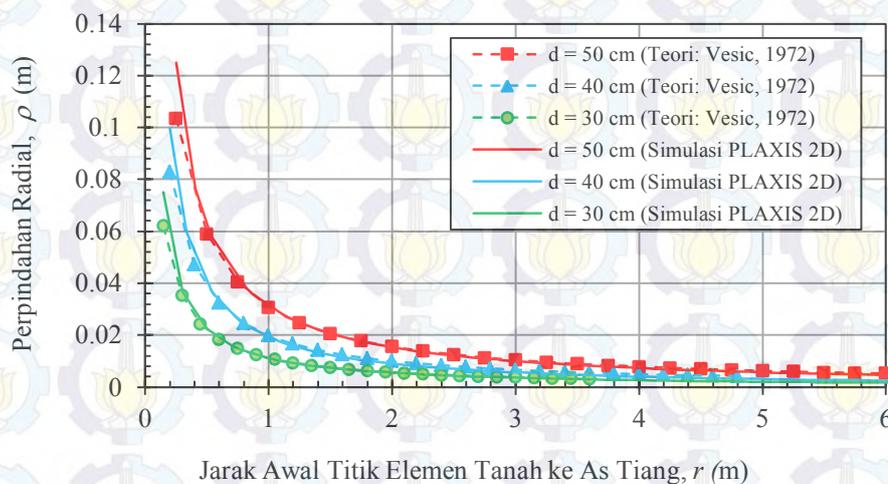
Dari Gambar 4.2 dapat dilihat grafik perpindahan radial tanah di sekitar tiang berdiameter 40 cm dengan variasi panjang tiang  $L$  adalah 5 m, 15 m, dan 30 m yang diperoleh dari simulasi PLAXIS. Tren perpindahan juga terlihat relatif seragam seperti pada penjelasan Gambar 4.1. Perpindahan tanah saat  $r = 2d$  adalah 25 mm, sedangkan saat  $r = 4d$  adalah 12 mm, dan saat  $r = 6d$  adalah 8 mm.



Gambar 4.3 Perpindahan radial tanah di sekitar tiang

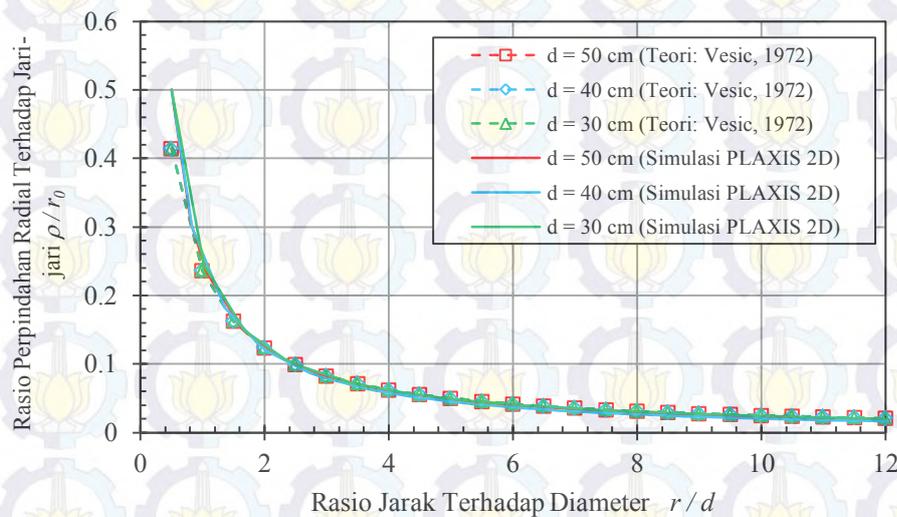
Dari Gambar 4.3 dapat dilihat grafik perpindahan radial tanah di sekitar tiang berdiameter 30 cm dengan variasi panjang tiang  $L$  adalah 5 m, 15 m, dan 30 m yang diperoleh dari simulasi PLAXIS. Tren perpindahan juga terlihat relatif seragam seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.1. Perpindahan tanah saat  $r = 2d$  adalah 18 mm, sedangkan saat  $r = 4d$  adalah 9 mm, dan saat  $r = 6d$  adalah 6 mm.

Grafik pada Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 memberikan nilai perpindahan radial yang sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori CCE seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, 2, dan 3, hal ini karena pemodelan dilakukan dengan kondisi *undrained* sehingga teori CCE dapat berlaku pada kondisi tersebut.



Gambar 4.4 Hubungan antara jarak  $r$  dan perpindahan radial tanah, hasil simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen.

Gambar 4.4 adalah grafik distribusi horisontal perpindahan radial permukaan tanah yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r$  (jarak posisi awal titik elemen tanah ke as tiang) dan perpindahan radial permukaan tanah di sekitar tiang. Perpindahan radial diperoleh dari hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm dengan parameter tanah homogen. Dari Gambar 4.4 tersebut dapat dilihat bahwa hasil perhitungan perpindahan tanah dari PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori *CCE* dari Vesic (1972) dengan selisih perbedaan kurang dari 10%. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi diameter tiang, yaitu saat diameter semakin besar maka perpindahan radial tanah di sekitar tiang juga akan semakin besar. Tren perpindahan radial tersebut menunjukkan bahwa saat jarak  $r$  semakin bertambah maka perpindahan radial titik elemen tanah di sekitar tersebut akan semakin berkurang.



Gambar 4.5 Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter dan rasio perpindahan permukaan tanah terhadap jari-jari tiang, hasil simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen.

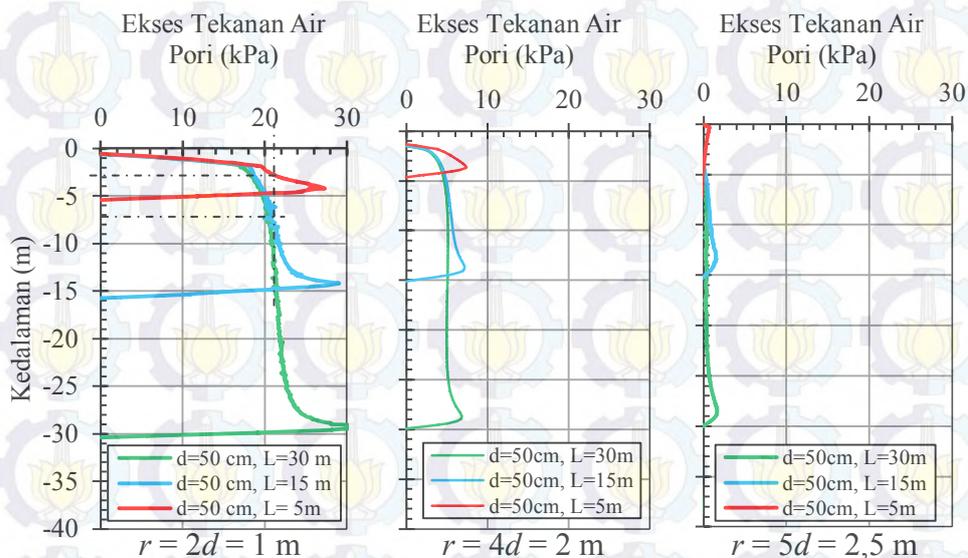
Gambar 4.5 menunjukkan hubungan antara rasio jarak  $r$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan terhadap jari-jari tiang yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm dengan parameter tanah homogen. Grafik pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa perhitungan dari PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan perhitungan berdasarkan teori *CCE* dari Vesic (1972).

Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi diameter tiang. Walaupun perpindahan radial tanah di sekitar tiang akan semakin besar saat diameter bertambah besar, rasio perpindahan radial  $\rho / r_0$  memiliki nilai yang sama pada rasio jarak radial  $r$  yang sama untuk setiap variasi diameter tiang, hal ini sesuai dengan hasil perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori CCE (Vesic, 1972; Chai et al, 2005 & 2007) yang telah ditunjukkan sebelumnya.

Tabel 4.4 adalah hasil dari perhitungan eksese tekanan air pori di sekitar tiang menggunakan persamaan berdasarkan teori CCE (Randolph dan Wroth, 1979) untuk tiang dengan diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. Saat jarak  $r$  (posisi awal titik elemen tanah ke as tiang) semakin bertambah maka eksese tekanan air pori semakin berkurang.

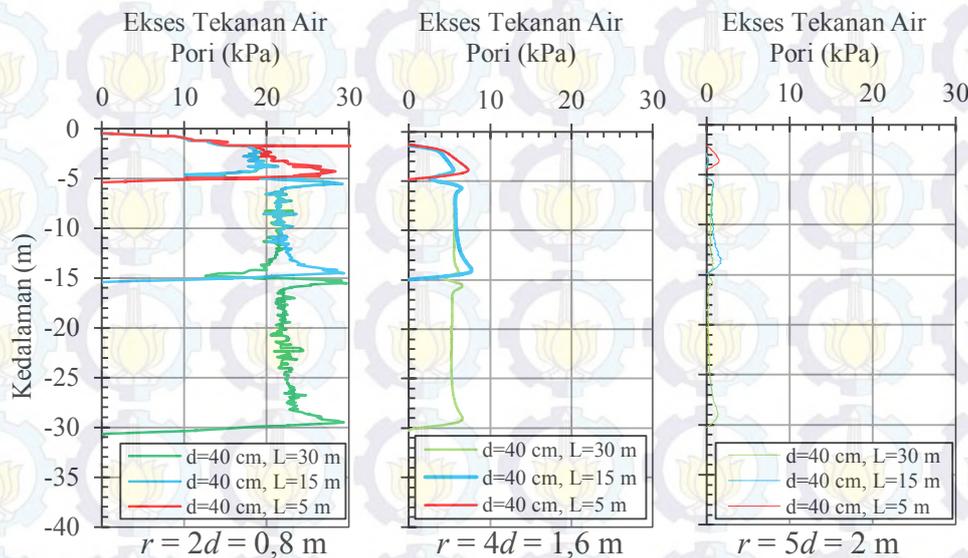
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Eksese Tekanan Air Pori ( $\Delta u$ ) berdasarkan teori CCE

| $\frac{r}{d}$ | $\frac{r}{r_0}$ | Diameter 50 cm |                  |                        | Diameter 40 cm |                  |                        | Diameter 30 cm |                  |                        |
|---------------|-----------------|----------------|------------------|------------------------|----------------|------------------|------------------------|----------------|------------------|------------------------|
|               |                 | $r$ (m)        | $\Delta u$ (kPa) | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $r$ (m)        | $\Delta u$ (kPa) | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $r$ (m)        | $\Delta u$ (kPa) | $\frac{\Delta u}{C_u}$ |
| 0,5           | 1               | 0,25           | 50,66            | 4,6                    | 0,2            | 50,66            | 4,6                    | 0,15           | 50,66            | 4,6                    |
| 1             | 2               | 1              | 35,41            | 3,22                   | 0,4            | 35,41            | 3,22                   | 0,3            | 35,41            | 3,22                   |
| 2             | 4               | 1,5            | 20,16            | 1,83                   | 0,8            | 20,16            | 1,83                   | 0,6            | 20,16            | 1,83                   |
| 3             | 6               | 2              | 11,24            | 1,02                   | 1,2            | 11,24            | 1,02                   | 0,9            | 11,24            | 1,02                   |
| 4             | 8               | 2,5            | 4,91             | 0,45                   | 1,6            | 4,91             | 0,45                   | 1,2            | 4,91             | 0,45                   |



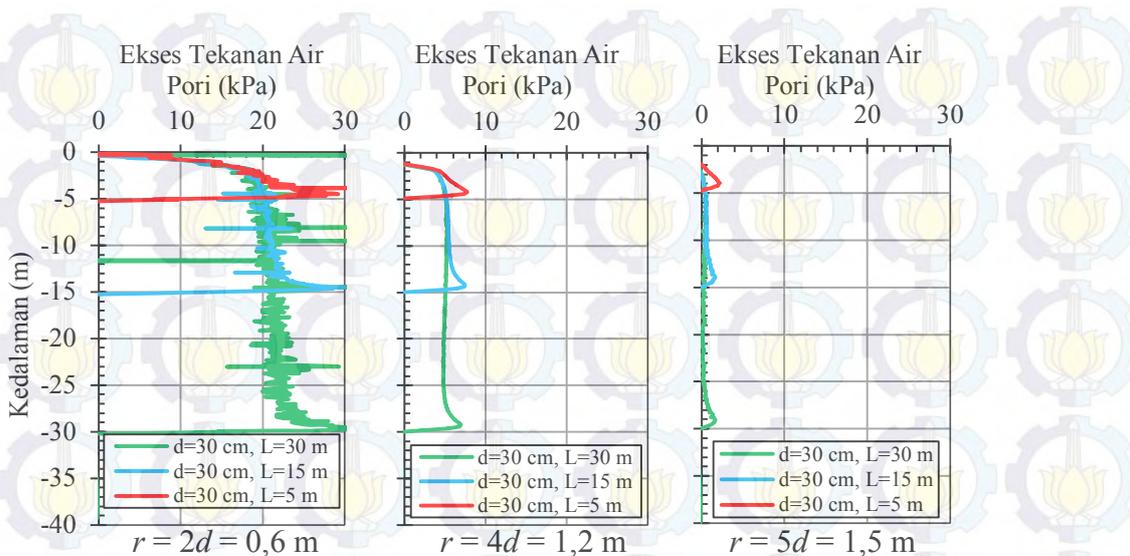
Gambar 4.6 Eksese tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 50\text{ cm}$ )

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara kedalaman dan ekses tekanan air pori yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm dengan penetrasi tiang atau panjang tiang 5 m, 15 m, dan 30 m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa apabila ekses tekanan air pori didekat permukaan tanah ( $>$  dari  $4d$ ) dan didekat ujung tiang diabaikan maka nilai ekses tekanan air pori akan sesuai dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979) Ekses tekanan air pori pada kedalaman  $0,5 L$  (kedalaman 2,5 m, 7,5 m, dan 15 m) saat  $r = 1$  m adalah 21,3 kPa, sedangkan saat  $r = 2$  m adalah 6,1 kPa, dan saat  $r = 2,5$  m adalah 1,2 kPa.



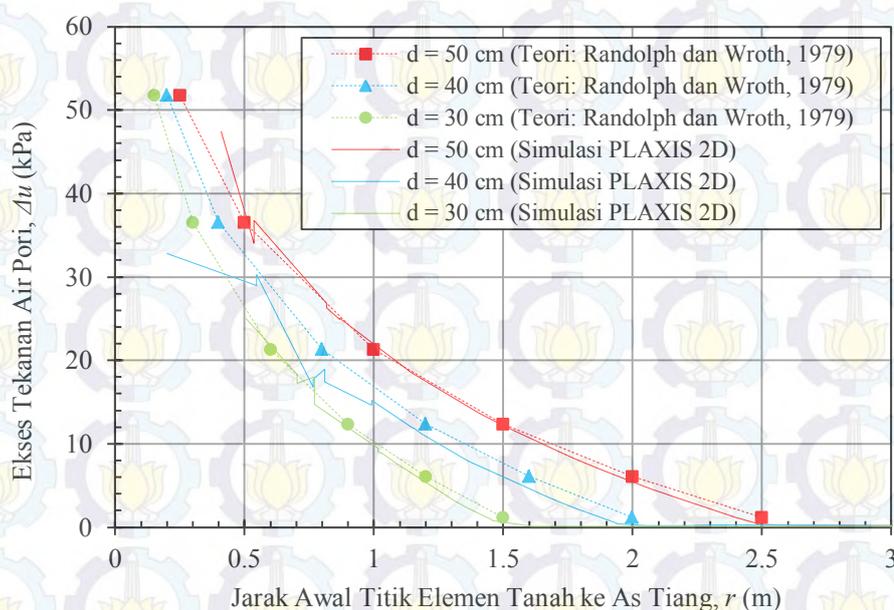
Gambar 4.7 Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 40$  cm)

Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara kedalaman dan ekses tekanan air pori yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal diameter 40 cm dengan penetrasi tiang 5 m, 15 m, dan 30 m. Grafik terlihat sedikit lebih kasar dibandingkan dengan grafik pada Gambar 4.6 karena tingkat kehalusan jaring elemen pada PLAXIS, dimana apabila jaring elemen semakin halus maka hasil grafik yang diperoleh juga akan semakin halus, terlepas dari tingkat kehalusan grafik tersebut, tren grafik pada Gambar 4.7 cukup sesuai dengan tren graik pada Gambar 4.6. Dari gambar tersebut dapat diperoleh ekses tekanan air pori pada kedalaman  $0,5 L$  saat  $r = 0,8$  m adalah 21,2 kPa, sedangkan saat  $r = 1,6$  m adalah 6,3 kPa, dan saat  $r = 2$  m adalah 1,1 kPa.



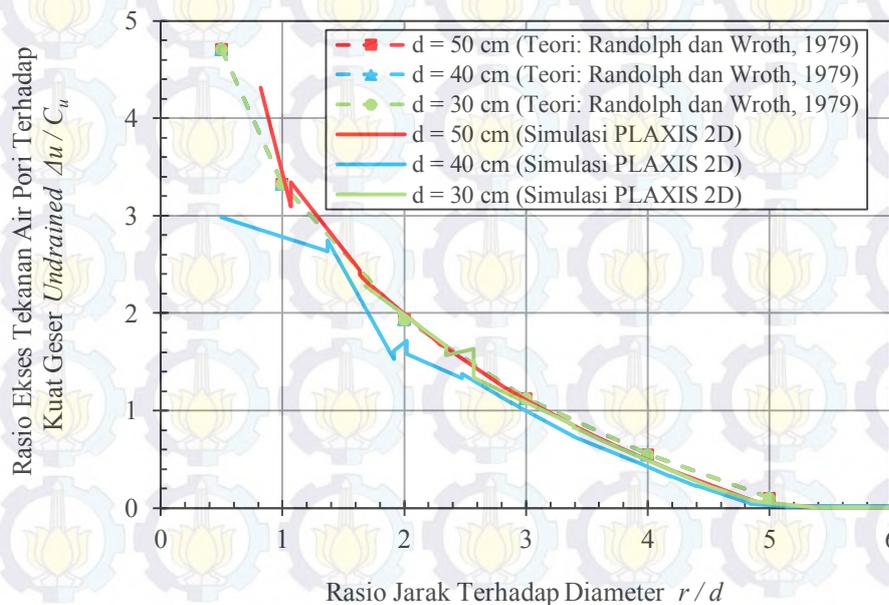
Gambar 4.8 Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 40$  cm)

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat ekses tekanan air pori yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal diameter 30 cm dengan penetrasi tiang 5 m, 15 m, dan 30 m. tren grafik tersebut cukup sesuai dengan tren grafik pada Gambar 4.6. Ekses tekanan air pori pada kedalaman  $0,5 L$  saat  $r = 0,6$  m adalah 21,4 kPa, sedangkan saat  $r = 1,2$  m adalah 6,2 kPa, dan saat  $r = 1,5$  m adalah 1,15 kPa.



Gambar 4.9 Hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori di kedalaman  $0,5L$ , hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen.

Gambar 4.9 adalah grafik distribusi horisontal eksres tekanan air pori yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r$  dari as (pusat) tiang dan eksres tekanan air pori di sekitar tiang pada kedalaman setengah dari panjang tiang ( $0,5 L$ ) yang diperoleh dari hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. Grafik distribusi horisontal eksres tekanan air pori yang didapat dari PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan grafik dari perhitungan eksres tekanan air pori berdasarkan teori *CCE* dari Randolph dan Wroth (1979) dengan selisih perbedaan kurang dari 20%, selisih perbedaan tersebut tergantung dari tingkat kehalusan jaring elemen yang diperlukan di dalam simulasi tiang tersebut, terutama jaring elemen yang berada di dekat tiang. Jika jaring elemen semakin halus maka hasil yang diperoleh akan semakin baik. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi diameter tiang, yaitu jika diameter semakin besar maka eksres tekanan air pori di sekitar tiang juga akan semakin besar.



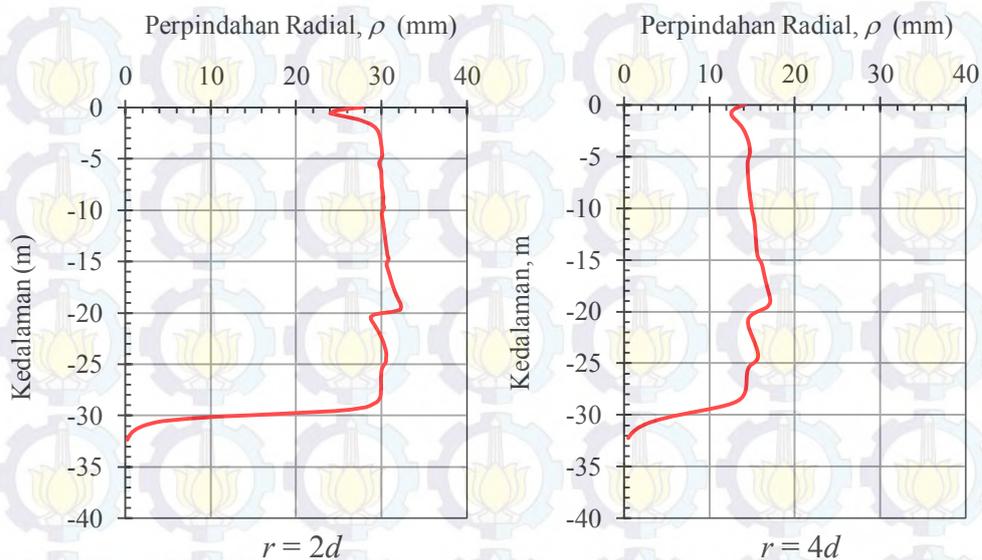
Gambar 4.10 Hubungan antara rasio jarak  $r$  terhadap diameter tiang dan rasio eksres tekanan air pori terhadap kuat geser *undrainated* di kedalaman  $0,5L$ , hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah homogen.

Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara rasio jarak terhadap diameter dan rasio eksres tekanan air pori terhadap kuat geser *undrainated* yang diperoleh dari hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm

dengan parameter tanah homogen. Grafik rasio eksese tekanan air pori yang didapat PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan grafik rasio yang didapat dari perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori *CCE* dari Randolph dan Wroth (1979). Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi diameter tiang. Walaupun eksese tekanan air pori di sekitar tiang akan semakin besar saat diameter bertambah besar, rasio eksese tekanan air pori memiliki nilai yang sama pada rasio jarak radial  $r$  yang sama untuk setiap variasi diameter tiang, hal ini sesuai dari hasil perhitungan eksese tekanan air pori berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979).

#### 4.1.2 Hasil Simulasi Tiang Tunggal 2D Berdasarkan Data Tanah BM1, BM2, dan BM3

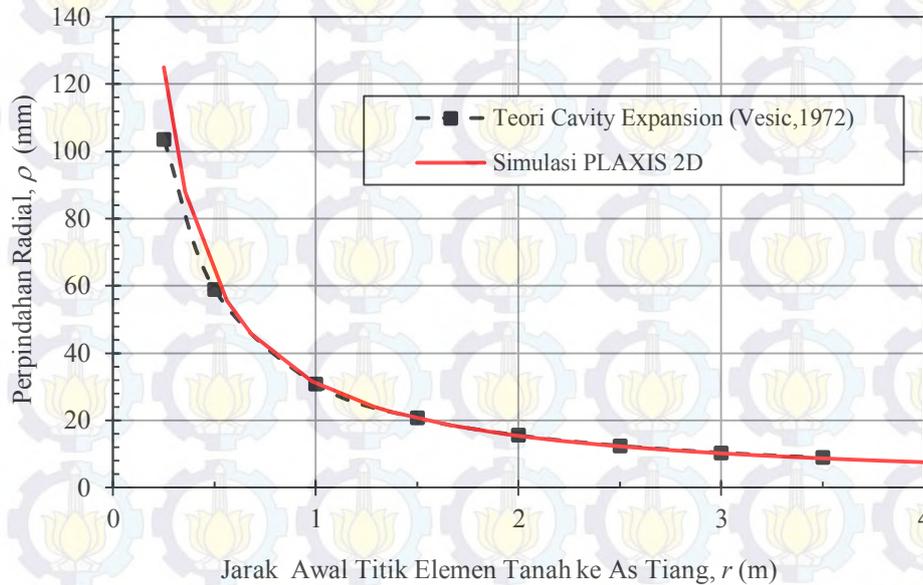
Hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal ini diperoleh dari PLAXIS 2D dengan jaring elemen yang halus. Parameter tanah pada simulasi ini berdasarkan data tanah BM1, BM2, BM3 (Tabel 3.3, 3.4, 3.5, dan 3.6) dan Geometri dimodelkan seperti pada Gambar 3.6 yang sebelumnya dibahas pada Sub-Bab 3.5.2 dengan diameter tiang 50 cm dan panjang tiang yaitu 30 m.



Gambar 4.11 Perpindahan radial tanah di sekitar tiang ( $d=50$  cm) dengan parameter tanah BM1.

Gambar 4.11 adalah grafik distribusi vertikal perpindahan yang menunjukkan hubungan antara kedalaman dengan perpindahan radial tanah di

sekitar tiang pada jarak  $2d$  dan  $4d$  dari pusat tiang dengan nilai rata-rata sekitar 31 mm dan 16 mm yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm dengan parameter tanah BM1.



Gambar 4.12 Hubungan antara jarak  $r$  dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 50 cm dengan parameter tanah BM1.

Gambar 4.12 merupakan distribusi horisontal perpindahan yang menunjukkan hubungan antara jarak dan perpindahan radial permukaan tanah yang diperoleh dari perhitungan / simulasi tiang tunggal diameter 50 cm. Grafik rasio perpindahan tanah yang didapat PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan grafik rasio yang didapat dari perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori *CCE* dari Vesic (1972).

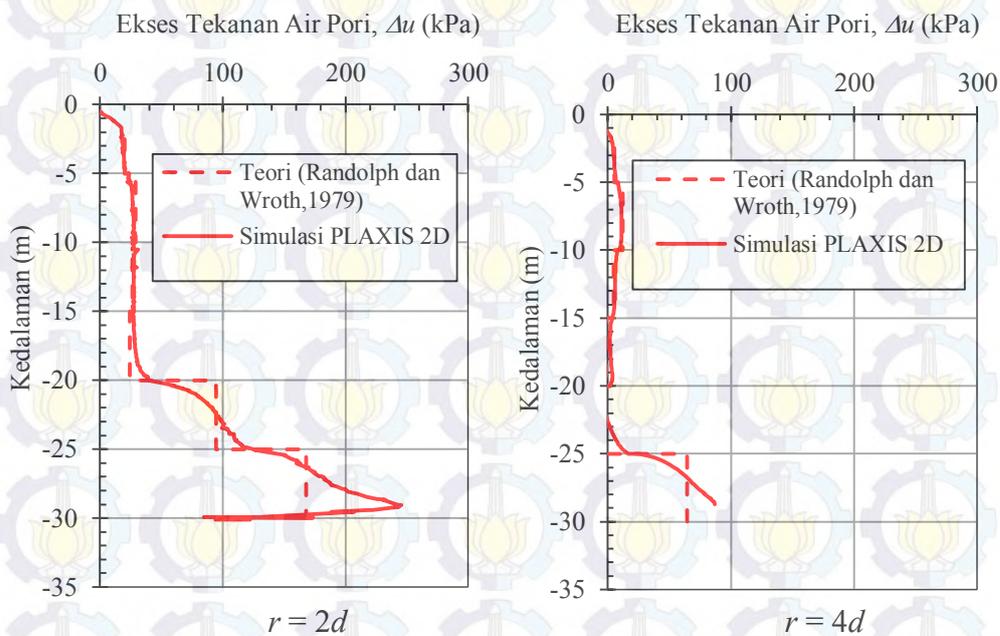
Tabel 4.5 dan 4.6 adalah hasil perhitungan eksese tekanan air pori menggunakan persamaan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979). Saat jarak  $r$  semakin bertambah maka eksese tekanan air pori juga semakin bertambah. Dari Tabel 4.5 dan 4.6 tersebut dapat dilihat bahwa besarnya nilai eksese tekanan air pori maksimum dan rasio eksese tekanan air pori sangat dipengaruhi oleh nilai kohesi  $C_u$  dan juga indek kekakuan  $G / C_u$ .

Tabel 4.5 Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori  $\Delta u$  (Kedalaman 7,5 m)

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$<br>(m) | Data Tanah BM1<br>$C_u = 12$ kPa<br>$G/C_u = 179$ |                        | Data Tanah BM2<br>$C_u = 4$ kPa<br>$G/C_u = 88$ |                        | Data Tanah BM3<br>$C_u = 9$ kPa<br>$G/C_u = 198$ |                        |
|-------|---------|------------|---|------------------------|---|------------------------|--|------------------------|
|       |         |            | $\Delta u$<br>(kPa)                               | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $\Delta u$<br>(kPa)                             | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $\Delta u$<br>(kPa)                              | $\frac{\Delta u}{C_u}$ |
| 0,5   | 1       | 0,25       | 62,25   | 5,19                   | 17,91   | 4,48                   | 47,59  | 5,29                   |
| 1     | 2       | 0,5        | 45,61   | 3,80                   | 12,36   | 3,09                   | 35,12  | 3,90                   |
| 2     | 4       | 1          | 28,98   | 2,41                   | 6,82  | 1,70                   | 22,64  | 2,52                   |
| 3     | 6       | 1,5        | 19,25   | 1,60                   | 3,58  | 0,89                   | 15,34  | 1,70                   |
| 4     | 8       | 2          | 12,34   | 1,03                   | 1,27  | 0,32                   | 10,16  | 1,13                   |
| 5     | 10      | 2,5        | 6,99  | 0,58                   | 0,51  | 0,13                   | 6,15   | 0,68                   |

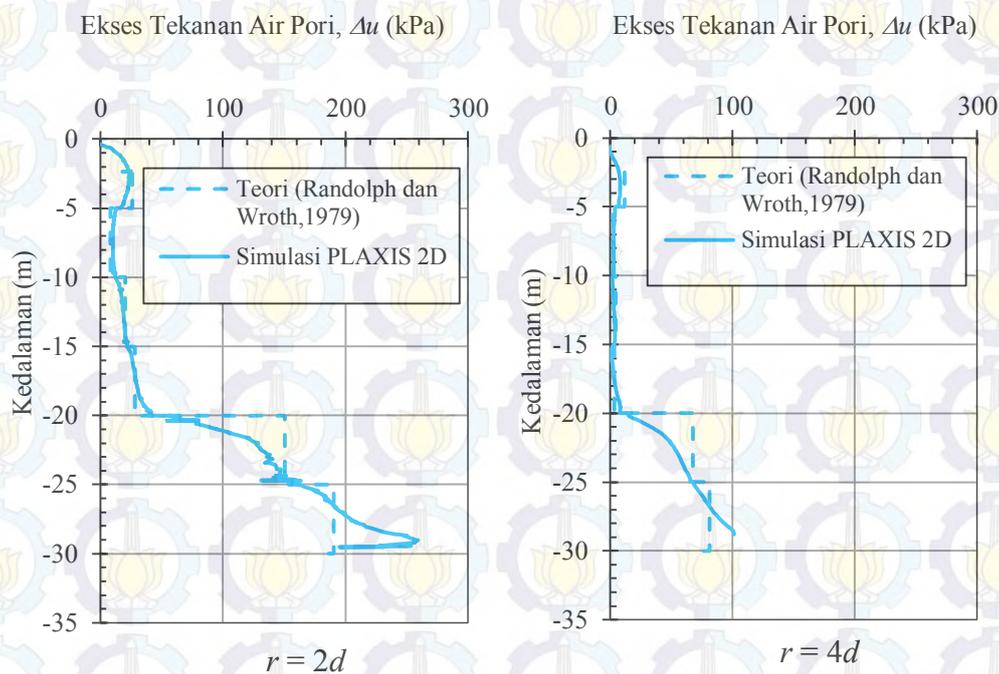
Tabel 4.6 Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori  $\Delta u$  (Kedalaman 12,5 m)

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$<br>(m) | Data Tanah BM1<br>$C_u = 15$ kPa<br>$G/C_u = 87$ |                        | Data Tanah BM2<br>$C_u = 11$ kPa<br>$G/C_u = 85$ |                        | Data Tanah BM3<br>$C_u = 13$ kPa<br>$G/C_u = 84$ |                        |
|-------|---------|------------|--|------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
|       |         |            | $\Delta u$<br>(kPa)                              | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $\Delta u$<br>(kPa)                              | $\frac{\Delta u}{C_u}$ | $\Delta u$<br>(kPa)                              | $\frac{\Delta u}{C_u}$ |
| 0,5   | 1       | 0,25       | 66,99  | 4,47                   | 48,87  | 4,44                   | 57,60  | 4,43                   |
| 1     | 2       | 0,5        | 46,19  | 3,08                   | 33,62  | 3,06                   | 39,58  | 3,04                   |
| 2     | 4       | 1          | 25,40  | 1,69                   | 18,37  | 1,67                   | 21,56  | 1,66                   |
| 3     | 6       | 1,5        | 13,24  | 0,88                   | 9,45   | 0,86                   | 11,01  | 0,85                   |
| 4     | 8       | 2          | 4,61   | 0,31                   | 3,12   | 0,28                   | 3,54   | 0,27                   |
| 5     | 10      | 2,5        | 2,09   | 0,14                   | 1,79   | 0,16                   | 2,27   | 0,17                   |



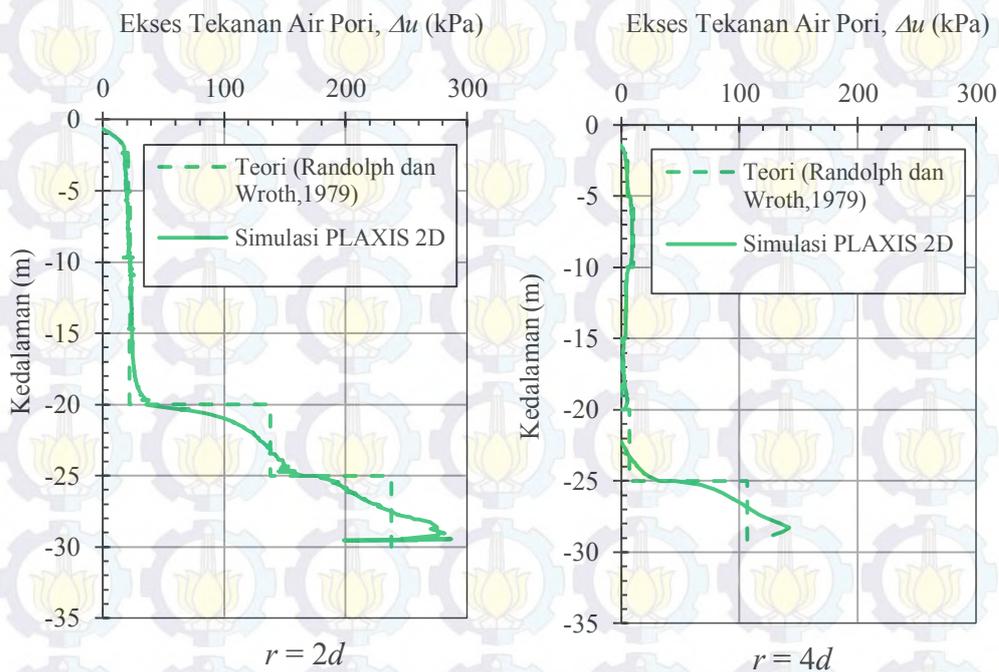
Gambar 4.13 Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 50$  cm) dengan parameter tanah BM1

Gambar 4.13 menunjukkan hubungan antara kedalaman dan ekses tekanan air pori di sekitar tiang berdiameter 50 cm dengan panjang tiang  $L$  adalah 30 m yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1. Tren grafik pada gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai ekses tekanan air pori di setiap kedalaman dipengaruhi oleh parameter setiap lapisan tanah, seperti yang diuraikan pada perhitungan dengan menggunakan persamaan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979) bahwa parameter  $C_u$  dan  $G / C_u$  berpengaruh terhadap besarnya nilai ekses tekanan air pori di sekitar tiang. Grafik distribusi vertikal ekses tekanan air pori tersebut cukup sesuai saat dibandingkan dengan grafik yang diperoleh dari perhitungan yang menggunakan persamaan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979). Dari Gambar 4.13 tersebut didapat nilai ekses tekanan air pori pada jarak  $2d$  dan  $4d$  untuk kedalaman 7,5 m adalah 25,6 kPa dan 11,21 kPa, sedangkan untuk kedalaman 12,5m adalah 27,56 kPa dan 5,96 kPa.



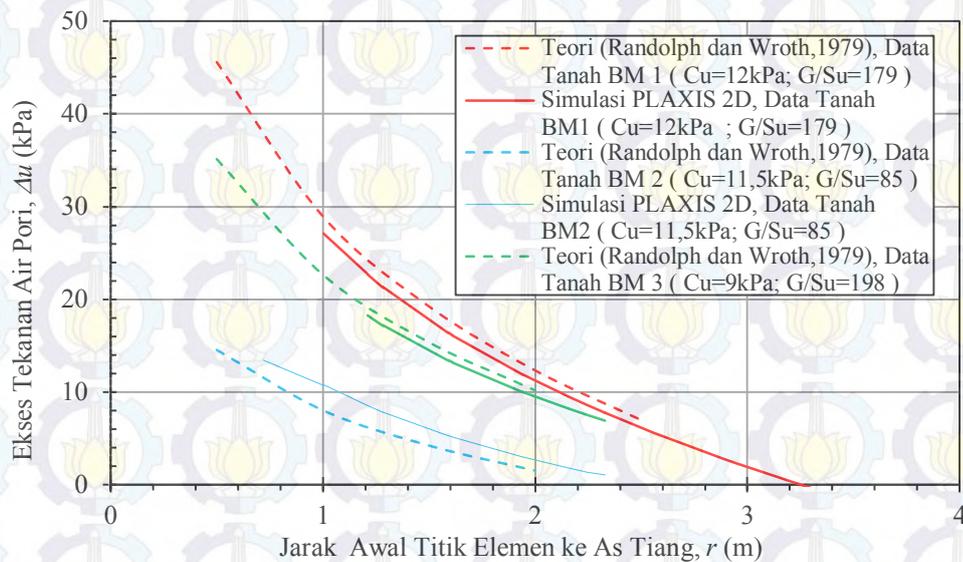
Gambar 4.14 Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 50$  cm) dengan parameter tanah BM2

Dari Gambar 4.14 dapat dilihat grafik ekses tekanan air pori di sekitar tiang berdiameter 50 cm dengan panjang tiang  $L$  adalah 30 m yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM2. Tren ekses tekanan air pori juga bervariasi tergantung dari parameter tanah seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.13. Nilai ekses tekanan air pori pada jarak  $2d$  dan  $4d$  untuk kedalaman 7,5 m adalah 10,22 kPa dan 2,56 kPa sedangkan untuk kedalaman 12,5 m adalah 18,73 kPa dan 3,04 kPa

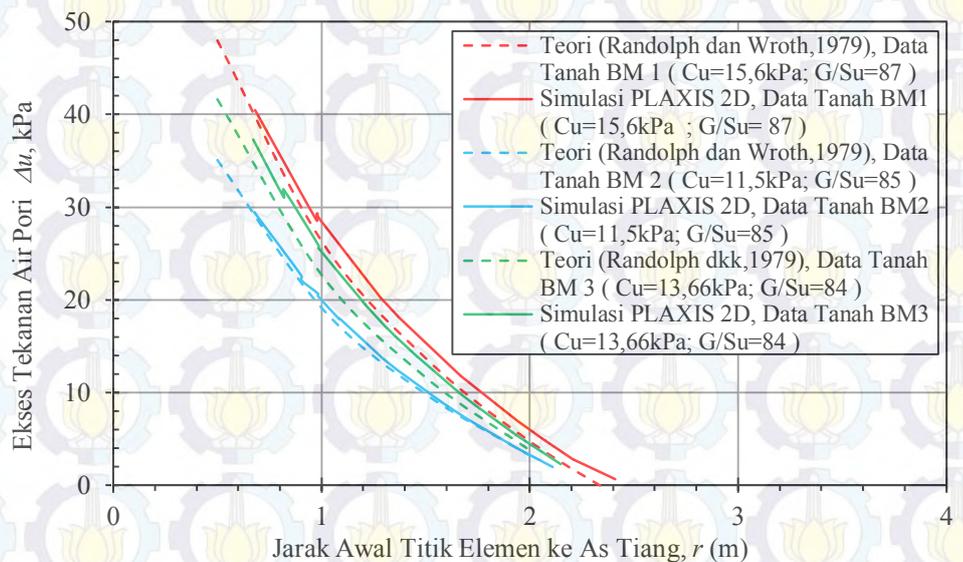


Gambar 4.15 Ekses tekanan air pori di sekitar tiang ( $d = 50$  cm) dengan parameter tanah BM3

Dari Gambar 4.15 dapat dilihat grafik ekses tekanan air pori yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM3. Tren ekses tekanan air pori bervariasi tergantung dari parameter tanah seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.13. Nilai ekses tekanan air pori pada jarak  $2d$  dan  $4d$  untuk kedalaman 7,5 m adalah 20,66 kPa dan 9,35 kPa sedangkan untuk kedalaman 12,5 m adalah 23,69 kPa dan 4,18 kPa.



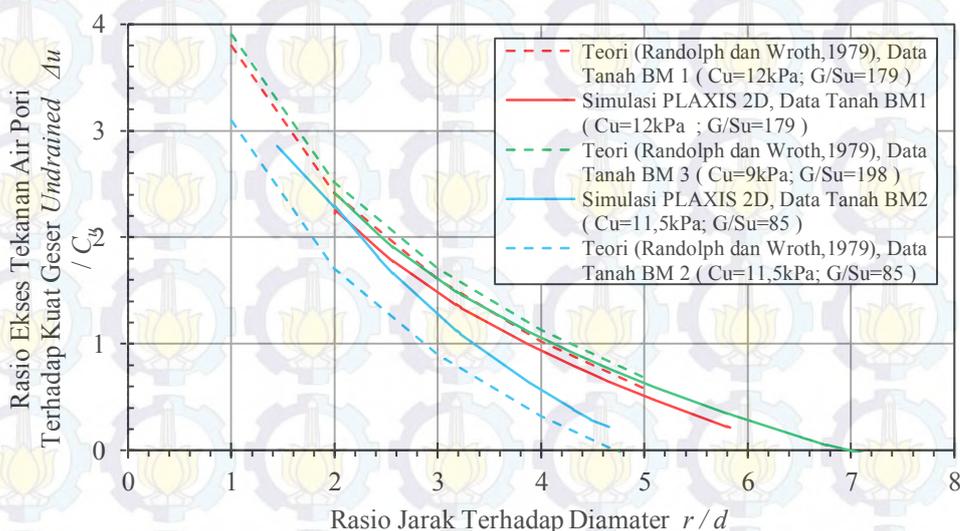
Gambar 4.16 Hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori di kedalaman 7,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.



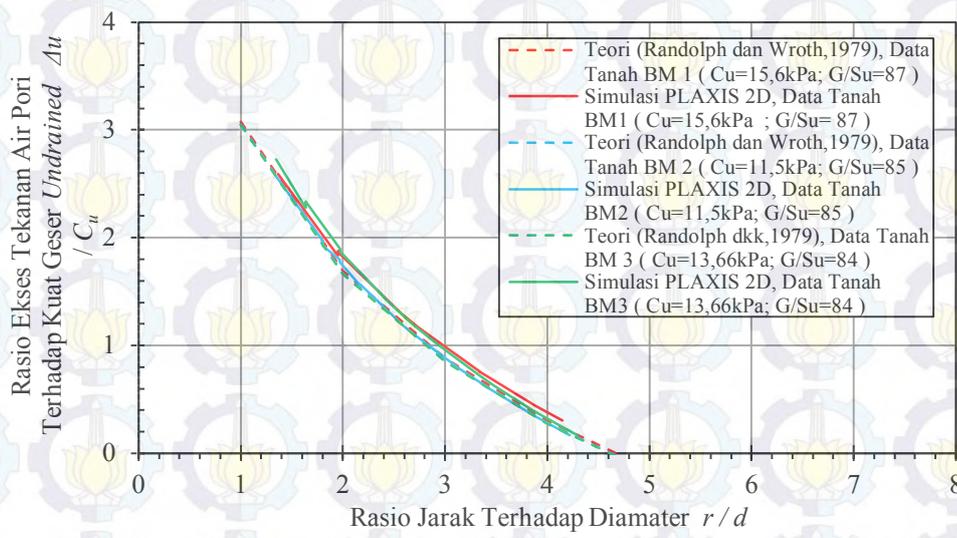
Gambar 4.17 Hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori di kedalaman 12,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.

Gambar 4.16 dan 4.17 merupakan perbandingan grafik distribusi horisontal yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori yang diperoleh dari simulasi tiang tunggal dengan data tanah BM1, BM2, dan BM3 di kedalaman 7,5 m dan 12,5 m. Grafik tersebut terlihat cukup sesuai dengan perhitungan ekses tekanan air pori berdasarkan teori *CCE* dari Randolph dan

Wroth (1979) dengan selisih perbedaan kurang dari 20%. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi parameter tanah terhadap nilai eksese tekanan air pori. Jika parameter kohesi  $C_u$  semakin besar maka eksese tekanan air pori maksimum juga akan semakin besar. selain itu nilai eksese tekanan air pori juga dipengaruhi indek kekakuan  $G / S_u$ . Nilai eksese tekanan air pori menjadi semakin kecil sering dengan meningkatnya jarak  $r$  dari pusat tiang dan kecil atau nol pada  $r = r_p$ , notasi  $r_p$  adalah radius batas antara zona plastis dan elastis di sekitar tiang. Gambar 4.16 menunjukkan bahwa untuk tanah dengan paramater  $G / C_u = 179$  maka nilai radius batas antara zona plastis dan elastis  $r_p$  adalah sekitar 3,2 m, sedangkan untuk tanah dengan paramater  $G / C_u = 88$  dan 198 didapat nilai radius batas antara zona plastis yaitu sekitar 2,4 m dan 3,4 m. Dari Gambar 4.17 juga menunjukkan bahwa untuk tanah dengan paramater  $G / C_u$  yang hampir sama menghasilkan nilai radius batas antara zona plastis dan elastis  $r_p$  juga hampir sama pula, hal ini sesuai dengan persamaan mengenai radius batas antara zona plastis dan elastis  $r_p$  dari Vesic (1972) dimana nilai  $r_p$  sangat dipengaruhi oleh parameter tanah  $G / C_u$ , selain itu radius batas antara zona plastis dan elastis juga dipengaruhi oleh dimensi tiang itu sendiri.



Gambar 4.18 Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio eksese tekanan air pori terhadap kuat geser *undrained* di kedalaman 7,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.

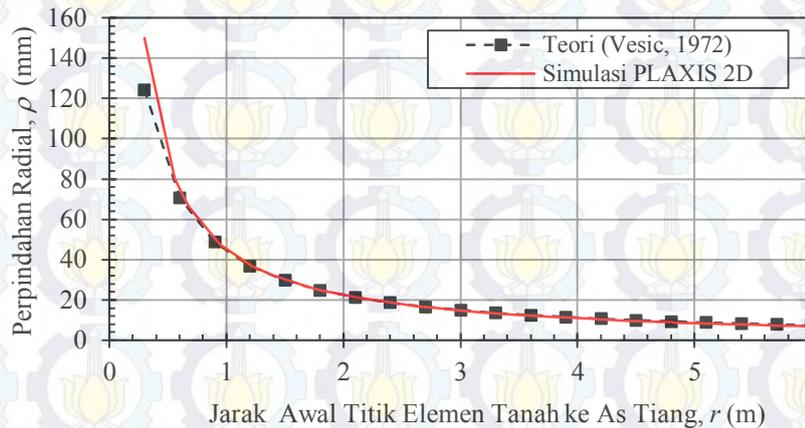


Gambar 4.19 Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter dan rasio ekses tekanan air pori terhadap kuat geser *undrained* di kedalaman 12,5 m, hasil dari simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3.

Gambar 4.18 dan 4.19 menunjukkan hubungan antara rasio jarak partikel ke as tiang terhadap diameter tiang dan rasio ekses tekanan air pori terhadap kuat geser *undrained* yang diperoleh dari hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal dengan parameter tanah BM1, BM2, dan BM3 pada kedalaman 7,5 m dan 12,5 m. Grafik rasio ekses tekanan air pori yang didapat PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan grafik rasio yang didapat dari perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori *CCE* dari Randolph dan Wroth (1979). Dari gambar tersebut juga dapat dilihat perbandingan antara variasi parameter tanah. Pada rasio jarak radial  $r/d$  dan  $G/C_u$  yang sama rasio ekses tekanan air pori memiliki nilai yang sama (tetap) untuk setiap variasi kohesi  $C_u$ , meskipun nilai ekses tekanan air pori di sekitar tiang akan semakin besar saat kohesi  $C_u$  bertambah besar. Gambar 4.18 menunjukkan grafik distribusi horisontal rasio ekses tekanan air pori yang tidak sama antara satu dengan yang lain, hal ini karena memiliki parameter  $G/C_u$  yang berbeda-beda, sedangkan Gambar 4.19 menunjukkan grafik distribusi horisontal rasio ekses tekanan air pori yang cukup sama antara satu dengan yang lain, hal ini karena memiliki parameter  $G/C_u$  yang hampir sama, jadi dapat dikatakan bahwa nilai rasio ekses tekanan air pori dipengaruhi oleh parameter  $G/C_u$ .

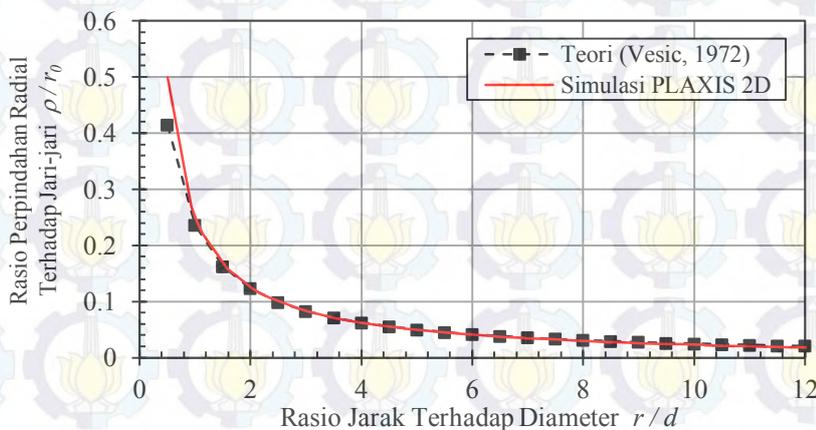
### 4.1.3 Perbandingan Simulasi Tiang Tunggal 2D dengan Data Penelitian dari Pestana (2002)

Seperti yang sebelumnya dibahas pada Sub-Bab 3.5.3, geometri simulasi ini dimodelkan di dalam PLAXIS 2D berdasarkan dari data Pestana (2002) dengan diameter tiang adalah 60 cm dan panjang tiang adalah 36 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan parameter tanah seperti pada Tabel 3.7.



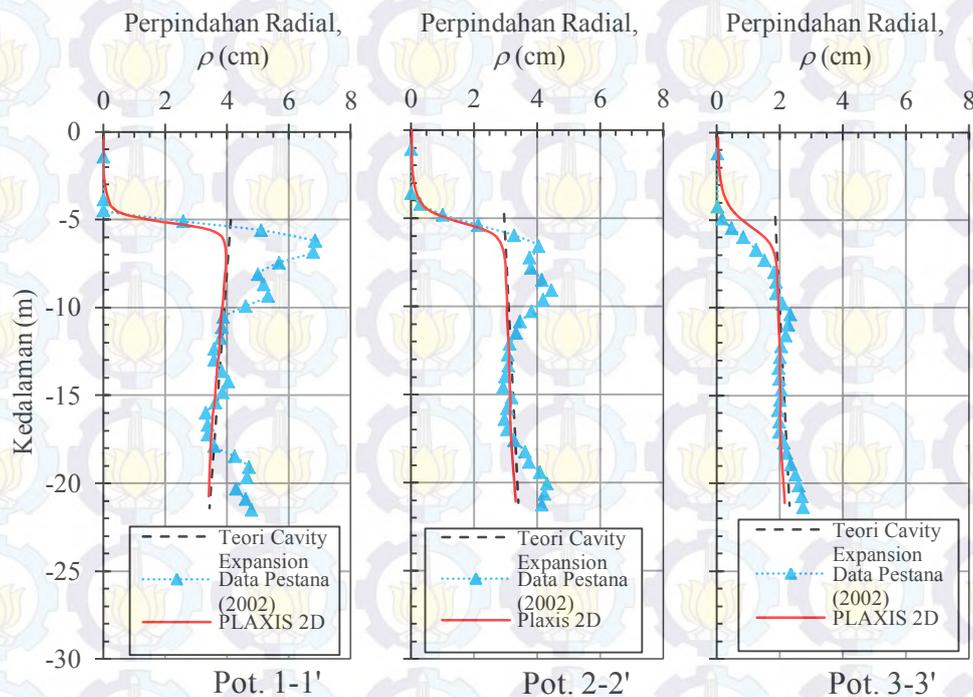
Gambar 4.20 Hubungan antara jarak  $r$  dan perpindahan radial tanah, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 60 cm.

Gambar 4.20 menunjukkan hubungan antara jarak awal titik elemen tanah ke as tiang ( $r$ ) dan perpindahan radial, dari grafik gambar tersebut dapat dilihat bahwa perpindahan radial semakin menurun saat jarak  $r$  semakin meningkat. perpindahan radial yang didapat PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan hasil perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori CCE.



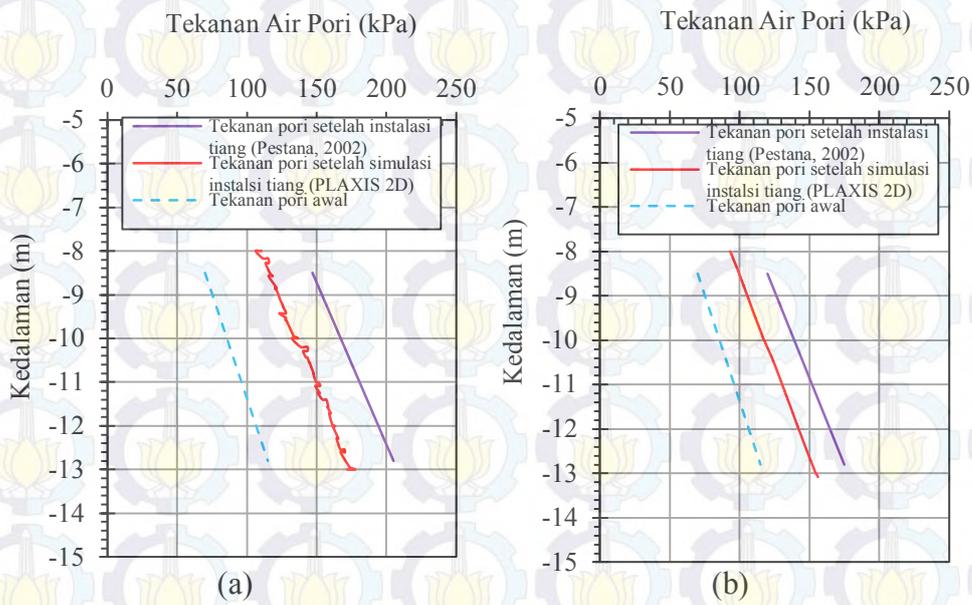
Gambar 4.21 Hubungan antara rasio jarak terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan radial terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi tiang tunggal diameter 60 cm.

Gambar 4.21 menunjukkan hubungan antara rasio jarak terhadap diameter ( $r/d$ ) dan rasio perpindahan radial terhadap jari-jari tiang ( $\rho/r_0$ ), dari grafik gambar tersebut dapat dilihat bahwa rasio perpindahan radial ( $\rho/r_0$ ) semakin menurun saat rasio jarak ( $r/d$ ) semakin meningkat.

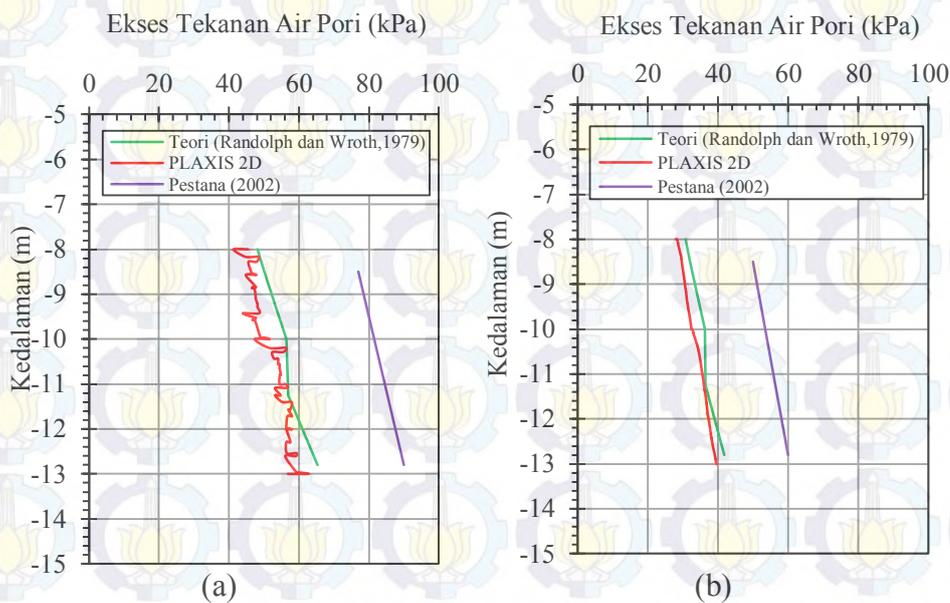


Gambar 4.22 Perbandingan perpindahan radial tanah antara hasil simulasi tiang tunggal (PLAXIS 2D) dan data Pestana et al (2002)

Gambar 4.22 menunjukkan hubungan antara kedalaman dan perpindahan radial di titik / garis potoangan 1-1', 2-2', dan 3-3' yang diperoleh dari hasil simulasi PLAXIS 2D. Posisi titik / potongan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4 pada Sub-Bab 3.5.3. Hasil simulasi tersebut sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE* dari Vesic, serta memberikan perpindahan radial yang cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Pestana (2012) dengan selisih perbedaan kurang dari 10%, namun perbedaan antara kedalaman 5 hingga 9 m cukup besar ( $> 10\%$ ), hal ini karena kondisi batas, yaitu *preaugering* dan pengisian *casing* serta sedikit penyesuaian pada keselarasan tiang dalam beberapa meter pertama saat pemancangan seperti yang dijelaskan oleh Pestana (2002).



Gambar 4.23 Nilai tekanan air pori hasil simulasi tiang tunggal dan data dari pestana 2002. (a)  $r = 0,9 \text{ m}$ , (b)  $r = 1,5 \text{ m}$ .



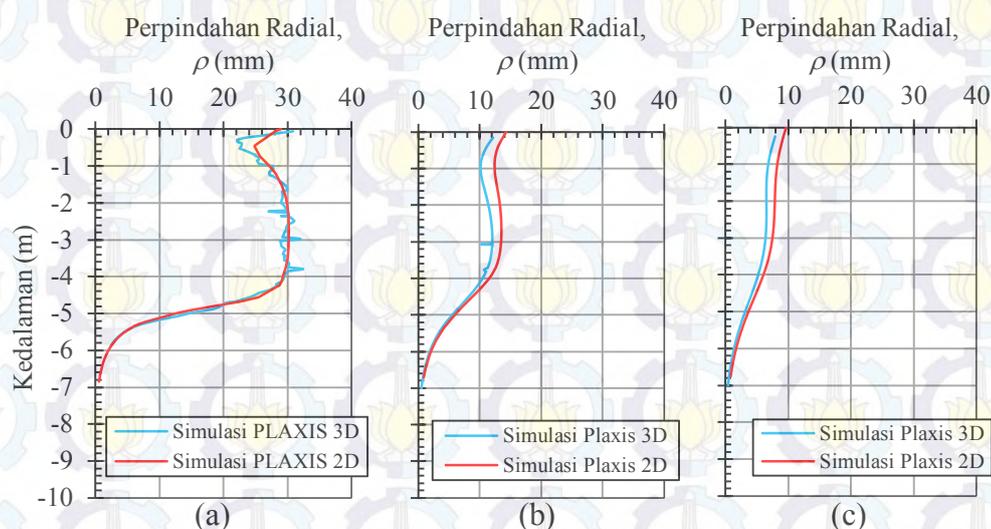
Gambar 4.24 Ekses tekanan air pori antara hasil simulasi tiang tunggal dan data dari pestana 2002. (a)  $r = 0,9 \text{ m}$ , (b)  $r = 1,5 \text{ m}$

Gambar 4.23 dan 4.24 menunjukkan peningkatan dan ekses tekanan air pori, dimana hasil dari simulasi PLAXIS 2D memberikan nilai yang sesuai saat dibandingkan dengan perhitungan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979) dengan selisih perbedaan kurang dari 10%. Pada saat dibandingkan dengan data dari Pestana (2002) untuk nilai ekses tekanan air pori pada kedalaman 8,5 m

dan 12,5 m dengan jarak  $r = 0,9$  m dan 1,5 m dari pusat tiang terdapat selisih perbedaan sekitar 20% s/d 35%, hal ini karena penentuan nilai parameter kohesi  $C_u$  dalam simulasi ini ditentukan berdasarkan korelasi sedangkan pada kondisi sebenarnya parameter  $C_u$  bisa memiliki nilai yang berbeda dari yang diperoleh dari korelasi. Parameter  $C_u$  juga berpengaruh dengan nilai indek kekakuan  $G / C_u$  sehingga juga berpengaruh pada nilai eksese tekanan air pori dan radius zona plastis di sekitar tiang, disamping itu faktor-faktor lain dalam kondisi sebenarnya dan juga pemilihan model dalam analisis juga dapat memberikan perbedaan antara hasil analisis dengan kondisi sebenarnya. Terlepas dengan adanya selisih perbedaan tersebut, distribusi vertikal eksese tekanan air pori yang diperoleh dari PLAXIS 2D dan dari perhitungan dengan persamaan dari Randolph dan Wroth (1979) memberikan tren yang serupa dengan data dari Pestana (2002). Pada saat jarak radial  $r$  semakin jauh dari titik tiang maka nilai eksese tekanan air pori semakin mengecil.

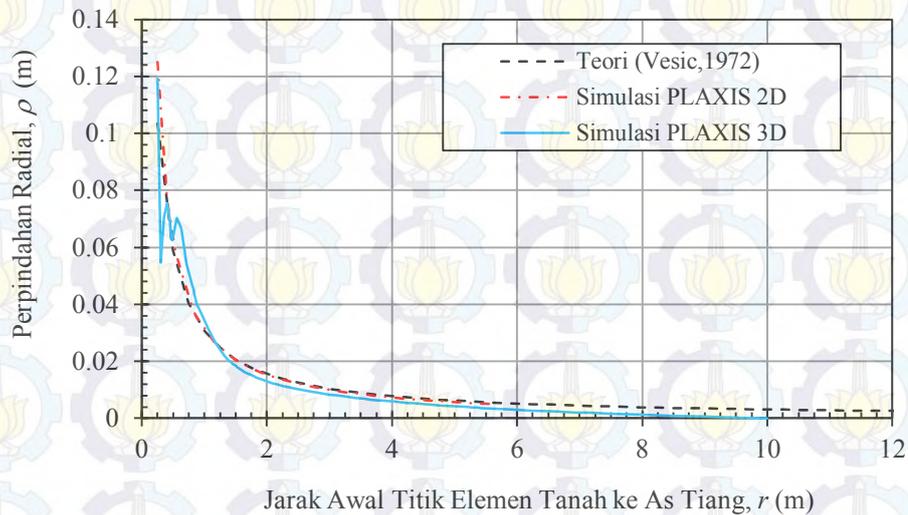
#### 4.1.4 Perbandingan Simulasi Tiang Tunggal PLAXIS 2D dan PLAXIS 3D

Hasil perhitungan / simulasi tiang tunggal ini diperoleh dari PLAXIS 3D 2012 dengan jaring elemen yang cukup halus di dekat. Parameter tanah dan geometri dimodelkan seperti pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.8 dengan diameter 50 cm dan panjang 5 m yang sebelumnya dibahas pada Sub-Bab 3.5.4.



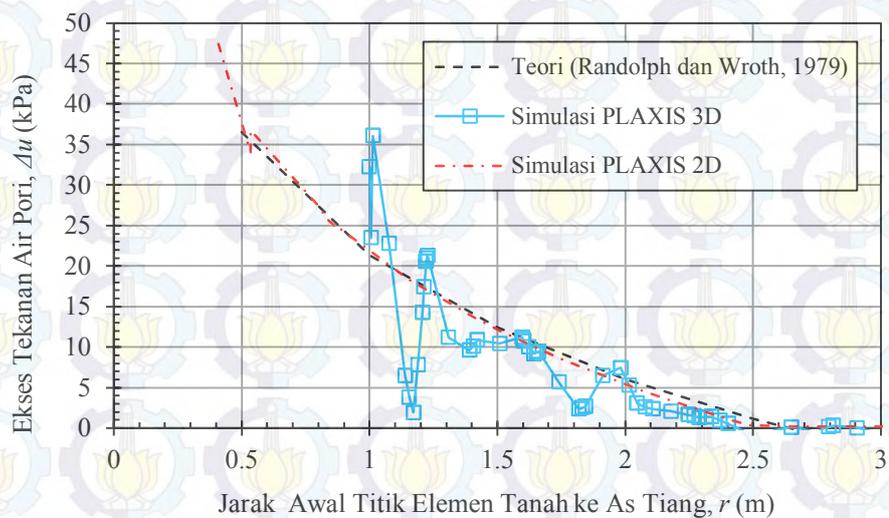
Gambar 4.25 Perpindahan radial tanah, hasil simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan 3D.

Gambar 2.25 menunjukkan antara kedalaman dan perpindahan radial pada jarak  $2d$ ,  $4d$ , dan  $6d$  dari as tiang. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa perpindahan radial dari PLAXIS 2D terlihat sesuai dengan hasil PLAXIS 3D.



Gambar 4.26 Hubungan antara jarak  $r$  dan perpindahan radial permukaan tanah, hasil simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan 3D.

Gambar 4.26 menunjukkan hubungan antara jarak  $r$  dan perpindahan radial, dari gambar tersebut dapat dilihat perpindahan dari PLAXIS 2D dan 3D terlihat sesuai dengan hasil perhitungan perpindahan radial tanah berdasarkan teori *CCE* dari Vesic (1972) dengan selisih perbedaan rata-rata kurang dari 10%.



Gambar 4.27 Hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori di kedalaman  $0,5L$ , hasil simulasi tiang tunggal PLAXIS 2D dan 3D.

Gambar 4.27 adalah grafik distribusi horisontal yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r$  dan ekses tekanan air pori. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa hasil simulasi PLAXIS 3D secara rata – rata relatif cukup sesuai dari PLAXIS 2D maupun dengan perhitungan berdasarkan teori *CCE* dari Randolph dan Wroth (1979), namun pada jarak  $r < 1,5$  m, grafik ekses tekanan air pori dari PLAXIS 3D terlihat kurang halus terutama di dekat tiang, padahal pada Gambar 4.26 dapat lihat bahwa dengan jaring elemen yang sama grafik perpindahan radial terlihat lebih halus bila dibandingkan dengan grafik ekses tekanan air pori (Gambar 4.27), hal ini karena hasil tegangan pada PLAXIS sangat sensitif terhadap tingkat kehalusan jaring elemen, jadi hasil tegangan tersebut akan lebih baik jika tingkat kehalusan jaring elemen cukup sesuai untuk dapat menggambarkan hasil tegangan itu sendiri, dengan kata lain semakin besar tegangan yang akan dihasilkan pada elemen maka diperlukan jaring elemen yang semakin halus untuk menghasilkan tegangan tersebut agar dapat tergambar lebih baik.

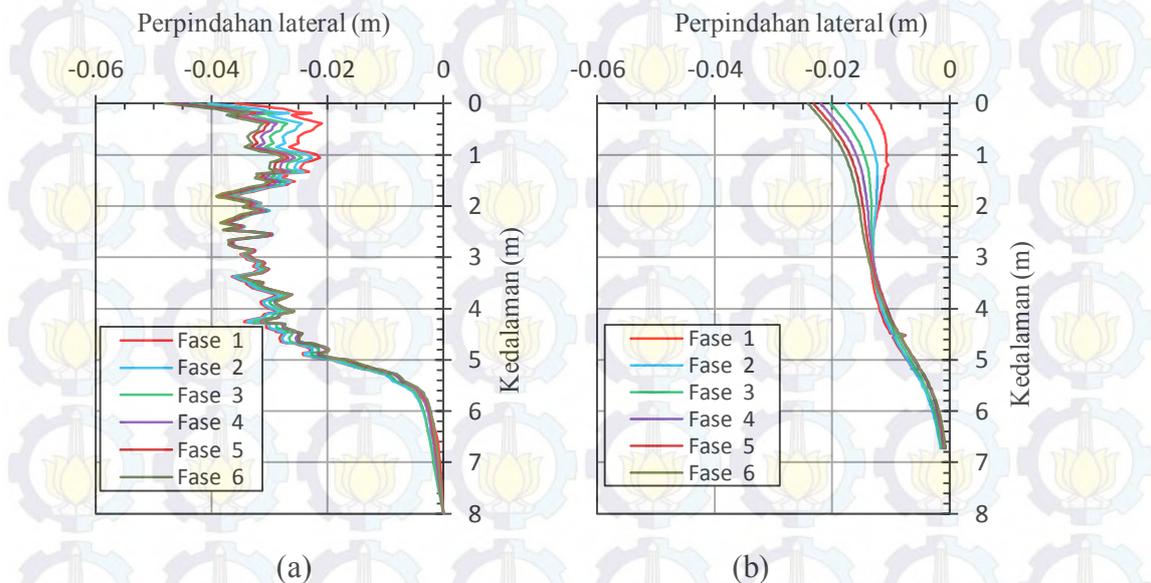
#### **4.2. Pemodelan Kelompok Tiang 3D dengan Parameter Tanah Homogen**

Hasil Pemodelan kelompok tiang dalam penelitian ini diperoleh dari beberapa simulasi kelompok tiang dengan parameter tanah homogen menggunakan PLAXIS 3D yang dijelaskan sebelumnya pada Bab 3. Simulasi ini menghasilkan perpindahan lateral tanah dan ekses tekanan air pori di sekitar tiang. Hasil dari simulasi fase-1 ( tiang P1) ini akan dibandingkan dengan perhitungan berdasarkan teori *CCE* sebagai verifikasi model.

##### **4.2.1 Hasil Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 1 x 6 (6 Tiang)**

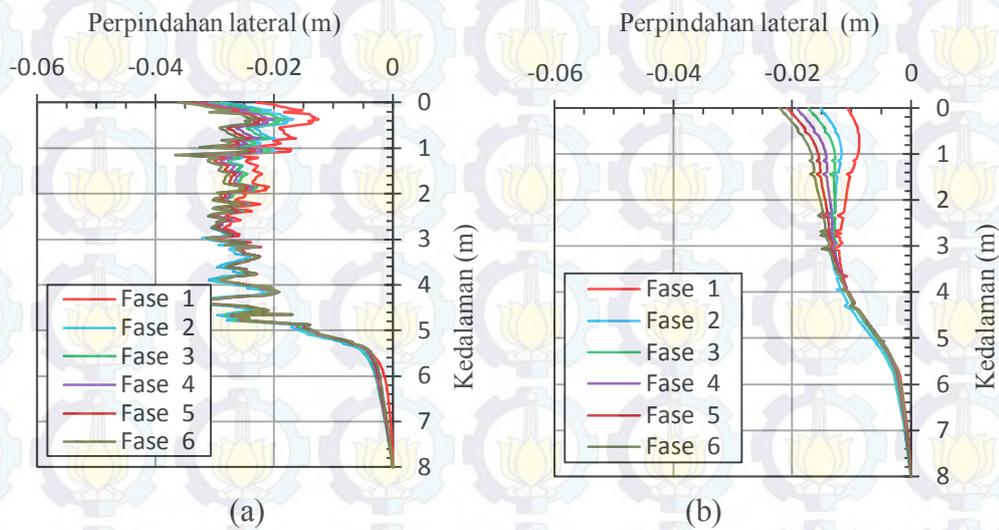
Hasil simulasi kelompok tiang dengan formasi 1 x 6 diperoleh dari PLAXIS 3D dengan jaring elemen global *medium* kemudian diperhalus di area yang berada dekat dengan tiang. Parameter tanah dan geometri dimodelkan seperti pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.10 dengan panjang tiang 5 m dan variasi diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm, model tiang dimodelkan dalam satu baris sebanyak 6 buah dengan spasi antar tiang  $3d$  seperti yang dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.6.1. Arah pemancangan tiang menuju titik B dan meninggalkan

titik A, dimana jarak  $r_A$  dan  $r_B$  bervariasi antara  $3d$  sampai dengan  $24d$  dari titik tiang P1, sehingga perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori ke arah titik A dan B dapat digambarkan dalam grafik dan dapat dibandingkan untuk setiap fase mulai dari fase-1 (tiang P1) sampai dengan fase-6 (tiang P6).



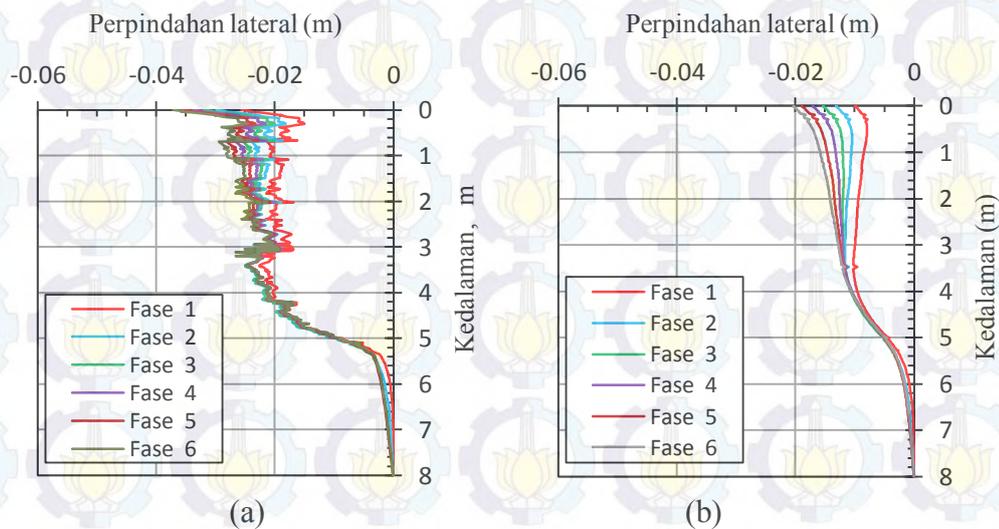
Gambar 4.28 Perpindahan lateral di titik A pada jarak: (a)  $r_A = 2d$ ; (b)  $r_A = 4d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm.

Gambar 4.28 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik A dengan jarak  $r_A = 2d$  dan  $4d$  dari as tiang P1 yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 50 cm. Dari gambar tersebut dapat dilihat tren perpindahan lateral yaitu saat jumlah tiang bertambah maka perpindahan lateral ( $\rho$ ) juga bertambah, sedangkan peningkatan perpindahan lateral ( $\Delta\rho$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin berkurang, hal ini karena arah pemancangan tiang meninggalkan titik A tersebut. Pada saat  $r_A = 2d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 31 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 48 mm. Saat  $r_A = 4d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 16 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 24 mm.



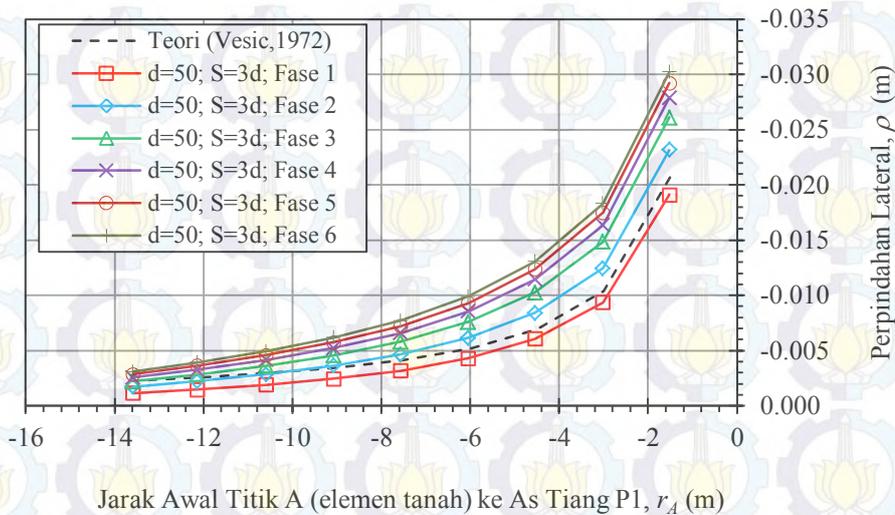
Gambar 4.29 Perpindahan lateral ke arah titik A pada jarak: (a)  $r_A = 2d$  ; (b)  $r_A = 4d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm.

Gambar 4.29 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik A yang diperoleh hasil dari simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 40 cm. Gambar 4.29 ini memberikan juga tren perpindahan lateral seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.28. Pada saat  $r_A = 2d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 25 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 36 mm. Saat  $r_A = 4d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 12 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 22 mm.

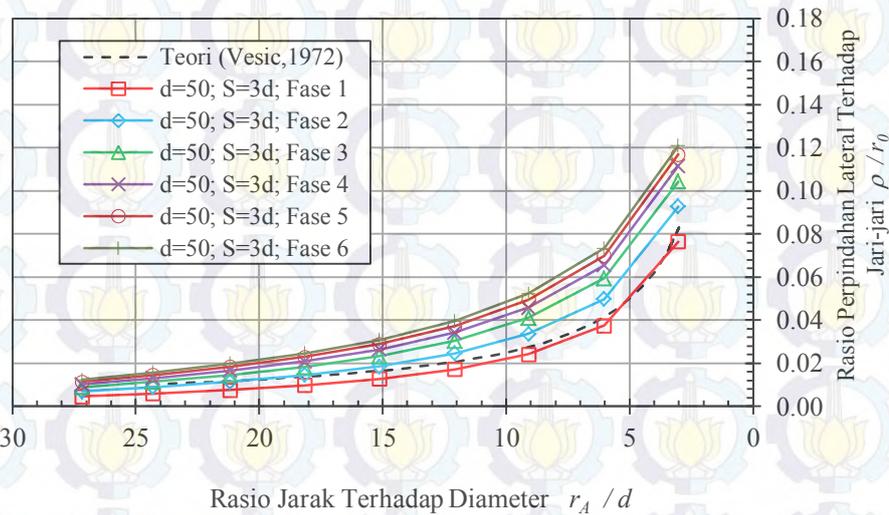


Gambar 4.30 Perpindahan lateral ke arah titik A pada jarak: (a)  $r_A = 2d$  ; (b)  $r_A = 4d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm dan spasi  $3d$ .

Gambar 4.30 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik A yang diperoleh hasil dari simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 40 cm. Gambar 4.30 ini memberikan juga tren perpindahan lateral seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.28. Pada saat  $r_A = 2d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 18 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 30 mm. Saat  $r_A = 4d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 9 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 20 mm.



(a)

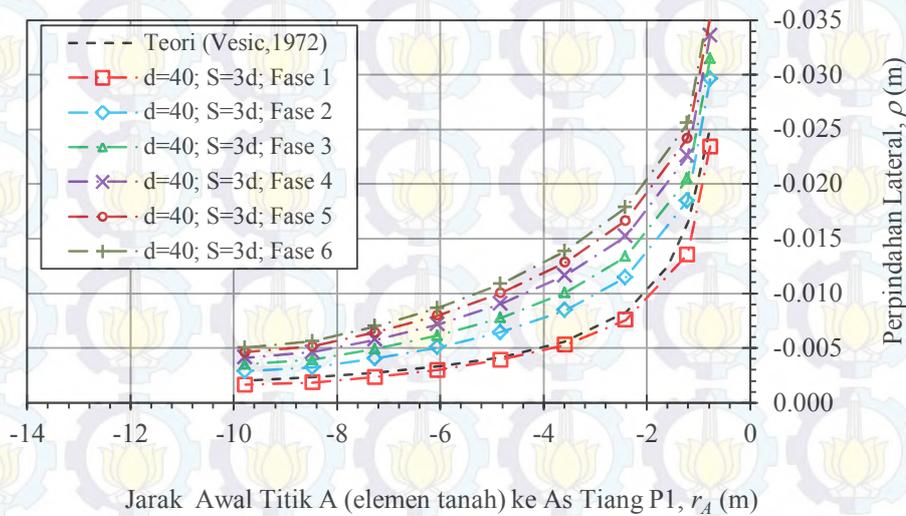


(b)

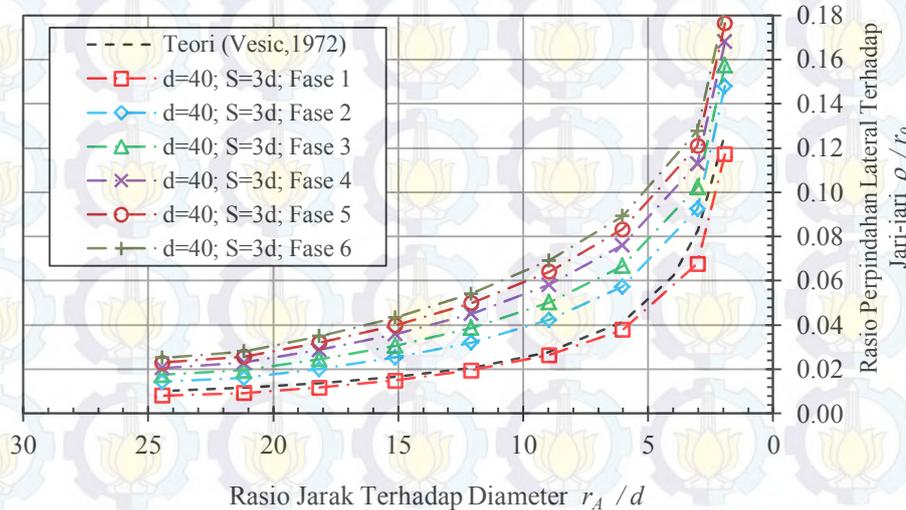
Gambar 4.31 (a) Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_A$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 50 cm dan spasi  $3d$

Gambar 4.31a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_A$  (titik A ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik A yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 50 cm. Tren perpindahan lateral dari gambar tersebut menunjukkan bahwa perpindahan lateral semakin menurun ketika jarak  $r_A$  semakin meningkat, saat jumlah tiang bertambah maka perpindahan lateral tanah ( $\rho$ ) juga bertambah, sedangkan peningkatan perpindahan lateral tanah ( $\Delta\rho$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin berkurang, hal ini karena arah pemancangan tiang meninggalkan titik A tersebut, Perpindahan lateral pada fase-1 (tiang P1) hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE*. Nilai perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A = 3$  m pada fase-1 adalah 9,37 mm kemudian meningkat menjadi 18,32 mm pada fase-6.

Gambar 4.31b menunjukkan hubungan antara rasio jarak  $r_A$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari – jari tiang ke arah titik A yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 50 cm. Tren rasio perpindahan lateral dari gambar tersebut menunjukkan bahwa rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ) semakin menurun ketika rasio jarak ( $r_A / d$ ) semakin meningkat, saat jumlah tiang bertambah maka rasio perpindahan lateral tanah ( $\rho / r_0$ ) juga bertambah, sedangkan peningkatan rasio perpindahan lateral tanah ( $\Delta \rho / r_0$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin berkurang, hal ini karena arah pemancangan tiang meninggalkan titik A tersebut. Rasio perpindahan lateral pada fase-1 (tiang P1) hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE*. Dari gambar tersebut diperoleh rasio perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A = 6d$  pada fase-1 adalah  $0,037r_0$  kemudian meningkat menjadi  $0,073r_0$  pada fase-6.



(a)

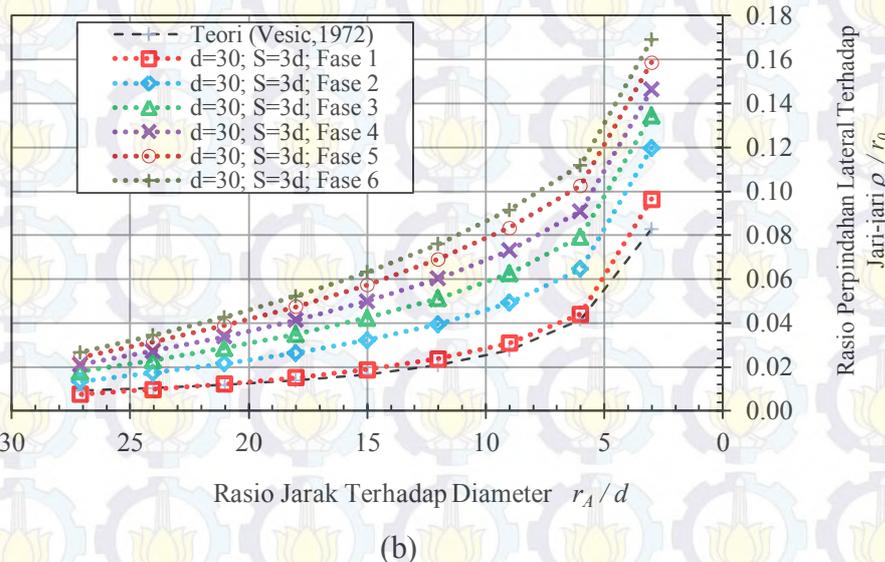
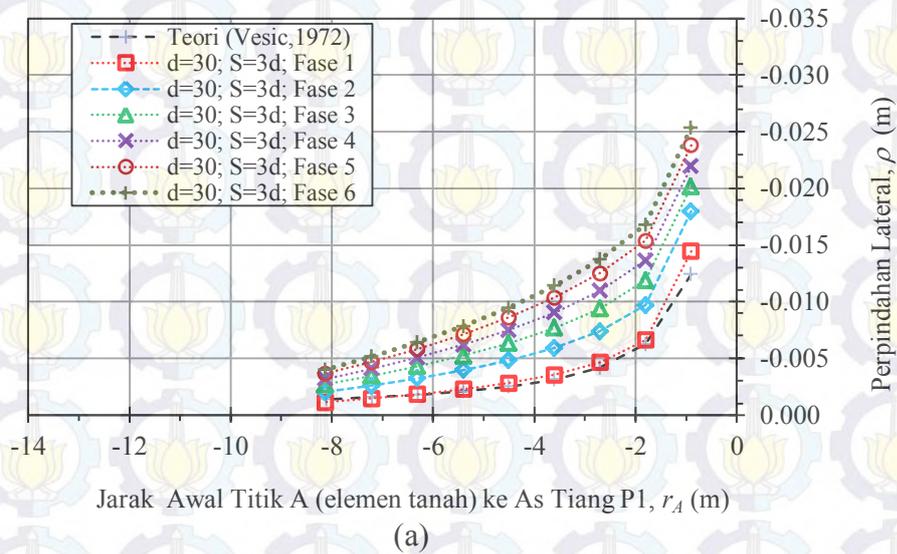


(b)

Gambar 4.32 (a) Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_A$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 40 cm

Gambar 4.32a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_A$  (titik A ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik A yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 40 cm. Gambar tersebut juga memberikan tren perpindahan seperti pada penjelasan Gambar 4.31a. Nilai perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A=2,4$  m pada fase-1 adalah 6,84 mm kemudian meningkat menjadi 16,65 mm pada fase-6. Dari Gambar 4.32b diperoleh nilai rasio perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A=$

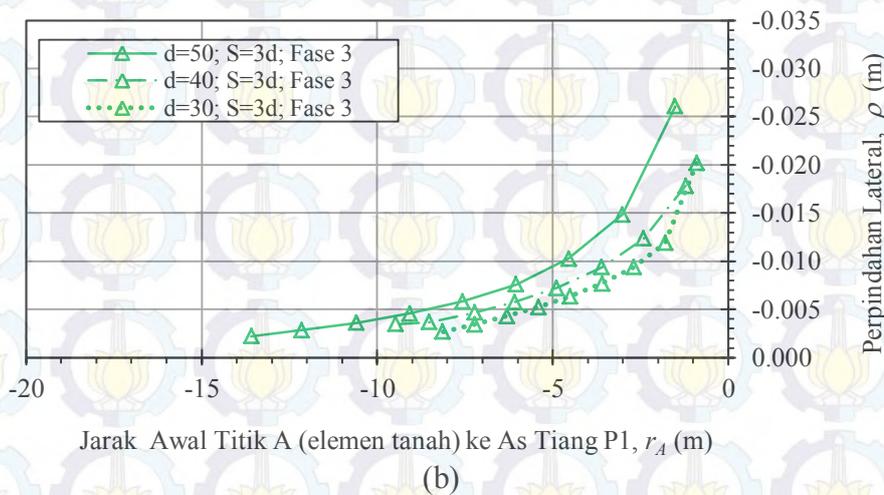
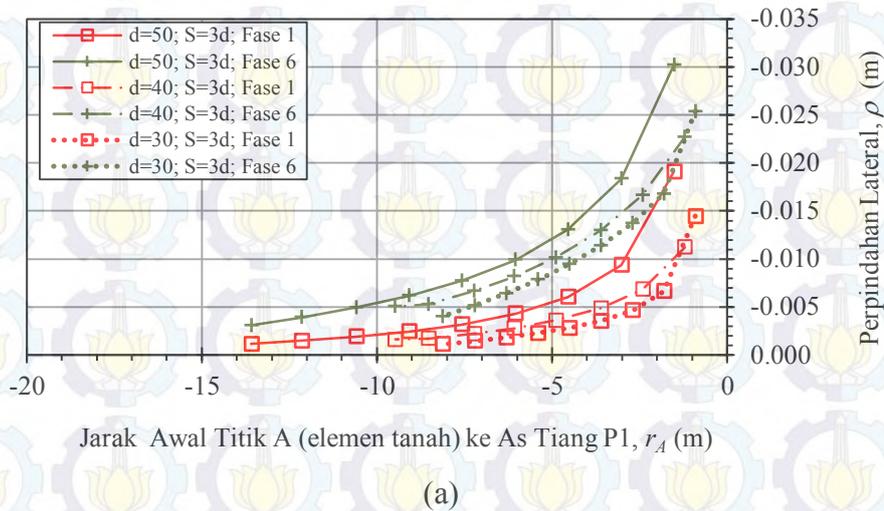
$6d$  pada fase-1 adalah  $0,034r_0$  kemudian meningkat menjadi  $16,65$  mm atau  $0,08 r_0$  pada fase-6.



Gambar 4.33 (a) Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan radial ke arah titik A; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_A$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 30 cm dan spasi  $3d$

Gambar 4.33a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_A$  (titik A ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik A yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 40 cm. Gambar tersebut juga memberikan tren perpindahan seperti pada penjelasan Gambar 4.31a. Nilai

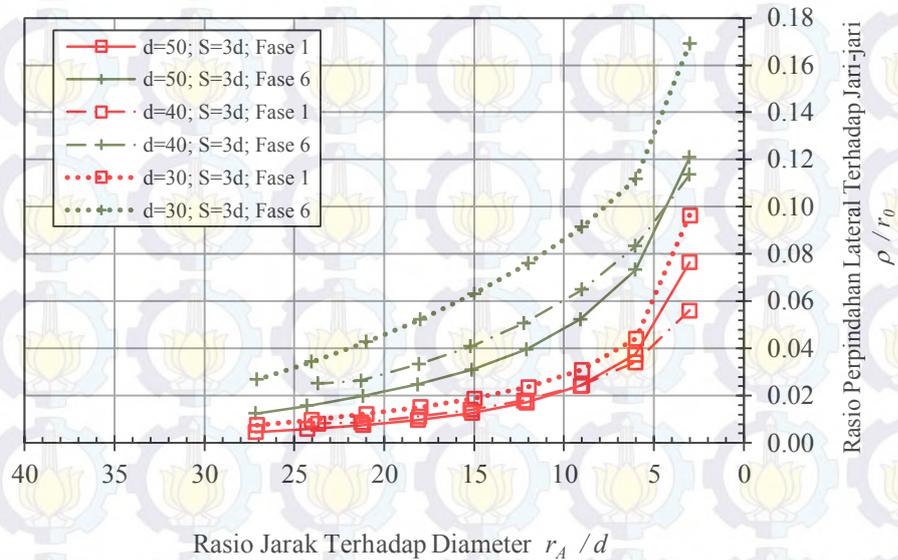
perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A = 1,8$  m pada fase-1 adalah 6,62 mm kemudian meningkat menjadi 16,78 mm pada fase-6. Dari Gambar 4.32b diperoleh nilai rasio perpindahan lateral ke arah titik A untuk jarak  $r_A = 6d$  pada fase-1 adalah  $0,044r_0$  atau kemudian meningkat menjadi  $0,112r_0$  pada fase-6.



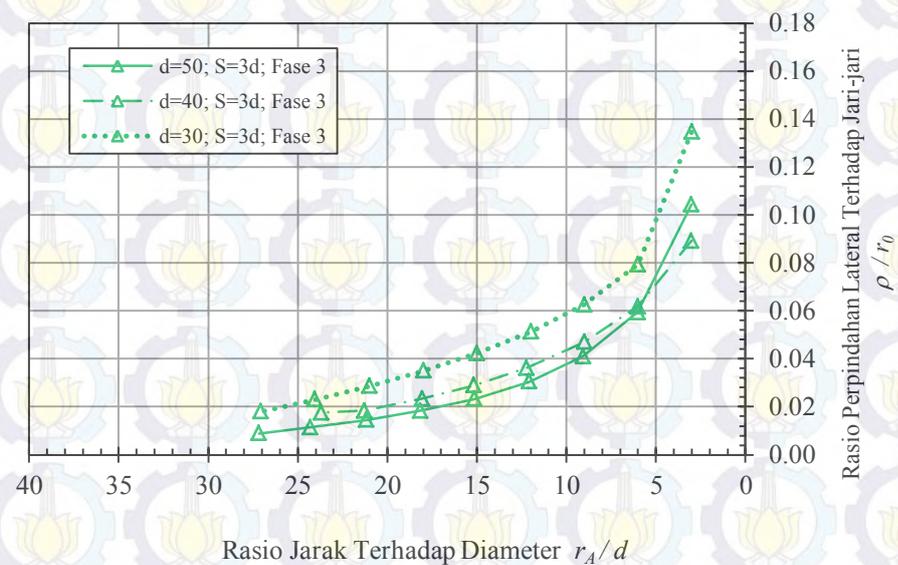
Gambar 4.34 Perbandingan distribusi horisontal perpindahan lateral ke arah titik A yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3

Gambar 4.34a dan b menunjukkan perbandingan perpindahan lateral ke arah titik A dari hasil simulasi kelompok tiang 1 x 6 (6 tiang) untuk diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm pada fase 1, 3, dan 6. Dari gambar tersebut dapat dilihat pengaruh diameter tiang terhadap perpindahan lateral, dimana saat diameter tiang semakin besar maka nilai perpindahan lateral juga semakin besar, karena volume

tiang tiang yang masuk ke dalam tanah juga semakin besar untuk setiap panjang penetrasi tiang tersebut.



(a)

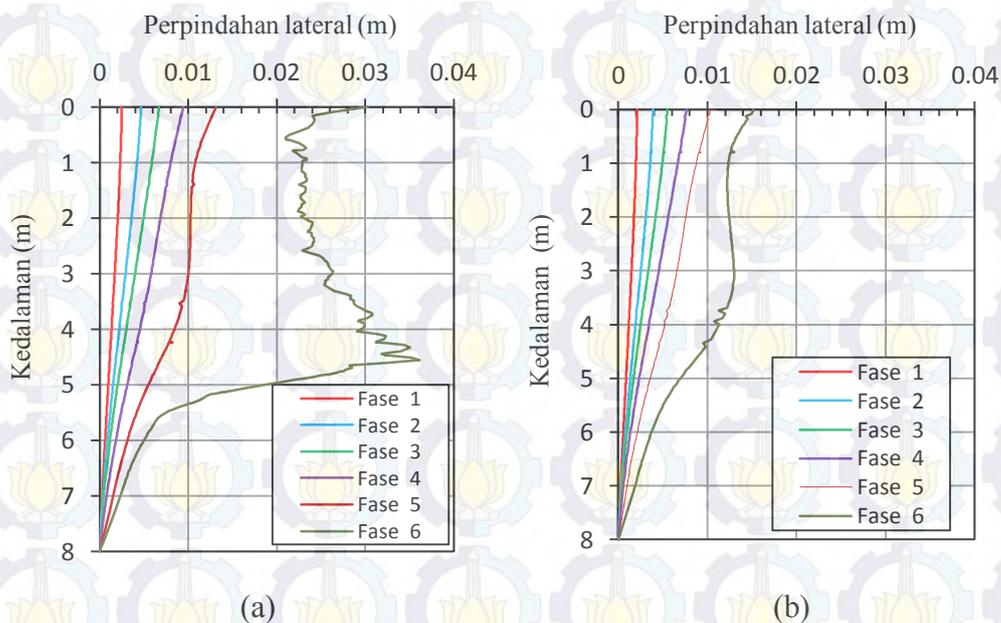


(b)

Gambar 4.35 Perbandingan rasio perpindahan lateral tanah ke arah titik A terhadap jari-jari tiang yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3

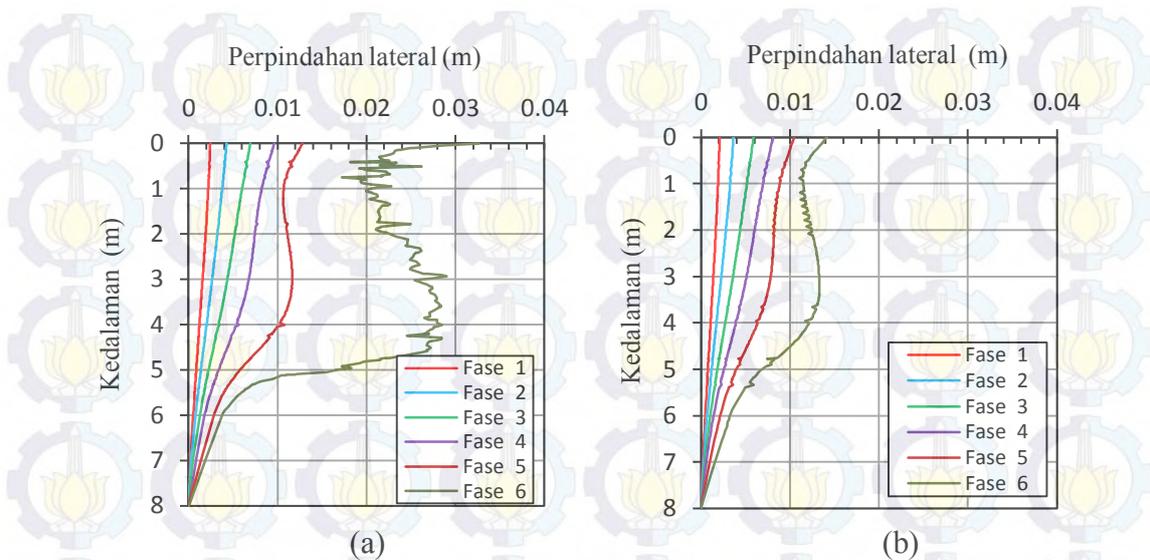
Dari gambar 4.35 dapat dilihat pengaruh diameter tiang terhadap rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ), untuk fase-1 yang menunjukkan rasio perbandingan rasio perpindahan lateral yang sama untuk setiap variasi diameter hal ini cukup

sesuai dengan teori *CCE*, namun untuk fase 3 dan 6 dapat dilihat bahwa saat diameter tiang semakin besar maka nilai rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ) juga semakin kecil, hal ini karena faktor pembagi rasio tersebut ( $r_0$ ) semakin besar sehingga nilai rasio perpindahan tersebut menjadi semakin kecil.



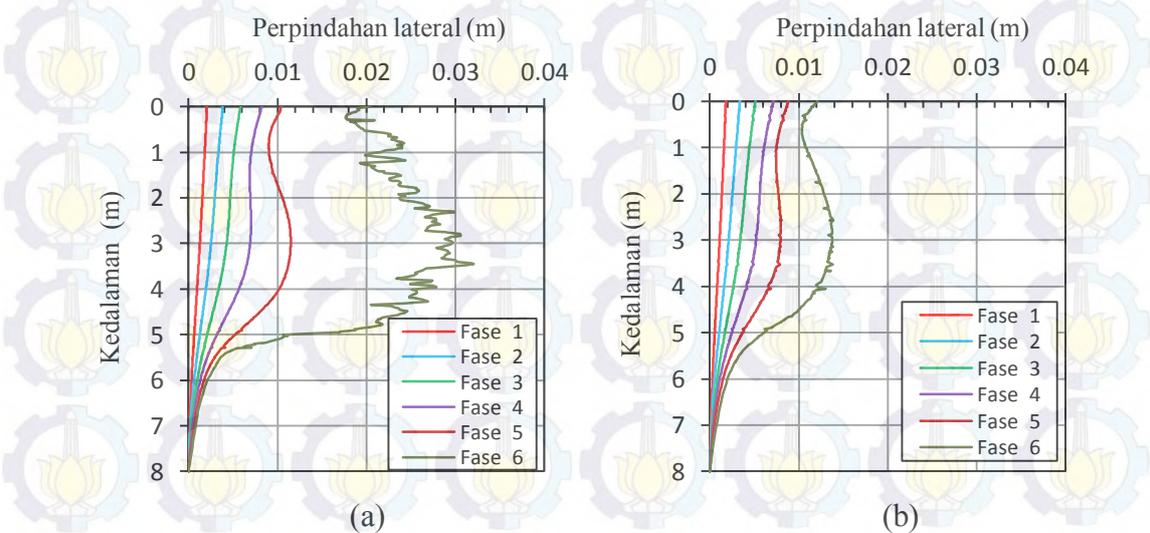
Gambar 4.36 Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a)  $r_B = 17d$ ; (b)  $r_B = 19d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 50 cm

Gambar 4.36 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik B dengan jarak  $r_B = 17d$  dan  $19d$  dari as tiang P1 yang diperoleh hasil dari simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 50 cm. Dari gambar tersebut dapat dilihat tren perpindahan lateral yaitu saat jumlah tiang bertambah maka perpindahan lateral ( $\rho$ ) juga bertambah, peningkatan perpindahan lateral ( $\Delta\rho$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin bertambah, hal ini karena arah pemancangan tiang mendekati / menuju ke titik B tersebut. Pada saat  $r_B = 17d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 2,5 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 32,4 mm. Saat  $r_B = 19d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 2,12 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 16,2 mm.



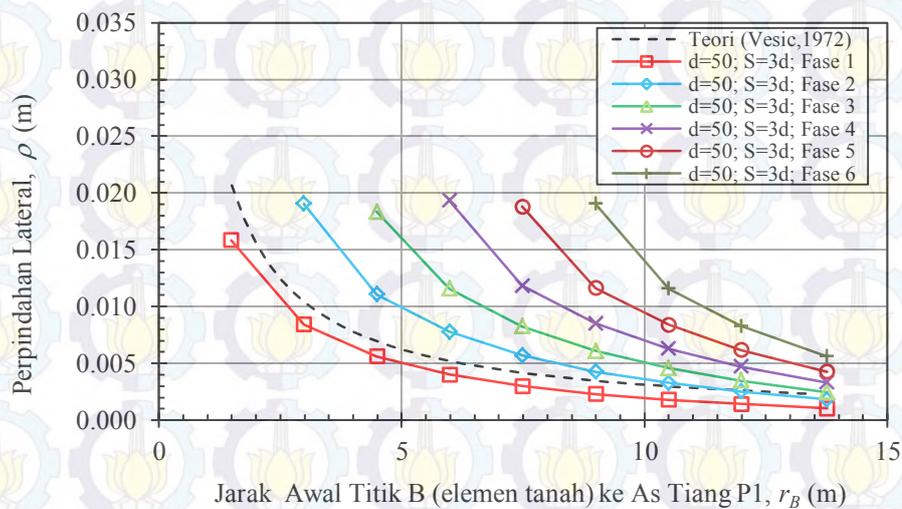
Gambar 4.37 Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a)  $r_B = 17d$ ; (b)  $r_B = 19d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 40 cm.

Gambar 4.37 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik B yang diperoleh hasil dari simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 40 cm. Gambar 4.37 ini memberikan juga tren perpindahan lateral seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.36. Pada saat  $r_B = 17d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 2,44 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 34,1 mm. Saat  $r_B = 19d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 2,08 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 15,1 mm.

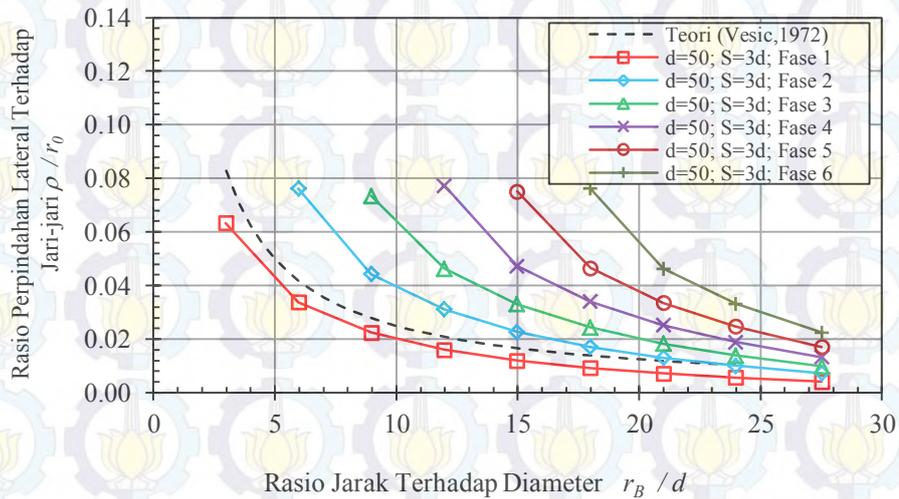


Gambar 4.38 Perpindahan lateral ke arah titik B pada jarak: (a)  $r_B = 17d$ ; (b)  $r_B = 19d$  dari as tiang P1, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter tiang 30 cm dan spasi  $3d$ .

Gambar 4.38 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral di titik B yang diperoleh hasil dari simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 dengan diameter 30 cm. Gambar 4.38 ini memberikan juga tren perpindahan lateral seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.36. Pada saat  $r_B = 17d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 2,07 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 20,5 mm. Saat  $r_B = 19d$ , perpindahan lateral permukaan tanah untuk fase-1 adalah 1,79 mm kemudian meningkat pada fase-6 menjadi 12,5 mm.



(a)

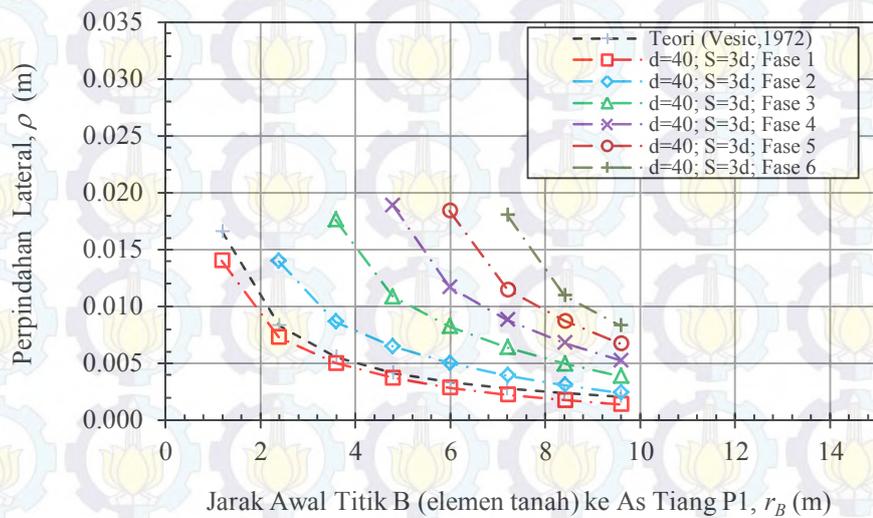


(b)

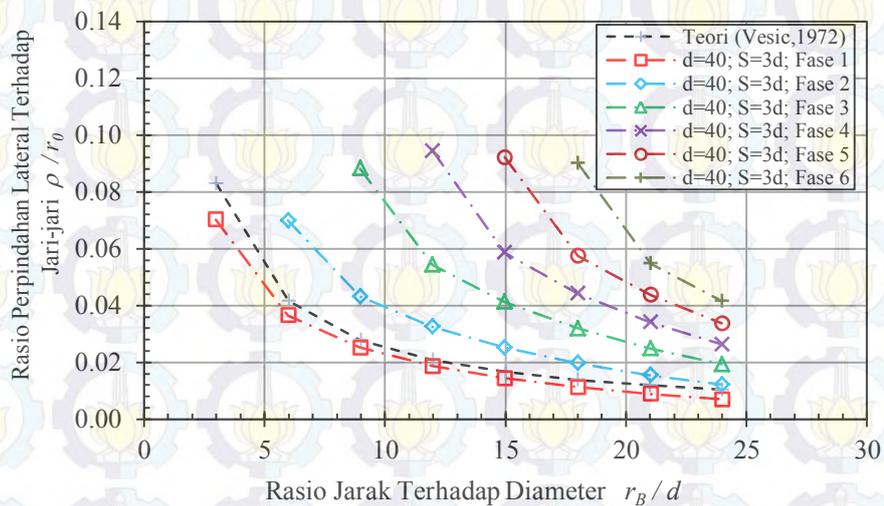
Gambar 4.39 (a) Hubungan antara jarak  $r_B$  dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_B$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 50 cm

Gambar 4.39a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_B$  (titik B ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik B yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 50 cm. Tren perpindahan lateral dari gambar tersebut menunjukkan bahwa perpindahan lateral semakin menurun ketika jarak  $r_B$  semakin meningkat, saat jumlah tiang bertambah maka perpindahan lateral tanah ( $\rho$ ) juga bertambah, sedangkan peningkatan perpindahan lateral tanah ( $\Delta\rho$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin bertambah, hal ini karena arah pemancangan tiang mendekati / ke arah titik B tersebut, Perpindahan lateral pada fase-1 (tiang P1) hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori CCE. Nilai perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B = 9\text{m}$  pada fase-1 adalah 2,3 mm kemudian meningkat menjadi 19,05 mm pada fase-6.

Gambar 4.39b menunjukkan hubungan antara rasio jarak  $r_B$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari – jari tiang ke arah titik B yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 50 cm. Tren rasio perpindahan lateral dari gambar tersebut menunjukkan bahwa rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ) semakin menurun ketika rasio jarak ( $r_B / d$ ) semakin meningkat, saat jumlah tiang bertambah maka rasio perpindahan lateral tanah ( $\rho / r_0$ ) juga bertambah, sedangkan peningkatan rasio perpindahan lateral tanah ( $\Delta \rho / r_0$ ) antar fase penambahan tiang tersebut cenderung semakin bertambah, hal ini karena arah pemancangan tiang mendekati / ke arah titik B tersebut. Rasio perpindahan lateral pada fase-1 (tiang P1) hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori CCE. Dari gambar tersebut diperoleh rasio perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B = 18d$  pada fase-1  $0,009r_0$  kemudian meningkat menjadi  $0,076r_0$  pada fase-6.



(a)

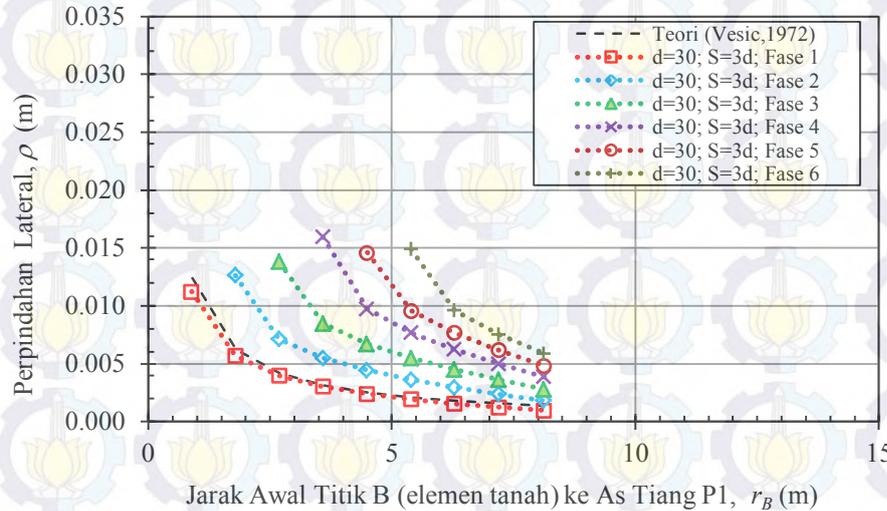


(b)

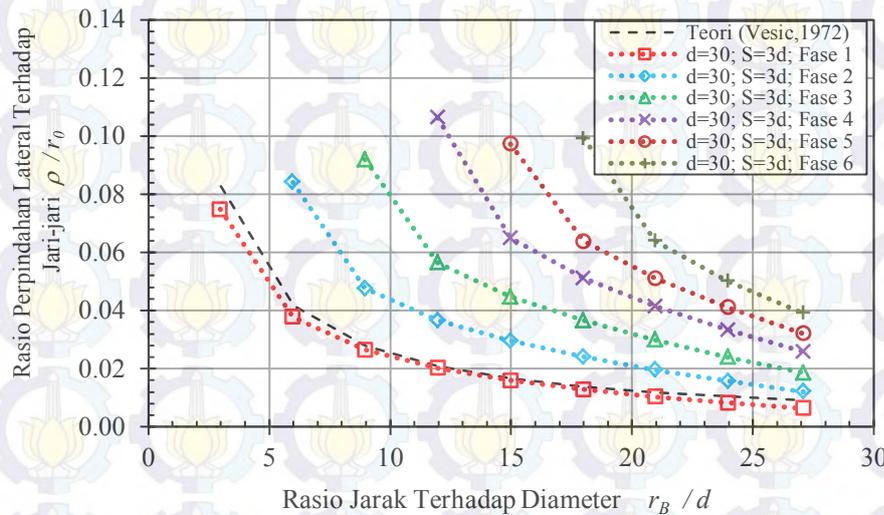
Gambar 4.40 (a) Hubungan antara jarak  $r_B$  dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_B$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 40 cm

Gambar 4.40a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_B$  (titik B ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik B yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 40 cm. Gambar tersebut juga memberikan tren perpindahan seperti pada penjelasan Gambar 4.39a. Nilai perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B=7,2\text{m}$  pada fase-1 adalah 2,2 mm kemudian meningkat menjadi 18 mm pada fase-6. Dari Gambar 4.40b

diperoleh nilai rasio perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B = 18d$  pada fase-1 adalah  $0,011r_0$  kemudian meningkat menjadi  $0,090r_0$  pada fase-6.



(a)

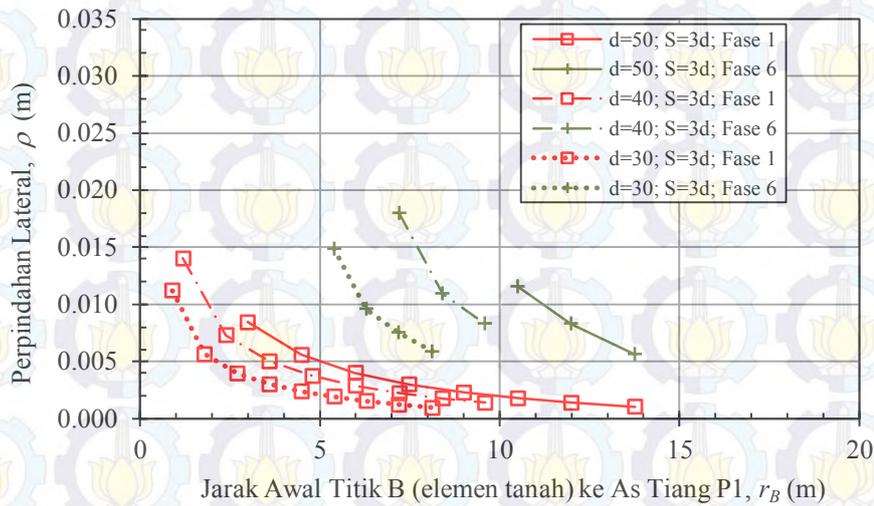


(b)

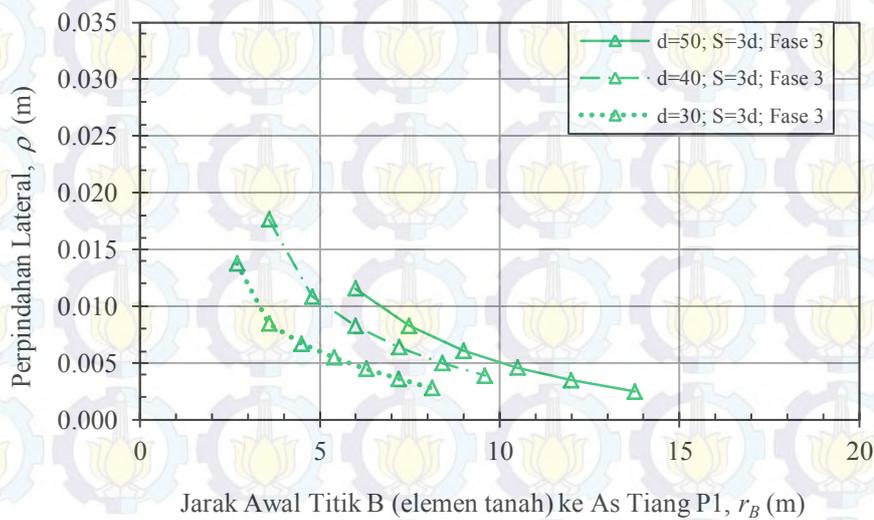
Gambar 4.41 (a) Hubungan antara jarak  $r_B$  dan perpindahan radial ke arah titik B; (b) Hubungan antara rasio jarak  $r_B$  terhadap diameter tiang dan rasio perpindahan lateral terhadap jari-jari tiang, hasil dari simulasi kelompok tiang 1 x 6, diameter tiang 30 cm

Gambar 4.41a menunjukkan hubungan antara jarak  $r_B$  (titik B ke as tiang P1) dan perpindahan lateral ke arah titik B yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang formasi 1 x 6 untuk diameter 30 cm. Gambar tersebut juga memberikan tren perpindahan seperti pada penjelasan Gambar 4.39a. Nilai

perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B = 5,4$  m pada fase-1 adalah 1,9 mm atau kemudian meningkat menjadi 14,87 mm pada fase-6. Dari Gambar 4.41b diperoleh nilai rasio perpindahan lateral ke arah titik B untuk jarak  $r_B = 6d$  pada fase-1 adalah  $0,012r_0$  atau kemudian meningkat menjadi  $0,099r_0$  pada fase-6.



(a)

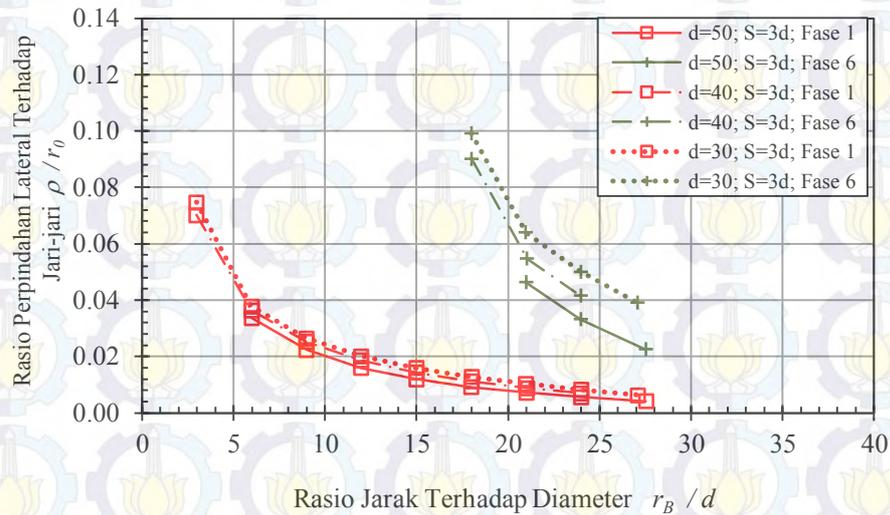


(b)

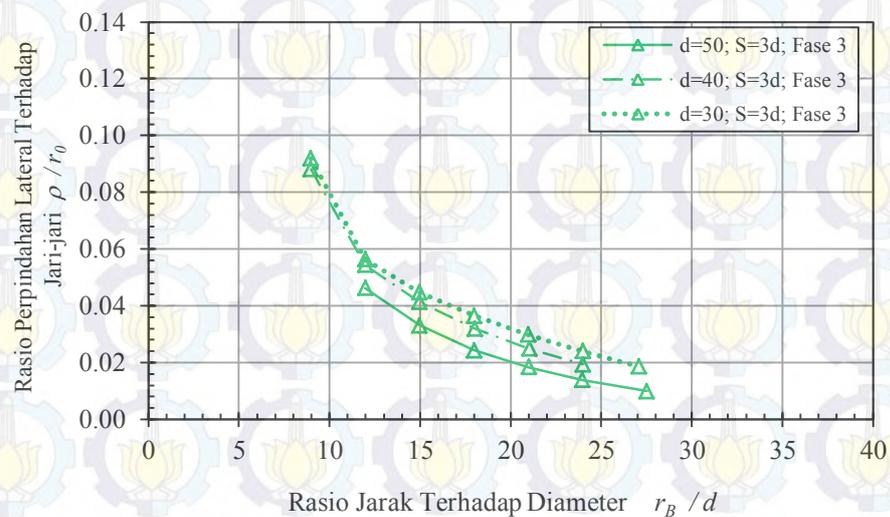
Gambar 4.42 Perbandingan distribusi horisontal perpindahan lateral ke arah titik B yang diperoleh dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) fase-1 dan fase-6, (b) fase 3

Gambar 4.42a dan b menunjukkan perbandingan perpindahan lateral ke arah titik B dari hasil simulasi kelompok tiang 1 x 6 (6 tiang) untuk diameter 50 cm, 40 cm, dan 30 cm pada fase 1, 3, dan 6. Dari gambar tersebut dapat dilihat

pengaruh diameter tiang terhadap perpindahan lateral, dimana saat diameter tiang semakin besar maka nilai perpindahan lateral juga semakin besar, karena volume tiang tiang yang masuk ke dalam tanah juga semakin besar untuk setiap panjang penetrasi tiang tersebut.



(a)



(b)

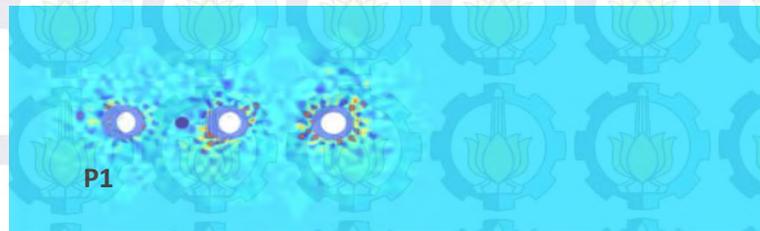
Gambar 4.43 Perbandingan Rasio Perpindahan Lateral ke Arah Titik B dari Simulasi Kelompok tiang 1 x 6 untuk diameter Tiang 50 cm, 40 cm, dan 30 cm. (a) Fase 1 dan 6, (b) Fase 3

Dari gambar 4.43 dapat dilihat pengaruh diameter tiang terhadap rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ), untuk fase-1 yang menunjukkan rasio perbandingan rasio perpindahan lateral yang sama untuk setiap variasi diameter hal ini cukup

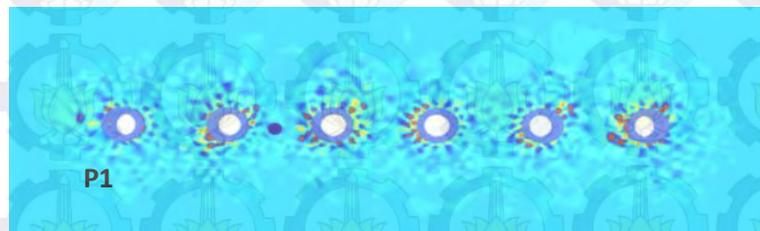
sesuai dengan teori *CCE*, namun untuk fase 3 dan 6 dapat dilihat bahwa saat diameter tiang semakin besar maka nilai rasio perpindahan lateral ( $\rho / r_0$ ) juga semakin kecil, hal ini karena faktor pembagi rasio tersebut ( $r_0$ ) semakin besar sehingga nilai rasio perpindahan tersebut menjadi semakin kecil.



(a)



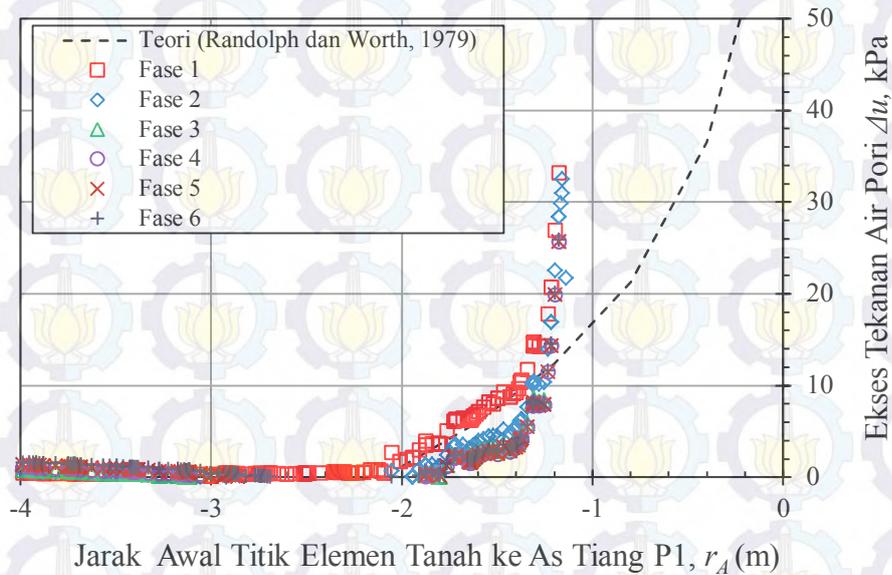
(b)



(c)

Gambar 4.44 Tampak atas ( $z = -3$  m) bidang penyebaran ekses tekanan air pori dari simulasi kelompok tiang 1 x 6 dengan diameter 40 cm; spasi  $3d$ . (a) tiang P1, (b) Tiang P1-P3, (c) Tiang P1-P6

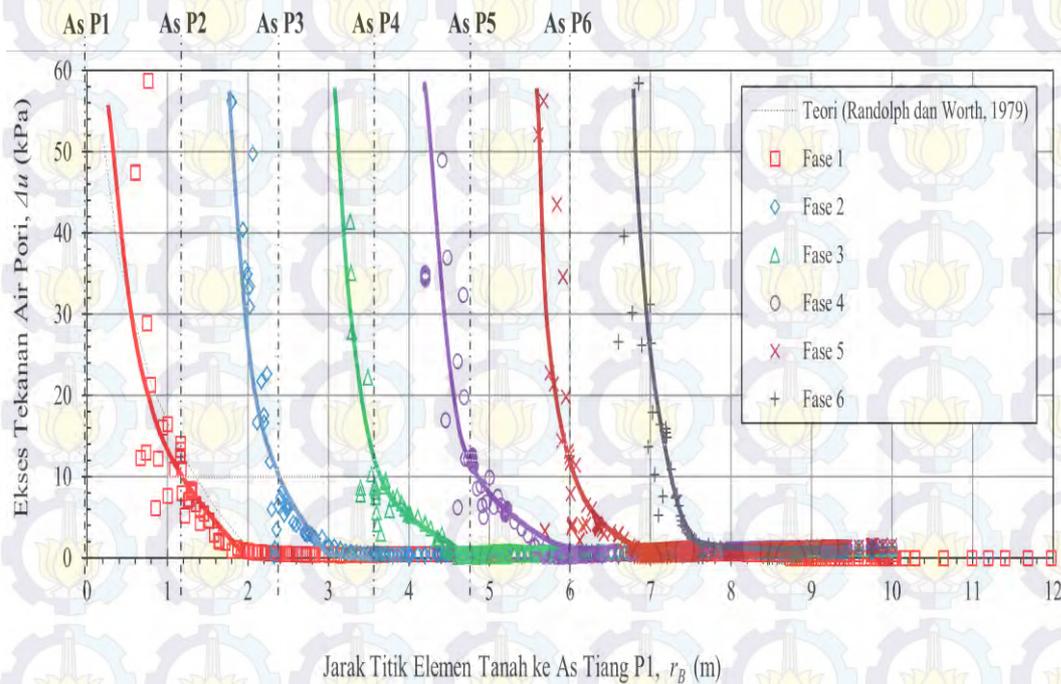
Gambar 4.44 adalah tampak atas bidang ekses tekanan air pori di sekitar tiang pada kedalaman  $z = -2,5$  m. Dari gambar tersebut terlihat penyebaran ekses air pori saat jumlah tiang bertambah. Area ekses tekanan air pori bertambah mengikuti posisi penambahan tiang.



Gambar 4.45 Hubungan antara jarak  $r_A$  dan ekseks tekanan air pori ke arah titik A

Gambar 4.45 menunjukkan hubungan antara jarak  $r_A$  (titik A ke as tiang P1) dan ekseks tekanan air pori ke arah titik A dari hasil simulasi kelompok tiang 1 x 6 (6 tiang) untuk diameter 40 cm. Pada jarak  $r_A > 3d$  (1,2 m) ekseks tekanan air pori pada fase-1 hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori CCE (Randolph dan Wroth, 1979), namun ekseks tekanan air pori pada jarak  $r_A < 3d$  (1,2 m) tidak rasional saat dibandingkan dengan teori sehingga hasil tersebut suli digambarkan dalam grafik, hal ini karena elemen di bagian tersebut sangat dekat dengan tiang dan memerlukan jaring elemen yang lebih halus untuk memberikan hasil yang lebih baik. Pada jarak jarak  $r_A = 1,2$  m, nilai ekseks tekanan air porinya adalah sekitar 10 kPa. Ekseks tekanan air pori semakin menurun seiring dengan meningkatnya jarak  $r_A$ . Saat jarak jarak  $r_A$  mendekati radius batas antara zona plastis dan zona elastis maka ekseks tekanan air pori menjadi sangat kecil mendekati nol. Untuk grafik fase-2 sampai dengan fase-6 menunjukkan hasil ekseks tekanan air pori yang hampir serupa dengan grafik pada fase-1, hal ini menunjukkan bahwa pada saat arah alur pemancangan tiang bergerak menjauhi titik A atau pun P1, nilai ekseks tekanan air pori di sekitar titik P1 tidak begitu banyak berubah walaupun

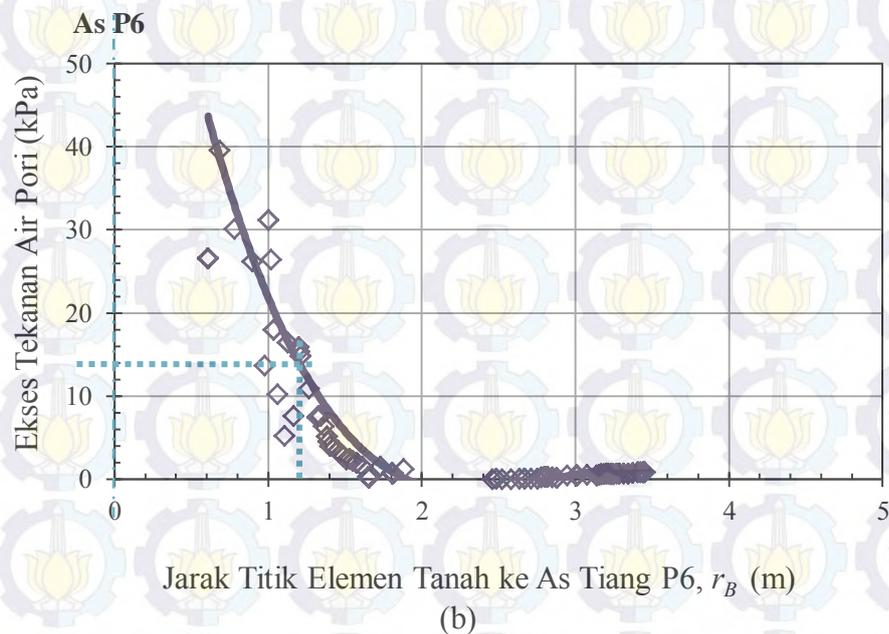
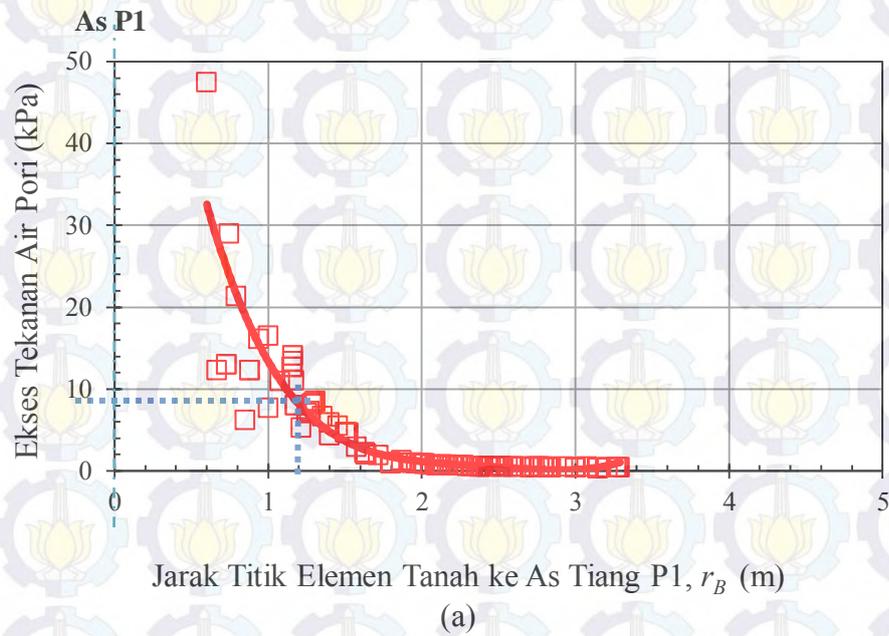
*prescribed displacement* dan tegangan yang diterapkan pada dinding rongga yang mewakili tiang P1 telah dihilangkan.



Gambar 4.46 (a) Hubungan antara jarak  $r_B$  dan ekses tekanan air pori ke arah titik B

Hubungan antara jarak  $r_B$  (titik B ke as tiang P1) dan ekses tekanan air pori ke arah titik B dari hasil simulasi kelompok tiang 1x6 (6 tiang) untuk diameter 40 cm dapat dilihat pada Gambar 4.46, Grafik fase-1 (tiang P1) sampai dengan fase-6 (tiang P1) menunjukkan ekses tekanan air pori pada setiap fase (untuk setiap penambahan jumlah tiang). Ekses tekanan air pori pada jarak  $< 1,5d$  ( $0,6$  m) dari as tiang terakhir untuk setiap fase tidak digambarkan dalam grafik karena tidak rasional, namun ekses tekanan air pori pada jarak  $> 1,5d$  dari as tiang terakhir untuk setiap fase memberikan grafik yang cukup rasional pada setiap fase (tiang P1 sampai dengan P6), terutama pada fase (tiang P1) memberikan hasil yang cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori CCE (Randolph dan Wroth, 1979). Jarak  $r_B$  atau zona ekses tekanan air pori untuk fase-2 terlihat lebih besar dari pada jarak  $r_B$  atau zona ekses tekanan air pori pada fase-1, hal ini menunjukkan bahwa pada saat alur

pemancanan tiang bergerak menjauhi P1 ke arah titik B, maka zona eksese tekanan air pori juga ikut meningkat mengikuti arah alur pemancanan tiang.

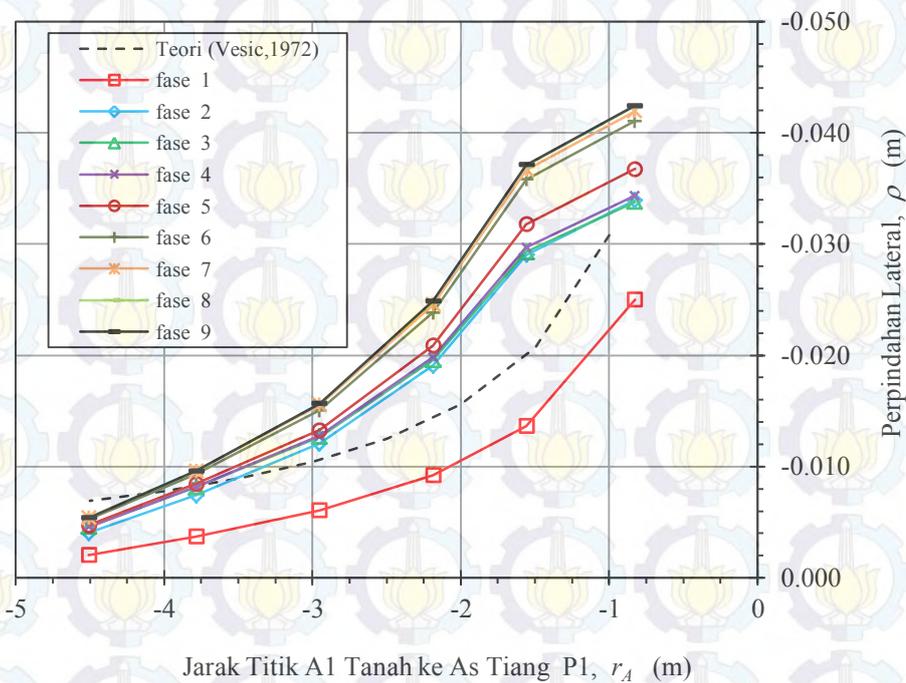


Gambar 4.47 (a) Hubungan antara jarak elemen tanah ke as P1 dan eksese tekanan air pori saat fase 1 (tiang 1), (b) hubungan antara jarak elemen tanah ke as P1 dan eksese tekanan air pori saat fase 6 (tiang P6)

Gambar 4.47 (a) dan (b) menunjukkan eksese tekanan air pori pada jarak  $3d$  (1,2m) dari P1 untuk fase 1 dan eksese tekanan air pori pada jarak  $3d$  (1,2m) dari P6 untuk fase 6. Eksese tekanan air pori pada jarak  $3d$  (1,2m) dari P6 untuk fase 6 terlihat lebih besar saat dibandingkan dengan eksese tekanan air pori pada jarak  $3d$  (1,2m) dari P1 untuk fase 1 karena adanya tambahan eksese tekanan air pori dari fase sebelumnya (tiang P1 sampai dengan P5).

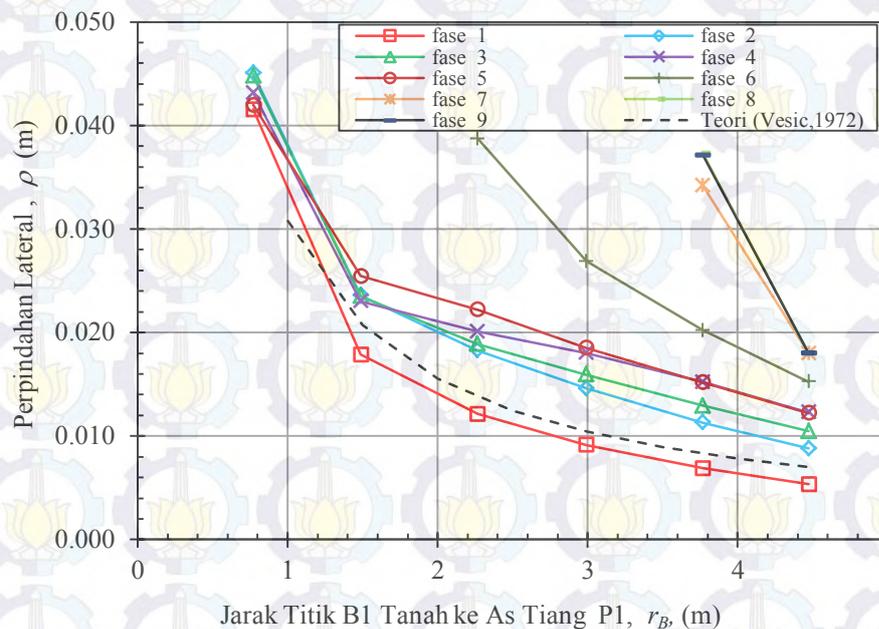
#### 4.2.2 Hasil Simulasi Kelompok Tiang dengan Formasi 3 x 3 ( 9 Tiang )

Hasil simulasi kelompok tiang dengan formasi 3 x 3 diperoleh dari PLAXIS 3D dengan jaring elemen global *medium* kemudian diperhalus di area yang berada dekat dengan tiang. Parameter tanah dan geometri dimodelkan seperti pada Tabel 3.2 dan Gambar 3.12 dengan diameter 50 cm dan panjang tiang 5 m, model tiang yang dimodelkan berjumlah 9 tiang dengan spasi antar tiang  $3d$  seperti yang dijelaskan sebelumnya pada Sub-Bab 3.6.2.



Gambar 4.48 Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan lateral ke arah A (Potongan A-A'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm

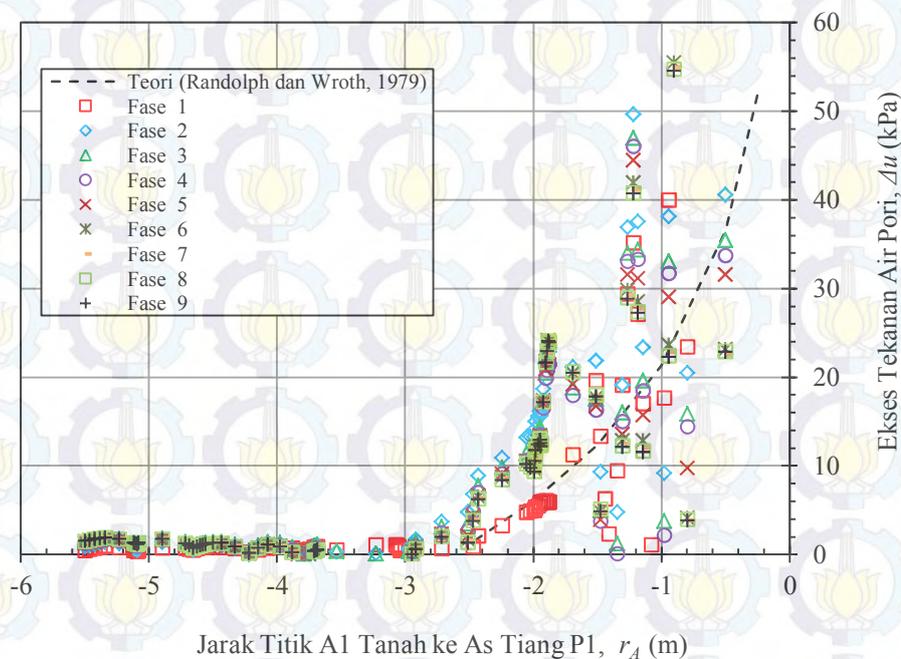
Gambar 4.48 adalah grafik distribusi horisontal yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan lateral ke arah A yang diperoleh dari hasil simulasi kelompok tiang dengan formasi 3 x 3 (9 tiang) untuk diameter 50 cm. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan perpindahan lateral  $\Delta\rho$  ke arah A akibat simulasi tiang P1 (fase-1), P2 (fase-2), P5 (fase-5), dan P6 (fase-6) cenderung jauh lebih besar dibandingkan dengan peningkatan perpindahan lateral  $\Delta\rho$  akibat simulasi tiang yang lain (P2,P3, P4,7, P8), hal ini karena area tersebut berada pada radius zona plastis diantara tiang P1, P2, P5, dan P6. Perpindahan lateral arah A pada fase-1 terdapat selisih perbedaan yang cukup besar antara hasil simulasi dengan teori, hal ini karena pada area tersebut memerlukan jaring elemen yang lebih halus. Terlepas dari selisih perbedaan tersebut tren dari keduanya cukup sesuai.



Gambar 4.49 Hubungan antara jarak  $r_B$  dan perpindahan lateral ke arah B (Potongan B-B'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm

Gambar 4.49 adalah grafik distribusi horisontal yang menunjukkan hubungan antara jarak  $r_B$  dan perpindahan lateral ke arah B yang diperoleh dari

hasil simulasi kelompok tiang dengan formasi 3 x 3 (9 tiang) untuk diameter 50 cm. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa tren perpindahan lateral untuk fase-1 dari PLAXIS 3D terlihat cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE*. Peningkatan perpindahan lateral  $\Delta\rho$  ke arah B akibat simulasi tiang P6 (fase-6) dan P7 (fase-7) jauh lebih besar dibandingkan dengan fase lain, hal ini karena tiang P6 dan P7 berada dalam satu baris dengan titik P1, selain itu area tersebut berada juga pada radius zona plastis dari tiang P5 dan P6 tersebut, hasil dari PLAXIS menghasilkan perpindahan lateral pada jarak  $r$  yang cukup terbatas, karena pemodelan tiang cukup terbatas.

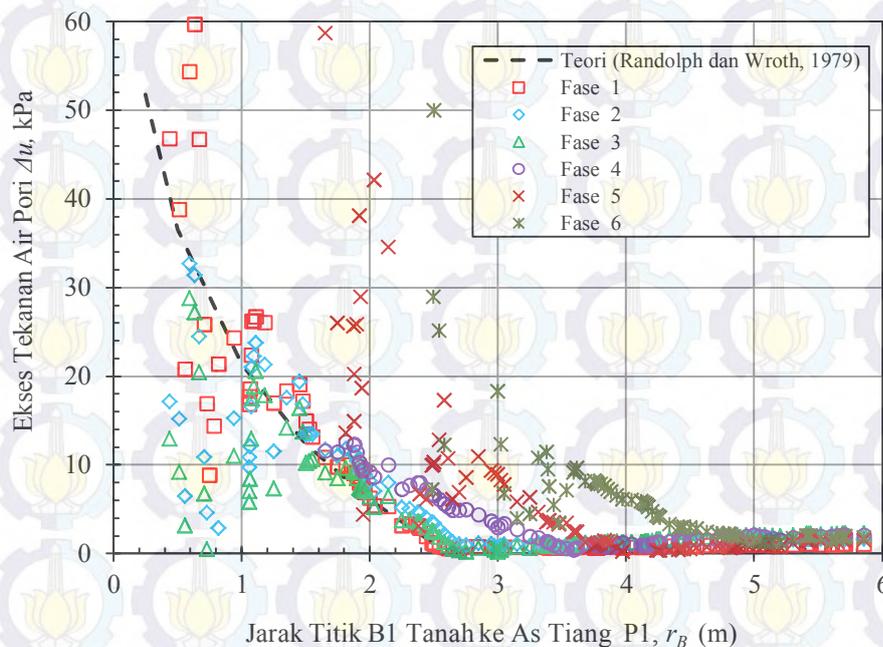


(a)

Gambar 4.50 Hubungan antara jarak  $r_A$  dan ekses tekanan air pori ke arah A (Potongan A-A'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm

Gambar 4.50 menunjukkan hubungan jarak  $r_A$  dan ekses tekanan air pori ke arah A kedalaman 2,5m dari hasil simulasi kelompok tiang 3 x 3 (9 tiang) untuk diameter 50 cm. Pada jarak  $r_A > 2d$  ( 1 m) ekses tekanan air pori pada fase-1 hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan

hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979), sedangkan pada jarak  $r_A < 2d$  ( 1 m) memerlukan jaring elemen yang lebih halus untuk memberikan hasil yang lebih baik. Pada jarak  $r_A = 2$  m nilai eksese tekanan air porinya adalah sekitar 5 kPa. Eksese tekanan air pori semakin menurun seiring dengan meningkatnya jarak  $r_A$ . Saat jarak  $r_A$  mendekati radius plastis maka eksese tekanan air pori menjadi sangat kecil mendekati nol. Untuk grafik fase-2 sampai dengan fase-6 sedikit menurun karena efek penghilangan *prescribed displacement* pada tiang P6, namun eksese tekanan air pori tersebut hampir serupa dengan grafik pada fase-1. Hal ini menunjukkan bahwa saat arah alur pemancangan tiang bergerak menjauhi P1, nilai eksese tekanan air pori di sekitar titik P1 tidak begitu banyak berubah.



(b)

Gambar 4.51 Hubungan antara jarak  $r_B$  dan eksese tekanan air pori ke arah B (Potongan B-B'), hasil dari simulasi kelompok tiang 3x3 untuk diameter tiang 50 cm

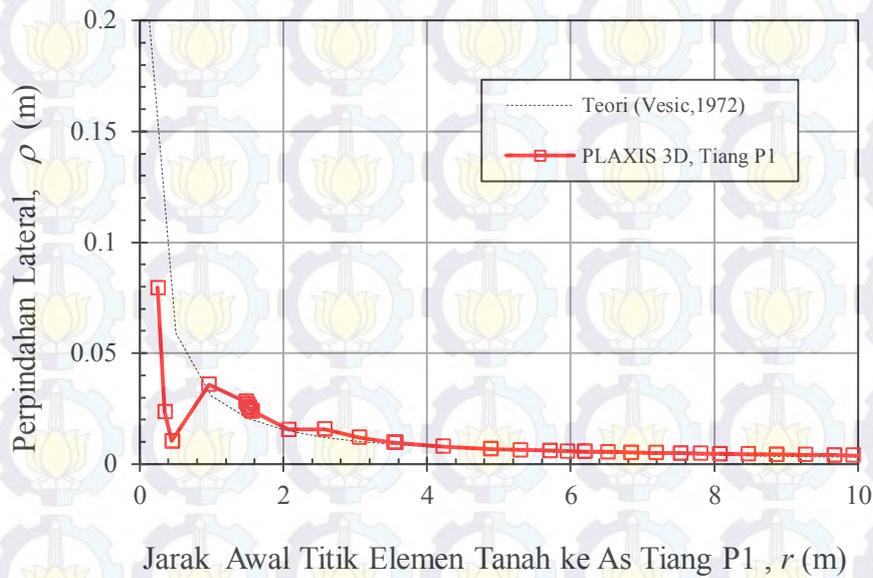
Gambar 4.51 menunjukkan distribusi horisontal eksese tekanan air pori ke arah B kedalaman 3 m dari hasil simulasi kelompok tiang 3 x 3 (9 tiang) untuk

diameter 50 cm. Pada jarak  $r_B > 2d$  ( 1 m) ekses tekanan air pori pada fase-1 hasil simulasi dari PLAXIS 3D cukup sesuai saat dibandingkan dengan hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE* (Randolph dan Wroth, 1979), sedangkan pada jarak  $r_B < 2d$  memerlukan jaring elemen yang lebih halus untuk memberikan hasil yang lebih baik. Pada jarak jarak  $r_B = 2$  m nilai ekses tekanan air porinya adalah sekitar 5 kPa. Grafik ekses tekanan air pori untuk fase-1,2, dan 3 terlihat hampir sama, hal ini karena posisi tiang P1, P2, dan P3 berada dalam satu baris. Ekses tekanan air pori untuk fase-4, 5, dan 6 terlihat lebih besar dari pada jarak  $r_B$  atau zona ekses tekanan air pori pada fase sebelumnya, hal ini karena posisi tiang P4, P5, dan P6 berada di baris ke 2 dengan arah pemancangan tiang bergerak menjauhi P1, oleh karena itu zona ekses tekanan air pori juga ikut meningkat mengikuti alur pemancangan tiang. Untuk fase-7 s/d 9 tidak tergambar karena jaring elemen kurang halus di area ini masih perlu diperhalus lagi untuk dapat menggambarkan ekses tekanan air pori diarea tersebut, disamping itu kondisi batas model terlalu dekat dengan posisi P7, P8, dan P9.

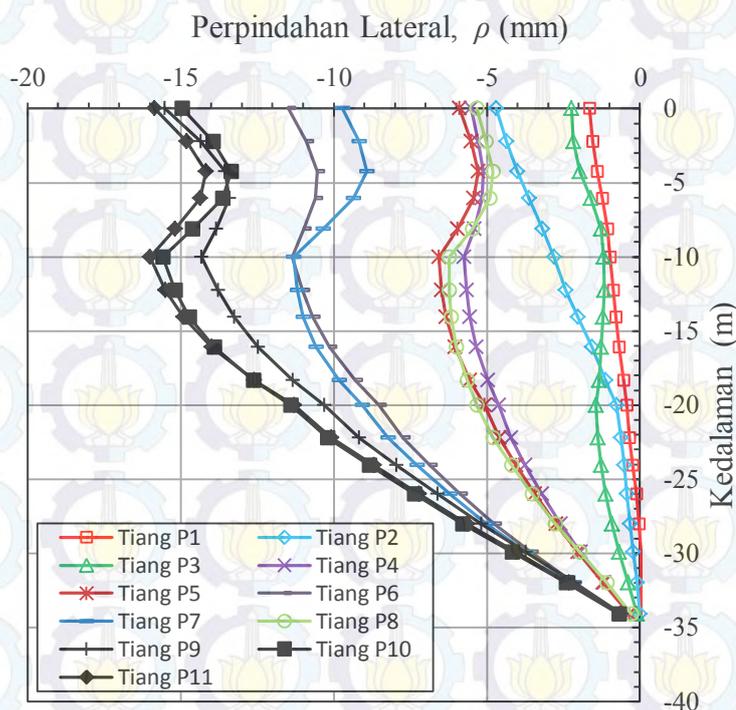
#### **4.3. Hasil Simulasi Tiang Berdasarkan Data Pemancangan Tanggal 22 Juni 2013 Proyek SL**

Dari simulasi tiang berdasarkan data pemancangan proyek SL pada tanggal 22 juni 2013 yang dimodelkan pada Model-1 dan Model-2 menggunakan PLAXIS 3D 2012 seperti pada Sub-Bab 3.6, maka diperoleh grafik perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori.

Gambar 4.52 menunjukkan hubungan antara jarak titik elemen tanah ke as tiang P1 ( $r$ ) dan perpindahan lateral permukaan tanah ( $\rho$ ) yang diperoleh dari tahap simulasi tiang P1 pada Model-1. Pada saat  $r$  semakin bertambah maka  $\rho$  semakin berkurang. Perbandingan antara hasil PLAXIS 3D dan teori *CCE* dari Vesic cukup sesuai dengan selisih perbedaan rata-rata  $< 10\%$ , kecuali pada jarak  $r < 1$  m ( $< 2d$ ), ada perbedaan karena di area ini sangat dekat dengan tiang sehingga diperlukan jaring elemen yang lebih halus lagi, namun tren dari perpindahan terlihat masih cukup sesuai dengan teori tersebut.



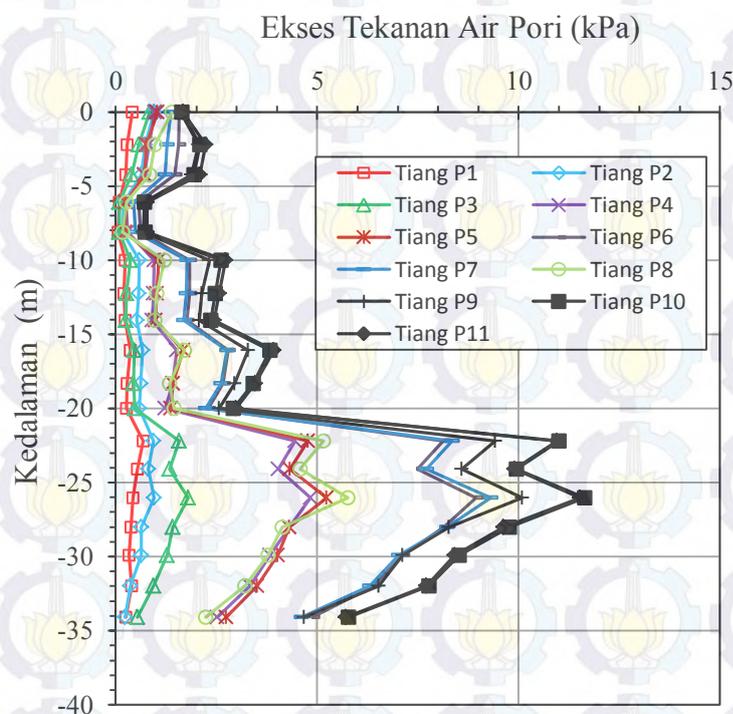
Gambar 4.52 Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang P1 pada model - 1



Gambar 4.53 Perpindahan lateral di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P11 pada model-1

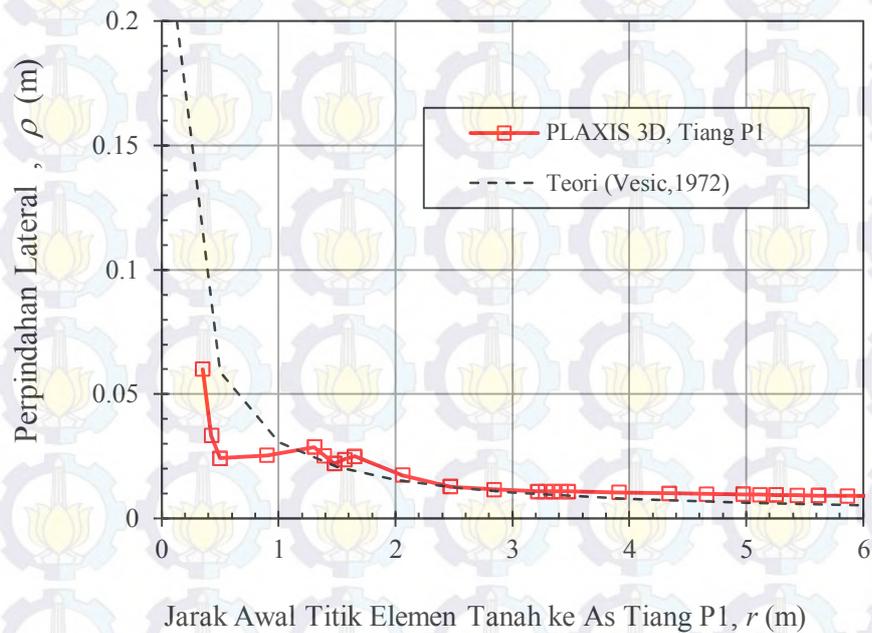
Gambar 4.53 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral pada setiap kedalaman di titik IN-01 yang diperoleh dari tahap simulasi tiang P1 sampai dengan P11 pada Model-1. Perpindahan lateral tersebut semakin menurun

saat kedalaman semakin meningkat sampai dengan kedalaman sekitar 35 m, dimana panjang tiang adalah 30 m. Untuk simulasi tiang P1 (tahap / fase 1), toleransi kesalahan pada pengaturan perhitungan di dalam PLAXIS 3D adalah 1% sesuai dengan standar pengaturan di dalam PLAXIS, oleh karena itu hasil perpindahan lateral akibat simulasi tiang P1 (Gambar 4.52) cukup sesuai dengan teori. Pada tahapan / fase selanjutnya (simulasi tiang P2 sampai dengan P11), toleransi kesalahan pada pengaturan perhitungan tidak diatur sebesar 1% karena proses perhitungan pada tahap selanjutnya menjadi lebih berat dan kebutuhan RAM melampaui spesifikasi yang ada sehingga proses perhitungan tersebut menjadi gagal (*error*). Oleh karena itu untuk tetap bisa mendapatkan hasil dari semua fase maka toleransi kesalahan pada pengaturan perhitungan untuk simulasi tiang P2 dan seterusnya dirubah menjadi 5%, namun hal ini menyebabkan hasil distribusi vertikal perpindahan lateral dan ekses tekanan air pori untuk simulasi tiang P3, P7, dan yang lainnya (Gambar 4.53 dan 4.54) terlihat tidak wajar, dimana saat penambahan tiang, nilai perpindahan dan ekses tekanan air pori tidak bertambah melainkan berkurang pada fase tersebut (P3 dan P7).



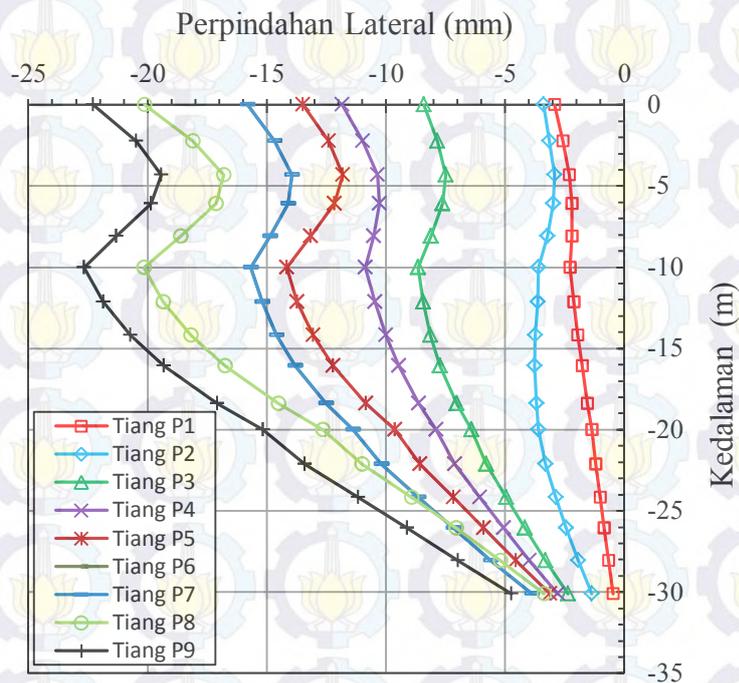
Gambar 4.54 Ekses tekanan air pori di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P11 pada model-1

Untuk mendapatkan hasil distribusi vertikal perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori yang lebih baik, maka dilakukan penyederhanaan dari Model-1 ke Model-2 seperti yang diuraikan pada Sub-Bab 3.7 sehingga toleransi kesalahan pada pengaturan perhitungan untuk semua fase (simulasi tiang pertama sampai dengan tiang terakhir) dapat diatur sebesar 1% sesuai dengan standar PLAXIS.



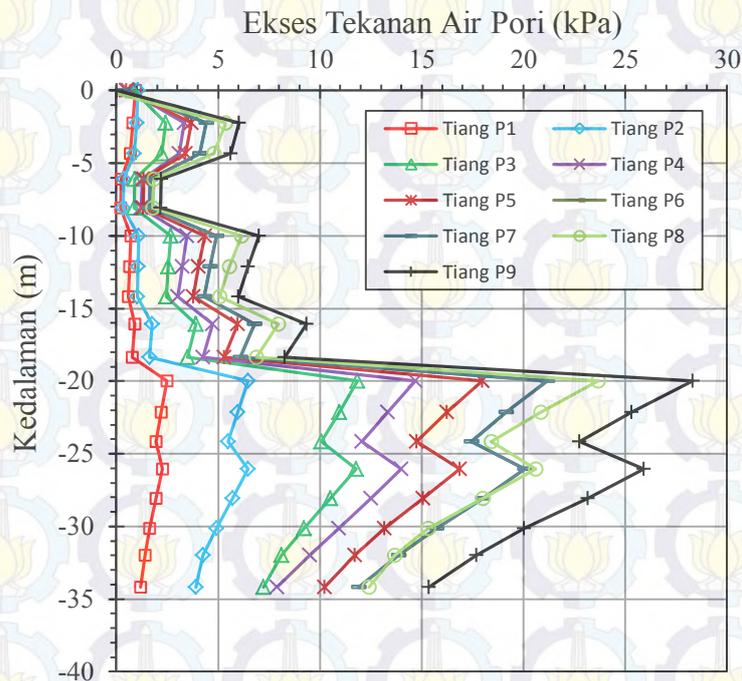
Gambar 4.55 Hubungan antara jarak  $r_A$  dan perpindahan radial, hasil dari simulasi tiang P1 pada model - 2

Gambar 4.55 menunjukkan hubungan antara jarak titik elemen tanah ke as tiang P1 ( $r$ ) dan perpindahan lateral permukaan tanah ( $\rho$ ) yang diperoleh dari tahap simulasi tiang P1 pada Model-2, dimana hasil PLAXIS 3D cukup sesuai dengan teori *CCE* dari Vesic. kecuali pada jarak  $r < 1$  m, ada perbedaan karena di area ini sangat dekat dengan tiang sehingga diperlukan jaring elemen yang lebih halus lagi, namun tren dari perpindahan terlihat masih cukup sesuai dengan teori tersebut.



Gambar 4.56 Perpindahan lateral di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P9 pada model-2

Gambar 4.56 menunjukkan distribusi vertikal perpindahan lateral pada setiap kedalaman di titik IN01 yang diperoleh dari tahap simulasi tiang P1 sampai dengan P9 pada Model-2. Perpindahan lateral di titik IN01 tersebut relatif semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman. Grafik perpindahan lateral untuk setiap fasenya cukup rasional, dimana perpindahan lateral  $\rho$  semakin meningkat seiring dengan penambahan jumlah tiang. Tren pada grafik perpindahan lateral tersebut cukup sesuai dengan data inklinometer-01 proyek SL. Dari Gambar 4.56 tersebut juga dapat dilihat bahwa perpindahan lateral permukaan tanah dari simulasi 9 tiang di titik IN01 adalah 22 mm, sedangkan dari laporan data inklinometer-01 proyek SL diketahui bahwa nilai perpindahan lateral di titik IN01 akibat pemancangan dari tanggal 6 maret 2013 sampai dengan tanggal 21 Juni 2013 adalah 340 mm dan pada tanggal 22 Juni 2013 perpindahan lateral menjadi 360 mm. Peningkatan perpindahan lateral ini diperkirakan terjadi akibat adanya penambahan pemancangan 11 tiang yang di lakukan pada tanggal 22 Juni 2013 sehingga perpindahan lateral di permukaan tanah mengalami peningkatan / bertambah sebesar 20 mm dari sebelumnya.



Gambar 4.57 Ekses tekanan air pori di titik IN01, hasil dari simulasi tiang P1 – P9 pada model-2

Gambar 4.57 menunjukkan distribusi vertikal ekses tekanan air pori pada setiap kedalaman di titik IN01 yang diperoleh dari tahap simulasi tiang P1 sampai dengan P9 pada Model-2. Nilai ekses tekanan air pori tersebut bervariasi pada setiap kedalaman tergantung dari parameter tanah, dimana pada saat nilai kuat geser *undrained*  $C_u$  semakin tinggi maka nilai ekses tekanan air pori juga semakin tinggi, hal ini sesuai dengan persamaan yang diberikan oleh Randolph (1979) dimana parameter  $C_u$  dan juga  $G/C_u$  berpengaruh pada ekses tekanan air pori. Grafik ekses tekanan air pori untuk setiap fasenya cukup rasional, dimana ekses tekanan air pori semakin besar seiring dengan penambahan tiang.

Dari Gambar 4.57 tersebut juga dapat dilihat bahwa ekses tekanan air pori dari simulasi 9 tiang di titik IN-01 pada kedalaman 3 m adalah 6 kPa, sedangkan dari laporan data Piezometer -01 proyek SL diketahui bahwa nilai ekses tekanan air pori di dekat titik IN01 akibat pemancangan mulai dari tanggal 6 maret 2013 sampai dengan tanggal 22 Juni 2013 adalah 42 kPa dan pada tanggal 22 Juni 2013 menjadi 48kPa. Peningkatan ekses tekanan air pori sebesar 6 kPa ini

diperkirakan terjadi akibat adanya penambahan pemancangan 11 tiang yang dilakukan pada tanggal 22 Juni 2013.

Hasil pemodelan numerik / simulasi tiang berdasarkan data pemancangan proyek SL pada tanggal 22 juni 2013 dengan menggunakan PLAXIS 3D diatas secara umum dapat memberikan gambaran tentang peningkatan perpindahan tanah dan eksese tekanan air pori yang diakibatkan oleh penambahan jumlah tiang, sehingga, dari gambaran tersebut bisa dibayangkan apabila jumlah pemancangan cukup signifikan akan mengakibatkan suatu pergerakan tanah yang dapat merusak area sekitar pemancangan tersebut, namun untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan alat instrumen geoteknik di lapangan sulit untuk dilakukan, karena pemodelan yang dilakukan hanya sebagian dari kondisi lapangan, disamping itu adanya faktor – faktor lain yang ikut mempengaruhi kondisi sebenarnya.

Pemodelan numerik yang sesuai dengan kondisi lapangan sulit dilakukan karena keterbatasan program . Akan tetapi pendekatan masih dapat dilakukan dengan cara memberi batasan-batasan dalam pemodelan sehingga proses *generating meshing* dan proses perhitungan numerik masih mungkin untuk dilakukan.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan pada Bab 4 dapat disimpulkan beberapa hal antara lain:

- a. Pemodelan numerik pemancangan sistem injeksi pada tanah lempung (kondisi *Undrained*) dapat dilakukan (didekati) menggunakan metode *DCCE* dengan *prescribed displacement*  $0,21d - 0,25d$  dan model tanah Mohr-Coulomb. Hasil simulasi tiang tunggal ini sesuai dengan teori *CCE* (Vesic, 1972; Randolph dan Wroth, 1979). Hasil simulasi tiang tunggal PLAXIS 3D juga sesuai dengan hasil PLAXIS 2D dan teori, sehingga pemodelan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) dapat dimodelkan menggunakan PLAXIS 3D.
- b. Selisih perbedaan perpindahan lateral tanah antara hasil perhitungan berdasarkan teori *CCE* (Vesic, 1972) dan hasil PLAXIS dengan jaring elemen yang halus adalah  $< 10\%$ . Saat dibandingkan dengan data pengukuran perpindahan tanah dari Pestana et al (2002) juga memberikan selisih perbedaan perpindahan lateral  $< 10\%$ . Sedangkan selisih perbedaan eksese tekanan air pori tanah antara hasil PLAXIS dan teori (Randolph dan Wroth, 1979) adalah  $< 20\%$ . Selisih perbedaan tersebut tergantung dari tingkat kehalusan jaring elemen terutama yang berada di dekat tiang.
- c. Tren perpindahan lateral tanah di zona plastis pada setiap kedalaman relatif seragam, sedangkan tren eksese tekanan air pori tergantung dari parameter tanah di setiap kedalaman, saat kuat geser *undrained* ( $C_u$ ) semakin meningkat maka eksese tekanan air pori juga semakin meningkat. Perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori semakin berkurang seiring dengan bertambahnya jarak  $r$  (antara titik elemen tanah ke as tiang). Saat  $r > 12r_0$ , nilai perpindahan radial  $\rho < 0,1r_0$  dan nilai eksese tekanan air

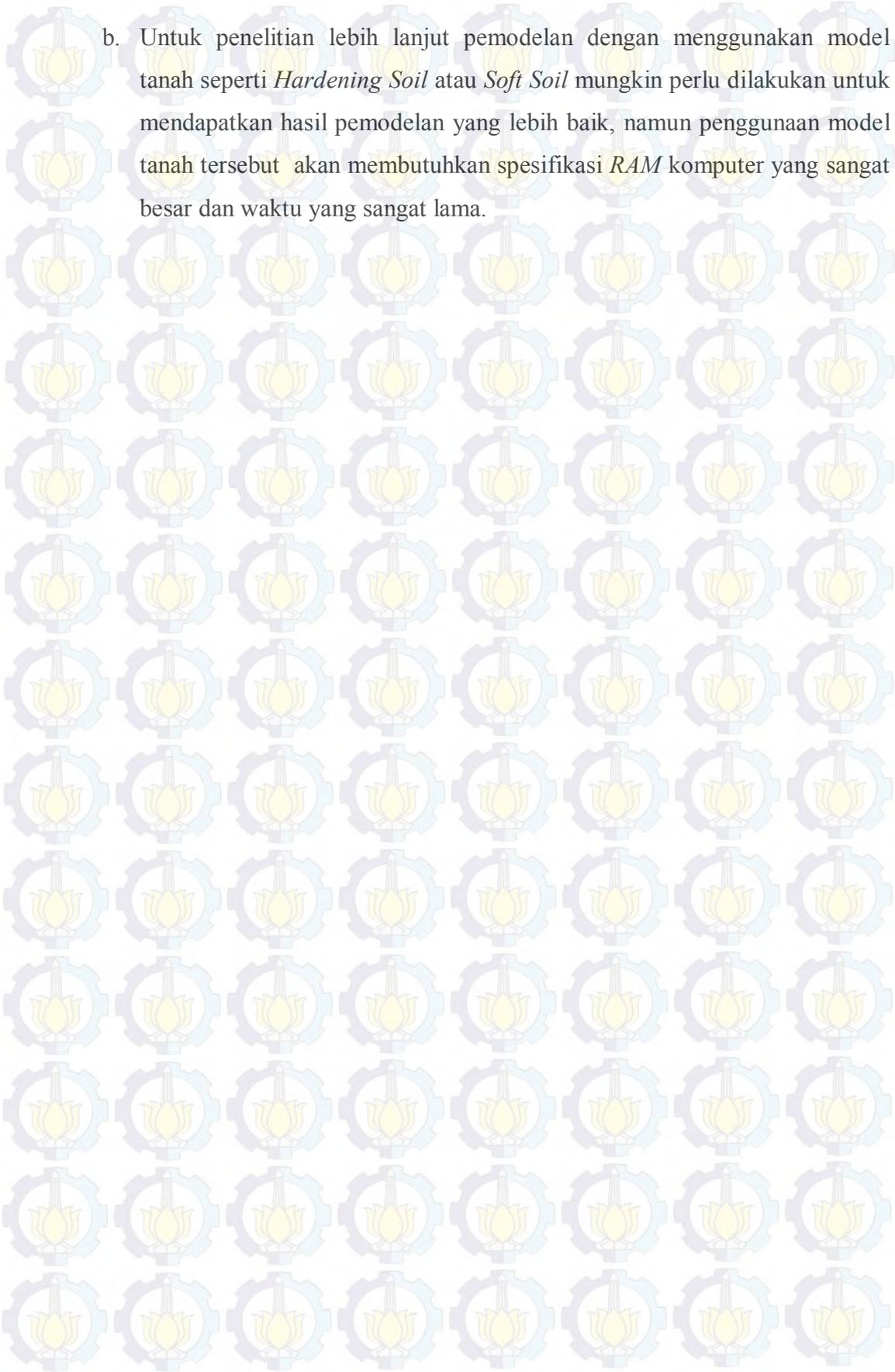
mendekati nol saat  $r = r_p$ , dimana  $r_p$  (radius zona plastis) tergantung dari parameter  $G / C_u$ .

- d. Hasil simulasi tiang tunggal dan kelompok tiang ( $> 1$  tiang) menunjukkan bahwa saat diameter semakin besar maka perpindahan lateral dan eksese tekanan air pori semakin besar.
- e. Hasil simulasi kelompok tiang menunjukkan bahwa saat jumlah tiang semakin bertambah maka perpindahan lateral ( $\rho$ ) dan eksese tekanan air pori juga semakin bertambah. Area eksese tekanan air pori bertambah mengikuti posisi penambahan tiang.
- f. Pengaruh alur simulasi pemancangan tiang menunjukkan bahwa saat arah pemancangan tiang menuju (mendekati) suatu titik, maka peningkatan perpindahan lateral antar fase penambahan tiang ( $\Delta\rho$ ) di titik yang didekati tersebut semakin bertambah, sedangkan ( $\Delta\rho$ ) di titik yang ditinggalkan semakin berkurang. Area eksese tekanan air pori di titik yang dituju juga semakin bertambah mengikuti alur pemancangan tiang.
- g. Hasil simulasi tiang berdasarkan data laporan pemancangan tanggal 22 juni 2013 pr oyek SL untuk simulasi 9 tiang memberikan perpindahan lateral tanah di titik IN-01 sebesar 22 mm dan eksese tekanan air pori di titik IN-01 pada kedalaman 3 m sebesar 6 kPa. Dari gambaran ini bisa dibayangkan apabila jumlah pemancangan cukup signifikan akan mengakibatkan suatu pergerakan tanah yang dapat merusak area sekitar pemancangan tersebut.

## 5.2 Saran

Dari analisa dan kesimpulan yang diberikan di atas, ada beberapa saran yang perlu disampaikan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

- a. Untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal, susunan jaring elemen perlu dibuat sangat halus terutama di dekat tiang, tetapi sesuaikan dengan kapasitas RAM komputer karena saat jaring elemen semakin halus maka jumlah elemen dan *node* juga semakin banyak.

- 
- b. Untuk penelitian lebih lanjut pemodelan dengan menggunakan model tanah seperti *Hardening Soil* atau *Soft Soil* mungkin perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil pemodelan yang lebih baik, namun penggunaan model tanah tersebut akan membutuhkan spesifikasi *RAM* komputer yang sangat besar dan waktu yang sangat lama.



## DAFTAR PUSTAKA

- Atkinson, J.H dan Bransby, P.L. (1978), *The Mechanics of Soil (An Introduction to Critical State Soil Mechanics)*, Mc Graw Hill, London.
- Binkgreve, R.B.J. dan Tim (2002). *PLAXIS 2D V8*, Delft University of Technology & PLAXIS b.v, Netherlands.
- Binkgreve, R.B.J., E. Engin., W.M. Swolfs., dan Tim (2012). *PLAXIS 3D 2012*, Delft University of Technology & PLAXIS b.v, Netherlands.
- Bowles J.E. (1997), *Foundation analysis and design, Fifth Edition*, Mc Graw Hill, Inc., Newyork.
- Broere, W dan A. F. van Tol. (2006). "Modelling The Bearing Capacity of Displacement Piles in Sand". *Proceeding of the institution of Civil Engineers - Delft University of Technology*, hal. 195-206.
- Butterfield, R. dan Banerjee, P. K. (1970), "The effect of pore water pressures on the ultimate bearing capacity of driven piles", *Proceeding Second South East Asian Conference Soil Engineering, Bangkok*, 385-394.
- Chai J., Carter J P., Norihiko Miura, and Hehua Zhu. (2009). "Improved Prediction of Lateral Deformations due to Installation of Soil-Cement Columns". *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 12, hal. 1836-1845.
- Cooke, RW dan Price, G 1973. "Strains and displacements around friction pile ". *Proceedings of the 8<sup>th</sup> . International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering*, Moscow, Vol. 2.1, pp 53-60.
- Das, B.M. (2006), *Principles of Geotechnical Engineering*, 7<sup>th</sup> Edition, Cengage, Stamford.
- Das, B.M. (1985), *Mekanika Rekayasa: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik*, oleh Noor Endah, Erlangga, Jakarta.
- Duncan, J.M. and Buchignani, A. L. (1976). *An Engineering Manual for Settlement Studies*, University of California, Berkley.

- Francescon, M. (1983), *Model Pile Tests In Clay: Stresses And Displacements Due To Installation And Axial Loading*, Tesis Ph.D., Cambridge University, Cambridge - U.K.
- Hardiyatmo, H.C. (2006). *Teknik Pondasi 2*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Jun-wei Liu, Zhongmiao Zhang , Nianwu Liu, dan Feng Yu. (2011), “Ground movement during concrete pipe piles jacking in silt deposit”, *Advanced Material Research*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 295-297, 2024 - 2027
- Jun-wei Liu, Zhong-miao Zhang, Feng Yu, dan Zhi-zhuan Xie. (2012). “Case History of Installing Instrumented Jacked Open-Ended Piles” . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 138, 810-820.
- Maryono, (2014), *Kajian Efek Desakan Tiang Terhadap Gerakan Turap Pada Tanah Lunak*, Tesis, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Paulina N dan Johanna R. (2011), *Environmental Impact of Pile Driving*, Tesis, Chalmers University Of Technology, Goteborg - Sweden.
- Pestana, J.M., Christopher E.H., dan Jonathan, D.B. (2002), “Soil Deformation and Excess Pore Pressure Field around a Closed-Ended Pile”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No 1, hal. 1-12
- Pham Huy Dung. (2009), *Modelling of Installation Effect of Driven Piles by Hypoplasticity*, Tesis, Delft University of Technology, Delft - Netherlands.
- Poulos, H.G ( 1994), “Effect Of Pile Driving On Adjacent Piles In Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 6,856-867
- Randolph, M. F., Carter, J. P., dan Wroth, C. P. (1979a), “Driven piles in clay - the effects of installation and subsequent consolidation”, *Geotechnique*, 29(4), 361–393.
- Randolph, M. F., Steenfelt, J. S. dan Wroth, C. P. (1979b), “The effect of pile type on design parameters for driven piles”, *Proceedings 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, 107-114.
- Randolph, M. F. dan Wroth, C. P. (1979), “An analytical solution for the consolidation around a driven pile”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3, 217-229.

Satibi Syawal, Ayman Abed., Chuang Yu., Martino Leoni., Pieter A. Vermeer. (2007), *FE Simulation of Installation and Loading of Tube-Installed Pile*, Universitat Stuttgart, Stuttgart.

Skempton, A.W, (1957), "Discussion on planning and design of the new Hong Kong airport", *Proc. Instn Civil Engrs*, 7, 306.

Steenfelt, J. S., Randolph, M. F. and Wroth, C. P. (1981). "Instrumented model piles jacked into clay." *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sweden, 857-864.

Swan, C.C, "Changes in Soil During Pile Driving". Instructor, 53:139 Foundation Engineering The University of Iowa.

Vesic, A. S. (1972). "Expansion of cavities in infinite soil mass", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94(SM3), 661-688.

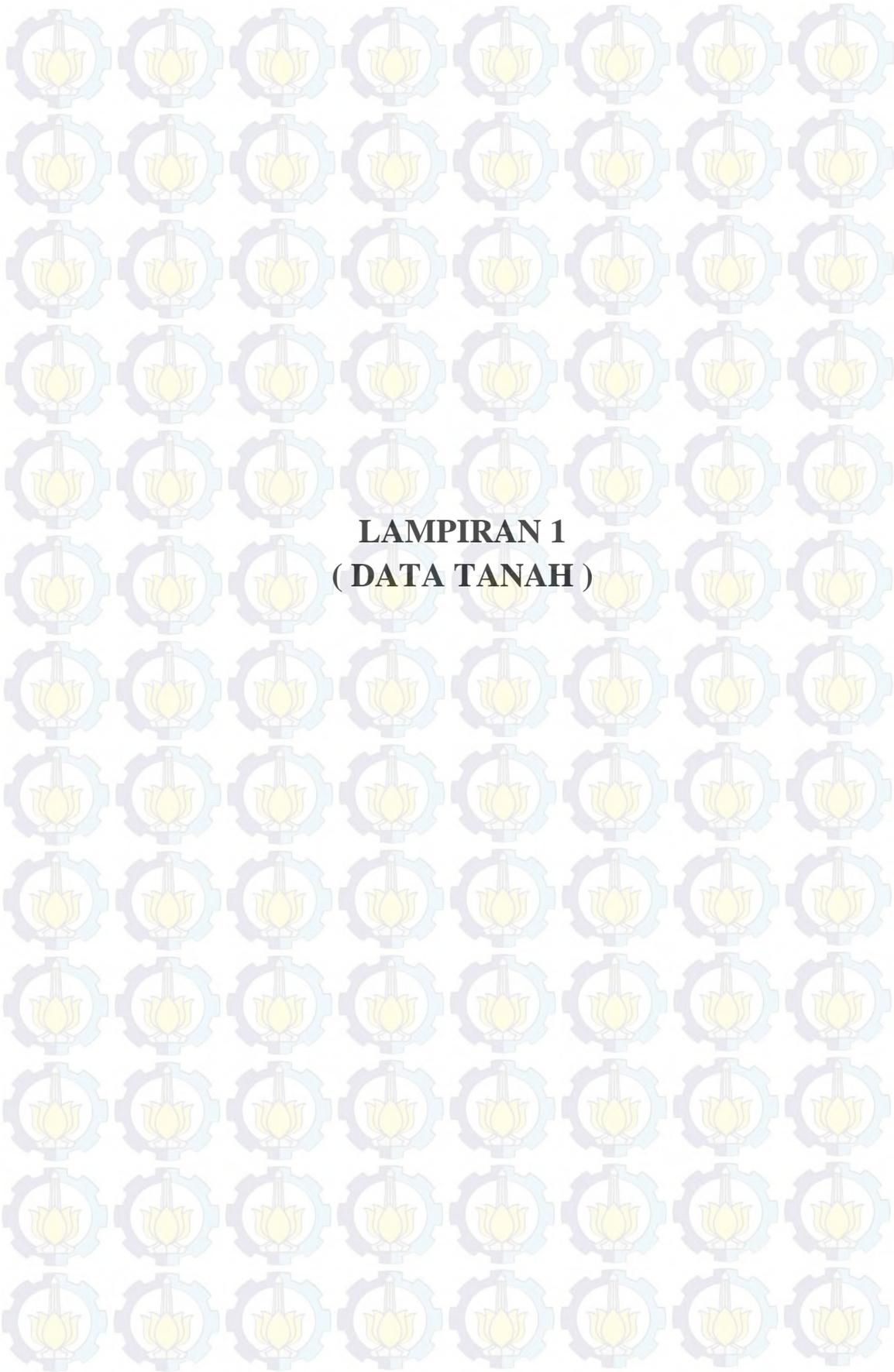
Yu, F. (2004), *Behavior of large capacity jacked piles*, Tesis Ph.D, University of Hong Kong, Hong Kong.

Yu-nong Li, Jing-pei Li, Shu-taoZhang. (2010), "Model Test research on the Compaction Effect of Jacked Pile in Layered Soil", *Geo-Shanghai International Conference*, 238-245

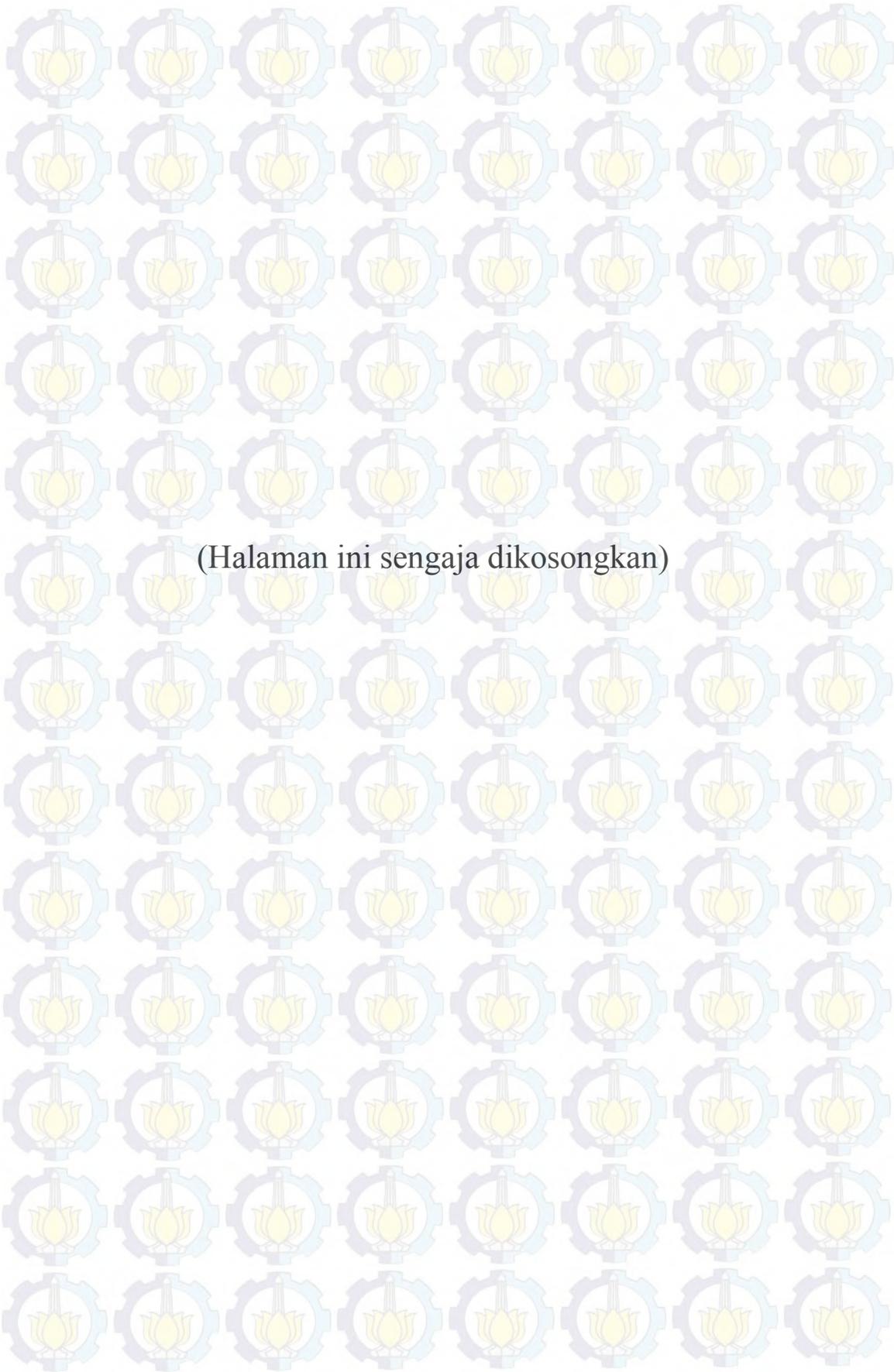
Zsolt Remai. (2012), "Correlation of undrained shear strength and CPT resistance", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, 57/1, 39-44



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



**LAMPIRAN 1  
( DATA TANAH )**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**PROGRAM DIPLOMA TEKNIK SIPIL**  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**

Kampus ITS Manyar, Jl. Menur 127 Surabaya 60116  
Telp. : 031 5981006, 5947637 Fax. : 031-5981006  
E-mail : labujimatna1.its@gmail.com

**DRILLING LOG**

| Project No.       |            | Project : PT. Sampo Auri Lestari          |        | Type of Drilling          |         | Rotary                          |                 | Remarks                   |             |                      |                     |     |    |         |
|-------------------|------------|---|--------|---------------------------|---------|---------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------|----------------------|---------------------|-----|----|---------|
| Bore Hole No      |            | Lokasi : Kandang Hentak Nambawa           |        | Date                      |         | 23 Juni - 24 Juni 2012          |                 | U1 = Undisturb Sample     |             |                      |                     |     |    |         |
| Water Table       |            | Elevation : ± 0.0 ( muka tanah setempat ) |        | Driller                   |         | Santosa                         |                 | SPT = SPT Test            |             |                      |                     |     |    |         |
| Soak in (minutes) | Depth in m | Thickness in m                            | Liquor | Type of Soil              | Color   | Relative Density or Consistency | General Remarks | Standard Penetration Test |             |                      |                     |     |    |         |
|                   |            |   |        |                           |         |                                 |                 | Depth in m                | Sample Code | Blow/Ave Blows/30 cm | Blow per each 15 cm |     |    | N-Value |
|                   |            |   |        |                           |         |                                 |                 |                           | 15 cm       | 15 cm                | 15 cm               |     |    |         |
| 0                 | 0.00       |   |        |                           |         |                                 |                 |                           |             |                      |                     |     |    |         |
| 1                 |            |   |        | Lempung Berlempu          | Abu-abu | Very Soft to Soft               |                 | U1                        | PT 1        | 4                    | 1                   | 2   | 3  | 0.4     |
| 2                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 2        | 9                    | 0                   | 0   | 1  | 1       |
| 3                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 3        | 5                    | 0                   | 0   | 1  | 1       |
| 4                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 4        | 5                    | 0                   | 0   | 1  | 1       |
| 5                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 5        | 2                    | 1                   | 1   | 1  | 2       |
| 6                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 6        | 3                    | 1                   | 1   | 2  | 2       |
| 7                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 7        | 4                    | 1                   | 2   | 2  | 4       |
| 8                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 8        | 4                    | 2                   | 2   | 2  | 4       |
| 9                 |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 9        | 4                    | 2                   | 3   | 3  | 6       |
| 10                | 15.00      | 15.00                                     |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 10       | 9                    | 4                   | 5   | 4  | 9       |
| 11                |            |   |        | Lempung Berlempu Berpasir | Abu-abu | Medium to Hard                  |                 | U1                        | PT 11       | 23                   | 10                  | 11  | 12 | 23      |
| 12                |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 12       | 31                   | 10                  | 13  | 16 | 31      |
| 13                |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 13       | 16                   | 13                  | 15  | 20 | 35      |
| 14                |            |   |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 14       | 28                   | 8                   | 12  | 16 | 28      |
| 15                | 25.00      | 25.00                                     |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 15       | >60                  | 16                  | >60 | -  | >60     |
| 16                |            |   |        | Lempung Berlempu          | Abu-abu | Hard                            |                 | U1                        | PT 16       | 33                   | 9                   | 13  | 20 | 33      |
| 17                | 25.00      | 25.00                                     |        |                           |         |                                 |                 | U1                        | PT 17       | 32                   | 9                   | 12  | 20 | 32      |

Legende :  
 = Lempung  
 = Pasir  
 = Retan  
 = Makas Air Tanah  
 = Gumpal  
 = Keras



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN**  
**PROGRAM DIPLOMA TEKNIK SIPIL**  
**LABORATORIUM UJI MATERIAL**

Kampus ITS Manyar, Jl. Menur 127 Surabaya 60116  
Telp. : 031 5981006, 5947637 Fax. : 031-5981006  
E-mail : labujimat.its@gmail.com

**DRILLING LOG**

| Drilling No. _____   |               | Drilling PT. Sama Aji Lentera             |       | Type of Drilling Rotary     |         | Remarks                            |                 |                           |             |               |                     |    |     |
|----------------------|---------------|---|-------|-----------------------------|---------|------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------|---------------|---------------------|----|-----|
| Bore Hole No. BM 2   |               | Lokasi : Sadang Perak Surabaya            |       | Date 24 Juni - 26 Juni 2012 |         | US = Undisturb Sample              |                 |                           |             |               |                     |    |     |
| Water Table - 2.00 M |               | Elevation : ± 0,0 ( muka tanah setempat ) |       | Driller Santosa             |         | SPT = SPT Test                     |                 |                           |             |               |                     |    |     |
| Soils in<br>Interval | Depth in<br>m | Water in<br>m                             | Fogel | Type of Soil                | Color   | Moisture Content<br>or Consistency | General Remarks | Standard Penetration Test |             |               |                     |    |     |
|                      |               |   |       |                             |         |                                    |                 | Depth in<br>m             | Sample Code | Blow<br>Count | Blow per inch 15 cm |    |     |
|                      |               |   |       |                             |         |                                    |                 |                           | 15 cm       | 15 cm         | 15 cm               |    |     |
|                      | 0.00          |   |       |                             |         |                                    |                 |                           |             |               |                     |    |     |
|                      | 1.00          |   |       |                             |         |                                    |                 |                           |             |               |                     |    |     |
|                      | 1.00 - 1.50   |   |       | Lempung Berlempas           | Abu-abu | Very Soft<br>s/d<br>Medium         |                 | US<br>SPT 1               | 4           | 1             | 2                   | 3  | 9   |
|                      | 1.50 - 2.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 2               | 3           | 1             | 1                   | 3  | 9   |
|                      | 2.00 - 2.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 3               | 1           | 0             | 0                   | 1  | 9   |
|                      | 2.50 - 3.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 4               | 1           | 0             | 0                   | 1  | 9   |
|                      | 3.00 - 3.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 5               | 3           | 1             | 1                   | 2  | 9   |
|                      | 3.50 - 4.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 6               | 4           | 2             | 2                   | 3  | 9   |
|                      | 4.00 - 4.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 7               | 5           | 2             | 2                   | 3  | 9   |
|                      | 4.50 - 5.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 8               | 9           | 3             | 3                   | 3  | 9   |
|                      | 5.00 - 5.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 9               | 8           | 2             | 3                   | 3  | 9   |
|                      | 5.50 - 6.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 10              | 8           | 2             | 3                   | 3  | 9   |
|                      | 6.00 - 6.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 11              | 15          | 4             | 7                   | 5  | 15  |
|                      | 6.50 - 7.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 12              | 19          | 5             | 9                   | 10 | 19  |
|                      | 7.00 - 7.50   |   |       | Lempung Berlempas<br>Deras  | Abu-abu | Medium<br>s/d<br>Hard              |                 | US<br>SPT 13              | 33          | 11            | 15                  | 10 | 33  |
|                      | 7.50 - 8.00   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 14              | 23          | 5             | 0                   | 15 | 33  |
|                      | 8.00 - 8.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 15              | 190         | 100           | -                   | -  | 190 |
|                      | 8.50 - 9.00   |   |       | Lempung Berlempas           | Abu-abu | Hard                               |                 | US<br>SPT 16              | 33          | 10            | 13                  | 20 | 33  |
|                      | 9.00 - 9.50   |   |       |                             |         |                                    |                 | US<br>SPT 17              | 36          | 12            | 17                  | 22 | 36  |

Legenda :  
 = Lempung  
 = Lempas  
 = Pasir  
 = Batu  
 = Bekas  
 = Muka Air bawah



| DRILLING LOG          |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
|-----------------------|---------|---|------------------|--------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|------------|---------------------------|-------|-------|-----------|
| Project No. : 1       |         | Thruout : FT. Sura Auri Lestari           |                  |        |                          | Type of Drilling : Rotary     |                                 | Remarks :             |               |            |                           |       |       |           |
| Bore Hole No. : BM 2  |         | Lokasi : Kandang Bantak Surabaya          |                  |        |                          | Date : 24 Juni - 26 Juni 2012 |                                 | SD = Undisturb Sample |               |            |                           |       |       |           |
| Water Table : -2.00 M |         | Elevation : ± 0.0 ( muka tanah setempat ) |                  |        |                          | Driller : Santoso             |                                 | SPT = SPT Test        |               |            |                           |       |       |           |
| Depth in m            | Diwater | Depth in m                                | Water level in m | Legend | Type of Soil             | Color                         | Moisture Content or Consistency | Crane / Remarks       | SD / SPT TEST |            | Standard Penetration Test |       |       | N - Value |
|                       |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       | Depth in m    | Sample No. | Blows per each of soil    |       |       |           |
|                       |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            | 15 cm                     | 30 cm | 45 cm |           |
| 0                     |         | 0.00                                      |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 1                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 2                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 3                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 4                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 5                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 6                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 7                     |         |   |                  |        | Lempung Berdebu          | abu-abu                       | Very Soft and Medium            |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 8                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 9                     |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 10                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 11                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 12                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 13                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 14                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 15                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 16                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 17                    |         | -17.00                                    | -17.00           |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 18                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 19                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 20                    |         |   |                  |        | Lempung Berdebu Bersisir | Abu-abu                       | Medium and Hard                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 21                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 22                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 23                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 24                    |         | 23.00                                     | 23.00            |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 25                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 26                    |         | 25.00                                     | 25.00            |        | Lempung Berdebu          | Abu-abu                       | Hard                            |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 27                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 28                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 29                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 30                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 31                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 32                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 33                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 34                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 35                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 36                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 37                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 38                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 39                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 40                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 41                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 42                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 43                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 44                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 45                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 46                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 47                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 48                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 49                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 50                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 51                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 52                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 53                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 54                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 55                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 56                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 57                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 58                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 59                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |
| 60                    |         |   |                  |        |                          |                               |                                 |                       |               |            |                           |       |       |           |

Legenda :  
 = Lempung  
 = Lempung Bersisir  
 = Pasir  
 = Pasir Halus  
 = Batu  
 = Muka Air Tanah



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

| Proyek  |                              | :                              | Samator                 | STA      | :        |        |
|---|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------|----------|--------|
| Standard  |                              | :                              | ASTM                    | BH       | :        | BMI    |
| Lokasi  |                              | :                              | Kedung Baruk - Surabaya |          |          |        |
| BH  |                              |                                | BMI                     | BMI      | BMI      | BMI    |
| Sample Depth (m)  |                              |                                | - 2,5                   | - 5      | - 10     | - 15   |
| Physical Properties                                     | Unit weight                  | $\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> ) | 1,613                   | 1,515    | 1,518    | 1,630  |
|   | Dry unit weight              | $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> ) | 1,120                   | 1,025    | 1,021    | 1,119  |
|   | Water content                | $W_c$ (%)                      | 44,02                   | 47,78    | 48,68    | 45,68  |
|   | Degree of Saturation         | $S_r$ (%)                      | 100,0                   | 100,0    | 100,0    | 100,0  |
|   | Porosity                     | $n$ (%)                        | 56,9                    | 59,4     | 59,2     | 57,2   |
|   | Void Ratio                   | $e$                            | 1,321                   | 1,462    | 1,449    | 1,338  |
|   | Specific Gravity             | $G_s$                          | 2,600                   | 2,524    | 2,500    | 2,616  |
| Atterberg Limit   | Liquid limit                 | LL (%)                         | 80,12                   | 64,85    | 88,78    | 119,25 |
|   | Plastic limit                | PL (%)                         | 31,08                   | 30,580   | 31,05    | 34,02  |
|   | Plasticity Index             | PI (%)                         | 49,04                   | 34,27    | 57,73    | 85,23  |
| Grain Size Distribution                                 | Gravel                       | (%)                            | -                       | -        | -        | -      |
|   | Sand                         | (%)                            | -                       | -        | -        | 18,79  |
|   | Silt                         | (%)                            | 23,40                   | 22,40    | 27,40    | 22,40  |
|   | Clay                         | (%)                            | 76,60                   | 77,60    | 72,60    | 77,60  |
|   | Max. diameter                | (mm)                           | *                       | *        | *        | *      |
|   | Diam. at 60%                 | (mm)                           | *                       | *        | *        | *      |
|   | Diam. at 10%                 | (mm)                           | *                       | *        | *        | *      |
| Unconfined Compression Test                             | Peak Deviator Stress, $q_u$  | (kg/cm <sup>2</sup> )          | *                       | *        | *        | *      |
|   | Undisturbed Cohesion, $C_u$  | (kg/cm <sup>2</sup> )          | *                       | *        | *        | *      |
|   | Modulus Elasticity, $E_{50}$ | (kg/cm <sup>2</sup> )          | *                       | *        | *        | *      |
|   | Strain at failure            | (%)                            | *                       | *        | *        | *      |
| Triaxial Test   | Friction Angle               | (degree)                       | 0,60                    | 0,50     | 0,90     | 1,70   |
|   | Cohesion Intercept           | (kg/cm <sup>2</sup> )          | 0,107                   | 0,120    | 0,156    | 0,186  |
|   | Drainage condition           |                                | UU                      | UU       | UU       | UU     |
| Direct Shear Test                                       | Friction Angle               | (degree)                       | *                       | *        | *        | *      |
|   | Cohesion Intercept           | (kg/cm <sup>2</sup> )          | *                       | *        | *        | *      |
| Permeability Test                                       | Unit weight                  | $\gamma_s$ (t/m <sup>3</sup> ) | 1,561                   | 1,501    | 1,464    | *      |
|   | Koefisien Permeability       | (cm/s)                         | 4,54E-07                | 8,40E-07 | 9,61E-08 | *      |
| Consolidation Test                                      | Preconsolidation Pressure    | (kg/cm <sup>2</sup> )          | 0,598                   | 0,664    | 0,664    | *      |
|   | Compression Index, $C_c$     |                                | 0,734                   | 0,867    | 0,855    | *      |
| Remarks :   |                              |                                |                         |          |          |        |
| * : Not test; NP = Non Plastic; NS = Not Sample SPT >50 |                              |                                |                         |          |          |        |

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

|  |                              |                        |                         |     |   |      |
|--|------------------------------|------------------------|-------------------------|-----|---|------|
| Project  |                              | :                      | Samator                 | STA | : |      |
| Standard   |                              | :                      | ASTM                    | BH  | : | BM I |
| Lokasi   |                              | :                      | Kedung Baruk - Surabaya |     |   |      |
| Sample No.   |                              |                        | BMI                     |     |   |      |
| Sample Depth (m)   |                              |                        | - 25                    |     |   |      |
| Physical Properties  | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | 1,717                   |     |   |      |
|  | Dry unit weight              | $\gamma_d$ ( $t/m^3$ ) | 1,233                   |     |   |      |
|  | Water content                | $W_c$ (%)              | 39,24                   |     |   |      |
|  | Degree of Saturation         | $S_r$ (%)              | 100,0                   |     |   |      |
|  | Porosity                     | $n$ (%)                | 53,0                    |     |   |      |
|  | Void Ratio                   | $e$                    | 1,130                   |     |   |      |
|  | Specific Gravity             | $G_s$                  | 2,626                   |     |   |      |
| Atterberg Limit  | Liquid limit                 | LL (%)                 | 68,00                   |     |   |      |
|  | Plastic limit                | PL (%)                 | 28,32                   |     |   |      |
|  | Plasticity Index             | PI (%)                 | 39,68                   |     |   |      |
| Grain Size Distribution  | Gravel                       | (%)                    | -                       |     |   |      |
|  | Sand                         | (%)                    | 19,74                   |     |   |      |
|  | Silt                         | (%)                    | 21,19                   |     |   |      |
|  | Clay                         | (%)                    | 59,07                   |     |   |      |
|  | Max. diameter                | (mm)                   | *                       |     |   |      |
|  | Diam. at 60%                 | (mm)                   | *                       |     |   |      |
|  | Diam. at 10%                 | (mm)                   | *                       |     |   |      |
| Unconfined Compression Test                                      | Peak Deviator Stress, $q_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *                       |     |   |      |
|  | Undisturbed Cohesion, $C_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *                       |     |   |      |
|  | Modulus Elasticity, $E_{50}$ | ( $kg/cm^2$ )          | *                       |     |   |      |
|  | Strain at failure            | (%)                    | *                       |     |   |      |
| Triaxial Test  | Friction Angle               | (degree)               | 5,10                    |     |   |      |
|  | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | 0,747                   |     |   |      |
|  | Drainage condition           |                        | UU                      |     |   |      |
| Direct Shear Test  | Friction Angle               | (degree)               | *                       |     |   |      |
|  | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | *                       |     |   |      |
| Permeability Test  | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | *                       |     |   |      |
|  | Koefisien Permeability       | ( $cm/s$ )             | *                       |     |   |      |
| Consolidation Test   | Preconsolidation Pressure    | ( $kg/cm^2$ )          | *                       |     |   |      |
|  | Compression Index, $C_c$     |                        | *                       |     |   |      |
| Remarks :  |                              |                        |                         |     |   |      |
| * : Not tests      NP = Non Plastic      NS = Not Sample/SPT >50 |                              |                        |                         |     |   |      |

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

Proyek : Samator  
 Standard : ASTM  
 Lokasi : Kedung Baruk - Surabaya

STA :  
 BH : BM II

| BH  |                              | BM II                  | BM II    | BM II    | BM II    | BM II    |       |
|---|------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Sample Depth (m)  |                              | - 2,5                  | - 5      | - 10     | - 15     | - 20     |       |
| Physical Properties                                       | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | 1,682    | 1,521    | 1,553    | 1,516    | 1,682 |
|   | Dry unit weight              | $\gamma_d$ ( $t/m^3$ ) | 1,206    | 1,017    | 1,042    | 1,016    | 1,166 |
|   | Water content                | $W_c$ (%)              | 39,44    | 49,51    | 49,02    | 49,21    | 44,29 |
|   | Degree of Saturation         | $S_r$ (%)              | 100,0    | 100,0    | 100,0    | 100,0    | 100,0 |
|   | Porosity                     | $n$ (%)                | 52,9     | 59,4     | 58,4     | 59,5     | 54,7  |
|   | Void Ratio                   | $e$                    | 1,125    | 1,460    | 1,405    | 1,467    | 1,208 |
|   | Specific Gravity             | $G_s$                  | 2,563    | 2,503    | 2,506    | 2,507    | 2,574 |
| Atterberg Limit   | Liquid limit                 | LL (%)                 | 68,58    | 98,68    | 95,00    | 107,45   | 68,71 |
|   | Plastic limit                | PL (%)                 | 34,21    | 41,98    | 35,83    | 36,14    | 34,37 |
|   | Plasticity Index             | PI (%)                 | 34,37    | 56,70    | 59,17    | 71,31    | 34,34 |
| Grain Size Distribution                                   | Gravel                       | (%)                    | -        | -        | -        | -        | -     |
|   | Sand                         | (%)                    | 16,70    | -        | -        | -        | -     |
|   | Silt                         | (%)                    | 21,16    | 26,40    | 21,40    | 20,40    | 23,40 |
|   | Clay                         | (%)                    | 62,14    | 73,60    | 78,60    | 79,60    | 76,60 |
|   | Max. diameter                | (mm)                   | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Diam. at 60%                 | (mm)                   | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Diam. at 10%                 | (mm)                   | *        | *        | *        | *        | *     |
| Unconfined Compression Test                               | Peak Deviator Stress, $q_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Undisturbed Cohesion, $C_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Modulus Elasticity, $E_{50}$ | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Strain at failure            | (%)                    | *        | *        | *        | *        | *     |
| Triaxial Test   | Friction Angle               | (degree)               | 1,50     | 0,90     | 0,70     | 1,20     | 2,60  |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | 0,104    | 0,047    | 0,115    | 0,179    | 0,597 |
|   | Drainage condition           |                        | UU       | UU       | UU       | UU       | UU    |
| Direct Shear Test   | Friction Angle               | (degree)               | *        | *        | *        | *        | *     |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *        | *     |
| Permeability Test   | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | 1,65     | 1,46     | 1,48     | *        | *     |
|   | Koefisien Permeability       | ( $cm/s$ )             | 4,46E-07 | 2,08E-07 | 6,26E-08 | 1,00E-06 | *     |
| Consolidation Test  | Preconsolidation Pressure    | ( $kg/cm^2$ )          | 0,76     | 0,88     | 0,96     | *        | *     |
|   | Compression Index, $C_c$     |                        | 0,57     | 0,70     | 0,70     | *        | *     |
| Remarks :   |                              |                        |          |          |          |          |       |
| * : Not test; NP = Non Plastic NS = Not Sample / SPT > 30 |                              |                        |          |          |          |          |       |

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

|   |                              |                           |               |       |         |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------|-------|---------|
| Project   |                              | : Samator                 |               | STA   | :       |
| Standard  |                              | : ASTM                    |               | BH    | : BM II |
| Lokasi  |                              | : Kedung Baruk - Surabaya |               |       |         |
| Sample No.  |                              | BM II                     |               |       |         |
| Sample Depth (m)  |                              | - 25                      |               |       |         |
| Physical Properties                                     | Unit weight                  | $\gamma_t$                | ( $t/m^3$ )   | 1,680 |         |
|   | Dry unit weight              | $\gamma_d$                | ( $t/m^3$ )   | 1,238 |         |
|   | Water content                | $W_c$                     | (%)           | 35,66 |         |
|   | Degree of Saturation         | $S_r$                     | (%)           | 100,0 |         |
|   | Porosity                     | $n$                       | (%)           | 52,5  |         |
|   | Void Ratio                   | $e$                       |               | 1,105 |         |
|   | Specific Gravity             | $G_s$                     |               | 2,607 |         |
| Atterberg Limit   | Liquid limit                 | LL                        | (%)           | 65,55 |         |
|   | Plastic limit                | PL                        | (%)           | 27,64 |         |
|   | Plasticity Index             | PI                        | (%)           | 37,91 |         |
| Grain Size Distribution                                 | Gravel                       |                           | (%)           | -     |         |
|   | Sand                         |                           | (%)           | -     |         |
|   | Silt                         |                           | (%)           | 22,40 |         |
|   | Clay                         |                           | (%)           | 77,60 |         |
|   | Max. diameter                |                           | (mm)          | *     |         |
|   | Diam. at 60%                 |                           | (mm)          | *     |         |
|   | Diam. at 10%                 |                           | (mm)          | *     |         |
| Unconfined Compression Test I                           | Peak Deviator Stress, $q_u$  |                           | ( $kg/cm^2$ ) | *     |         |
|   | Undisturbed Cohesion, $C_u$  |                           | ( $kg/cm^2$ ) | *     |         |
|   | Modulus Elasticity, $E_{50}$ |                           | ( $kg/cm^2$ ) | *     |         |
|   | Strain at failure            |                           | (%)           | *     |         |
| Triaxial Test I   | Friction Angle               |                           | (degree)      | 3,90  |         |
|   | Cohesion Intercept           |                           | ( $kg/cm^2$ ) | 0,790 |         |
|   | Drainage condition           |                           |               | UU    |         |
| Direct Shear Test I                                     | Friction Angle               |                           | (degree)      | *     |         |
|   | Cohesion Intercept           |                           | ( $kg/cm^2$ ) | *     |         |
| Permeability Test I                                     | Unit weight                  | $\gamma_t$                | ( $t/m^3$ )   | *     |         |
|   | Koefisien Permeability       |                           | ( $cm/s$ )    | *     |         |
| Consolidation Test I                                    | Preconsolidation Pressure    |                           | ( $kg/cm^2$ ) | *     |         |
|   | Compression Index, $C_c$     |                           |               | *     |         |
| Remarks :   |                              |                           |               |       |         |
| * : Not test; NP = Non Plastic; NS = Not Sample SPT >50 |                              |                           |               |       |         |

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

Proyek : Samator  
 Standard : ASTM  
 Lokasi : Kedung Baruk - Surabaya

STA :  
 BH : BM III

| BH  |                              |                        | BM III   | BM III   | BM III   | BM III | BM III |
|---|------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|--------|--------|
|   | Sample Depth (m)             |                        | - 2,5    | - 5      | - 10     | - 15   | - 20   |
| Physical Properties                                     | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | 1,566    | 1,520    | 1,602    | 1,512  | 1,637  |
|   | Dry unit weight              | $\gamma_d$ ( $t/m^3$ ) | 1,057    | 1,043    | 1,087    | 1,016  | 1,117  |
|   | Water content                | $W_c$ (%)              | 48,17    | 45,76    | 47,38    | 48,86  | 46,52  |
|   | Degree of Saturation         | $S_r$ (%)              | 100,0    | 100,0    | 100,0    | 100,0  | 100,0  |
|   | Porosity                     | $n$ (%)                | 58,8     | 58,3     | 58,0     | 59,4   | 57,4   |
|   | Void Ratio                   | $e$                    | 1,429    | 1,400    | 1,379    | 1,461  | 1,350  |
|   | Specific Gravity             | $G_s$                  | 2,567    | 2,503    | 2,586    | 2,500  | 2,625  |
| Atterberg Limit   | Liquid limit                 | LL (%)                 | 82,00    | 63,00    | 95,15    | 111,00 | 103,55 |
|   | Plastic limit                | PL (%)                 | 33,02    | 32,64    | 35,83    | 36,17  | 30,87  |
|   | Plasticity Index             | PI (%)                 | 48,98    | 30,36    | 59,32    | 74,83  | 72,68  |
| Grain Size Distribution                                 | Gravel                       | (%)                    | -        | -        | -        | -      | -      |
|   | Sand                         | (%)                    | -        | -        | -        | -      | -      |
|   | Silt                         | (%)                    | 25,40    | 24,40    | 23,40    | 22,40  | 21,40  |
|   | Clay                         | (%)                    | 74,60    | 75,60    | 76,60    | 77,60  | 78,60  |
|   | Max. diameter                | (mm)                   | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Diam. at 60%                 | (mm)                   | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Diam. at 10%                 | (mm)                   | *        | *        | *        | *      | *      |
| Unconfined Compression Test                             | Peak Deviator Stress, $q_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Undisturbed Cohesion, $C_u$  | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Modulus Elasticity, $E_{50}$ | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Strain at failure            | (%)                    | *        | *        | *        | *      | *      |
| Triaxial Test   | Friction Angle               | (degree)               | 0,80     | 0,30     | 1,60     | 1,80   | 4,80   |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | 0,110    | 0,090    | 0,136    | 0,155  | 0,948  |
|   | Drainage condition           |                        | UU       | UU       | UU       | UU     | UU     |
| Direct Shear Test                                       | Friction Angle               | (degree)               | *        | *        | *        | *      | *      |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )          | *        | *        | *        | *      | *      |
| Permeability Test                                       | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ ) | 1,477    | 1,598    | 1,458    | *      | *      |
|   | Koefisien Permeability       | ( $cm/s$ )             | 2,80E-07 | 1,73E-06 | 2,08E-07 | *      | *      |
| Consolidation Test                                      | Preconsolidation Pressure    | ( $kg/cm^2$ )          | 0,850    | 0,872    | 0,774    | *      | *      |
|   | Compression Index, $C_c$     |                        | 0,698    | 0,664    | 0,631    | *      | *      |
| Remarks :   |                              |                        |          |          |          |        |        |
| * : Not test; NP = Non Plastic; NS = Not Sample SPT >50 |                              |                        |          |          |          |        |        |

**Table SUMMARY OF LABORATORY TEST RESULTS**

|   |                              |                           |       |     |          |
|---|------------------------------|---------------------------|-------|-----|----------|
| Project   |                              | : Samator                 |       | STA | :        |
| Standard  |                              | : ASTM                    |       | BH  | : BM III |
| Lokasi  |                              | : Kedung Baruk - Surabaya |       |     |          |
| Sample No.  |                              | BM III                    |       |     |          |
| Sample Depth (m)  |                              | - 25                      |       |     |          |
| Physical Properties   | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ )    | NS    |     |          |
|   | Dry unit weight              | $\gamma_d$ ( $t/m^3$ )    | NS    |     |          |
|   | Water content                | $W_c$ (%)                 | NS    |     |          |
|   | Degree of Saturation         | $S_r$ (%)                 | NS    |     |          |
|   | Porosity                     | $n$ (%)                   | NS    |     |          |
|   | Void Ratio                   | $e$                       | NS    |     |          |
|   | Specific Gravity             | $G_s$                     | NS    |     |          |
| Atterberg Limit   | Liquid limit                 | LL (%)                    | 64,35 |     |          |
|   | Plastic limit                | PL (%)                    | 33,68 |     |          |
|   | Plasticity Index             | PI (%)                    | 30,67 |     |          |
| Grain Size Distribution   | Gravel                       | (%)                       | -     |     |          |
|   | Sand                         | (%)                       | -     |     |          |
|   | Silt                         | (%)                       | 20,40 |     |          |
|   | Clay                         | (%)                       | 79,60 |     |          |
|   | Max. diameter                | (mm)                      | *     |     |          |
|   | Diam. at 80%                 | (mm)                      | *     |     |          |
|   | Diam. at 10%                 | (mm)                      | *     |     |          |
| Unconfined Compression Test                                     | Peak Deviator Stress, $q_u$  | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
|   | Undisturbed Cohesion, $C_u$  | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
|   | Modulus Elasticity, $E_{50}$ | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
|   | Strain at failure            | (%)                       | *     |     |          |
| Triaxial Test   | Friction Angle               | (degree)                  | *     |     |          |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
|   | Drainage condition           |                           | *     |     |          |
| Direct Shear Test   | Friction Angle               | (degree)                  | *     |     |          |
|   | Cohesion Intercept           | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
| Permeability Test   | Unit weight                  | $\gamma_t$ ( $t/m^3$ )    | *     |     |          |
|   | Koefisien Permeability       | ( $cm/s$ )                | *     |     |          |
| Consolidation Test  | Preconsolidation Pressure    | ( $kg/cm^2$ )             | *     |     |          |
|   | Compression Index, $C_c$     |                           | *     |     |          |
| Remarks :   |                              |                           |       |     |          |
| * : Not test      NP = Non Plastic      NS = Not Sample SPT >50 |                              |                           |       |     |          |



| REVISI |        |
|--------|--------|
| No.    | Uraian |
| 1      | ...    |
| 2      | ...    |
| 3      | ...    |
| 4      | ...    |
| 5      | ...    |

Gambar 1



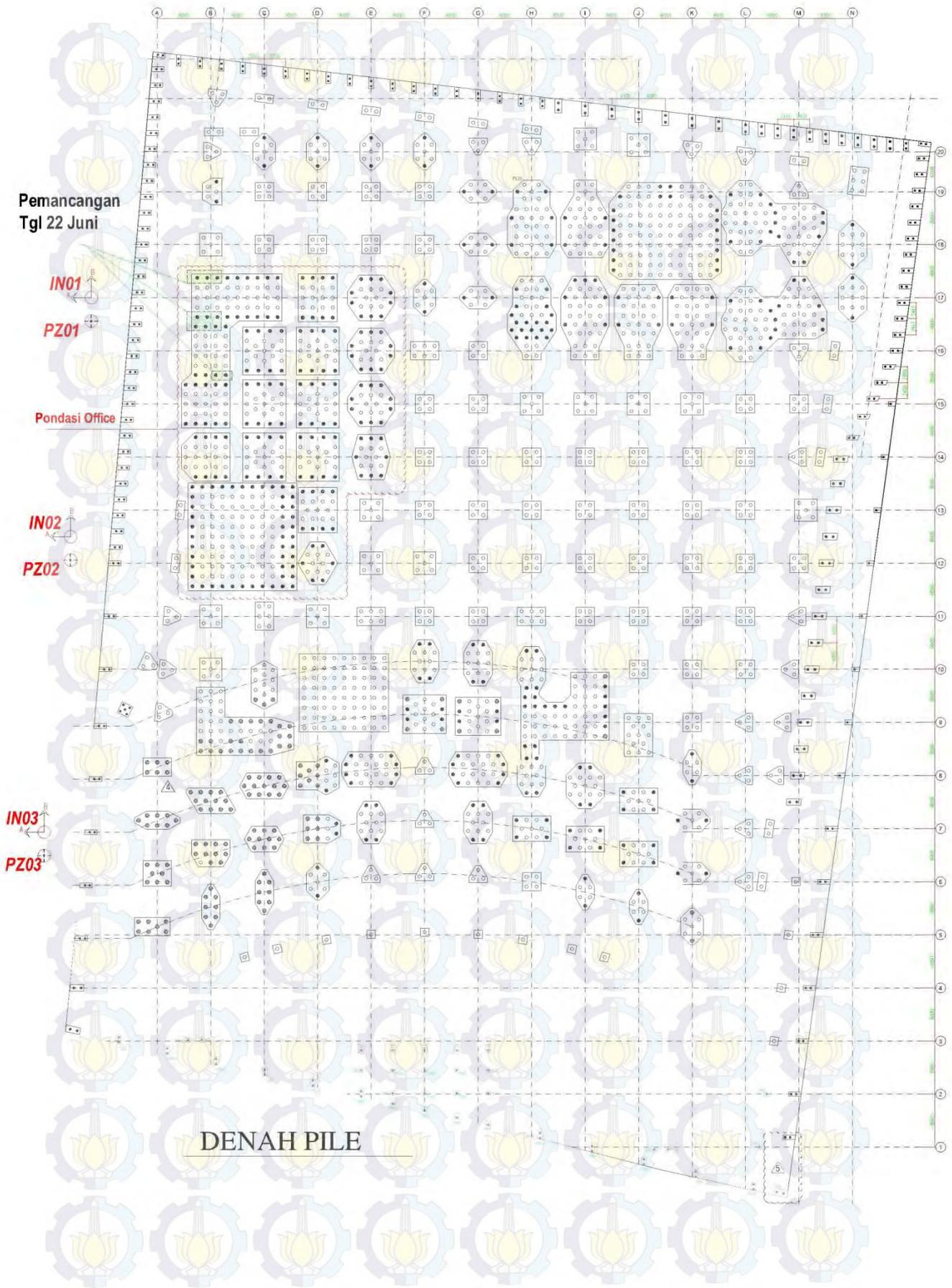
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



**LAMPIRAN 2**  
**( DATA PEMANCANGAN DAN DATA INSTRUMEN GEOTEKNIK**  
**PADA TANGGAL 22 JUNI 2013 )**



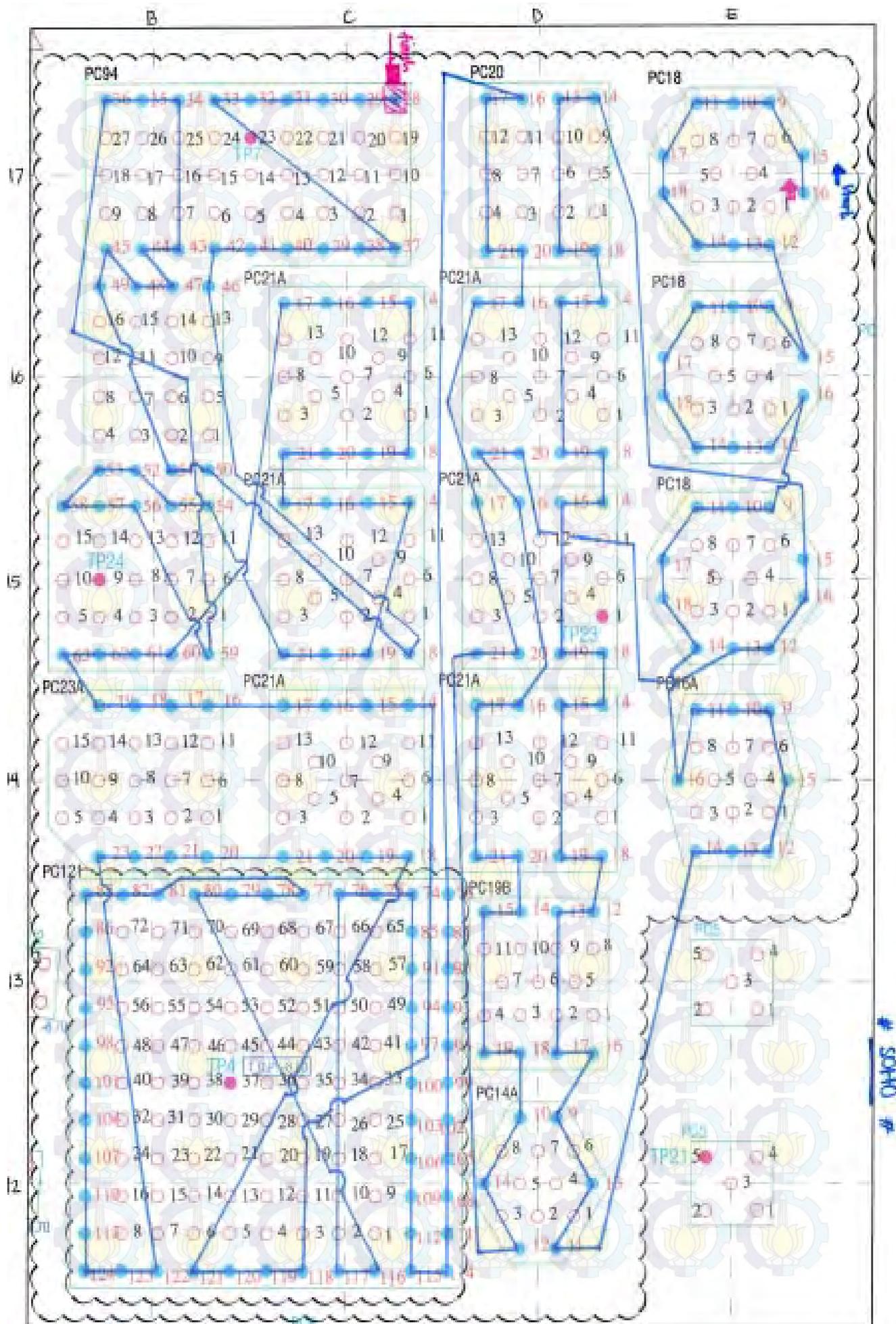
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



**DENAH PILE**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

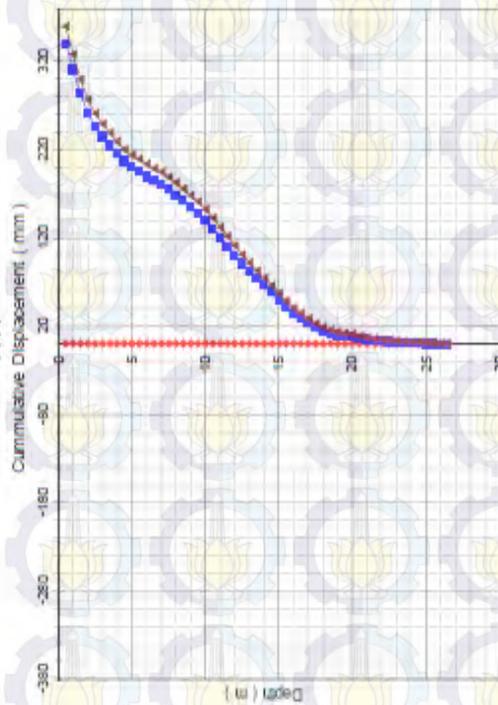
# INCLINOMETER READING

**IN-01**

|                      |  |  |             |
|----------------------|--|--|-------------|
| Project :            |  |  |             |
| Location :           | Jl. Kedung Baruk, Surabaya   |  |             |
| No. :                | IN-01  |  | Signature : |
| Depth :              | 25.5 m.  |  |             |
| Engineer :           | AT   |  |             |
| Supervision :        | AS   |  |             |
| Checked / Approved : | PPR  |  |             |
| Legend :             |  |  |             |

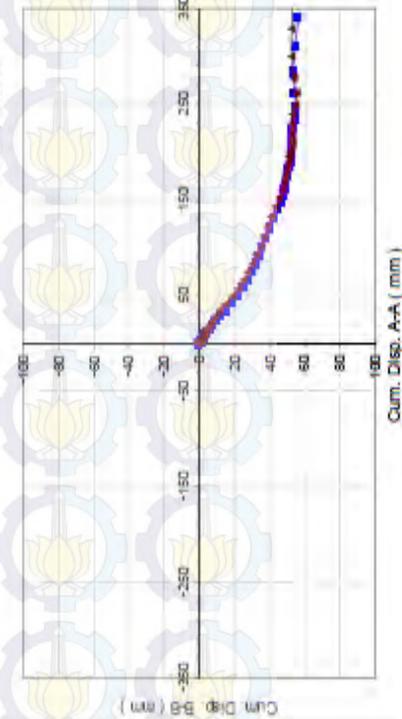
**INCLINOMETER IN-01**

A-A



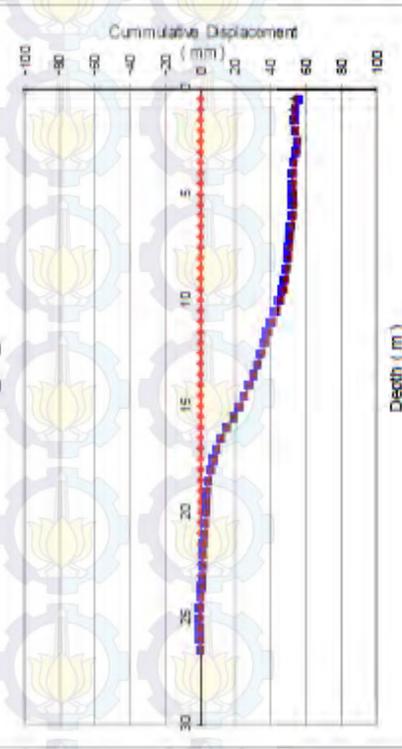
**INCLINOMETER IN-01**

PLAN VIEW

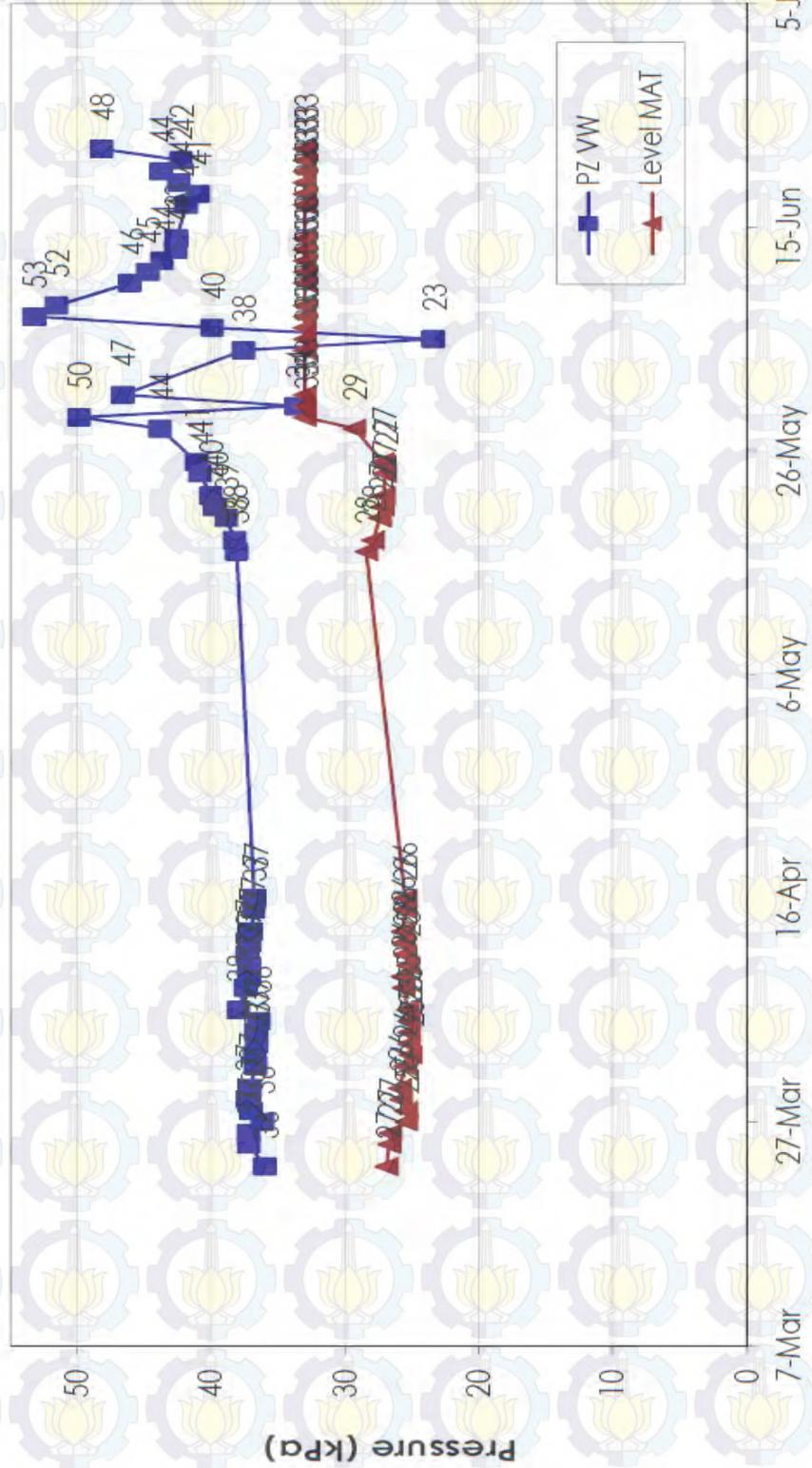


**INCLINOMETER IN-01**

B - B



### Piezometer Vibrating Wire (VW-01), depth 3 m



**Summary of Pile Driving Record**

Tipe mesin : ZYJ – 420

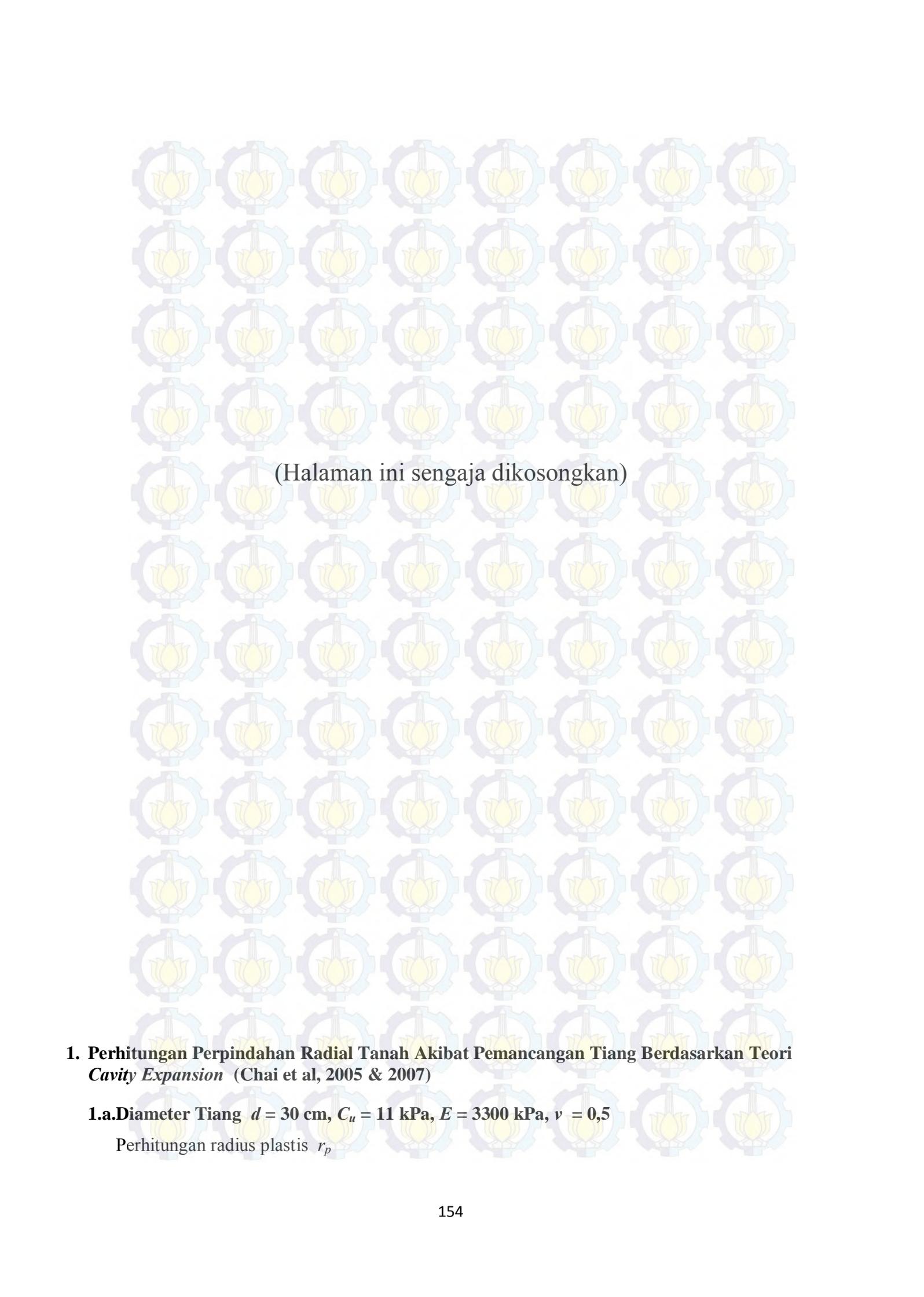
Tanggal : 15 Juni 2013 s/d 24 Juni 2013

| No. | Date      | Axis Pile Cap | ID Pile No. | P I L E D A T A |       |       |       |       | Total Length (m) | Final Penetration of Pile (m) | Dolly / Ruyung (m) | Joint |
|-----|-----------|---------------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------|-------|
|     |           |               |             | Type (mm)       | B (m) | M (m) | M (m) | T (m) |                  |                               |                    |       |
| 1   | 15-Jun-13 | 15C           | 15          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 26                            |                    | 1     |
| 2   | 15-Jun-13 | 15C           | 16          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 3   | 15-Jun-13 | 15C           | 17          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 4   | 15-Jun-13 | 15C           | 14          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 5   | 15-Jun-13 | 15C           | 15          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 6   | 15-Jun-13 | 15C           | 16          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 26                            |                    | 1     |
| 7   | 15-Jun-13 | 15C           | 17          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 8   | 15-Jun-13 | 15C           | 19          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 9   | 15-Jun-13 | 15C           | 20          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 28                            |                    | 1     |
| 10  | 19-Jun-13 | 15C           | 21          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 3                  | 1     |
| 11  | 19-Jun-13 | 16C           | 14          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 12  | 19-Jun-13 | 16C           | 18          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 13  | 19-Jun-13 | 16C           | 19          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 14  | 19-Jun-13 | 16C           | 20          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 3                  | 1     |
| 15  | 19-Jun-13 | 16C           | 21          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 26                            |                    | 1     |
| 16  | 21-Jun-13 | 17C           | 54          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 17  | 21-Jun-13 | 17C           | 55          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 3                  | 1     |
| 18  | 21-Jun-13 | 17C           | 52          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 19  | 21-Jun-13 | 17C           | 53          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 20  | 21-Jun-13 | 17C           | 58          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 21  | 21-Jun-13 | 17C           | 57          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 22  | 21-Jun-13 | 17C           | 55          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |
| 23  | 21-Jun-13 | 17C           | 59          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |
| 24  | 22-Jun-13 | 17C           | 34          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |
| 25  | 22-Jun-13 | 17C           | 35          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |
| 26  | 22-Jun-13 | 17C           | 36          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |
| 27  | 22-Jun-13 | 17C           | 43          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 1                  | 1     |
| 28  | 22-Jun-13 | 17C           | 44          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 29  | 22-Jun-13 | 17C           | 47          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 30  | 22-Jun-13 | 17C           | 48          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 31  | 22-Jun-13 | 17C           | 45          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 32  | 22-Jun-13 | 17C           | 49          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 33  | 22-Jun-13 | 17C           | 50          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 34  | 22-Jun-13 | 17C           | 51          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 3                  | 1     |
| 35  | 24-Jun-13 | 17C           | 18          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 36  | 24-Jun-13 | 17C           | 46          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 37  | 24-Jun-13 | 17C           | 42          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 38  | 24-Jun-13 | 17C           | 41          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 39  | 24-Jun-13 | 17C           | 40          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 40  | 24-Jun-13 | 17C           | 39          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 41  | 24-Jun-13 | 17C           | 38          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 42  | 24-Jun-13 | 17C           | 37          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 43  | 24-Jun-13 | 17C           | 28          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 4                  | 1     |
| 44  | 24-Jun-13 | 17C           | 29          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 45  | 24-Jun-13 | 17C           | 30          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 3                  | 1     |
| 46  | 24-Jun-13 | 17C           | 31          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 47  | 24-Jun-13 | 17C           | 32          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            |                    | 1     |
| 48  | 24-Jun-13 | 17C           | 33          | Ø500            | 15    |       |       | 15    | 30               | 30                            | 2                  | 1     |





**LAMPIRAN 3**  
**( PERHITUNGAN PERPINDAHAN RADIAL & EKSES TEKANAN**  
**AIR PORI )**



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**1. Perhitungan Perpindahan Radial Tanah Akibat Pemancangan Tiang Berdasarkan Teori *Cavity Expansion* (Chai et al, 2005 & 2007)**

**1.a. Diameter Tiang  $d = 30$  cm,  $C_u = 11$  kPa,  $E = 3300$  kPa,  $\nu = 0,5$**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d / 2 = 0,3 \text{ m} / 2 = 0,15 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1 + \nu)S_u} = \frac{3300}{2(1 + 0,5)11} = 100$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{100} \cdot 0,15 = 1,5 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1 + \nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1 + 0,5}{3300} 1,5 \cdot 11 = 0,0075 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p / r} \rho_p = \frac{2 \cdot 1,5 + 0,0075}{2 \cdot 0,15 + 0,0075 \cdot 1,5 / 0,15} 0,0075 = 0,0602 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,15    | 0,0602     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,3     | 0,0354     | 0,24       |
| 2     | 4       | 0,6     | 0,0185     | 0,12       |
| 3     | 6       | 0,9     | 0,0124     | 0,08       |
| 4     | 8       | 1,2     | 0,0094     | 0,06       |
| 5     | 10      | 1,5     | 0,0075     | 0,05       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 6     | 12      | 1,8     | 0,0063     | 0,04       |
| 7     | 14      | 2,1     | 0,0054     | 0,04       |
| 8     | 16      | 2,4     | 0,0047     | 0,03       |
| 9     | 18      | 2,7     | 0,0042     | 0,03       |
| 10    | 20      | 3       | 0,0038     | 0,03       |

**1.b. Diameter Tiang  $d = 40 \text{ cm}$ ,  $C_u = 11 \text{ kPa}$ ,  $E = 3300 \text{ kPa}$ ,  $\nu = 0,5$**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d / 2 = 0,4 \text{ m} / 2 = 0,2 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1 + \nu)S_u} = \frac{3300}{2(1 + 0,5)11} = 100$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{100} \cdot 0,2 = 2 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1 + \nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1 + 0,5}{3300} 2 \cdot 11 = 0,01 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p / r} \rho_p = \frac{2 \cdot 2 + 0,01}{2 \cdot 0,2 + 0,01 \cdot 2 / 0,2} 0,01 = 0,0802 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,2     | 0,0802     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,4     | 0,0472     | 0,24       |
| 2     | 4       | 0,8     | 0,0247     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,2     | 0,0166     | 0,08       |
| 4     | 8       | 1,6     | 0,0125     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2       | 0,0100     | 0,05       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 6     | 12      | 2,4     | 0,0083     | 0,04       |
| 7     | 14      | 2,8     | 0,0072     | 0,04       |
| 8     | 16      | 3,2     | 0,0063     | 0,03       |
| 9     | 18      | 3,6     | 0,0056     | 0,03       |
| 10    | 20      | 4       | 0,0050     | 0,03       |

### 1.c. Diameter Tiang $d = 50 \text{ cm}$ , $C_u = 11 \text{ kPa}$ , $E = 3300 \text{ kPa}$ , $\nu = 0,5$

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d/2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1 + \nu)S_u} = \frac{3300}{2(1 + 0,5)11} = 100$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{100} \cdot 0,25 = 2,5 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1 + \nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1 + 0,5}{3300} 2,5 \cdot 11 = 0,0125 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p/r} \rho_p = \frac{2 \cdot 2,5 + 0,0125}{2 \cdot 0,25 + 0,0125 \cdot 2,5/0,25} 0,0125 = 0,1003m$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1003     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 6     | 12      | 3       | 0,0104     | 0,04       |
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |
| 10    | 20      | 5       | 0,0063     | 0,03       |

#### 1.d. Diameter Tiang $d = 50$ cm, $C_u = 10,7$ kPa, $E = 3364$ kPa, $\nu = 0,5$ (BM1)

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d/2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{3364}{2(1+0,5)10,7} = 104,8$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{104,8} \cdot 0,25 = 2,56 \text{ m} \rightarrow 5,12d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1+0,5}{3364} 2,56 \cdot 10,7 = 0,0122 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p/r} \rho_p = \frac{2 \cdot 2,56 + 0,0122}{2 \cdot 0,25 + 0,0122 \cdot 2,56/0,25} 0,0122 = 0,1002m$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1002     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 6     | 12      | 3       | 0,0104     | 0,04       |
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |
| 10    | 20      | 5       | 0,0063     | 0,03       |

**1.e. Diameter Tiang  $d = 50$  cm,  $C_u = 12$  kPa,  $E = 6431$  kPa,  $\nu = 0,5$  (BM1)**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d/2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{6431}{2(1+0,5)12} = 178,65$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{178,65} \cdot 0,25 = 3,34 \text{ m} \rightarrow 6,68d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1+0,5}{6431} 3,34 \cdot 12 = 0,0094 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p/r} \rho_p = \frac{2 \cdot 3,34 + 0,0094}{2 \cdot 0,25 + 0,0094 \cdot 3,34/0,25} 0,0094 = 0,1001 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1001     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |

|   |    |     |        |      |
|---|----|-----|--------|------|
| 2 | 4  | 1   | 0,0308 | 0,12 |
| 3 | 6  | 1,5 | 0,0207 | 0,08 |
| 4 | 8  | 2   | 0,0156 | 0,06 |
| 5 | 10 | 2,5 | 0,0125 | 0,05 |
| 6 | 12 | 3   | 0,0104 | 0,04 |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |
| 10    | 20      | 5       | 0,0063     | 0,03       |

### 1.f. Diameter Tiang $d = 50$ cm, $C_u = 15,6$ kPa, $E = 4053$ kPa, $\nu = 0,5$ (BM1)

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d/2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{4053}{2(1+0,5)15,6} = 86,61$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{86,61} \cdot 0,25 = 2,33 \text{ m} \rightarrow 4,65d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1+0,5}{4053} 2,33 \cdot 15,6 = 0,0134 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p/r} \rho_p = \frac{2 \cdot 2,33 + 0,0134}{2 \cdot 0,25 + 0,0134 \cdot 2,33/0,25} 0,0134 = 0,1003m$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1003     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |
| 6     | 12      | 3       | 0,0104     | 0,04       |
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |
| 10    | 20      | 5       | 0,0063     | 0,03       |

**1.g. Diameter Tiang  $d = 50$  cm,  $C_u = 18,6$  kPa,  $E = 3273$  kPa,  $\nu = 0,5$  (BM1)**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d/2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{3273}{2(1+0,5)18,6} = 58,66$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{58,66} \cdot 0,25 = 1,91 \text{ m} \rightarrow 3,83d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1+0,5}{3273} 1,91 \cdot 18,6 = 0,0163 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p/r} \rho_p = \frac{2 \cdot 1,91 + 0,0163}{2 \cdot 0,25 + 0,0163 \cdot 1,91/0,25} 0,0163 = 0,1004 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1004     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |

|    |    |     |        |      |
|----|----|-----|--------|------|
| 6  | 12 | 3   | 0,0104 | 0,04 |
| 7  | 14 | 3,5 | 0,0089 | 0,04 |
| 8  | 16 | 4   | 0,0078 | 0,03 |
| 9  | 18 | 4,5 | 0,0070 | 0,03 |
| 10 | 20 | 5   | 0,0063 | 0,03 |

**1.h. Diameter Tiang  $d = 50$  cm,  $C_u = 73,9$  kPa,  $E = 12759$  kPa,  $\nu = 0,5$  (BM1)**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d / 2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1 + \nu)S_u} = \frac{12759}{2(1 + 0,5)73,9} = 57,55$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{57,55} \cdot 0,25 = 1,90 \text{ m} \rightarrow 3,79d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1 + \nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1 + 0,5}{12759} 1,90 \cdot 73,9 = 0,0165 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p / r} \rho_p = \frac{2 \cdot 1,90 + 0,0165}{2 \cdot 0,25 + 0,0165 \cdot 1,90 / 0,25} 0,0165 = 0,1004 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1004     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0590     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |
| 6     | 12      | 3       | 0,0104     | 0,04       |
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |

|    |    |   |        |      |
|----|----|---|--------|------|
| 10 | 20 | 5 | 0,0063 | 0,03 |
|----|----|---|--------|------|

**1.i. Diameter Tiang  $d = 50$  cm,  $C_u = 74,7$  kPa,  $E = 33974$  kPa,  $\nu = 0,5$  (BM1)**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_0 = d / 2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

$$I_r = \frac{G}{S_u} = \frac{E}{2(1+\nu)S_u} = \frac{33974}{2(1+0,5)74,7} = 151,6$$

$$r_p = \sqrt{I_r} \cdot r_0 = \sqrt{151,6} \cdot 0,25 = 3,08 \text{ m} \rightarrow 6,16d$$

Perpindahan radial saat  $r = r_p$

$$\rho_p = \frac{1+\nu}{E} r_p \cdot S_u = \frac{1+0,5}{33974} 3,08 \cdot 74,7 = 0,0102 \text{ m}$$

Perpindahan radial di zona plastis,

saat  $r = r_0$

$$\rho = \frac{2r_p + \rho_p}{2r + \rho_p \cdot r_p / r} \rho_p = \frac{2 \cdot 3,08 + 0,0102}{2 \cdot 0,25 + 0,0102 \cdot 3,08 / 0,25} 0,0102 = 0,1002 \text{ m}$$

saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | 0,1002     | 0,4        |
| 1     | 2       | 0,5     | 0,0589     | 0,24       |
| 2     | 4       | 1       | 0,0308     | 0,12       |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,0207     | 0,08       |
| 4     | 8       | 2       | 0,0156     | 0,06       |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,0125     | 0,05       |
| 6     | 12      | 3       | 0,0104     | 0,04       |

Perpindahan radial di zona elastis ( saat  $r \geq r_p$  )

$$\rho = \frac{r_p^2}{2r}$$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho$ (m) | $\rho/r_0$ |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 7     | 14      | 3,5     | 0,0089     | 0,04       |
| 8     | 16      | 4       | 0,0078     | 0,03       |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,0070     | 0,03       |
| 10    | 20      | 5       | 0,0063     | 0,03       |

**2. Perhitungan Perpindahan Radial Tanah Akibat Pemancangan Tiang Berdasarkan Teori *Cavity Expansion* (Vesic, 1972)**

## 2.a. Diameter tiang $d = 30$ cm

$$r_0 = d / 2 = 0,3 \text{ m} / 2 = 0,15 \text{ m}$$

Saat  $r = r_0$

$$\frac{\rho}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{r}{r_0}\right]^2} - \frac{r}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{0,15}{0,15}\right]^2} - \frac{0,25}{0,25} = 0,42$$

$$\rho = 0,42 \times 0,15 = 0,062 \text{ m}$$

Saat  $r > r_0$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho/r_0$ | $\rho$ (m) |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 1     | 2       | 0,3     | 0,24       | 0,035      |
| 2     | 4       | 0,6     | 0,12       | 0,018      |
| 3     | 6       | 0,9     | 0,08       | 0,012      |
| 4     | 8       | 1,2     | 0,06       | 0,009      |
| 5     | 10      | 1,5     | 0,05       | 0,007      |
| 6     | 12      | 1,8     | 0,04       | 0,006      |
| 7     | 14      | 2,1     | 0,04       | 0,005      |
| 8     | 16      | 2,4     | 0,03       | 0,005      |
| 9     | 18      | 2,7     | 0,03       | 0,004      |
| 10    | 20      | 3       | 0,02       | 0,004      |
| 11    | 22      | 3,3     | 0,02       | 0,003      |
| 12    | 24      | 3,6     | 0,02       | 0,003      |

## 2.b. Diameter tiang $d = 40$ cm

$$r_0 = d / 2 = 0,4 \text{ m} / 2 = 0,2 \text{ m}$$

Saat  $r = r_0$

$$\frac{\rho}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{r}{r_0}\right]^2} - \frac{r}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{0,2}{0,2}\right]^2} - \frac{0,25}{0,25} = 0,42$$

$$\rho = 0,42 \times 0,2 = 0,083 \text{ m}$$

Saat  $r > r_0$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho/r_0$ | $\rho$ (m) |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 1     | 2       | 0,4     | 0,24       | 0,047      |
| 2     | 4       | 0,8     | 0,12       | 0,025      |
| 3     | 6       | 1,2     | 0,08       | 0,017      |
| 4     | 8       | 1,6     | 0,06       | 0,012      |
| 5     | 10      | 2       | 0,05       | 0,010      |
| 6     | 12      | 2,4     | 0,04       | 0,008      |
| 7     | 14      | 2,8     | 0,04       | 0,007      |
| 8     | 16      | 3,2     | 0,03       | 0,006      |

|    |    |     |      |       |
|----|----|-----|------|-------|
| 9  | 18 | 3,6 | 0,03 | 0,006 |
| 10 | 20 | 4   | 0,02 | 0,005 |
| 11 | 22 | 4,4 | 0,02 | 0,005 |
| 12 | 24 | 4,8 | 0,02 | 0,004 |

### 2.c. Diameter Tiang $d = 50$ cm

$$r_0 = d / 2 = 0,5 \text{ m} / 2 = 0,25 \text{ m}$$

Saat  $r = r_0$

$$\frac{\rho}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{r}{r_0}\right]^2} - \frac{r}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{0,25}{0,25}\right]^2} - \frac{0,25}{0,25} = 0,42$$

$$\rho = 0,42 \times 0,25 = 0,104 \text{ m}$$

Saat  $r > r_0$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho/r_0$ | $\rho$ (m) |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 1     | 2       | 0,5     | 0,24       | 0,059      |
| 2     | 4       | 1       | 0,12       | 0,031      |
| 3     | 6       | 1,5     | 0,08       | 0,021      |
| 4     | 8       | 2       | 0,06       | 0,016      |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,05       | 0,012      |
| 6     | 12      | 3       | 0,04       | 0,010      |
| 7     | 14      | 3,5     | 0,04       | 0,009      |
| 8     | 16      | 4       | 0,03       | 0,008      |
| 9     | 18      | 4,5     | 0,03       | 0,007      |
| 10    | 20      | 5       | 0,02       | 0,006      |
| 11    | 22      | 5,5     | 0,02       | 0,006      |
| 12    | 24      | 6       | 0,02       | 0,005      |

### 2.d. Diameter Tiang $d = 60$ cm

$$r_0 = d / 2 = 0,6 \text{ m} / 2 = 0,3 \text{ m}$$

Saat  $r = r_0$

$$\frac{\rho}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{r}{r_0}\right]^2} - \frac{r}{r_0} = \sqrt{1 + \left[\frac{0,3}{0,3}\right]^2} - \frac{0,3}{0,3} = 0,42$$

$$\rho = 0,42 \times 0,3 = 0,124 \text{ m}$$

Saat  $r > r_0$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\rho/r_0$ | $\rho$ (m) |
|-------|---------|---------|------------|------------|
| 1     | 2       | 0,6     | 0,24       | 0,071      |
| 2     | 4       | 1,2     | 0,12       | 0,037      |
| 3     | 6       | 1,8     | 0,08       | 0,025      |
| 4     | 8       | 2,4     | 0,06       | 0,019      |
| 5     | 10      | 3       | 0,05       | 0,015      |
| 6     | 12      | 3,6     | 0,04       | 0,012      |
| 7     | 14      | 4,2     | 0,04       | 0,011      |
| 8     | 16      | 4,8     | 0,03       | 0,009      |
| 9     | 18      | 5,4     | 0,03       | 0,008      |
| 10    | 20      | 6       | 0,02       | 0,007      |
| 11    | 22      | 6,6     | 0,02       | 0,007      |
| 12    | 24      | 7,2     | 0,02       | 0,006      |

### 3. Perhitungan Ekses Tekanan Air Pori Akibat Pemancangan Tiang Berdasarkan Teori *Cavity Expansion* (Randpolh dan Wroth, 1979)

#### 3.a. Diameter Tiang $d = 30$ cm, $C_u = 11$ kPa, $E = 3300$ kPa, $\nu = 0,5$

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_p = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)S_u}} \cdot r_0 = \sqrt{\frac{3300}{2(1+0,5)11}} \cdot 0,15 = 1,5 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r = r_0$

$$\Delta u = -2 C_u \ln(r_p/r) = -2 \cdot 11 \cdot \ln(1,5 / 0,15) = -50,66 \text{ kPa}$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\Delta u$ (kPa) | $-\Delta u / C_u$ |
|-------|---------|---------|------------------|-------------------|
| 0,5   | 1       | 0,15    | -50,66           | 4,6               |
| 1     | 2       | 0,3     | -35,41           | 3,22              |
| 2     | 4       | 0,6     | -20,16           | 1,83              |
| 3     | 6       | 0,9     | -11,24           | 1,02              |
| 4     | 8       | 1,2     | -4,91            | 0,45              |
| 5     | 10      | 1,5     | 0,00             | 0,00              |

#### 3.b. Diameter Tiang $d = 40$ cm, $C_u = 11$ kPa, $E = 3300$ kPa, $\nu = 0,5$

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_p = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)S_u}} \cdot r_0 = \sqrt{\frac{3300}{2(1+0,5)11}} \cdot 0,2 = 2 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r = r_0$

$$\Delta u = -2 C_u \ln(r_p/r) = 2 \cdot 11 \cdot \ln(2 / 0,2) = -50,66 \text{ kPa}$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\Delta u$ (kPa) | $-\Delta u / C_u$ |
|-------|---------|---------|------------------|-------------------|
| 0,5   | 1       | 0,2     | -50,66           | 4,6               |
| 1     | 2       | 0,4     | -35,41           | 3,22              |
| 2     | 4       | 0,8     | -20,16           | 1,83              |
| 3     | 6       | 1,2     | -11,24           | 1,02              |
| 4     | 8       | 1,6     | -4,91            | 0,45              |
| 5     | 10      | 2       | 0,00             | 0,00              |

**3.c. Diameter Tiang  $d = 50$  cm,  $C_u = 11$  kPa,  $E = 3300$  kPa,  $\nu = 0,5$**

Perhitungan radius plastis  $r_p$

$$r_p = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)S_u}} \cdot r_0 = \sqrt{\frac{3300}{2(1+0,5)11}} \cdot 0,25 = 2,5 \text{ m} \rightarrow 5d$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r = r_0$

$$\Delta u = -2 C_u \ln (r_p / r) = 2 \cdot 11 \cdot \ln (2,5 / 0,25) = -50,66 \text{ kPa}$$

Ekses tekanan air pori, saat  $r_0 \leq r \leq r_p$

| $r/d$ | $r/r_0$ | $r$ (m) | $\Delta u$ (kPa) | $-\Delta u / C_u$ |
|-------|---------|---------|------------------|-------------------|
| 0,5   | 1       | 0,25    | -50,66           | 4,6               |
| 1     | 2       | 0,5     | -35,41           | 3,22              |
| 2     | 4       | 1       | -20,16           | 1,83              |
| 3     | 6       | 1,5     | -11,24           | 1,02              |
| 4     | 8       | 2       | -4,91            | 0,45              |
| 5     | 10      | 2,5     | 0,00             | 0,00              |

### 3.d. Perhitungan eksres tekanan air pori untuk tanah dengan parameter dari BM1

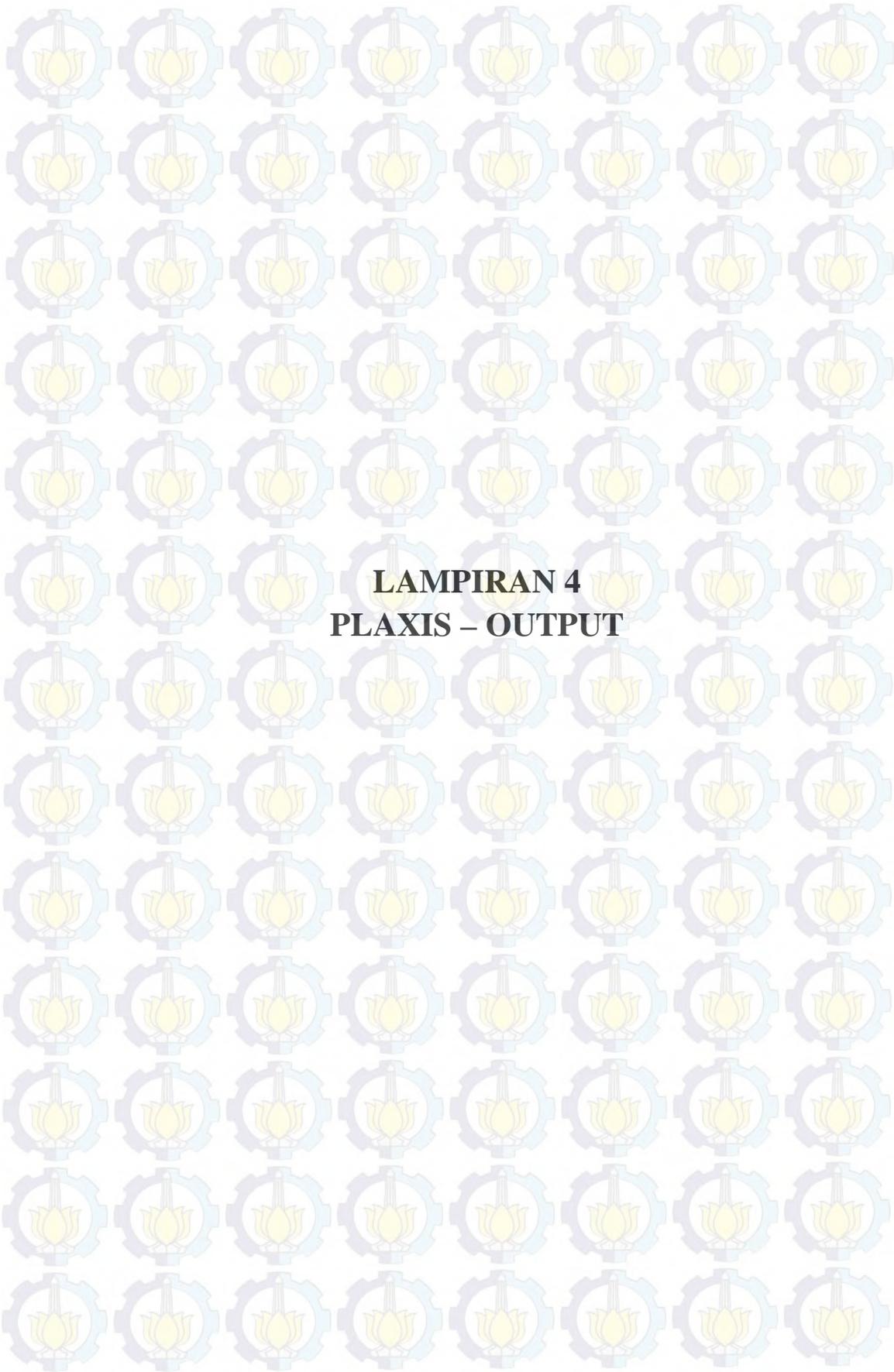
| Kedalaman<br>m | $C_u$<br>kPa | $PI$  | $E_u/C_u$ | $E$<br>kPa | $\nu$ | $G$<br>kPa | $G/S_u$ | Eksres tekanan air pori, kPa |              |              |              |              |              |
|----------------|--------------|-------|-----------|------------|-------|------------|---------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                |              |       |           |            |       |            |         | $r = 0,25$ m                 | $r = 0,50$ m | $r = 1,00$ m | $r = 1,50$ m | $r = 2,00$ m | $r = 2,50$ m |
| 2,5            | 10,7         | 49,04 | 314       | 3364       | 0,5   | 1121       | 105     | -49,78                       | -34,94       | -20,11       | -11,43       | -5,28        | -0,50        |
| 5              | 12           | 34,27 | 536       | 6431       | 0,5   | 2144       | 179     | -62,23                       | -45,59       | -28,95       | -19,22       | -12,32       | -6,96        |
| 10             | 15,6         | 57,73 | 260       | 4053       | 0,5   | 1351       | 87      | -69,60                       | -47,97       | -26,35       | -13,70       | -4,72        | 2,24         |
| 15             | 18,6         | 85,23 | 176       | 3273       | 0,5   | 1091       | 59      | -75,74                       | -49,95       | -24,17       | -9,08        | 1,62         | 9,92         |
| 20             | 73,9         | 86,88 | 173       | 12759      | 0,5   | 4253       | 58      | -299,49                      | -197,04      | -94,60       | -34,67       | 7,85         | 40,83        |
| 25             | 74,7         | 39,68 | 455       | 33974      | 0,5   | 11325      | 152     | -375,09                      | -271,53      | -167,97      | -107,40      | -64,42       | -31,08       |

### 3.e. Perhitungan eksres tekanan air pori untuk tanah dengan parameter dari BM2

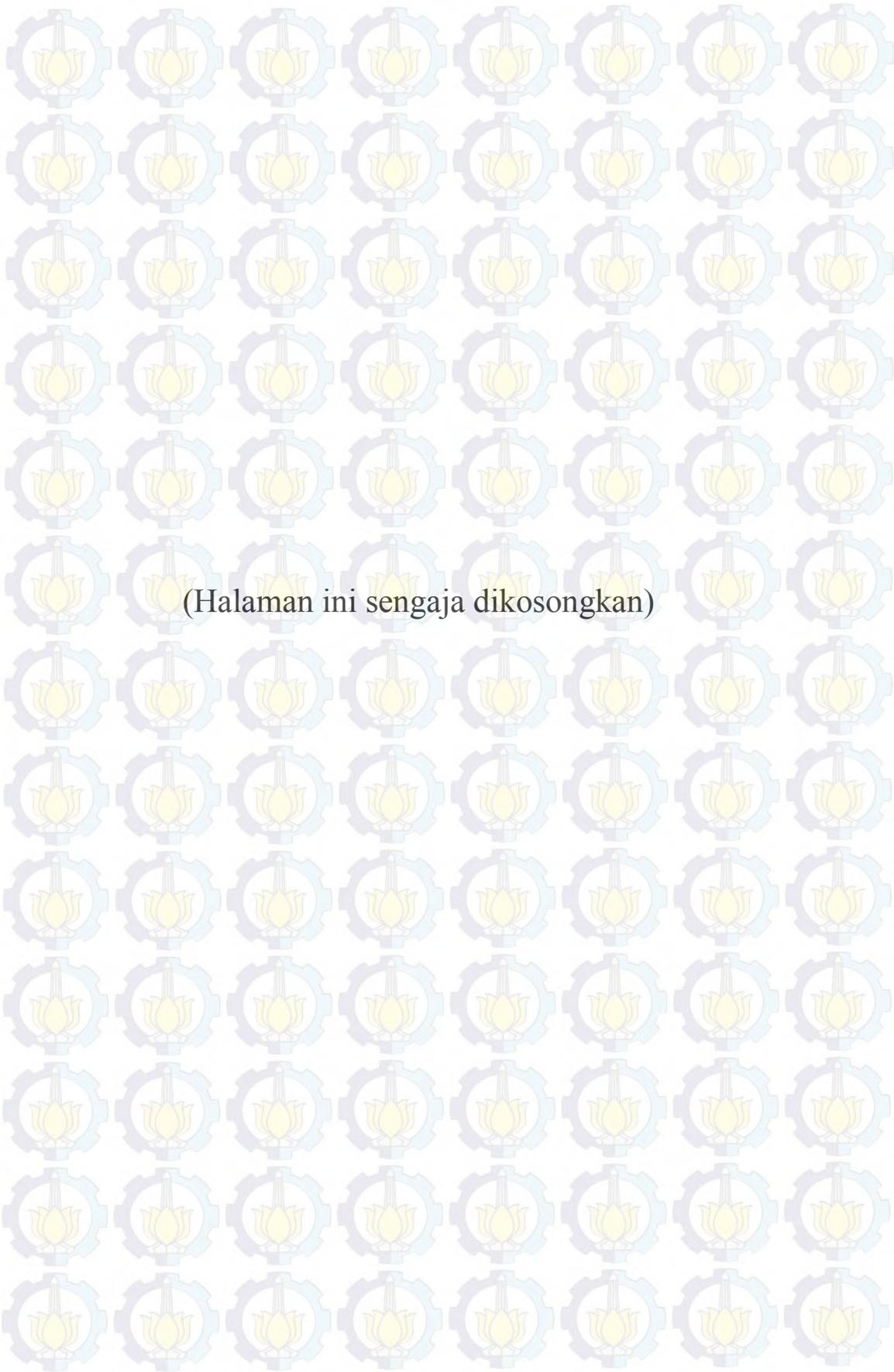
| Kedalaman<br>m | $C_u$<br>kPa | $PI$  | $E_u/C_u$ | $E$<br>kPa | $\nu$ | $G$<br>kPa | $G/S_u$ | Eksres tekanan air pori, kPa |              |              |              |              |              |
|----------------|--------------|-------|-----------|------------|-------|------------|---------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                |              |       |           |            |       |            |         | $r = 0,25$ m                 | $r = 0,50$ m | $r = 1,00$ m | $r = 1,50$ m | $r = 2,00$ m | $r = 2,50$ m |
| 2,5            | 10,4         | 34,37 | 534       | 5558       | 0,5   | 1853       | 178     | -53,90                       | -39,48       | -25,06       | -16,63       | -10,65       | -6,01        |
| 5              | 4,7          | 56,70 | 265       | 1243       | 0,5   | 414        | 88      | -21,05                       | -14,54       | -8,02        | -4,21        | -1,51        | 0,59         |
| 10             | 11,5         | 59,17 | 254       | 2915       | 0,5   | 972        | 85      | -51,02                       | -35,08       | -19,14       | -9,81        | -3,20        | 1,94         |
| 15             | 17,9         | 71,31 | 210       | 3765       | 0,5   | 1255       | 70      | -76,08                       | -51,26       | -26,45       | -11,93       | -1,63        | 6,35         |
| 20             | 59,7         | 34,24 | 536       | 32023      | 0,5   | 10674      | 179     | -309,62                      | -226,86      | -144,10      | -95,68       | -61,33       | -34,69       |
| 25             | 79           | 37,91 | 481       | 38027      | 0,5   | 12676      | 160     | -401,16                      | -291,64      | -182,13      | -118,06      | -72,61       | -37,35       |

3.f. Perhitungan ekses tekanan air pori untuk tanah dengan parameter dari BM3

| Kedalaman<br>m | $C_u$<br>kPa | $PI$  | $E_u/C_u$ | $E$<br>kPa | $\nu$ | $G$<br>kPa | $G/S_u$ | Ekses tekanan air pori, kPa |              |              |              |              |              |
|----------------|--------------|-------|-----------|------------|-------|------------|---------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                |              |       |           |            |       |            |         | $r = 0,25$ m                | $r = 0,50$ m | $r = 1,00$ m | $r = 1,50$ m | $r = 2,00$ m | $r = 2,50$ m |
| 2,5            | 11           | 48,98 | 315       | 3468       | 0,5   | 1156       | 105     | -51,20                      | -35,95       | -20,71       | -11,79       | -5,46        | -0,55        |
| 5              | 9            | 30,36 | 595       | 5351       | 0,5   | 1784       | 198     | -47,60                      | -35,13       | -22,65       | -15,35       | -10,17       | -6,16        |
| 10             | 13,66        | 59,32 | 253       | 3454       | 0,5   | 1151       | 84      | -60,57                      | -41,64       | -22,70       | -11,62       | -3,76        | 2,33         |
| 15             | 15,5         | 74,83 | 200       | 3107       | 0,5   | 1036       | 67      | -65,13                      | -43,64       | -22,16       | -9,59        | -0,67        | 6,25         |
| 20             | 94,8         | 72,68 | 206       | 19565      | 0,5   | 6522       | 69      | -401,11                     | -269,69      | -138,27      | -61,39       | -6,85        | 35,46        |
| 25             | 94,8         | 30,67 | 590       | 55927      | 0,5   | 18642      | 197     | -500,68                     | -369,26      | -237,84      | -160,96      | -106,42      | -64,11       |



**LAMPIRAN 4**  
**PLAXIS - OUTPUT**





## 2. PLAXIS 2D- OUTPUT : Simulasi tiang tunggal, $d = 40$ cm (Tanah Homogen)

Perpindahan radial dan ekses tekanan air pori pada kedalaman 15 m

| $r$<br>[m] | $\rho$<br>[m] | $\Delta u$<br>[kPa] |      |      |       |  |       |      |       |  |       |      |       |
|------------|---------------|---------------------|------|------|-------|--|-------|------|-------|--|-------|------|-------|
|            |               |                     | 3,97 | 0,00 | -0,20 |  | 8,46  | 0,00 | -0,16 |  | 17,89 | 0,00 | -0,16 |
|            |               |                     | 3,97 | 0,00 | -0,20 |  | 8,46  | 0,00 | -0,16 |  | 17,89 | 0,00 | -0,16 |
|            |               |                     | 4,08 | 0,00 | -0,20 |  | 8,50  | 0,00 | -0,16 |  | 18,75 | 0,00 | -0,16 |
|            |               |                     | 4,08 | 0,00 | -0,20 |  | 8,50  | 0,00 | -0,16 |  | 18,75 | 0,00 | -0,16 |
| 0,20       | 0,10          | 0,00                | 4,29 | 0,00 | -0,19 |  | 8,57  | 0,00 | -0,16 |  | 18,83 | 0,00 | -0,16 |
| 0,33       | 0,06          | 0,00                | 4,29 | 0,00 | -0,19 |  | 8,57  | 0,00 | -0,16 |  | 18,83 | 0,00 | -0,16 |
| 0,33       | 0,06          | 0,00                | 4,39 | 0,00 | -0,19 |  | 8,76  | 0,00 | -0,16 |  | 19,66 | 0,00 | -0,16 |
| 0,54       | 0,04          | 0,00                | 4,39 | 0,00 | -0,19 |  | 8,76  | 0,00 | -0,16 |  | 19,66 | 0,00 | -0,16 |
| 0,54       | 0,04          | -32,82              | 4,44 | 0,00 | -0,18 |  | 8,83  | 0,00 | -0,16 |  | 20,00 | 0,00 | -0,16 |
| 0,77       | 0,03          | -29,00              | 4,44 | 0,00 | -0,18 |  | 8,83  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 0,77       | 0,03          | -30,24              | 4,74 | 0,00 | -0,18 |  | 9,08  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 0,82       | 0,02          | -16,80              | 4,74 | 0,00 | -0,18 |  | 9,08  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 0,82       | 0,02          | -17,75              | 4,98 | 0,00 | -0,18 |  | 9,17  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,09       | 0,02          | -18,92              | 4,98 | 0,00 | -0,18 |  | 9,17  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,09       | 0,02          | -17,41              | 4,98 | 0,00 | -0,18 |  | 9,17  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,12       | 0,02          | -14,62              | 5,06 | 0,00 | -0,18 |  | 9,32  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,12       | 0,02          | -14,65              | 5,06 | 0,00 | -0,18 |  | 9,32  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,16       | 0,02          | -14,63              | 5,13 | 0,00 | -0,18 |  | 9,44  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,16       | 0,02          | -15,18              | 5,13 | 0,00 | -0,18 |  | 9,44  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,40       | 0,01          | -11,86              | 5,37 | 0,00 | -0,18 |  | 9,61  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,40       | 0,01          | -11,87              | 5,37 | 0,00 | -0,18 |  | 9,61  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,50       | 0,01          | -11,22              | 5,56 | 0,00 | -0,18 |  | 9,89  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,50       | 0,01          | -11,25              | 5,56 | 0,00 | -0,18 |  | 9,89  | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,75       | 0,01          | -7,95               | 5,77 | 0,00 | -0,17 |  | 10,00 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,75       | 0,01          | -7,94               | 5,77 | 0,00 | -0,17 |  | 10,00 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,80       | 0,01          | -4,96               | 5,89 | 0,00 | -0,17 |  | 10,16 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,80       | 0,01          | -4,98               | 5,89 | 0,00 | -0,17 |  | 10,16 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,85       | 0,01          | -3,56               | 6,24 | 0,00 | -0,17 |  | 10,43 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 1,85       | 0,01          | -3,59               | 6,24 | 0,00 | -0,17 |  | 10,43 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,12       | 0,01          | -2,50               | 6,29 | 0,00 | -0,17 |  | 10,63 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,12       | 0,01          | -2,50               | 6,29 | 0,00 | -0,17 |  | 10,63 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,38       | 0,01          | -0,51               | 6,31 | 0,00 | -0,17 |  | 11,17 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,38       | 0,01          | -0,45               | 6,31 | 0,00 | -0,17 |  | 11,17 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,43       | 0,01          | -0,22               | 6,34 | 0,00 | -0,17 |  | 11,37 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,43       | 0,01          | -0,19               | 6,34 | 0,00 | -0,17 |  | 11,37 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,46       | 0,01          | -0,23               | 6,64 | 0,00 | -0,17 |  | 11,96 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,46       | 0,01          | -0,23               | 6,64 | 0,00 | -0,17 |  | 11,96 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,56       | 0,01          | -0,24               | 6,75 | 0,00 | -0,17 |  | 12,45 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,56       | 0,01          | -0,24               | 6,75 | 0,00 | -0,17 |  | 12,45 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,70       | 0,01          | -0,24               | 6,85 | 0,00 | -0,17 |  | 12,94 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,70       | 0,01          | -0,24               | 6,85 | 0,00 | -0,17 |  | 12,94 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,88       | 0,01          | -0,24               | 7,06 | 0,00 | -0,17 |  | 13,37 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,88       | 0,01          | -0,24               | 7,06 | 0,00 | -0,17 |  | 13,37 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,94       | 0,01          | -0,24               | 7,16 | 0,00 | -0,17 |  | 14,13 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,94       | 0,01          | -0,24               | 7,16 | 0,00 | -0,17 |  | 14,13 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,96       | 0,01          | -0,23               | 7,40 | 0,00 | -0,16 |  | 14,52 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 2,96       | 0,01          | -0,23               | 7,40 | 0,00 | -0,16 |  | 14,52 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,04       | 0,01          | -0,23               | 7,52 | 0,00 | -0,16 |  | 15,47 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,04       | 0,01          | -0,23               | 7,52 | 0,00 | -0,16 |  | 15,47 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,24       | 0,01          | -0,22               | 7,62 | 0,00 | -0,16 |  | 15,67 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,24       | 0,01          | -0,22               | 7,62 | 0,00 | -0,16 |  | 15,67 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,44       | 0,00          | -0,21               | 7,79 | 0,00 | -0,16 |  | 15,75 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,44       | 0,00          | -0,21               | 7,79 | 0,00 | -0,16 |  | 15,75 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,51       | 0,00          | -0,21               | 7,92 | 0,00 | -0,16 |  | 16,55 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,51       | 0,00          | -0,21               | 7,92 | 0,00 | -0,16 |  | 16,55 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,53       | 0,00          | -0,21               | 8,01 | 0,00 | -0,16 |  | 16,75 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,53       | 0,00          | -0,21               | 8,01 | 0,00 | -0,16 |  | 16,75 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,56       | 0,00          | -0,20               | 8,06 | 0,00 | -0,16 |  | 16,81 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,56       | 0,00          | -0,20               | 8,06 | 0,00 | -0,16 |  | 16,81 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,79       | 0,00          | -0,20               | 8,26 | 0,00 | -0,16 |  | 17,62 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |
| 3,79       | 0,00          | -0,20               | 8,26 | 0,00 | -0,16 |  | 17,62 | 0,00 | -0,16 |  |       |      |       |



**4. PLAXIS 2D- OUTPUT : Simulasi tiang tunggal,  $d = 50 \text{ cm}$ ,  $L = 30 \text{ m}$  (Tanah BM1)**

Perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori pada kedalaman 12,5 m

| r<br>[m] | $\rho$<br>[m] | $\Delta u$<br>[kPa] |      |       |       |  |       |       |       |
|----------|---------------|---------------------|------|-------|-------|--|-------|-------|-------|
|          |               |                     | 4,07 | 0,007 | -0,53 |  | 7,96  | 0,003 | -0,33 |
|          |               |                     | 4,07 | 0,007 | -0,53 |  | 7,96  | 0,003 | -0,33 |
|          |               |                     | 4,16 | 0,007 | -0,52 |  | 8,24  | 0,003 | -0,33 |
| 0,25     | 0,125         | -40,02              | 4,16 | 0,007 | -0,52 |  | 8,24  | 0,003 | -0,33 |
| 0,35     | 0,088         | -74,94              | 4,46 | 0,007 | -0,50 |  | 8,57  | 0,003 | -0,32 |
| 0,35     | 0,088         | -66,20              | 4,46 | 0,007 | -0,50 |  | 8,57  | 0,003 | -0,32 |
| 0,56     | 0,056         | -38,88              | 4,55 | 0,007 | -0,49 |  | 8,60  | 0,003 | -0,32 |
| 0,56     | 0,056         | -49,36              | 4,55 | 0,007 | -0,49 |  | 8,60  | 0,003 | -0,32 |
| 0,68     | 0,046         | -39,65              | 4,84 | 0,006 | -0,47 |  | 8,62  | 0,003 | -0,32 |
| 0,68     | 0,046         | -40,46              | 4,84 | 0,006 | -0,47 |  | 8,62  | 0,003 | -0,32 |
| 0,98     | 0,032         | -28,57              | 4,93 | 0,006 | -0,46 |  | 8,63  | 0,003 | -0,32 |
| 0,98     | 0,032         | -29,25              | 4,93 | 0,006 | -0,46 |  | 8,63  | 0,003 | -0,32 |
| 0,98     | 0,032         | -29,32              | 5,10 | 0,006 | -0,45 |  | 8,70  | 0,003 | -0,32 |
| 0,98     | 0,032         | -29,07              | 5,10 | 0,006 | -0,45 |  | 8,70  | 0,003 | -0,32 |
| 0,99     | 0,031         | -28,83              | 5,23 | 0,006 | -0,44 |  | 8,96  | 0,003 | -0,31 |
| 0,99     | 0,031         | -28,80              | 5,23 | 0,006 | -0,44 |  | 8,96  | 0,003 | -0,31 |
| 1,29     | 0,024         | -20,16              | 5,35 | 0,005 | -0,44 |  | 9,02  | 0,003 | -0,31 |
| 1,29     | 0,024         | -20,17              | 5,35 | 0,005 | -0,44 |  | 9,02  | 0,003 | -0,31 |
| 1,37     | 0,023         | -18,12              | 5,52 | 0,005 | -0,43 |  | 9,24  | 0,003 | -0,30 |
| 1,37     | 0,023         | -18,12              | 5,52 | 0,005 | -0,43 |  | 9,24  | 0,003 | -0,30 |
| 1,67     | 0,019         | -11,82              | 5,61 | 0,005 | -0,42 |  | 9,37  | 0,003 | -0,30 |
| 1,67     | 0,019         | -11,83              | 5,61 | 0,005 | -0,42 |  | 9,37  | 0,003 | -0,30 |
| 1,67     | 0,019         | -11,81              | 5,87 | 0,005 | -0,41 |  | 9,57  | 0,003 | -0,30 |
| 1,67     | 0,019         | -11,81              | 5,87 | 0,005 | -0,41 |  | 9,57  | 0,003 | -0,30 |
| 1,67     | 0,018         | -11,76              | 5,97 | 0,005 | -0,40 |  | 9,85  | 0,002 | -0,29 |
| 1,67     | 0,018         | -11,74              | 5,97 | 0,005 | -0,40 |  | 9,85  | 0,002 | -0,29 |
| 1,94     | 0,016         | -6,91               | 6,07 | 0,005 | -0,40 |  | 10,00 | 0,002 | -0,29 |
| 1,94     | 0,016         | -6,91               | 6,07 | 0,005 | -0,40 |  | 10,00 | 0,002 | -0,29 |
| 2,08     | 0,015         | -4,77               | 6,27 | 0,005 | -0,39 |  | 10,19 | 0,002 | -0,29 |
| 2,08     | 0,015         | -4,77               | 6,27 | 0,005 | -0,39 |  | 10,19 | 0,002 | -0,29 |
| 2,21     | 0,014         | -2,74               | 6,39 | 0,004 | -0,39 |  | 10,47 | 0,002 | -0,28 |
| 2,21     | 0,014         | -2,76               | 6,39 | 0,004 | -0,39 |  | 10,47 | 0,002 | -0,28 |
| 2,41     | 0,013         | -0,65               | 6,64 | 0,004 | -0,38 |  | 11,01 | 0,002 | -0,27 |
| 2,41     | 0,013         | -0,63               | 6,64 | 0,004 | -0,38 |  | 11,01 | 0,002 | -0,27 |
| 2,47     | 0,012         | -0,66               | 6,65 | 0,004 | -0,38 |  | 11,49 | 0,002 | -0,27 |
| 2,47     | 0,012         | -0,65               | 6,65 | 0,004 | -0,38 |  | 11,49 | 0,002 | -0,27 |
| 2,56     | 0,012         | -0,64               | 6,93 | 0,004 | -0,37 |  | 12,48 | 0,002 | -0,25 |
| 2,56     | 0,012         | -0,65               | 6,93 | 0,004 | -0,37 |  | 12,48 | 0,002 | -0,25 |
| 2,76     | 0,011         | -0,63               | 6,97 | 0,004 | -0,36 |  | 13,27 | 0,001 | -0,25 |
| 2,76     | 0,011         | -0,63               | 6,97 | 0,004 | -0,36 |  | 14,06 | 0,001 | -0,24 |
| 2,82     | 0,011         | -0,63               | 7,29 | 0,004 | -0,35 |  | 14,06 | 0,001 | -0,24 |
| 2,82     | 0,011         | -0,63               | 7,29 | 0,004 | -0,35 |  | 14,79 | 0,001 | -0,24 |
| 3,00     | 0,010         | -0,62               | 7,31 | 0,004 | -0,35 |  | 14,79 | 0,001 | -0,24 |
| 3,00     | 0,010         | -0,62               | 7,31 | 0,004 | -0,35 |  | 15,96 | 0,001 | -0,23 |
| 3,15     | 0,010         | -0,61               | 7,42 | 0,004 | -0,35 |  | 15,96 | 0,001 | -0,23 |
| 3,15     | 0,010         | -0,61               | 7,42 | 0,004 | -0,35 |  | 17,31 | 0,000 | -0,23 |
| 3,23     | 0,009         | -0,60               | 7,63 | 0,004 | -0,34 |  | 17,31 | 0,000 | -0,23 |
| 3,23     | 0,009         | -0,60               | 7,63 | 0,004 | -0,34 |  | 18,19 | 0,000 | -0,22 |
| 3,44     | 0,009         | -0,58               | 7,66 | 0,004 | -0,34 |  | 19,06 | 0,000 | -0,22 |
| 3,44     | 0,009         | -0,58               | 7,66 | 0,004 | -0,34 |  | 19,93 | 0,000 | -0,22 |
| 3,61     | 0,008         | -0,57               | 7,92 | 0,003 | -0,34 |  | 19,93 | 0,000 | -0,22 |
| 3,61     | 0,008         | -0,57               | 7,92 | 0,003 | -0,34 |  | 20,00 | 0,000 | -0,22 |
| 3,79     | 0,008         | -0,55               | 7,96 | 0,003 | -0,33 |  |       |       |       |
| 3,79     | 0,008         | -0,55               | 7,96 | 0,003 | -0,33 |  |       |       |       |

**5. PLAXIS 2D- OUTPUT : Simulasi tiang tunggal,  $d = 50 \text{ cm}$ ,  $L = 30 \text{ m}$  (Tanah BM2)**

Perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori pada kedalaman 12,5 m

| $r$<br>[m] | $\rho$<br>[m] | $\Delta u$<br>[kPa] |      |       |       |  |       |       |       |
|------------|---------------|---------------------|------|-------|-------|--|-------|-------|-------|
|            |               |                     | 4,09 | 0,008 | -0,17 |  | 7,96  | 0,004 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,15 | 0,007 | -0,17 |  | 8,02  | 0,004 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,15 | 0,007 | -0,17 |  | 8,02  | 0,004 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,47 | 0,007 | -0,19 |  | 8,24  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,47 | 0,007 | -0,19 |  | 8,24  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,54 | 0,007 | -0,19 |  | 8,50  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,54 | 0,007 | -0,19 |  | 8,50  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,86 | 0,006 | -0,20 |  | 8,59  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,86 | 0,006 | -0,20 |  | 8,59  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,92 | 0,006 | -0,20 |  | 8,62  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 4,92 | 0,006 | -0,20 |  | 8,62  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,04 | 0,006 | -0,21 |  | 8,66  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,04 | 0,006 | -0,21 |  | 8,66  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,23 | 0,006 | -0,21 |  | 8,86  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,23 | 0,006 | -0,21 |  | 8,86  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,40 | 0,006 | -0,22 |  | 8,97  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,40 | 0,006 | -0,22 |  | 8,97  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,40 | 0,006 | -0,22 |  | 8,97  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,52 | 0,006 | -0,22 |  | 9,00  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,52 | 0,006 | -0,22 |  | 9,00  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,60 | 0,005 | -0,22 |  | 9,26  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,60 | 0,005 | -0,22 |  | 9,26  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,90 | 0,005 | -0,22 |  | 9,35  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,90 | 0,005 | -0,22 |  | 9,35  | 0,003 | -0,22 |
|            |               |                     | 5,97 | 0,005 | -0,22 |  | 9,59  | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 5,97 | 0,005 | -0,22 |  | 9,59  | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,04 | 0,005 | -0,22 |  | 9,83  | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,04 | 0,005 | -0,22 |  | 9,83  | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,29 | 0,005 | -0,22 |  | 10,00 | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,29 | 0,005 | -0,22 |  | 10,00 | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,39 | 0,005 | -0,22 |  | 10,17 | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,39 | 0,005 | -0,22 |  | 10,17 | 0,003 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,60 | 0,005 | -0,22 |  | 10,48 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,60 | 0,005 | -0,22 |  | 10,48 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,65 | 0,005 | -0,22 |  | 10,99 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,65 | 0,005 | -0,22 |  | 10,99 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,86 | 0,004 | -0,22 |  | 11,50 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,86 | 0,004 | -0,22 |  | 11,50 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,94 | 0,004 | -0,22 |  | 12,46 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,94 | 0,004 | -0,22 |  | 12,46 | 0,002 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,95 | 0,004 | -0,22 |  | 13,28 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 6,95 | 0,004 | -0,22 |  | 14,09 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,07 | 0,004 | -0,22 |  | 14,09 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,07 | 0,004 | -0,22 |  | 14,79 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,29 | 0,004 | -0,22 |  | 14,79 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,29 | 0,004 | -0,22 |  | 15,90 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,31 | 0,004 | -0,22 |  | 15,90 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,31 | 0,004 | -0,22 |  | 16,61 | 0,001 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,62 | 0,004 | -0,22 |  | 17,31 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,62 | 0,004 | -0,22 |  | 17,31 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,68 | 0,004 | -0,22 |  | 18,20 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,68 | 0,004 | -0,22 |  | 19,10 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,94 | 0,004 | -0,22 |  | 19,99 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,94 | 0,004 | -0,22 |  | 19,99 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 7,96 | 0,004 | -0,22 |  | 20,00 | 0,000 | -0,21 |
|            |               |                     | 4,09 | 0,008 | -0,17 |  |       |       |       |
| 0,25       | 0,125         | -26,73              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,34       | 0,092         | -51,59              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,34       | 0,092         | -52,27              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,59       | 0,053         | -29,97              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,59       | 0,053         | -33,67              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,68       | 0,046         | -29,16              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,68       | 0,046         | -29,45              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,90       | 0,034         | -22,65              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,90       | 0,034         | -22,12              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,98       | 0,031         | -20,66              |      |       |       |  |       |       |       |
| 0,98       | 0,031         | -20,38              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,09       | 0,028         | -17,88              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,09       | 0,028         | -17,98              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,30       | 0,024         | -13,59              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,30       | 0,024         | -13,60              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,36       | 0,023         | -12,52              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,36       | 0,023         | -12,51              |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,57       | 0,020         | -9,05               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,57       | 0,020         | -9,04               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,66       | 0,018         | -7,65               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,66       | 0,018         | -7,65               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,70       | 0,018         | -7,14               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,70       | 0,018         | -7,13               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,94       | 0,016         | -3,99               |      |       |       |  |       |       |       |
| 1,94       | 0,016         | -3,99               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,11       | 0,015         | -1,96               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,11       | 0,015         | -1,95               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,21       | 0,014         | -0,86               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,21       | 0,014         | -0,85               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,35       | 0,013         | 0,03                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,35       | 0,013         | 0,04                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,47       | 0,012         | 0,04                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,47       | 0,012         | 0,02                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,65       | 0,012         | 0,00                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,65       | 0,012         | 0,00                |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,77       | 0,011         | -0,02               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,77       | 0,011         | -0,02               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,81       | 0,011         | -0,03               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,81       | 0,011         | -0,03               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,92       | 0,010         | -0,04               |      |       |       |  |       |       |       |
| 2,92       | 0,010         | -0,04               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,15       | 0,010         | -0,08               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,15       | 0,010         | -0,08               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,26       | 0,009         | -0,09               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,26       | 0,009         | -0,09               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,43       | 0,009         | -0,11               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,43       | 0,009         | -0,11               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,64       | 0,008         | -0,13               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,64       | 0,008         | -0,13               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,78       | 0,008         | -0,14               |      |       |       |  |       |       |       |
| 3,78       | 0,008         | -0,14               |      |       |       |  |       |       |       |
| 4,09       | 0,008         | -0,17               |      |       |       |  |       |       |       |

## 6. PLAXIS 2D - OUTPUT : Simulasi tiang tunggal, $d = 50 \text{ cm}$ , $L = 30 \text{ m}$ (Tanah BM3)

Perpindahan radial tanah dan eksese tekanan air pori pada kedalaman 12,5 m

| r<br>[m] | $\rho$<br>[m] | $\Delta u$<br>[kPa] |      |       |       |       |       |       |  |  |
|----------|---------------|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 0,25     | 0,125         | -41,33              | 3,77 | 0,008 | -0,62 | 8,09  | 0,003 | -0,30 |  |  |
| 0,33     | 0,096         | -59,65              | 4,11 | 0,008 | -0,58 | 8,09  | 0,003 | -0,30 |  |  |
| 0,33     | 0,096         | -67,68              | 4,11 | 0,008 | -0,58 | 8,24  | 0,003 | -0,29 |  |  |
| 0,61     | 0,051         | -42,91              | 4,13 | 0,008 | -0,58 | 8,24  | 0,003 | -0,29 |  |  |
| 0,61     | 0,051         | -38,67              | 4,13 | 0,008 | -0,58 | 8,42  | 0,003 | -0,29 |  |  |
| 0,67     | 0,046         | -36,92              | 4,49 | 0,007 | -0,54 | 8,42  | 0,003 | -0,29 |  |  |
| 0,67     | 0,046         | -37,28              | 4,49 | 0,007 | -0,54 | 8,57  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 0,82     | 0,038         | -31,07              | 4,49 | 0,007 | -0,54 | 8,57  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 0,82     | 0,038         | -31,88              | 4,52 | 0,007 | -0,53 | 8,62  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 0,99     | 0,032         | -25,84              | 4,52 | 0,007 | -0,53 | 8,62  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 0,99     | 0,032         | -25,54              | 4,89 | 0,006 | -0,50 | 8,69  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 1,20     | 0,026         | -19,83              | 4,89 | 0,006 | -0,50 | 8,69  | 0,003 | -0,28 |  |  |
| 1,20     | 0,026         | -19,78              | 4,92 | 0,006 | -0,49 | 8,98  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,31     | 0,024         | -16,99              | 4,92 | 0,006 | -0,49 | 8,98  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,31     | 0,024         | -17,01              | 4,98 | 0,006 | -0,49 | 8,99  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,34     | 0,023         | -16,29              | 4,98 | 0,006 | -0,49 | 8,99  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,34     | 0,023         | -16,28              | 5,23 | 0,006 | -0,46 | 9,04  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,46     | 0,021         | -13,87              | 5,23 | 0,006 | -0,46 | 9,04  | 0,003 | -0,27 |  |  |
| 1,46     | 0,021         | -13,89              | 5,45 | 0,006 | -0,44 | 9,28  | 0,003 | -0,26 |  |  |
| 1,66     | 0,019         | -9,98               | 5,45 | 0,006 | -0,44 | 9,28  | 0,003 | -0,26 |  |  |
| 1,66     | 0,019         | -9,98               | 5,53 | 0,005 | -0,44 | 9,33  | 0,003 | -0,26 |  |  |
| 1,74     | 0,018         | -8,61               | 5,53 | 0,005 | -0,44 | 9,33  | 0,003 | -0,26 |  |  |
| 1,74     | 0,018         | -8,62               | 5,58 | 0,005 | -0,43 | 9,61  | 0,003 | -0,25 |  |  |
| 1,93     | 0,016         | -5,41               | 5,58 | 0,005 | -0,43 | 9,61  | 0,003 | -0,25 |  |  |
| 1,93     | 0,016         | -5,41               | 5,93 | 0,005 | -0,41 | 9,80  | 0,003 | -0,25 |  |  |
| 2,15     | 0,014         | -2,27               | 5,93 | 0,005 | -0,41 | 9,80  | 0,003 | -0,25 |  |  |
| 2,15     | 0,014         | -2,26               | 5,97 | 0,005 | -0,41 | 10,00 | 0,002 | -0,24 |  |  |
| 2,21     | 0,014         | -1,47               | 5,97 | 0,005 | -0,41 | 10,00 | 0,002 | -0,24 |  |  |
| 2,21     | 0,014         | -1,39               | 6,01 | 0,005 | -0,40 | 10,14 | 0,002 | -0,24 |  |  |
| 2,29     | 0,014         | -0,83               | 6,01 | 0,005 | -0,40 | 10,14 | 0,002 | -0,24 |  |  |
| 2,29     | 0,014         | -0,84               | 6,32 | 0,005 | -0,38 | 10,14 | 0,002 | -0,24 |  |  |
| 2,47     | 0,013         | -0,77               | 6,32 | 0,005 | -0,38 | 10,49 | 0,002 | -0,23 |  |  |
| 2,47     | 0,013         | -0,76               | 6,38 | 0,005 | -0,38 | 10,49 | 0,002 | -0,23 |  |  |
| 2,75     | 0,011         | -0,74               | 6,38 | 0,005 | -0,38 | 10,97 | 0,002 | -0,22 |  |  |
| 2,75     | 0,011         | -0,74               | 6,38 | 0,005 | -0,38 | 10,97 | 0,002 | -0,22 |  |  |
| 2,79     | 0,011         | -0,74               | 6,52 | 0,005 | -0,37 | 10,97 | 0,002 | -0,22 |  |  |
| 2,79     | 0,011         | -0,74               | 6,52 | 0,005 | -0,37 | 11,51 | 0,002 | -0,22 |  |  |
| 2,80     | 0,011         | -0,74               | 6,66 | 0,004 | -0,36 | 11,51 | 0,002 | -0,22 |  |  |
| 2,80     | 0,011         | -0,74               | 6,66 | 0,004 | -0,36 | 12,45 | 0,002 | -0,20 |  |  |
| 2,84     | 0,011         | -0,73               | 6,66 | 0,004 | -0,36 | 12,45 | 0,002 | -0,20 |  |  |
| 2,84     | 0,011         | -0,73               | 6,93 | 0,004 | -0,35 | 12,45 | 0,002 | -0,20 |  |  |
| 3,15     | 0,010         | -0,70               | 6,93 | 0,004 | -0,35 | 13,29 | 0,001 | -0,19 |  |  |
| 3,15     | 0,010         | -0,70               | 6,96 | 0,004 | -0,35 | 14,12 | 0,001 | -0,19 |  |  |
| 3,30     | 0,009         | -0,68               | 6,96 | 0,004 | -0,35 | 14,12 | 0,001 | -0,19 |  |  |
| 3,30     | 0,009         | -0,68               | 6,96 | 0,004 | -0,35 | 14,12 | 0,001 | -0,19 |  |  |
| 3,42     | 0,009         | -0,67               | 7,28 | 0,004 | -0,33 | 14,79 | 0,001 | -0,18 |  |  |
| 3,42     | 0,009         | -0,67               | 7,28 | 0,004 | -0,33 | 14,79 | 0,001 | -0,18 |  |  |
| 3,66     | 0,009         | -0,64               | 7,28 | 0,004 | -0,33 | 14,79 | 0,001 | -0,18 |  |  |
| 3,66     | 0,009         | -0,64               | 7,34 | 0,004 | -0,33 | 15,84 | 0,001 | -0,18 |  |  |
| 3,77     | 0,008         | -0,62               | 7,34 | 0,004 | -0,33 | 15,84 | 0,001 | -0,18 |  |  |
|          |               |                     | 7,61 | 0,004 | -0,32 | 16,58 | 0,001 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,61 | 0,004 | -0,32 | 17,31 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,70 | 0,004 | -0,31 | 17,31 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,70 | 0,004 | -0,31 | 18,19 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,91 | 0,004 | -0,31 | 19,07 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,91 | 0,004 | -0,31 | 19,95 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,97 | 0,003 | -0,30 | 19,95 | 0,000 | -0,17 |  |  |
|          |               |                     | 7,97 | 0,003 | -0,30 | 20,00 | 0,000 | -0,17 |  |  |

**7. PLAXIS 2D - OUTPUT : Simulasi tiang tunggal,  $d = 60$  cm**

Perpindahan radial tanah

| $r$<br>[m] | $\rho$<br>[m] |      |       |  |  |       |       |
|------------|---------------|------|-------|--|--|-------|-------|
|            |               | 4,42 | 0,010 |  |  | 8,37  | 0,004 |
|            |               | 4,42 | 0,010 |  |  | 8,37  | 0,004 |
|            |               | 4,56 | 0,009 |  |  | 8,67  | 0,004 |
|            |               | 4,56 | 0,009 |  |  | 8,67  | 0,004 |
|            |               | 4,79 | 0,009 |  |  | 8,93  | 0,004 |
|            |               | 4,79 | 0,009 |  |  | 8,93  | 0,004 |
|            |               | 4,81 | 0,009 |  |  | 9,05  | 0,004 |
|            |               | 4,81 | 0,009 |  |  | 9,05  | 0,004 |
|            |               | 4,82 | 0,009 |  |  | 9,17  | 0,004 |
|            |               | 4,82 | 0,009 |  |  | 9,17  | 0,004 |
|            |               | 5,06 | 0,008 |  |  | 9,46  | 0,004 |
|            |               | 5,06 | 0,008 |  |  | 9,46  | 0,004 |
|            |               | 5,20 | 0,008 |  |  | 9,56  | 0,004 |
|            |               | 5,20 | 0,008 |  |  | 9,56  | 0,004 |
|            |               | 5,44 | 0,008 |  |  | 9,86  | 0,003 |
|            |               | 5,44 | 0,008 |  |  | 9,86  | 0,003 |
|            |               | 5,46 | 0,008 |  |  | 10,00 | 0,003 |
|            |               | 5,46 | 0,008 |  |  | 10,00 | 0,003 |
|            |               | 5,48 | 0,008 |  |  | 10,14 | 0,003 |
|            |               | 5,48 | 0,008 |  |  | 10,14 | 0,003 |
|            |               | 5,73 | 0,007 |  |  | 10,41 | 0,003 |
|            |               | 5,73 | 0,007 |  |  | 10,41 | 0,003 |
|            |               | 5,86 | 0,007 |  |  | 10,65 | 0,003 |
|            |               | 5,86 | 0,007 |  |  | 10,65 | 0,003 |
|            |               | 6,11 | 0,007 |  |  | 10,93 | 0,003 |
|            |               | 6,11 | 0,007 |  |  | 10,93 | 0,003 |
|            |               | 6,12 | 0,007 |  |  | 11,25 | 0,003 |
|            |               | 6,12 | 0,007 |  |  | 11,25 | 0,003 |
|            |               | 6,13 | 0,007 |  |  | 11,64 | 0,003 |
|            |               | 6,13 | 0,007 |  |  | 11,64 | 0,003 |
|            |               | 6,38 | 0,006 |  |  | 12,10 | 0,002 |
|            |               | 6,38 | 0,006 |  |  | 12,10 | 0,002 |
|            |               | 6,51 | 0,006 |  |  | 12,42 | 0,002 |
|            |               | 6,51 | 0,006 |  |  | 12,42 | 0,002 |
|            |               | 6,76 | 0,006 |  |  | 12,95 | 0,002 |
|            |               | 6,76 | 0,006 |  |  | 12,95 | 0,002 |
|            |               | 6,77 | 0,006 |  |  | 13,56 | 0,002 |
|            |               | 6,77 | 0,006 |  |  | 13,56 | 0,002 |
|            |               | 6,78 | 0,006 |  |  | 13,89 | 0,002 |
|            |               | 6,78 | 0,006 |  |  | 13,89 | 0,002 |
|            |               | 7,04 | 0,006 |  |  | 14,60 | 0,001 |
|            |               | 7,04 | 0,006 |  |  | 14,60 | 0,001 |
|            |               | 7,16 | 0,005 |  |  | 15,42 | 0,001 |
|            |               | 7,16 | 0,005 |  |  | 15,42 | 0,001 |
|            |               | 7,41 | 0,005 |  |  | 15,71 | 0,001 |
|            |               | 7,41 | 0,005 |  |  | 15,71 | 0,001 |
|            |               | 7,47 | 0,005 |  |  | 16,79 | 0,001 |
|            |               | 7,47 | 0,005 |  |  | 16,79 | 0,001 |
|            |               | 7,53 | 0,005 |  |  | 16,93 | 0,001 |
|            |               | 7,53 | 0,005 |  |  | 16,93 | 0,001 |
|            |               | 7,83 | 0,005 |  |  | 17,09 | 0,001 |
|            |               | 7,83 | 0,005 |  |  | 17,09 | 0,001 |
|            |               | 8,00 | 0,005 |  |  | 18,35 | 0,000 |
|            |               | 8,00 | 0,005 |  |  | 18,35 | 0,000 |
|            |               | 8,32 | 0,004 |  |  | 19,81 | 0,000 |
|            |               | 8,32 | 0,004 |  |  | 19,81 | 0,000 |
|            |               | 8,35 | 0,004 |  |  | 20,00 | 0,000 |
|            |               | 8,35 | 0,004 |  |  | 20,00 | 0,000 |

### 8. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi tiang tunggal, $d = 50$ cm

Perpindahan radial tanah

| $r$<br>[m] | $\rho$<br>[m] |      |       |       |       |
|------------|---------------|------|-------|-------|-------|
| 0,25       | 0,119         | 2,27 | 0,011 | 5,22  | 0,004 |
| 0,30       | 0,055         | 2,29 | 0,011 | 5,27  | 0,004 |
| 0,35       | 0,071         | 2,31 | 0,011 | 5,32  | 0,004 |
| 0,35       | 0,071         | 2,31 | 0,011 | 5,32  | 0,004 |
| 0,40       | 0,076         | 2,32 | 0,011 | 5,37  | 0,004 |
| 0,45       | 0,070         | 2,34 | 0,011 | 5,42  | 0,004 |
| 0,45       | 0,070         | 2,34 | 0,011 | 5,42  | 0,004 |
| 0,46       | 0,066         | 2,44 | 0,010 | 5,66  | 0,003 |
| 0,47       | 0,063         | 2,54 | 0,010 | 5,90  | 0,003 |
| 0,47       | 0,063         | 2,54 | 0,010 | 5,90  | 0,003 |
| 0,48       | 0,063         | 2,65 | 0,010 | 6,07  | 0,003 |
| 0,48       | 0,062         | 2,76 | 0,009 | 6,24  | 0,003 |
| 0,48       | 0,062         | 2,76 | 0,009 | 6,24  | 0,003 |
| 0,56       | 0,070         | 2,76 | 0,009 | 6,59  | 0,002 |
| 0,63       | 0,066         | 2,77 | 0,009 | 6,94  | 0,002 |
| 0,63       | 0,066         | 2,77 | 0,009 | 6,94  | 0,002 |
| 0,72       | 0,054         | 2,77 | 0,009 | 7,00  | 0,002 |
| 0,81       | 0,047         | 2,77 | 0,009 | 7,05  | 0,002 |
| 0,81       | 0,047         | 2,78 | 0,009 | 7,05  | 0,002 |
| 0,82       | 0,045         | 2,78 | 0,009 | 7,10  | 0,002 |
| 0,84       | 0,044         | 2,89 | 0,009 | 7,15  | 0,002 |
| 0,84       | 0,044         | 3,00 | 0,008 | 7,15  | 0,002 |
| 0,86       | 0,042         | 3,00 | 0,008 | 7,55  | 0,002 |
| 0,88       | 0,040         | 3,14 | 0,008 | 7,95  | 0,001 |
| 0,88       | 0,040         | 3,27 | 0,008 | 7,95  | 0,001 |
| 0,97       | 0,036         | 3,27 | 0,008 | 8,45  | 0,001 |
| 1,06       | 0,032         | 3,27 | 0,008 | 8,95  | 0,001 |
| 1,06       | 0,032         | 3,27 | 0,008 | 8,95  | 0,001 |
| 1,12       | 0,029         | 3,27 | 0,008 | 8,96  | 0,001 |
| 1,19       | 0,026         | 3,27 | 0,008 | 8,97  | 0,001 |
| 1,19       | 0,026         | 3,41 | 0,007 | 8,97  | 0,001 |
| 1,23       | 0,025         | 3,55 | 0,007 | 8,98  | 0,001 |
| 1,27       | 0,024         | 3,55 | 0,007 | 9,00  | 0,001 |
| 1,27       | 0,024         | 3,67 | 0,007 | 9,00  | 0,001 |
| 1,33       | 0,022         | 3,80 | 0,006 | 9,50  | 0,000 |
| 1,38       | 0,020         | 3,80 | 0,006 | 10,00 | 0,000 |
| 1,38       | 0,020         | 3,81 | 0,006 |       |       |
| 1,42       | 0,020         | 3,82 | 0,006 |       |       |
| 1,46       | 0,019         | 3,82 | 0,006 |       |       |
| 1,46       | 0,019         | 3,83 | 0,006 |       |       |
| 1,49       | 0,019         | 3,84 | 0,006 |       |       |
| 1,53       | 0,018         | 3,84 | 0,006 |       |       |
| 1,53       | 0,018         | 3,84 | 0,006 |       |       |
| 1,59       | 0,017         | 3,96 | 0,006 |       |       |
| 1,65       | 0,016         | 4,08 | 0,006 |       |       |
| 1,65       | 0,016         | 4,08 | 0,006 |       |       |
| 1,72       | 0,015         | 4,16 | 0,006 |       |       |
| 1,79       | 0,015         | 4,24 | 0,005 |       |       |
| 1,79       | 0,015         | 4,24 | 0,005 |       |       |
| 1,83       | 0,014         | 4,28 | 0,005 |       |       |
| 1,86       | 0,014         | 4,33 | 0,005 |       |       |
| 1,86       | 0,014         | 4,33 | 0,005 |       |       |
| 1,89       | 0,014         | 4,44 | 0,005 |       |       |
| 1,92       | 0,014         | 4,55 | 0,005 |       |       |
| 1,92       | 0,014         | 4,55 | 0,005 |       |       |
| 2,00       | 0,013         | 4,55 | 0,005 |       |       |
| 2,08       | 0,012         | 4,56 | 0,005 |       |       |
| 2,08       | 0,012         | 4,67 | 0,005 |       |       |
| 2,18       | 0,012         | 4,79 | 0,005 |       |       |
| 2,27       | 0,011         | 4,79 | 0,005 |       |       |
|            |               | 5,00 | 0,004 |       |       |
|            |               | 5,22 | 0,004 |       |       |

**9. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi tiang kelompok 1 x 6 (6 tiang)  $S = 3d$ ,  $d = 50$  cm**

Perpindahan radial tanah ke arah titik A

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| -0,540     | -0,104               | -0,110               | -0,113               | -0,115               | -0,117               | -0,118               |
| -1,033     | -0,035               | -0,039               | -0,042               | -0,044               | -0,046               | -0,047               |
| -1,515     | -0,019               | -0,023               | -0,026               | -0,028               | -0,029               | -0,030               |
| -3,015     | -0,009               | -0,012               | -0,015               | -0,016               | -0,017               | -0,018               |
| -4,545     | -0,006               | -0,008               | -0,010               | -0,011               | -0,012               | -0,013               |
| -6,040     | -0,004               | -0,006               | -0,008               | -0,009               | -0,009               | -0,010               |
| -7,565     | -0,003               | -0,005               | -0,006               | -0,007               | -0,007               | -0,008               |
| -9,074     | -0,002               | -0,004               | -0,005               | -0,005               | -0,006               | -0,006               |
| -10,592    | -0,002               | -0,003               | -0,004               | -0,004               | -0,005               | -0,005               |
| -12,149    | -0,001               | -0,002               | -0,003               | -0,003               | -0,004               | -0,004               |
| -13,588    | -0,001               | -0,002               | -0,002               | -0,003               | -0,003               | -0,003               |

Perpindahan radial tanah (m) ke arah titik B

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,027      | 0,027                | -0,080               | -0,088               | -0,090               | -0,092               | -0,093               |
| 1,485      | 0,016                | 0,000                | 0,095                | 0,093                | 0,091                | 0,089                |
| 2,527      | 0,010                | 0,030                | -0,078               | -0,086               | -0,088               | -0,090               |
| 2,985      | 0,008                | 0,019                | 0,000                | 0,040                | 0,039                | 0,037                |
| 3,979      | 0,006                | 0,013                | 0,025                | -0,079               | -0,086               | -0,088               |
| 4,485      | 0,006                | 0,011                | 0,018                | 0,000                | 0,033                | 0,030                |
| 5,479      | 0,004                | 0,009                | 0,013                | 0,031                | -0,066               | -0,074               |
| 5,985      | 0,004                | 0,008                | 0,012                | 0,019                | 0,000                | 0,020                |
| 6,979      | 0,003                | 0,006                | 0,009                | 0,013                | 0,029                | -0,081               |
| 7,485      | 0,003                | 0,006                | 0,008                | 0,012                | 0,019                | 0,000                |
| 8,509      | 0,002                | 0,005                | 0,007                | 0,009                | 0,013                | 0,030                |
| 8,993      | 0,002                | 0,004                | 0,006                | 0,009                | 0,012                | 0,019                |
| 10,498     | 0,002                | 0,003                | 0,005                | 0,006                | 0,008                | 0,012                |
| 11,987     | 0,001                | 0,003                | 0,003                | 0,005                | 0,006                | 0,008                |
| 13,761     | 0,001                | 0,002                | 0,002                | 0,003                | 0,004                | 0,006                |

**10. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi tiang kelompok 1 x 6 (6 tiang)  $S = 3d$  ,  $d = 40$  cm**

Perpindahan radial tanah ke arah titik A

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| -1,210     | -0,011               | -0,016               | -0,018               | -0,020               | -0,021               | -0,023               |
| -2,411     | -0,007               | -0,011               | -0,012               | -0,014               | -0,016               | -0,017               |
| -3,600     | -0,005               | -0,008               | -0,009               | -0,011               | -0,012               | -0,013               |
| -4,892     | -0,004               | -0,006               | -0,007               | -0,008               | -0,009               | -0,010               |
| -6,078     | -0,003               | -0,005               | -0,006               | -0,007               | -0,008               | -0,008               |
| -7,221     | -0,002               | -0,004               | -0,005               | -0,005               | -0,006               | -0,007               |
| -8,519     | -0,002               | -0,003               | -0,004               | -0,004               | -0,005               | -0,005               |
| -9,480     | -0,002               | -0,003               | -0,003               | -0,004               | -0,005               | -0,005               |

Perpindahan radial tanah (m) ke arah titik B

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,188      | 0,014                | 0,000                | 0,020                | 0,018                | 0,017                | 0,015                |
| 2,390      | 0,007                | 0,014                | 0,000                | 0,043                | 0,041                | 0,039                |
| 3,588      | 0,005                | 0,009                | 0,018                | 0,000                | 0,052                | 0,050                |
| 4,788      | 0,004                | 0,006                | 0,011                | 0,019                | 0,000                | 0,051                |
| 5,988      | 0,003                | 0,005                | 0,008                | 0,012                | 0,018                | 0,000                |
| 7,205      | 0,002                | 0,004                | 0,006                | 0,009                | 0,011                | 0,018                |
| 8,413      | 0,002                | 0,003                | 0,005                | 0,007                | 0,009                | 0,011                |
| 9,592      | 0,001                | 0,002                | 0,004                | 0,005                | 0,007                | 0,008                |
| 10,928     | 0,001                | 0,002                | 0,003                | 0,004                | 0,005                | 0,006                |
| 12,128     | 0,001                | 0,001                | 0,002                | 0,003                | 0,004                | 0,004                |
| 13,396     | 0,001                | 0,001                | 0,001                | 0,002                | 0,002                | 0,003                |
| 14,325     | 0,000                | 0,001                | 0,001                | 0,001                | 0,001                | 0,002                |

**11. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi tiang kelompok 1 x 6 (6 tiang)  $S = 3d$  ,  $d = 30$  cm**  
 Perpindahan radial tanah ke arah titik A

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| -0,902     | -0,014               | -0,018               | -0,020               | -0,022               | -0,024               | -0,025               |
| -1,802     | -0,007               | -0,010               | -0,012               | -0,014               | -0,015               | -0,017               |
| -2,701     | -0,005               | -0,007               | -0,009               | -0,011               | -0,012               | -0,014               |
| -3,600     | -0,004               | -0,006               | -0,008               | -0,009               | -0,010               | -0,011               |
| -4,500     | -0,003               | -0,005               | -0,006               | -0,007               | -0,009               | -0,009               |
| -5,400     | -0,002               | -0,004               | -0,005               | -0,006               | -0,007               | -0,008               |
| -6,306     | -0,002               | -0,003               | -0,004               | -0,005               | -0,006               | -0,006               |
| -7,212     | -0,001               | -0,003               | -0,003               | -0,004               | -0,005               | -0,005               |
| -8,128     | -0,001               | -0,002               | -0,003               | -0,003               | -0,004               | -0,004               |

Perpindahan radial tanah (m) ke arah titik B

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0,891      | 0,011                | 0,000                | -0,003               | -0,004               | -0,006               | -0,008               |
| 1,791      | 0,006                | 0,013                | 0,000                | 0,016                | 0,014                | 0,013                |
| 2,691      | 0,004                | 0,007                | 0,014                | 0,000                | 0,032                | 0,030                |
| 3,591      | 0,003                | 0,005                | 0,008                | 0,016                | 0,000                | 0,012                |
| 4,494      | 0,002                | 0,004                | 0,007                | 0,010                | 0,015                | 0,000                |
| 5,400      | 0,002                | 0,004                | 0,005                | 0,008                | 0,010                | 0,015                |
| 6,291      | 0,002                | 0,003                | 0,004                | 0,006                | 0,008                | 0,010                |
| 7,194      | 0,001                | 0,002                | 0,004                | 0,005                | 0,006                | 0,008                |
| 8,127      | 0,001                | 0,002                | 0,003                | 0,004                | 0,005                | 0,006                |

**12. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi tiang kelompok 3 x 3 (9 tiang)  $S = 3d$ ,  $d = 30$  cm**  
 Perpindahan radial tanah ke arah titik A

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] | $\rho$ fase-7<br>[m] | $\rho$ fase-8<br>[m] | $\rho$ fase-9<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| -0,739     | -0,028               | -0,034               | -0,034               | -0,034               | -0,036               | -0,040               | -0,040               | -0,041               | -0,041               |
| -1,018     | -0,021               | -0,034               | -0,034               | -0,035               | -0,038               | -0,043               | -0,044               | -0,044               | -0,044               |
| -1,456     | -0,015               | -0,031               | -0,031               | -0,031               | -0,034               | -0,038               | -0,039               | -0,039               | -0,039               |
| -1,979     | -0,010               | -0,022               | -0,022               | -0,023               | -0,024               | -0,027               | -0,028               | -0,028               | -0,028               |
| -2,186     | -0,009               | -0,019               | -0,020               | -0,020               | -0,021               | -0,024               | -0,025               | -0,025               | -0,025               |
| -2,477     | -0,008               | -0,016               | -0,016               | -0,016               | -0,017               | -0,020               | -0,020               | -0,020               | -0,020               |
| -2,954     | -0,006               | -0,012               | -0,013               | -0,013               | -0,013               | -0,015               | -0,016               | -0,016               | -0,016               |
| -3,585     | -0,004               | -0,008               | -0,009               | -0,009               | -0,009               | -0,011               | -0,011               | -0,011               | -0,011               |
| -3,783     | -0,004               | -0,007               | -0,008               | -0,008               | -0,008               | -0,009               | -0,010               | -0,010               | -0,010               |
| -3,783     | -0,004               | -0,007               | -0,008               | -0,008               | -0,008               | -0,009               | -0,010               | -0,010               | -0,010               |
| -3,988     | -0,003               | -0,006               | -0,007               | -0,007               | -0,007               | -0,008               | -0,008               | -0,008               | -0,008               |
| -4,508     | -0,002               | -0,004               | -0,005               | -0,005               | -0,005               | -0,005               | -0,005               | -0,005               | -0,005               |

Perpindahan radial tanah (m) ke arah titik B

| $r$<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[m] | $\rho$ fase-4<br>[m] | $\rho$ fase-5<br>[m] | $\rho$ fase-6<br>[m] | $\rho$ fase-7<br>[m] | $\rho$ fase-8<br>[m] | $\rho$ fase-9<br>[m] |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,487      | 0,018                | 0,024                | 0,023                | 0,023                | 0,025                | 0,000                | -0,036               | -0,036               | -0,036               |
| 2,267      | 0,012                | 0,018                | 0,019                | 0,020                | 0,022                | 0,039                | -0,003               | -0,007               | -0,007               |
| 2,991      | 0,009                | 0,015                | 0,016                | 0,018                | 0,019                | 0,027                | 0,000                | -0,196               | -0,196               |
| 3,767      | 0,007                | 0,011                | 0,013                | 0,015                | 0,015                | 0,020                | 0,034                | 0,037                | 0,037                |
| 4,474      | 0,005                | 0,009                | 0,010                | 0,012                | 0,012                | 0,015                | 0,012                | 0,012                | 0,012                |

**13. PLAXIS 3D - OUTPUT : Simulasi pemancangan 9 tiang ( $d=50\text{cm}$ ) pada tanggal 22 Juni 2013**

Perpindahan radial tanah di titik A

| Depth<br>[m] | $\rho$ fase-1<br>[mm] | $\rho$ fase-1<br>[mm] | $\rho$ fase-1<br>[mm] | $\rho$ fase-4<br>[mm] | $\rho$ fase-5<br>[mm] | $\rho$ fase-6<br>[mm] | $\rho$ fase-7<br>[mm] | $\rho$ fase-8<br>[mm] | $\rho$ fase-9<br>[mm] |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,000        | -3,940                | -7,848                | -9,353                | -15,695               | -19,056               | -23,614               | -26,003               | -30,684               | -36,491               |
| -2,289       | -4,072                | -7,865                | -9,403                | -14,987               | -18,048               | -22,373               | -24,435               | -27,571               | -31,818               |
| -2,289       | -4,072                | -7,865                | -9,403                | -14,987               | -18,048               | -22,373               | -24,435               | -27,571               | -31,818               |
| -3,084       | -4,131                | -7,972                | -9,621                | -14,982               | -17,933               | -22,209               | -24,206               | -26,851               | -30,510               |
| -4,107       | -4,202                | -8,127                | -9,958                | -15,062               | -17,886               | -22,117               | -24,062               | -26,125               | -28,986               |
| -6,577       | -4,328                | -9,110                | -12,245               | -17,170               | -19,846               | -24,267               | -26,599               | -27,996               | -29,896               |
| -6,577       | -4,328                | -9,110                | -12,245               | -17,170               | -19,846               | -24,267               | -26,599               | -27,996               | -29,896               |
| -8,127       | -4,347                | -9,769                | -13,931               | -18,899               | -21,581               | -26,178               | -28,794               | -30,090               | -32,297               |
| -8,127       | -4,347                | -9,769                | -13,931               | -18,899               | -21,581               | -26,178               | -28,794               | -30,090               | -32,297               |
| -10,000      | -4,315                | -10,318               | -15,621               | -20,575               | -23,332               | -28,041               | -30,603               | -32,236               | -35,334               |
| -10,000      | -4,315                | -10,318               | -15,621               | -20,575               | -23,332               | -28,041               | -30,603               | -32,236               | -35,334               |
| -12,450      | -4,389                | -10,248               | -15,794               | -20,083               | -22,680               | -27,126               | -29,572               | -31,427               | -33,902               |
| -14,049      | -4,487                | -10,158               | -15,928               | -19,536               | -22,013               | -26,148               | -28,654               | -30,651               | -32,538               |
| -14,049      | -4,487                | -10,158               | -15,928               | -19,536               | -22,013               | -26,148               | -28,654               | -30,651               | -32,538               |
| -16,576      | -4,605                | -9,734                | -15,506               | -18,018               | -20,267               | -23,841               | -26,065               | -28,305               | -29,685               |
| -16,576      | -4,605                | -9,734                | -15,506               | -18,018               | -20,267               | -23,841               | -26,065               | -28,305               | -29,685               |
| -18,173      | -4,666                | -9,309                | -14,894               | -16,657               | -18,723               | -21,875               | -23,767               | -25,921               | -27,031               |
| -18,173      | -4,666                | -9,309                | -14,894               | -16,657               | -18,723               | -21,875               | -23,767               | -25,921               | -27,031               |
| -20,000      | -4,694                | -8,633                | -13,903               | -14,754               | -16,582               | -19,165               | -20,565               | -22,519               | -23,141               |
| -20,000      | -4,694                | -8,633                | -13,903               | -14,754               | -16,582               | -19,165               | -20,565               | -22,519               | -23,141               |
| -22,058      | -4,464                | -7,878                | -12,584               | -13,081               | -14,700               | -16,996               | -18,164               | -19,918               | -20,336               |
| -22,058      | -4,464                | -7,878                | -12,584               | -13,081               | -14,700               | -16,996               | -18,164               | -19,918               | -20,336               |
| -24,157      | -4,110                | -6,862                | -10,766               | -10,887               | -12,205               | -14,116               | -14,975               | -16,507               | -16,646               |
| -26,367      | -3,615                | -5,704                | -8,768                | -8,590                | -9,590                | -11,101               | -11,664               | -12,948               | -12,844               |
| -26,367      | -3,615                | -5,704                | -8,768                | -8,590                | -9,590                | -11,101               | -11,664               | -12,948               | -12,844               |
| -28,857      | -2,820                | -4,209                | -6,348                | -5,987                | -6,642                | -7,716                | -8,010                | -8,953                | -8,696                |
| -28,857      | -2,820                | -4,209                | -6,348                | -5,987                | -6,642                | -7,716                | -8,010                | -8,953                | -8,696                |
| -30,218      | -2,291                | -3,323                | -4,958                | -4,554                | -5,031                | -5,856                | -6,032                | -6,762                | -6,487                |
| -30,218      | -2,291                | -3,323                | -4,958                | -4,554                | -5,031                | -5,856                | -6,032                | -6,762                | -6,487                |
| -32,216      | -1,401                | -1,945                | -2,861                | -2,523                | -2,769                | -3,244                | -3,301                | -3,712                | -3,488                |
| -32,216      | -1,401                | -1,945                | -2,861                | -2,523                | -2,769                | -3,244                | -3,301                | -3,712                | -3,488                |
| -34,341      | -0,349                | -0,460                | -0,665                | -0,557                | -0,607                | -0,718                | -0,720                | -0,812                | -0,743                |

## BIOGRAFI PENULIS



Nama Lengkap : Arik Triarso  
Tempat & Tanggal Lahir : Surabaya, 01 Januari 1987  
N R P : 3113 201 001  
Agama : Islam  
Alamat : Jl. Pagesangan II-D / 20, RT 02 / RW 02, Jambangan, Surabaya  
Kode Pos : 60233  
Email : Ariktriarso45@gmail.com

Judul Tesis : Studi Pengaruh Pemancangan dengan Metode Injeksi Terhadap Ekses Tekanan Air Pori dan Pergerakan Tanah dengan Pemodelan Menggunakan Program Plaxis 2D dan 3D

Dosen Pembimbing: Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.  
M. Farid Ma'ruf, ST., MT., Ph.D.

Program Studi : Pascasarjana – Teknik Sipil ITS

Bidang Keahlian : Geoteknik

Pendidikan :

SDN Pagesangan Surabaya (Lulus tahun 1999)

SLTPN 21 Surabaya (Lulus tahun 2002)

SMKN 5 Surabaya (Lulus tahun 2006)

S1 Teknik Sipil (Pend. Teknik Bangunan) Universitas Negeri Surabaya (Lulus tahun 2012)

S2 Teknik Sipil (Geoteknik) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (Lulus tahun 2016)