

## **TUGAS AKHIR**

# **ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN FONDASI TIANG PANCANG MENGGUNAKAN PENDEKATAN 1-DIMENSI TERZAGHI DAN METODE ELEMEN HINGGA 2-DIMENSI**

## ***(COMPARATIVE ANALYSIS OF PILE FOUNDATION SETTLEMENT USING THE ONE-DIMENSIONAL TERZAGHI APPROACH AND THE TWO- DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD)***

(Studi Kasus: Proyek Tower Pendidikan di Surabaya)

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Muhammad Rafi' Nur Rahman**

**22511094**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

**2026**

## TUGAS AKHIR

# ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN FONDASI TIANG PANCANG MENGGUNAKAN PENDEKATAN 1-DIMENSI TERZAGHI DAN METODE ELEMEN HINGGA 2-DIMENSI

## (COMPARATIVE ANALYSIS OF PILE FOUNDATION SETTLEMENT USING THE ONE-DIMENSIONAL TERZAGHI APPROACH AND THE TWO- DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD)

(Studi Kasus: Proyek Tower Pendidikan di Surabaya)

Disusun Oleh :

Muhammad Rafi Nur Rahman  
2251104

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 20 Juli 2026  
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing :

Ir. Muhammad Irfan Marasabessy, S.T., M.T.  
NIK : 245110502

Tanggal : 24 Juli 2026

Penguji I :

Dr. Ir. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T.  
NIK : 045110407

Tanggal : 23 Juli 2026

Penguji II :

Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng.  
NIK : 215111305

Tanggal : 27 Juli 2026



Mengesahkan

Pia Ketua Program Studi Teknik Sipil

Durka Anggrahen, S.T., M.Eng.  
NIK : 165110105

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian Program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemui seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 22 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Rafil Nur R

22511094

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillahirabbil'alamin*, puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Perbandingan Penurunan Fondasi Tiang Pancang Menggunakan Pendekatan 1-Dimensi Terzaghi Dan Metode Elemen Hingga 2-Dimensi (Studi Kasus: Proyek Tower Pendidikan di Surabaya)" dengan baik. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan jenjang Strata Satu pada Program Studi Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, doa, dan dukungan dari berbagai pihak. Bantuan tersebut sangat berarti selama proses penyusunan hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Maka dari itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak terkait.

1. Bapak Ir. Muhammad Irfan Marasabessy, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah membimbing penulis dengan sabar, baik, dan penuh perhatian selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Dr. Ir. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I dan Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji II, yang telah memberikan arahan, kritik, dan saran yang membantu penulis menyempurnakan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dinia Anggraheni S.T., M.Eng. selaku Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
4. Seluruh dosen dan pengajar Program Studi Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan.
5. Kedua orang tua penulis, Bapak dan Ibu tercinta, yang selalu menjadi sumber doa, dukungan, semangat dan kekuatan terbesar bagi penulis,

6. Kakak-kakak dan Adik penulis dan keluarga besar, yang selalu memberi warna dalam perjalanan penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Andien Putri Aulia seseorang yang sangat berarti bagi penulis, yang selalu hadir menemani, membantu, mendengarkan keluh kesah, dan memberikan semangat selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman terdekat penulis, Alfat, Andra, Tyo, Budi, Surya dan Bom-Bom yang akrab penulis sebut sebagai BARESKRIM POLDA DIY sebagai sumber semangat, dan cerita paling berkesan selama proses ini.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.

Akhirnya penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 22 Juli 2026

Penulis,



Muhammad Rafi' Nur R

22511094

## DAFTAR ISI

|                                                                                                                                                                          |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| LEMBAR PENGESAHAN                                                                                                                                                        | ii    |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI                                                                                                                                                | iii   |
| KATA PENGANTAR                                                                                                                                                           | iv    |
| DAFTAR ISI                                                                                                                                                               | vi    |
| DAFTAR TABEL                                                                                                                                                             | ix    |
| DAFTAR GAMBAR                                                                                                                                                            | xi    |
| DAFTAR LAMPIRAN                                                                                                                                                          | xiv   |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN                                                                                                                                              | xv    |
| ABSTRAK                                                                                                                                                                  | xviii |
| <i>ABSTRACT</i>                                                                                                                                                          | xix   |
| BAB 1 PENDAHULUAN                                                                                                                                                        | 20    |
| 1.1 Latar Belakang                                                                                                                                                       | 20    |
| 1.2 Rumusan Masalah                                                                                                                                                      | 21    |
| 1.3 Tujuan Penelitian                                                                                                                                                    | 21    |
| 1.4 Manfaat Penelitian                                                                                                                                                   | 22    |
| 1.5 Batasan Penelitian                                                                                                                                                   | 22    |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA                                                                                                                                                   | 24    |
| 2.1 Tinjauan Umum                                                                                                                                                        | 24    |
| 2.2 Penelitian Terdahulu                                                                                                                                                 | 24    |
| 2.2.1 Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Fondasi<br>Tiang Menggunakan Metode Analitik dan Elemen Hingga<br>(Pembangunan Gedung Bank Aceh Syariah Kota Banda<br>Aceh) | 24    |
| 2.2.2 Analisa Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan<br>terhadap Variasi Bentuk Penampang Fondasi Tiang<br>Pancang                                                       | 25    |
| 2.2.3 Analisis Perbandingan Penurunan Terhadap Daya Dukung<br>Fondasi Tiang Pada Tanah Ekspansif Di Karawang Jawa<br>Barat                                               | 26    |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4 Analisis Penurunan Fondasi Tiang Pancang Pada Jembatan Meninting Menggunakan Metode Analitis dan Metode Numerik | 26 |
| 2.2.5 Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan <i>PLAXIS 3D</i> Berdasarkan Data N-SPT                   | 27 |
| 2.3 Keaslian Penelitian                                                                                               | 33 |
| BAB 3 LANDASAN TEORI                                                                                                  | 35 |
| 3.1 Tanah                                                                                                             | 35 |
| 3.2 Klasifikasi Tanah                                                                                                 | 35 |
| 3.3 Penyelidikan Tanah                                                                                                | 36 |
| 3.4 Fondasi                                                                                                           | 37 |
| 3.4.1 Pengertian Fondasi                                                                                              | 37 |
| 3.4.2 Fondasi Dangkal                                                                                                 | 38 |
| 3.4.3 Fondasi Dalam                                                                                                   | 39 |
| 3.5 Kapasitas Daya Dukung Tiang                                                                                       | 40 |
| 3.6 Penurunan Tiang                                                                                                   | 41 |
| 3.6.1 Penurunan elastis tiang tunggal                                                                                 | 41 |
| 3.6.2 Penurunan elastis kelompok tiang                                                                                | 44 |
| 3.6.3 Penurunan konsolidasi                                                                                           | 44 |
| 3.6.4 Penurunan total                                                                                                 | 45 |
| 3.6.5 Perbedaan penurunan                                                                                             | 46 |
| 3.7 Metode Elemen Hingga                                                                                              | 48 |
| 3.7.1 <i>PLAXIS 2D</i>                                                                                                | 48 |
| 3.7.2 Proses analisis <i>PLAXIS 2D</i>                                                                                | 50 |
| 3.8 <i>Settle3D</i>                                                                                                   | 54 |
| 3.8.1 Pendekatan 3-dimensi                                                                                            | 54 |
| 3.8.2 Pehitungan distribusi tegangan ( $\Delta\sigma$ ) akibat beban                                                  | 55 |
| 3.8.3 Proses analisis <i>Settle3D</i>                                                                                 | 55 |
| BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN                                                                                           | 59 |
| 4.1 Tinjauan Umum                                                                                                     | 59 |
| 4.2 Lokasi Penelitian                                                                                                 | 59 |

|       |                                                                  |     |
|-------|------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3   | Data Penelitian                                                  | 60  |
| 4.3.1 | Data Struktur                                                    | 60  |
| 4.3.2 | Data Tanah                                                       | 62  |
| 4.4   | Tahap Analisis                                                   | 63  |
| 4.5   | Bagan Alir Penelitian                                            | 63  |
| BAB 5 | ANALISIS PERHITUNGAN                                             | 67  |
| 5.1   | Pembacaan Reaksi Beban Fondasi                                   | 67  |
| 5.2   | Fondasi                                                          | 68  |
| 5.3   | Analisis Numerik 1-Dimensi                                       | 71  |
| 5.3.1 | Analisis Numerik 1-Dimensi Terzaghi                              | 71  |
| 5.3.2 | Analisis Numerik 1-Dimensi <i>Settle3D</i>                       | 96  |
| 5.3.3 | Perbandingan Hasil Analisis Konsolidasi 1-Dimensi                | 99  |
| 5.4   | Analisis Metode Elemen Hingga                                    | 100 |
| 5.5   | Perbandingan Hasil Penurunan 1-Dimensi dengan 2-Dimensi          | 117 |
| 5.5.1 | Perbandingan Penurunan Elastis                                   | 118 |
| 5.5.2 | Perbandingan Penurunan Konsolidasi                               | 125 |
| 5.5.3 | Perbandingan Penurunan Total                                     | 132 |
| 5.5.4 | Perbandingan Beda Penurunan Manual dan <i>PLAXIS 2D</i>          | 139 |
| 5.5.5 | Pengaruh Interaksi Antar <i>Pile cap</i> Terhadap Pola Penurunan | 140 |
| BAB 6 | KESIMPULAN DAN SARAN                                             | 144 |
| 6.1   | Kesimpulan                                                       | 144 |
| 6.2   | Saran                                                            | 145 |
|       | DAFTAR PUSTAKA                                                   | 147 |
|       | LAMPIRAN                                                         | 151 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu                                              | 29  |
| Tabel 2.2 Perbandingan Persamaan dan Perbedaan Penelitian Terdahulu                      | 33  |
| Tabel 3.1 Hubungan Nilai N dan Kerapatan Relatif ( $D_r$ ) tanah pasir                   | 37  |
| Tabel 3.2 Hubungan Nilai N dan Kuat Geset Tekan Bebas ( $q_u$ ) untuk Tanah Lempung      | 37  |
| Tabel 3.3 Perkiraan Modulus Elastisitas                                                  | 42  |
| Tabel 3.4 Perkiraan Poisson Rasio ( $\mu$ )                                              | 43  |
| Tabel 3.5 Fase pada <i>Stage Construction PLAXIS2D</i>                                   | 54  |
| Tabel 4.1 Nilai NSPT                                                                     | 62  |
| Tabel 5.1 <i>Output</i> Gaya-Gaya Aksial                                                 | 68  |
| Tabel 5.2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Penurunan Elastis Kelompok Tiang                | 82  |
| Tabel 5.3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Penurunan Konsolidasi Kelompok Tiang            | 91  |
| Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Total Kelompok Tiang                        | 92  |
| Tabel 5.5 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 1-Dimensi Terzaghi                     | 95  |
| Tabel 5.6 Data Parameter Tanah <i>Settle3D</i>                                           | 97  |
| Tabel 5.7 Rekapitulasi <i>Output</i> Penurunan Konsolidasi <i>Settle3D</i>               | 99  |
| Tabel 5.8 <i>Output</i> Penurunan Konsolidasi Rerata                                     | 100 |
| Tabel 5.9 Input Data Tanah                                                               | 101 |
| Tabel 5.10 Data <i>Input</i> Parameter <i>Pile Propertis</i> dengan <i>Embedded Beam</i> | 102 |
| Tabel 5.11 Data <i>Input Pile cap</i> dengan <i>Plate</i>                                | 102 |
| Tabel 5.12 <i>Output</i> Penurunan Potongan 1                                            | 105 |
| Tabel 5.13 <i>Output</i> Penurunan Potongan 2                                            | 107 |
| Tabel 5.14 <i>Output</i> Penurunan Potongan 3                                            | 109 |
| Tabel 5.15 <i>Output</i> Penurunan Potongan 4                                            | 111 |
| Tabel 5.16 <i>Output</i> Penurunan Potongan 5                                            | 114 |
| Tabel 5.17 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 2-Dimensi <i>PLAXIS 2D</i>            | 116 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Perbandingan                                                           | 118 |
| Tabel 5.19 Perbandingan Penurunan Elastis                                                            | 119 |
| Tabel 5.20 Perbandingan Penurunan Konsolidasi                                                        | 126 |
| Tabel 5.21 Perbandingan Penurunan Total                                                              | 133 |
| Tabel 5.22 Rekapitulasi Perbandingan Beda Penurunan Manual dan <i>PLAXIS</i><br><i>2D</i>            | 139 |
| Tabel 5.23 Perbandingan Penurunan Hasil Manual, Model <i>Pile Cap</i> Tunggal,<br>dan Model Potongan | 141 |
| Tabel 5.24 Perbandingan Penurunan Berdasarkan Variasi Jarak Antar- <i>Pile</i><br><i>cap</i>         | 143 |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah                                                                                                         | 36 |
| Gambar 3.2 Macam-macam tipe fondasi, (a) fondasi memanjang, (b) fondasi telapak, (c) fondasi rakit, (d) fondasi sumuran, (e) fondasi tiang. | 38 |
| Gambar 3.3 Macam-Macam Fondasi Tiang Pancang                                                                                                | 40 |
| Gambar 3.4 Distribusi Beban Kelompok Tiang untuk Menghitung Penurunan                                                                       | 44 |
| Gambar 3.5 Ilustrasi Perbedaan Penurunan                                                                                                    | 47 |
| Gambar 3.6 <i>Project Propertis</i>                                                                                                         | 51 |
| Gambar 3.7 Tampilan Input Material Tanah pada <i>PLAXIS 2D</i>                                                                              | 51 |
| Gambar 3.8 Pemodelan Lapisan Tanah pada <i>PLAXIS 2D</i>                                                                                    | 52 |
| Gambar 3.9 Input Parameter untuk <i>Pile cap</i>                                                                                            | 52 |
| Gambar 3.10 Tampilan Awal <i>Settle3D</i>                                                                                                   | 55 |
| Gambar 3.11 Tampilan <i>Project Settings</i>                                                                                                | 56 |
| Gambar 3.12 Tampilan <i>Input Material Tanah Settle3D</i>                                                                                   | 57 |
| Gambar 3.13 Input Susunan Lapisan Tanah pada <i>Settle3D</i>                                                                                | 57 |
| Gambar 3.14 <i>Input Geometri dan Beban Pile cap</i> pada <i>Settle3D</i>                                                                   | 58 |
| Gambar 4.1 Lokasi Penelitian                                                                                                                | 59 |
| Gambar 4.2 Model 3D Struktur Atas                                                                                                           | 60 |
| Gambar 4.3 Detail Potongan                                                                                                                  | 60 |
| Gambar 4.4 Denah <i>Pilecap</i>                                                                                                             | 61 |
| Gambar 4.5 <i>Design Line</i>                                                                                                               | 62 |
| Gambar 4.6 Bagan Alir Penelitian                                                                                                            | 64 |
| Gambar 4.7 Bagan Alir Program <i>PLAXIS 2D</i>                                                                                              | 65 |
| Gambar 4.8 Digram Alir Program <i>Settle3D</i>                                                                                              | 66 |
| Gambar 5.1 Kode Tumpuan yang Ditinjau                                                                                                       | 67 |
| Gambar 5.2 Denah Kode Fondasi yang Ditinjau                                                                                                 | 69 |
| Gambar 5.3 Model Fondasi <i>Pile cap 2</i>                                                                                                  | 70 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 5.4 Mekanisme Penyebaran Beban Kelompok Tiang                                                | 83  |
| Gambar 5.5 Tampilan <i>Output</i> Penurunan Konsolidasi pada <i>Settle3D</i>                        | 98  |
| Gambar 5.6 Ringkasan Hasil <i>Output</i> Analisis <i>Settle3D</i>                                   | 98  |
| Gambar 5.7 Denah Potongan Arah Y <i>Pile Cap</i>                                                    | 103 |
| Gambar 5.8 Lapisan Tanah                                                                            | 104 |
| Gambar 5.9 <i>Output</i> Penurunan Potongan 1                                                       | 104 |
| Gambar 5.10 Grafik Penurunan Total pada Potongan 1                                                  | 105 |
| Gambar 5.11 <i>Output</i> Penurunan Potongan 2                                                      | 106 |
| Gambar 5.12 Grafik Penurunan Total Potongan 2                                                       | 107 |
| Gambar 5.13 <i>Output</i> Penurunan Potongan 3                                                      | 109 |
| Gambar 5.14 Grafik Penurunan Total Potongan 3                                                       | 110 |
| Gambar 5.15 <i>Output</i> Penurunan Potongan 4                                                      | 111 |
| Gambar 5.16 Grafik Penurunan Total Potongan 4                                                       | 112 |
| Gambar 5.17 <i>Output</i> Penurunan Potongan 5                                                      | 114 |
| Gambar 5.18 Grafik Penurunan Total Potongan 5                                                       | 115 |
| Gambar 5.19 Perbandingan Potongan 1 Penurunan Elastis Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                | 120 |
| Gambar 5.20 Perbandingan Potongan 2 Penurunan Elastis Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                | 121 |
| Gambar 5.21 Perbandingan Potongan 3 Penurunan Elastis Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                | 122 |
| Gambar 5.22 Perbandingan Potongan 4 Penurunan Elastis Manual dan                                    | 123 |
| Gambar 5.23 Perbandingan Potongan 5 Penurunan Elastis Manual dan                                    | 124 |
| Gambar 5.24 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 1 Konsolidasi 1-<br>Dimensi dan <i>PLAXIS 2D</i> | 127 |
| Gambar 5.25 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 2 Konsolidasi 1-                                 | 128 |
| Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 3 Konsolidasi 1-                                 | 129 |
| Gambar 5.27 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 4 Konsolidasi 1-                                 | 130 |
| Gambar 5.28 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 5 Konsolidasi 1-                                 | 131 |
| Gambar 5.29 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 1 Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>           | 134 |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 5.30 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 2 Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                   | 135 |
| Gambar 5.31 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 3 Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                   | 136 |
| Gambar 5.32 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 4 Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                   | 137 |
| Gambar 5.33 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 5 Manual dan<br><i>PLAXIS 2D</i>                   | 138 |
| Gambar 5.34 Perbandingan Model Variasi Jarak Antar- <i>Pile cap</i> : (a) jarak 3,8<br>m dan (b) jarak 20 m | 142 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| Lampiran 1 Data Tanah                                         | 152 |
| Lampiran 2 Gambar Denah <i>Pile cap</i>                       | 156 |
| Lampiran 3 Gambar Kontur Penurunan Total Metode Manual        | 157 |
| Lampiran 4 Gambar Kontur Penurunan Total Metode Elemen Hingga | 158 |

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

|             |                                                                   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|
| SNI         | : Standar Nasional Indonesia                                      |
| PDA         | : <i>Pile Driving Analyzer</i>                                    |
| CAPWAP      | : <i>Case Pile Wave Analysis Program</i>                          |
| SLT         | : <i>Static Loading Test</i>                                      |
| FEM         | : <i>Finite Element Method</i>                                    |
| PC          | : <i>Pile cap</i>                                                 |
| OCR         | : <i>Overconsolidation Ratio</i>                                  |
| SF          | : Faktor keamanan                                                 |
| MAT         | : Muka Air Tanah                                                  |
| N-SPT       | : Nilai jumlah pukulan uji SPT                                    |
| $Q_{izin}$  | : Daya dukung izin (kN)                                           |
| $D_r$       | : Kerapatan relatif tanah pasir                                   |
| $q_u$       | : Kuat geser tekan bebas (kg/cm <sup>2</sup> )                    |
| $Q_p$       | : Daya dukung ujung tiang (kN)                                    |
| $K_b$       | : Koefisien daya dukung ujung tiang                               |
| $\bar{N}_b$ | : Nilai N-SPT rata-rata di bawah ujung tiang (kN/m <sup>2</sup> ) |
| $A_p$       | : Luas penampang tiang (m <sup>2</sup> )                          |
| $Q_s$       | : Daya dukung selimut tiang (kN)                                  |
| $\alpha$    | : Koefisien antara tanah dan tiang                                |
| $N_s$       | : Nilai N-SPT                                                     |
| $L$         | : Panjang tiang (m)                                               |
| $p$         | : Keliling tiang pancang (m')                                     |
| $S_e$       | : Total penurunan tiang (mm)                                      |
| $S_{e(1)}$  | : Penurunan elastis tiang (mm)                                    |
| $S_{e(2)}$  | : Penurunan tiang dikarenakan beban pada ujung tiang (mm)         |
| $S_{e(3)}$  | : Penurunan tiang dikarenakan beban pada selimut tiang (mm)       |
| $Q_{wp}$    | : Kapasitas dukung ujung tiang (ton)                              |
| $Q_{ws}$    | : Kapasitas dukung selimut tiang (ton)                            |
| $\xi$       | : Faktor empiric tipe variasi distribusi tahanan selimut tiang    |

|                  |                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $E_p$            | : Modulus elastis bahan tiang ( $\text{ton/m}^2$ )                  |
| $D$              | : Diameter tiang (m)                                                |
| $q_{wp}$         | : Beban titik per satuan luas ( $\text{kN/m}^2$ )                   |
| $E_s$            | : Modulus elastis tanah ( $\text{kN/m}^2$ )                         |
| $\mu$            | : Poisson rasio tanah                                               |
| $I_{wp}$         | : Faktor pengaruh, 0,85                                             |
| $S_g$            | : Penurunan elastis kelompok tiang (mm)                             |
| $B_g$            | : Lebar kelompok tiang (m)                                          |
| $L_g$            | : Panjang kelompok tiang (m)                                        |
| $C_c$            | : Index pemampatan                                                  |
| $e_0$            | : Angka pori awal                                                   |
| $H$              | : Tebal lapisan tanah yang ditinjau (m)                             |
| $P_0$            | : Tekanan efektif akibat berat tanah di atasnya ( $\text{kN/m}^2$ ) |
| $S_{total}$      | : Penurunan total fondasi (mm)                                      |
| $S_{izin}$       | : Penurunan total izin fondasi (mm)                                 |
| $S_c$            | : Penurunan konsolidasi primer kelompok tiang (mm)                  |
| $S_s$            | : Penurunan konsolidasi sekunder (mm)                               |
| $B$              | : Lebar bangunan (cm)                                               |
| $\theta$         | : Sudut distorsi                                                    |
| $\Delta s$       | : Selisih penurunan dua titik fondasi (mm)                          |
| $C_s$            | : Index pengembangan                                                |
| $E_{50}$         | : Modulus kekakuan pembebanan triaksial 50% ( $\text{kN/m}^2$ )     |
| $E_{oed}$        | : Kekakuan oedometer ( $\text{kN/m}^2$ )                            |
| $E_u^r$          | : Kekakuan unloading triaksial ( $\text{kN/m}^2$ )                  |
| $\gamma$         | : Berat isi ( $\text{kN/m}^3$ )                                     |
| $\Delta \sigma$  | : Distribusi tegangan akibat beban                                  |
| $P$              | : Beban aksial (kN)                                                 |
| $\gamma_{unsat}$ | : Berat volume tidak jenuh ( $\text{kN/m}^3$ )                      |
| $\gamma_{sat}$   | : Berat volume jenuh ( $\text{kN/m}^3$ )                            |
| $\pi$            | : <i>phi</i>                                                        |
| $f'_c$           | : Mutu beton                                                        |

$\gamma_{\text{beton}}$  : Berat volume beton ( $\text{kN/m}^3$ )  
 $L_{\text{spacing}}$  : Jarak *pile*  
 $W$  : Massa *pile cap* ( $\text{kN/m/m}$ )  
 $H$  : Tebal *pile cap* (m)  
 $I$  : Inersia ( $\text{m}^4$ )

## ABSTRAK

Konsolidasi tanah merupakan proses berkurangnya volume tanah akibat keluarnya air pori karena pembebanan. Pada tanah lunak, proses ini dapat menyebabkan penurunan besar dalam jangka panjang dan memengaruhi keamanan bangunan bertingkat. Penelitian ini bertujuan membandingkan penurunan fondasi berdasarkan Teori Terzaghi satu dimensi dan *Settle3D* dengan analisis numerik *PLAXIS 2D*, serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap batas penurunan dan beda penurunan SNI 8460:2017.

Penelitian dilakukan pada fondasi Tower Pendidikan di Kota Surabaya. Daya dukung tiang dianalisis menggunakan metode Luciano Decourt, sedangkan penurunan tiang dihitung dengan metode Vesic. Penurunan elastis, konsolidasi, dan total dianalisis menggunakan Teori Terzaghi, *Settle3D*, dan metode elemen hingga melalui *PLAXIS 2D*.

Hasil setiap metode kemudian dibandingkan dan dievaluasi berdasarkan sudut distorsi antarfondasi. Hasil menunjukkan rata-rata penurunan elastis metode manual sebesar 139,77115 mm dan *PLAXIS 2D* sebesar 44,5807 mm, dengan selisih 68,09%. Penurunan konsolidasi masing-masing sebesar 149,1623 mm dan 50,6247mm. Metode manual dan *Settle3D* menghasilkan nilai lebih konservatif. Evaluasi beda penurunan menunjukkan Sembilan segmen memenuhi dan tujuh segmen tidak memenuhi SNI 8460:2017. Dengan lokasi kritis yang berbeda pada setiap metode.

**Kata Kunci:** Penurunan, Tiang Pancang, Terzaghi, Metode Elemen Hingga

## ***ABSTRACT***

*Soil consolidation is a reduction in soil volume caused by the dissipation of pore water under loading. In soft soils, this process may result in substantial long-term settlement and affect the safety of high-rise buildings. This study aims to compare foundation settlement obtained from one-dimensional Terzaghi theory and Settle3D with numerical analysis using PLAXIS 2D and to evaluate compliance with the allowable settlement and differential settlement requirements of SNI 8460:2017.*

*The study was conducted on the foundation of an educational tower in Surabaya. Pile-bearing capacity was analyzed using the Luciano Decourt method, while pile settlement was calculated using the Vesic method. Elastic, consolidation, and total settlements were analyzed using Terzaghi theory, Settle3D, and the finite element method in PLAXIS 2D.*

*The results were compared based on the angular distortion between foundations. The results showed average elastic settlements of 139.7115 mm for the manual method and 44.5807 mm for PLAXIS 2D, representing a difference of 68.09%. Consolidation settlements were 10.1615 mm and 6.0466 mm, while total settlements were 149.1623 mm and 50.6274 mm, respectively. The manual method and Settle3D produced more conservative results. Differential settlement evaluation showed that nine segments complied with SNI 8460:2017, whereas seven segments exceeded the allowable limit, with different critical locations identified by each method.*

***Keywords:*** *Settlement, Driven Piles, Terzaghi, Finite Element Method.*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Proses konsolidasi tanah merupakan aspek penting dalam mekanika tanah karena menggambarkan berkurangnya kadar air pori dan perubahan volume tanah akibat pembebanan. Kondisi ini menjadi sangat penting pada tanah lunak yang mudah mengalami pemampatan, karena penurunan dapat berlangsung besar dan terjadi dalam jangka waktu yang panjang (Das, 1995). Pada bangunan bertingkat tinggi, khususnya gedung pendidikan yang beroperasi dalam waktu lama, kesalahan dalam memprediksi penurunan dapat menyebabkan kerusakan struktural, penurunan kinerja bangunan, dan risiko keselamatan bagi pengguna (Lukita dkk., 2021). Menurut Rafi Rizqullah dkk. (2023) di Surabaya tanah memiliki potensi penurunan akibat konsolidasi, sementara pembangunan gedung bertingkat terus meningkat, sehingga analisis penurunan menjadi komponen yang tidak dapat diabaikan dalam perencanaan fondasi.

Pada umumnya, analisis penurunan konsolidasi didasarkan pada pengujian laboratorium dan model konsolidasi 1-dimensi Terzaghi. Pada pengujian konsolidasi, benda uji tanah ditahan secara lateral dalam ring sehingga deformasi hanya diizinkan terjadi secara vertikal. Model 1-dimensi Terzaghi mengasumsikan aliran air pori dan deformasi hanya terjadi dalam arah vertikal, sehingga regangan lateral diabaikan (Hardiyatmo, 2010). Asumsi ini menyederhanakan analisis dan memudahkan perhitungan, tetapi kurang menggambarkan kondisi lapangan yang sebenarnya bersifat dua atau tiga dimensi, di mana beban fondasi menyebarkan tegangan dan regangan ke segala arah di dalam massa tanah.

Perkembangan perangkat lunak analisis geoteknik memungkinkan prediksi penurunan tanah dilakukan dengan pendekatan yang memungkinkan seperti kondisi di lapangan. *PLAXIS 2D* sebagai perangkat lunak berbasis metode elemen hingga memodelkan deformasi tanah secara kontinu dalam bidang 2-dimensi, sedangkan

*Settle3D* digunakan untuk analisis penurunan 3-dimensi dengan menghitung distribusi tegangan 3-dimensi akibat beban dan menggunakan pendekatan konsolidasi 1-dimensi Terzaghi. Maka dari itu, kedua perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan perilaku tanah yang lebih realistis, termasuk pengaruh penyebaran beban lateral, bentuk fondasi, dan susunan lapisan tanah di bawah fondasi (Surbakti, 2021). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan membandingkan hasil analisis penurunan fondasi menggunakan teori konsolidasi Terzaghi 1-dimensi dan pendekatan semi-analisis 3-dimensi menggunakan *Settle3D*, dengan metode elemen hingga 2-dimensi menggunakan *PLAXIS 2D*, pada bangunan Tower Pendidikan di Kota Surabaya. Hasil perbandingan diharapkan menunjukkan pengaruh asumsi tanpa regangan lateral pada model 1-dimensi terhadap keakuratan prediksi penurunan serta memberikan dasar yang lebih kuat bagi perencanaan fondasi bangunan bertingkat pada tanah yang mudah mengalami penurunan konsolidasi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan yang telah dibahas, maka rumusan masalah dalam studi ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kondisi tanah pada lokasi penelitian?
2. Bagaimana perbedaan hasil penurunan tanah berdasarkan analisis satu dimensi Teori Terzaghi yang dihitung secara manual dan menggunakan *Settle3D* dengan hasil analisis numerik menggunakan *PLAXIS 2D*?
3. Apakah nilai penurunan izin yang diperoleh dari masing-masing metode masih memenuhi syarat SNI 8460:2017?
4. Apakah nilai beda penurunan yang diperoleh dari masing-masing metode masih memenuhi syarat SNI 8460:2017?
5. Bagaimana pola distribusi penurunan tanah pada area fondasi berdasarkan hasil pemodelan kontur penurunan?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kondisi tanah pada lokasi penelitian.
2. Menganalisis perbedaan hasil penurunan tanah berdasarkan analisis satu dimensi Teori Terzaghi yang dihitung secara manual dan menggunakan *Settle3D* dengan hasil analisis numerik menggunakan *PLAXIS 2D*.
3. Mengetahui kesesuaian nilai penurunan total tanah yang diperoleh dari masing-masing metode terhadap syarat penurunan izin menurut SNI 8460:2017.
4. Mengetahui kesesuaian nilai beda penurunan yang diperoleh dari masing-masing metode terhadap syarat penurunan beda penurunan menurut SNI 8460:2017.
5. Menganalisis pola distribusi penurunan tanah pada area fondasi berdasarkan hasil pemodelan kontur penurunan serta mengidentifikasi zona yang mengalami penurunan terbesar dan terkecil.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Dari penelitian tugas akhir ini adapun manfaatnya sebagai berikut:

1. Menambah wawasan mengenai daya dukung pada fondasi tiang.
2. Meningkatkan pengetahuan di bidang Geoteknik mengenai penurunan fondasi tiang dengan analisis metode numerik 1-dimensi teori Terzaghi, dan metode semi-analitik 3-dimensi dengan *Settle3D*, dengan metode elemen hingga 2-dimensi dengan *PLAXIS 2D*.

#### **1.5 Batasan Penelitian**

Batasan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian adalah proyek pembangunan Gedung Pendidikan di Kota Surabaya,
2. Tanah yang terdapat pada lokasi penelitian berjenis lempung normal konsolidasi,
3. Jenis fondasi yang digunakan pada lokasi penelitian adalah tiang pancang tipe *spunpile* diameter 60 cm, panjang 33,75 m,

4. Mempertahankan panjang dan diameter tiang, dimensi panjang dan lebar pile cap, serta jumlah dan konfigurasi tiang sesuai kondisi eksisting,
5. Laporan perhitungan struktur atas didapatkan dari konsultan perencana,
6. Hanya meninjau penurunan pada Tower A,
7. Analisis penurunan dibatasi pada penurunan elastis dan konsolidasi primer,
8. Perhitungan daya dukung ujung dan daya dukung selimut dengan metode Decourt (1995),
9. Perhitungan penurunan elastis dilakukan dengan metode Vesic (1977) dan perhitungan penurunan konsolidasi dilakukan dengan metode Terzaghi (1967),
10. Perhitungan secara metode elemen hingga (*Finite Element Method*) menggunakan program *PLAXIS 2D*,
11. Perhitungan secara metode numerik dilakukan dengan menggunakan program *Settle3D*.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Umum**

Tinjauan pustaka berisi penjelasan mengenai teori-teori dasar yang mendukung penelitian, seperti konsep pengujian tanah, daya dukung fondasi dalam, serta penurunan fondasi. Selain itu, akan dibahas mengenai beberapa penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar dan pembanding dalam penelitian sekarang.

#### **2.2 Penelitian Terdahulu**

Penelitian – penelitian tentang daya dukung dan penurunan fondasi yang pernah dilakukan sebelumnya antara lain adalah sebagai berikut:

##### **2.2.1 Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang Menggunakan Metode Analitik dan Elemen Hingga (Pembangunan Gedung Bank Aceh Syariah Kota Banda Aceh)**

Zikrillah dkk. (2023) melakukan studi desain fondasi tiang untuk rencana pembangunan Gedung PT. Bank Aceh Syariah, Banda Aceh. Penelitian ini bertujuan menghitung sekaligus membandingkan daya dukung izin ( $Q_{izin}$ ) dan penurunan (*settlement*) fondasi tiang berdasarkan metode analitik dan metode elemen hingga, pada tiang pancang penampang bulat tipe *spun pile* dengan variasi diameter 30 cm, 40 cm, dan 50 cm pada kedalaman 22 m.

Metode yang digunakan dalam perhitungan daya dukung analitik memakai Decourt (1982) dan Briaud et al (1985) dan untuk perhitungan penurunan metode menggunakan Vesic (1977), lalu dibandingkan dengan analisis elemen hingga menggunakan *software PLAXIS V8.2*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa selisih rata-rata sekitar 51% pada diameter D50 cm,  $Q_{izin}$  mencapai 307,5 ton menggunakan metode Decourt dan 146,4 ton menggunakan metode Briaud. Untuk penurunan (*settlement*) dengan menggunakan perhitungan Vesic maupun *PLAXIS V8.2* memberikan nilai yang

masih aman menurut kriteria Terzaghi. Pada D50 cm, penurunan dari Vesic sebesar 1,9 cm berdasarkan  $Q_{izin}$  Decourt dan 1,2 cm berdasarkan  $Q_{izin}$  Briaud, sedangkan dari *PLAXIS V8.2* sebesar 2,5 cm berdasarkan  $Q_{izin}$  Decourt dan 0,7 berdasarkan  $Q_{izin}$  Briaud. Selain itu, hasil menunjukkan Vesic cenderung menghasilkan penurunan yang makin kecil saat diameter membesar, sementara *PLAXIS V8.2* dapat menunjukkan perbedaan karena menganggap perilaku yang lebih dinamis sesuai parameter tanah.

### 2.2.2 Analisa Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan terhadap Variasi Bentuk Penampang Fondasi Tiang Pancang

Wardani dkk. (2023) melakukan perencanaan fondasi tiang pancang pada pembangunan Gedung Rumah Sakit Dr. Ramelan Surabaya dengan mengacu SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Penelitian ini bertujuan membandingkan variasi dimensi dan bentuk penampang tiang, yaitu penampang lingkaran berdiameter D40 cm dan D60 cm serta penampang persegi berukuran 40x40 cm dan 60x60 cm, untuk menentukan alternatif yang paling aman ditinjau dari aspek daya dukung dan penurunan (*settlement*).

Metode yang dipakai menghitung daya dukung dari data SPT menggunakan Decourt (1982), Meyerhof (1976), dan Reese & O'Neill (1999), sedangkan penurunan total dihitung dengan metode Vesic dan Tomlinson.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya dukung *ultimate* terbesar diperoleh tiang persegi 60x60 cm sebesar 172,34 ton menggunakan metode mayerhof, sedangkan yang terkecil diperoleh tiang lingkaran D40 cm sebesar 54,16 ton menggunakan metode Decourt. Pembesaran dimensi dari 40 cm ke 60 cm menurunkan kebutuhan tiang sekitar 33% dan meningkatkan efisiensi sekitar 5%. Pada beban terbesar sekitar 330,38 ton, nilai penurunan total untuk variasi penampang adalah 16,145 cm pada tiang lingkaran D40, 15,66 cm pada tiang lingkaran D60, 16,269 cm pada tiang persegi 40 x 40, dan 15,660 cm pada tiang persegi 60x60 cm, sehingga alternatif yang direkomendasikan adalah tiang lingkaran D60 cm dan persegi 60x60 cm karena dinilai memenuhi ketentuan izin sesuai dengan SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

### 2.2.3 Analisis Perbandingan Penurunan Terhadap Daya Dukung Fondasi Tiang Pada Tanah Ekspansif Di Karawang Jawa Barat

Penelitian yang dilakukan Wijaya dkk. (2023) membahas evaluasi fondasi tiang pancang *spun pile* diameter 35 cm pada sebuah proyek pembangunan pabrik di Karawang, Jawa Barat. Penelitian ini bertujuan memperoleh perbandingan penurunan (*settlement*) terhadap daya dukung fondasi tiang berdasarkan hasil *Pile Driving Analyzer (PDA)*.

Analisis daya dukung dihitung dengan metode Meyerhof, Reese & Wright, Decourt, Schmertmann & Nottingham, Schmertmann, dan de Ruiter & Beringen dan menghitung penurunan dengan dua metode yaitu semi empiris dan Davisson, kemudian membandingkan dengan hasil PDA dan analisis lanjut *CAPWAP*.

Hasilnya, prediksi penurunan dengan metode semi-empiris paling mendekati PDA selisihnya 0,02% untuk tiang dengan kode W-1288 dan 2,39% untuk tiang dengan kode W-1623, sedangkan metode Davisson lebih meleset. Dari sisi daya dukung, hasil yang mendekati PDA/*CAPWAP* adalah de Ruiter & Beringen untuk tiang W-1288 dan Decourt untuk W-1623, sementara yang paling jauh adalah Schmertmann. Studi ini menegaskan bahwa hubungan daya dukung ultimate dengan penurunan maksimum tidak menunjukkan korelasi yang jelas karena parameter tanah setiap titik tiang berbeda, namun secara umum nilai penurunan maksimum masih berada di bawah batas izin 25 mm.

### 2.2.4 Analisis Penurunan Fondasi Tiang Pancang Pada Jembatan Meninting Menggunakan Metode Analitis dan Metode Numerik

Penelitian yang dilakukan oleh Putri dkk. (2024) membahas mengenai penurunan (*settlement*) tiang pancang pada Jembatan Meninting Kota Mataram Lombok Barat. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui nilai penurunan tiang tunggal dan penurunan kelompok tiang pada fondasi tiang pancang dan membandingkan hasil metode analisis dan numerik serta memverifikasi hasil terhadap syarat penurunan izin.

Metode yang digunakan untuk menghitung penurunan tiang secara analisis pada tiang tunggal digunakan metode Poulos & Davis (1980), Elastis, Vesic (1977),

pada kelompok tiang menggunakan metode Skempton dan Janbu. Sedangkan metode secara numerik menggunakan *software AllPile*.

Hasil penelitian menunjukkan penurunan fondasi tiang pancang pada Jembatan Meninting relatif kecil menurut sebagian besar metode. Penurunan tiang tunggal berturut-turut sebesar 0,148 cm (Poulos & Davis), 2,76 cm (elastis), 0,519 cm (Vesic), dengan hasil numerik *software AllPile* sebesar 0,168 cm. Untuk kelompok tiang, metode Vesic menghasilkan 0,355-6,63 cm, Skempton 0,917-17,1 cm, dan Janbu 0,837 cm, sementara pada metode numerik menggunakan *software AllPile* didapatkan 0,359 cm. Jika dibandingkan dengan batas penurunan izin 8 cm, hampir seluruh hasil masih memenuhi syarat, kecuali metode Skempton yang berbasis penurunan tiang tunggal dengan metode elastis mencapai 17,1 cm, sehingga tidak memenuhi syarat. Secara umum, hasil yang paling mendekati *software AllPile* untuk perhitungan tiang tunggal adalah metode Poulos & Davis dan untuk perhitungan kelompok tiang adalah metode Vesic, karena pendekatannya sama-sama banyak memanfaatkan data SPT.

#### 2.2.5 Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan *PLAXIS 3D* Berdasarkan Data N-SPT

Santi Pratiwi & Warsih Winoto (2025) mengkaji kinerja tiang bor pada studi kasus pembangunan Gedung Kantor PT. Daya Adicipta Mustika di Bandung dengan memanfaatkan korelasi data N-SPT. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi daya dukung aksial, daya dukung lateral, dan penurunan (*settlement*).

Metode yang digunakan *Finite Element Method* melalui *software PLAXIS 3D* dengan variasi model material tanah (*Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*) serta material tiang (*Linear Elastic* dan *Concrete*) lalu membandingkan dengan hasil uji lapangan PDA Test dan *Static Loading Test* (SLT).

Hasilnya menunjukkan pemilihan model material sangat mempengaruhi hasil kombinasi dari *Mohr-Coulomb* dan *Linear Elastic* memberikan daya dukung aksial tertinggi sebesar 7717,18 kN dan daya dukung lateral tertinggi sebesar 374 kN, sementara penurunan pada beban 250 ton berada sekitar 7,85-8,60 mm (tergantung kombinasi model). Dibandingkan uji lapangan penurunan dari *PLAXIS 3D* cenderung lebih kecil 5-13% dari hasil PDA sebesar 9 mm, sedangkan daya dukung

aksial *PLAXIS 3D* cenderung lebih tinggi 14% dibandingkan SLT, sehingga studi ini menegaskan pentingnya pemilihan model tanah yang tepat agar simulasi *Finite Element Method* lebih mendekati kondisi lapangan.

**Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| <b>Nama Peneliti, Tahun</b> | <b>Zikrillah dkk. (2023)</b>                                                                                                                              | <b>Wardani dkk. (2023)</b>                                                                             | <b>Wijaya dkk. (2023)</b>                                                                                      | <b>Putri dkk. (2024)</b>                                                                                        | <b>Santi Pratiwi &amp; Warsih Winoto (2025)</b>                                               | <b>Rahman (2026)</b>                                                                                                               |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Judul                       | Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang Menggunakan Metode Analitik dan Elemen Hingga (Pembangunan Gedung Bank Aceh Syariah Kota Banda Aceh) | Analisa Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan terhadap Variasi Bentuk Penampang Fondasi Tiang Pancang | Analisis Perbandingan Penurunan Terhadap Daya Dukung Fondasi Tiang Pada Tanah Ekspansif di Karawang Jawa Barat | Analisis Penurunan Fondasi Tiang Pancang Pada Jembatan Meninting Menggunakan Metode Analitis dan Metode Numerik | Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan <i>PLAXIS</i> 3D Berdasarkan Data N-SPT | Analisis Perbandingan Penurunan Fondasi Tiang Pancang Menggunakan Pendekatan 1-Dimensi Terzaghi Dan Metode Elemen Hingga 2-Dimensi |
| Lokasi                      | Banda Aceh                                                                                                                                                | Surabaya                                                                                               | Karawang                                                                                                       | Mataram                                                                                                         | Bandung                                                                                       | Surabaya                                                                                                                           |
| Metode                      | Analisis daya dukung dengan metode Luciano Decourt (1982) dan Briaud (1985),                                                                              | Analisis daya dukung dengan metode Decourt, Mayerhof, dan Reese O'Neil,                                | Analisis daya dukung dengan metode Mayerhoff, Reese & Wright, Decourt,                                         | Metode analisis penurunan tiang tunggal ; Poulus & Davis, Elastis Vesic,                                        | Metode <i>Finite Element Method (FEM)</i> menggunakan <i>software PLAXIS 3D</i>               | Analisis daya dukung dengan Luciano Decourt (1982) dan analisis penurunan tiang                                                    |

**Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| <b>Nama Peneliti, Tahun</b> | <b>Zikrillah dkk. (2023)</b>                                                                                                                                 | <b>Wardani dkk. (2023)</b>                                                                                                                               | <b>Wijaya dkk. (2023)</b>                                                                                                | <b>Putri dkk. (2024)</b>                                                                                                                   | <b>Santi Pratiwi &amp; Warsih Winoto (2025)</b>                                                                                                                  | <b>Rahman (2026)</b>                                                                                                                               |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metode                      | dan Analisis dengan Metode Elemen Hingga <i>PLAXIS V8.2</i>                                                                                                  | analisis penurunan dengan metode Vesic dan Tomlinson                                                                                                     | Schmertmann-Nottingham, Schmertmann, dan DeRuiter & Beringen dan menghitung penurunan semi empiris dan Davisson          | analisis penurunan ; kelompok tiang Vesic, Skempton, Janbu. Metode numerik software <i>AllPile</i> .                                       |                                                                                                                                                                  | dengan metode vesic (1977), serta Metode <i>Finite Element Method (FEM)</i> menggunakan <i>software PLAXIS 2D</i> dan <i>Settle3D</i>              |
| Tujuan                      | Membandingkan daya dukung izn (Qizin) dan penurunan ( <i>settlement</i> ) fondasi tiang untuk beberapa diameter dengan pendekatan analitik dan elemen hingga | Membandingkan variasi bentuk dan dimensi tiang untuk menentukan alternatif paling aman berdasarkan daya dukung dan penurunan sesuai syarat SNI 8460:2017 | Membandingkan penurunan dan daya dukung tiang berdasarkan perhitungan analisis dan hasil uji lapangan PDA/ <i>CAPWAP</i> | Mengetahui penurunan tiang tunggal dan kelompok tiang pada fondasi Jembatan Meninting, dan membandingkan metode analisis dan numerik serta | Mengetahui daya dukung aksial, daya dukung lateral dan penurunan tiang bor berbasis data NSPT dan pemodelan <i>PLAXIS 3D</i> serta membandingkan hasilnya dengan | Mengetahui pengaruh model konsolidasi 1-dimensi Terzaghi terhadap akurasi penurunan tanah, dan membandingkan hasil FEM dan mengevaluasi kesesuaian |

**Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| <b>Nama Peneliti, Tahun</b> | <b>Zikrillah dkk. (2023)</b>                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Wardani dkk. (2023)</b>                                                                                                                                                                                                                                  | <b>Wijaya dkk. (2023)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>Putri dkk. (2024)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Santi Pratiwi &amp; Warsih Winoto (2025)</b>                                                                                                                                                                                                                       | <b>Rahman (2026)</b>                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tujuan                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                           | mengverifikasi kesesuaian terhadap batas penurunan izin.                                                                                                                                                                                                                                                                         | <i>PDA Test</i> dan <i>Static Loading Test</i> (SLT)                                                                                                                                                                                                                  | terhadap batas penurunan izin.                                                                                                                                                                                          |
| Hasil                       | Pada diameter 50 cm, Qizin merode Deciurt lebih besar 307,5 ton dibandingkan Briaud 146,4 ton dengan selisih rata-rata 51%. Penurunan diameter 50 cm Vesic sekitar 1,9 cm dan 1,2 cm, sedangkan <i>PLAXIS</i> sekitar 2,5 cm Decourt dan 0,7 cm Briaud. Seluruh nilai penurunan | Daya dukung ultimate terbesar pada tiang persegi 60x60 172,34 ton Mayerhof, dan terkecil pada tiang lingkaran D40 54,16 ton Decourt Pembesaran dimensi 40 cm ke 60 cm menurunkan kebutuhan tiang 33% dan menaikkan efisiensi 5%. Penurunan total pada beban | Prediksi penurunan semi-empiris paling mendekati PDA selisih 0,02% dan 2,39% sedangkan Davisson lebih jauh selisih 20,02% dan 13,82%. Daya dukung paling mendekati PDA/ <i>CAPWAP</i> 31eRuiter & Beringen tiang W-1288 dan Decourt tiang W-1623, Penurunan maksimum umumnya masih <25 mm | Penurunan relatif kecil, tiang tunggal 0,148-2,76 cm (analisis) dan 0,168 cm ( <i>Allpile</i> ). Kelompok tiang 0,355-6,63 cm (Vesic), 0,917-17,1 cm (Skempton), 0,837 cm (Janbu), dan 0,359 cm ( <i>Allpile</i> ). Hampir semua memenuhi batas izin 8 cm, kecuali Skempton berbasis metode elastis menghasilkan 17,1 cm. Metode | Kombinasi <i>Mohr-Coulomb</i> dan <i>Linier Elastic</i> menghasilkan daya dukung aksial tertinggi sebesar 7717,83 kN dan daya dukung lateral tertinggi sebesar 347 kN. Penurunan pada beban 250 ton berada sekitar 7,85-8,60 mm. Dibandingkan uji lapangan, penurunan | Hasil menunjukkan rata-rata penurunan elastis metode manual sebesar 139,77115 mm dan <i>PLAXIS 2D</i> sebesar 44,5807 mm, dengan selisih 68,09%. Penurunan konsolidasi masing-masing sebesar 149,1623 mm dan 50,6247mm. |

**Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| <b>Nama Peneliti, Tahun</b> | <b>Zikrillah dkk. (2023)</b> | <b>Wardani dkk. (2023)</b>                                                                                                       | <b>Wijaya dkk. (2023)</b> | <b>Putri dkk. (2024)</b>                                                          | <b>Santi Pratiwi &amp; Warsih Winoto (2025)</b>                                           | <b>Rahman (2026)</b>                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hasil                       | masih memenuhi batas izin.   | 330,38 ton berada pada kisaran 15,66-16,27 cm. Rekomendasi digunakan tiang D60 dan 60x60 karena memenuhi ketentuan SNI 8460:2017 |                           | terdekat <i>Allpile</i> Poulos & Davis (tiang tunggal) dan Vesic (kelompok tiang) | <i>PLAXIS 3D</i> cenderung lebih kecil dari PDA dan aksial lebih tinggi dibandingkan SLT. | Metode manual dan <i>Settle3D</i> menghasilkan nilai lebih konservatif. Evaluasi beda penurunan menunjukkan Sembilan segmen memenuhi dan tujuh segmen tidak memenuhi SNI 8460:2017. Dengan lokasi kritis yang berbeda pada setiap metode. |

### 2.3 Keaslian Penelitian

Penelitian mengenai struktur bawah, khususnya pada fondasi dalam, telah banyak dilakukan oleh berbagai peneliti sebelumnya dengan berbagai metode dan tujuan yang berbeda. Berdasarkan analisis terhadap beberapa studi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa fokus penelitian tersebut sangat bervariasi, baik dari segi metodologi maupun penerapan teknik analisisnya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian kali ini berfokus untuk membandingkan antara perhitungan analisis dan simulasi numerik pada penurunan elastis dan konsolidasi tanah 1-dimensi, 3-dimensi dengan, 2-dimensi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan lebih dalam mengenai perbandingan hasil perhitungan tersebut dalam konteks fondasi dalam.

Persamaan dan perbedaan penelitian yang telah dilakukan oleh Zikrillah dkk. (2023), Wardani dkk. (2023), Wijaya dkk. (2023), Putri dkk. (2024), Santi Pratiwi & Warsih Winoto (2025) dan yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

**Tabel 2.2 Perbandingan Persamaan dan Perbedaan Penelitian Terdahulu**

| No | Persamaan                                                                   | Perbedaan                                                                                                                                                                                                                         |
|----|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Berfokus pada analisis fondasi dalam.                                       | Objek penelitian yang sekarang berlokasi di proyek pembangunan gedung pendidikan di Surabaya                                                                                                                                      |
| 2. | Menganalisis daya dukung fondasi dan penurunan fondasi dalam                | Membandingkan antara perhitungan analisis dengan metode elemen hingga ( <i>Finite Element Method</i> ) 2-dimensi menggunakan <i>software PLAXIS 2D</i> maupun metode semi-analitik 3-dimensi menggunakan <i>software Settle3D</i> |
| 3. | Menggunakan standar acuan SNI 8460:2017 Badan Standardisasi Nasional (2017) | Pada penelitian sekarang tidak dilakukan variasi dimensi dan perubahan terhadap struktur fondasi <i>eksisting</i> .                                                                                                               |

Dari Tabel 2.2 dapat dilihat keaslian dari penelitian ini terletak pada pembahasan mengenai perbandingan hasil penurunan antara metode numerik 1-dimensi Terzaghi dan *Settle3D* dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) 2-dimensi dengan *software PLAXIS 2D*.

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Tanah**

Tanah dari pandangan ilmu Teknik Sipil merupakan himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*) yang terletak di atas batu dasar (*bedrock*) Hardiyatmo (2002). Tanah secara umum didefinisikan sebagai agregat partikel padat mineral yang tidak tersementasi, dapat mengandung bahan organik, serta memiliki rongga-rongga yang diisi oleh udara dan air (Das, 1995).

#### **3.2 Klasifikasi Tanah**

Hardiyatmo (1996) menyatakan bahwa dalam perencanaan fondasi, klasifikasi tanah berguna sebagai petunjuk awal dalam memprediksi kelakuan tanah. Dalam sistem klasifikasi tersebut, secara garis besar tanah dibagi dalam 2 kelompok yaitu kelompok tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus yang didasarkan material yang lolos saringan nomor 200 (0,075 mm). Huruf pertama menunjukkan jenisnya seperti:

G : kerikil (*gravel*)

S : pasir (*sand*)

C : lempung (*clay*)

M : lanau (*silt*)

O : lempung atau lanau organik (*organic silt or clay*)

Pt : tanah gambut dan tanah organik tinggi (*peat and highly organic soil*)

Huruf kedua menunjukkan sifatnya, seperti :

W : gradasi baik (*well-graded*)

P : gradasi buruk (*poorly-graded*)

H : plastis tinggi (*high-plasticity*)

L : plastis rendah (*low-plasticity*)

Klasifikasi tanah menurut sistem klasifikasi tanah berdasarkan hasil pengujian laboratorium disajikan pada Gambar 3.1 berikut.

| Kriteria untuk Menetapkan Simbol-Simbol Kelompok dan Nama-Nama Kelompok Menggunakan Pengujian-Pengujian Laboratorium <sup>a</sup> |                                                                               |                                                             |                                                 | Klasifikasi Tanah |                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             |                                                 | Simbol Kelompok   | Nama Kelompok <sup>b</sup>            |
| TANAH BERBUTIR KASAR >50% tertahan ayakan No. 200                                                                                 | Kerikil (Lebih besar dari 50% Fraksi kasar yang tertahan ayakan No. 4 )       | Kerikil bersih (Butir halus <sup>C</sup> < 5%)              | $Cu \geq 4$ dan $1 \leq Cc \leq 3^D$            | GW                | Kerikil <sup>E</sup> bergradasi baik  |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | $Cu < 4$ dan/atau $Cc < 1$ atau $Cc > 3^D$      | GP                | Kerikil <sup>E</sup> bergradasi jelek |
|                                                                                                                                   |                                                                               | Kerikil dengan butir halus (Butir halus <sup>C</sup> > 12%) | Butir halus diklasifikasikan sebagai ML atau MH | GM                | Kerikil <sup>E, F, G</sup> lanauan    |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | Butir halus diklasifikasikan sebagai CL atau CH | GC                | Kerikil <sup>E, F, G</sup> lempungan  |
|                                                                                                                                   | Pasir (Lebih besar $\geq$ 50% Fraksi kasar yang lolos ayakan No. 4 )          | Pasir bersih (Butir halus <sup>H</sup> < 5%)                | $Cu \geq 6$ dan $1 \leq Cc \leq 3^D$            | SW                | Pasir <sup>I</sup> bergradasi baik    |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | $Cu < 6$ dan/atau $Cc < 1$ atau $Cc > 3^D$      | SP                | Pasir <sup>I</sup> bergradasi jelek   |
| TANAH BERBUTIR HALUS $\geq$ 50% lolos Ayakan No. 200                                                                              | Lanau dan lempung Batas cair < 50                                             | Non Organik                                                 | PI > 7 dan terletak pada atau di atas garis "A" | CL                | Lempung <sup>K, L, M</sup> rendah     |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | PI < 4 atau terletak di bawah garis "A"         | ML                | Lanau <sup>K, L, M</sup>              |
|                                                                                                                                   |                                                                               | Organik                                                     | Batas cair - kering oven _____ < 0,75           | OL                | Lempung <sup>K, L, M, N</sup> organik |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | Batas cair – tidak kering                       |                   | Lanau <sup>K, L, M, O</sup> organik   |
|                                                                                                                                   | Lanau dan lempung Batas cair $\geq$ 50                                        | Non Organik                                                 | PI terletak pada atau di atas garis "A"         | CH                | Lempung <sup>K, L, M</sup> tinggi     |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | PI terletak di bawah garis "A"                  | MH                | Lanau <sup>K, L, M</sup> elastis      |
|                                                                                                                                   |                                                                               | Organik                                                     | Batas cair - kering oven _____ < 0,75           | OH                | Lempung <sup>K, L, M, P</sup> organik |
|                                                                                                                                   |                                                                               |                                                             | Batas cair – tidak kering                       |                   | Lempung <sup>K, L, M, O</sup> organik |
| TANAH BERORGANIK                                                                                                                  | Secara primer terdiri atas zat-zat organik, berwarna gelap dan berbau organik |                                                             |                                                 | PT                | Gambut                                |

**Gambar 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah**  
(Sumber : Badan Standardisasi Nasional, 2015)

### 3.3 Penyelidikan Tanah

Hardiyatmo (1996) dalam Nabila (2025) menyatakan bahwa dalam perancangan fondasi pada bangunan, penyelidikan tanah merupakan aspek yang penting agar didapatkan data yang dibutuhkan untuk perancangan. Penyelidikan tanah dapat dilakukan melalui metode penggalian lubang (*trial pit*), pengeboran, atau pengujian langsung di lapangan (*in-situ test*). Data yang diperoleh nantinya dipelajari sifat teknis tanahnya, yang kemudian menjadi dasar dalam analisis daya dukung dan penurunan. Penyelidikan tanah umumnya melibatkan tiga tahapan, yaitu pengeboran atau penggalian lubang coba, sampling, serta pengujian sampel tanah tersebut. Pengujian sampel tanah dapat dilakukan langsung di lapangan atau di laboratorium. Pengujian di lapangan meliputi:

1. Pengujian penetrasi standar atau pengujian SPT (*Standard Penetration Test*).
2. Pengujian penetrasi kerucut statis (*Static Cone Penetration Test*).
3. Pengujian beban pelat (*Plate Load Test*).
4. Pengujian geser baling-baling (*Vane Shear Test*).

Pengujian langsung di lapangan ini sangat bermanfaat untuk memahami karakteristik tanah yang mendukung beban fondasi tanpa dipengaruhi oleh gangguan yang mungkin terjadi akibat pengeboran dan penanganan sampel. Metode pengujian di lapangan berguna untuk menyelidiki tanah terutama untuk tanah lempung sensitif, lanau, serta pasir tidak padat Hardiyatmo (1996).

Hubungan antara nilai  $N$  dan kerapatan relatif ( $D_r$ ) menurut Terzaghi dan Peck (1948) dalam Hardiyatmo (1996), Untuk tanah pasir dan tanah lempung masing-masing disajikan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 berikut.

**Tabel 3.1 Hubungan Nilai  $N$  dan Kerapatan Relatif ( $D_r$ ) tanah pasir**

| Nilai $N$ | Kerapatan relatif ( $D_r$ ) |
|-----------|-----------------------------|
| <4        | Sangat tidak padat          |
| 4 – 10    | Tidak padat                 |
| 10 – 30   | Kepadatan sedang            |
| 30 – 50   | Padat                       |
| > 50      | Sangat padat                |

Sumber : Terzhagi dan Peck (1948) dalam Hardiyatmo (1996)

**Tabel 3.2 Hubungan Nilai  $N$  dan Kuat Geset Tekan Bebas ( $q_u$ ) untuk Tanah Lempung**

| Nilai $N$ | Konsistensi  | Kuat geser tekan-bebas ( $q_u$ )<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--------------|-----------------------------------------------------------|
| < 2       | Sangat lunak | < 0,25                                                    |
| 2 – 4     | Lunak        | 0,25 – 0,50                                               |
| 4 – 8     | Sedang       | 0,50 – 1,00                                               |
| 8 – 15    | Kaku         | 1,00 – 2,00                                               |
| 15 – 30   | Sangat kaku  | 2,00 – 4,00                                               |
| > 30      | Keras        | > 4,00                                                    |

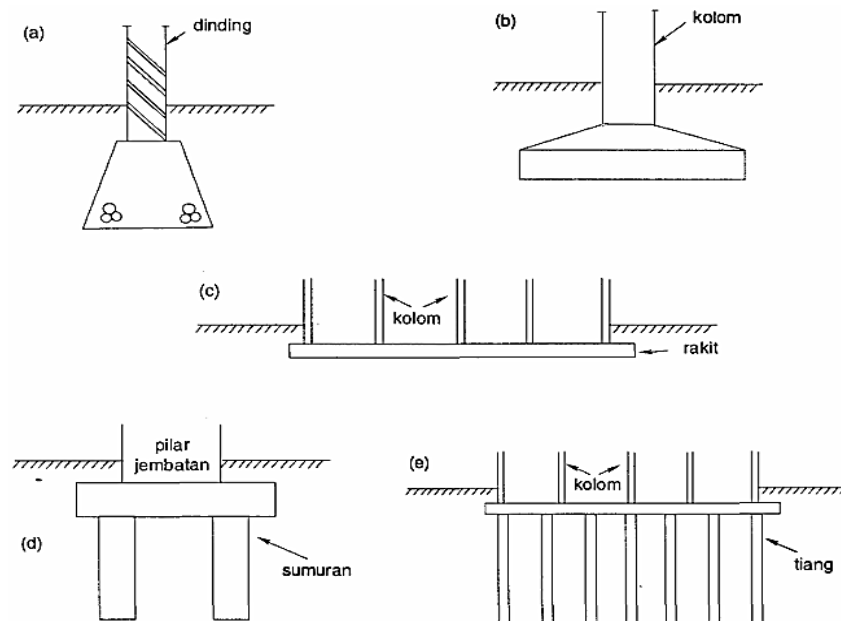
Sumber : Terzhagi dan Peck (1948) dalam Hardiyatmo (1996)

### 3.4 Fondasi

#### 3.4.1 Pengertian Fondasi

Menurut Suharyanto & Sunarta (2017) fondasi adalah suatu bagian dari konstruksi bangunan yang berfungsi untuk menempatkan bangunan dan meneruskan beban yang disalurkan dari struktur atas ke tanah dasar fondasi yang cukup kuat menahannya tanpa terjadinya perbedaan penurunan (*differential settlement*) pada sistem strukturnya. Maka proses pembangunan fondasi harus memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan agar mampu dan aman dalam

meneruskan beban dari atasnya dengan baik. Menurut Hardiyatmo (1996) terdapat dua klasifikasi fondasi yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam, gambar fondasi dangkal dan dalam dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut



**Gambar 3.2 Macam-macam tipe fondasi, (a) fondasi memanjang, (b) fondasi telapak, (c) fondasi rakit, (d) fondasi sumuran, (e) fondasi tiang.**  
(Sumber : Hardiyatmo, 1996)

### 3.4.2 Fondasi Dangkal

Menurut Hardiyatmo (1996) Fondasi dangkal didefinisikan sebagai fondasi yang mendukung bebannya secara langsung, seperti:

1. Fondasi telapak (*spread footing*)

Fondasi telapak adalah fondasi yang berdiri sendiri dalam mendukung kolom.

2. Fondasi memanjang

Fondasi memanjang adalah fondasi yang digunakan untuk mendukung dinding memanjang atau digunakan untuk mendukung sederetan kolom-kolom yang berjarak sangat dekat, sehingga bila dipakai fondasi telapak sisi-sisinya akan berimpit satu sama lain.

3. Fondasi rakit

Fondasi rakit adalah fondasi yang digunakan untuk mendukung bangunan yang terletak pada tanah lunak, atau digunakan bila susunan kolom-kolom

jaraknya sedemikian dekat di semua arahnya, sehingga bila dipakai fondasi telapak sisi-sisinya akan berimpit satu sama lain.

#### 3.4.3 Fondasi Dalam

Menurut Hardiyatmo (2010) fondasi dalam didefinisikan sebagai fondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batu yang terletak relatif jauh dari permukaan, seperti

1. Fondasi sumuran (*pier foundation*)

Fondasi sumuran merupakan bentuk peralihan antara fondasi dangkal dan fondasi tiang, digunakan bila tanah dasar yang kuat terletak pada kedalaman yang relatif dalam.

2. Fondasi tiang (*pile foundation*)

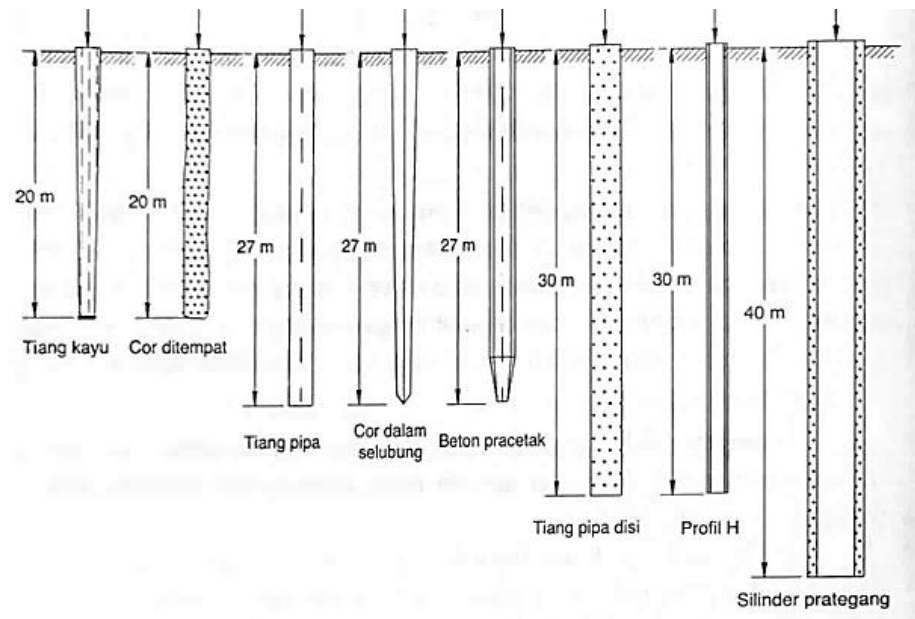
Fondasi tiang digunakan bila tanah fondasi pada kedalaman yang normal tidak mampu mendukung bebannya, dan tanah keras terletak pada kedalaman yang sangat dalam. Demikian pula, bila fondasi bangunan terletak pada tanah timbunan yang cukup tinggi, sehingga bila bangunan diletakkan pada timbunan akan dipengaruhi oleh penurunan yang besar. Bedanya dengan fondasi sumuran adalah fondasi tiang umumnya berdiameter lebih kecil dan lebih panjang. Terdapat dua tipe fondasi tiang yaitu :

- a. Tiang bor (*bored pile*)

Tiang bor adalah tiang yang dipasang dengan cara mengebor tanah lebih dulu sampai kedalaman tertentu, kemudian tulangan baja dimasukkan dalam lubang bor dan kemudian diisi/dicor dengan beton.

- b. Tiang pancang (*driven pile*)

Tiang pancang adalah tiang dipasang dengan cara membuat bahan berbentuk bulat atau bujur sangkar memanjang yang dicetak lebih dulu dan kemudian dipancang atau ditekan ke dalam tanah. Macam-macam tiang pancang terdiri dari tiang kayu, cor di tempat, tiang pipa, cor dalam selubung, beton pracetak, tiang pipa diisi, profil H, silinder prategang dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



**Gambar 3.3 Macam-Macam Fondasi Tiang Pancang**  
(sumber : Hardiyatmo, 2010)

### 3.5 Kapasitas Daya Dukung Tiang

Pada perhitungan kapasitas dukung tiang pancang dengan Metode Decourt (1995) dalam Shooshpasha dkk. (2013) berdasarkan nilai SPT, tahanan ujung tiang pancang dapat dihitung dengan:

1. Daya dukung ujung tiang ( $Q_p$ )

$$Q_p = K_b \times \bar{N}_b \times A_p \quad (3.1)$$

dengan,

$Q_p$  = Daya dukung ujung tiang (kN),

$K_b$  = 0,325; tiang bor & pancang di tanah pasir. 0,1; tiang pancang di tanah lempung. 0,08; tiang bor di tanah lempung,

$\bar{N}_b$  = Nilai N-SPT rata-rata 10D dan 4D dibawah tiang ( $\text{kN/m}^2$ ),

$A_p$  = Luas penampang dasar tiang ( $\text{m}^2$ ),

2. Daya dukng selimut tiang ( $Q_s$ )

$$Q_s = \alpha (2,8 N_s + 10) \times L \times p \quad (3.2)$$

dengan,

- $Q_s$  = Daya dukung selimut tiang (kN)  
 $\alpha$  = koefisien antara tanah dengan tiang  
 $N_s$  = Nilai N-SPT  
 $L$  = Tebal tanah sepanjang tiang (m)  
 $p$  = Keliling tiang pancang (m')

### 3.6 Penurunan Tiang

Menurut Apriani & Dwicahyani (2019) penurunan yang terjadi secara berlebihan akibat pembebanan dapat menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain kerusakan struktural pada elemen bangunan, gangguan fungsi arsitektural seperti pintu dan jendela yang sulit dibuka atau ditutup, timbulnya retak pada lapisan porselen dan plesteran, serta peningkatan keausan atau kerusakan peralatan akibat ketidaksejajaran yang disebabkan oleh penurunan tanah. Hardiyatmo (2010) menyatakan penurunan (*settlement*) tanah akibat pembebanan dapat dibagi ke dalam dua kelompok utama, yaitu

#### 3.6.1 Penurunan elastis tiang tunggal

Penurunan elastis atau penurunan segera dari suatu fondasi terjadi dengan segera setelah pemberian beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan kadar air. Besarnya penurunan ini akan tergantung pada ketentuan dari fondasi dan tipe dari material di mana fondasi tersebut berada (Das, 1995). Perhitungan penurunan segera atau penurunan elastis pada tiang tunggal dapat dihitung dengan metode Vesic (1977) menggunakan Persamaan 3.3 berikut.

##### 1. Penurunan total

$$Se = Se_{(1)} + Se_{(2)} + Se_{(3)} \quad (3.3)$$

dengan,

$Se$  = Total penurunan tiang (mm)

$Se_{(1)}$  = Penurunan elastis tiang (mm)

$Se_{(2)}$  = Penurunan tiang dikarenakan beban pada ujung tiang (mm)

$Se_{(3)}$  = Penurunan tiang dikarenakan beban yang ada pada selimut (mm)

##### 2. Penurunan elastis tiang

$$Se_{(1)} = \frac{(Q_{wp} + \zeta \times Q_{ws}) \times L}{A_p \times E_p} \quad (3.4)$$

dengan,

$Q_{wp}$  = Kapasitas dukung ujung tiang (ton)

$Q_{ws}$  = Kapasitas dukung selimut tiang (ton)

$\zeta$  = faktor empirik tipe variasi distribusi tahanan selimut tiang (0,5 – 0,67)

$L$  = Panjang tiang (m)

$A_p$  = Luas penampang tiang (m<sup>2</sup>)

$E_p$  = Modulus elastis bahan tiang (ton/m<sup>2</sup>)

3. Penurunan tiang dikarenakan beban pada ujung tiang

$$Se_{(2)} = \frac{q_{wp}^D}{E_s} (1 - \mu^2) \times I_{wp} \quad (3.5)$$

dengan,

$D$  = Diameter tiang (m)

$q_{wp}$  = Beban titik per satuan luasan,  $Q_{wp} / A_p$

$E_s$  = Modulus elastis tanah (Tabel 3.3)

$\mu$  = Poisson rasio tanah (Tabel 3.4)

$I_{wp}$  = Faktor pengaruh, 0,85

Perkiraan modulus elastis tanah dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut, dan untuk poisson rasio tanah dapat dilihat pada Tabel 3.4 halaman selanjutnya.

**Tabel 3.3 Perkiraan Modulus Elastisias**

| Tipe                                          | Kondisi          | Modulus Elastis (kN/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Kerikil                                       | Longgar          | 25.000 – 50.000                      |
|                                               | Kepadatan sedang | 50.000 – 100.00                      |
|                                               | Padat            | 100.000 – 200.000                    |
| Pasir butiran sedang sampai kasar pasir halus | Sangat longgar   | <5.000                               |
|                                               | Longgar          | 3.000 – 10.000                       |
|                                               | Kepadatan sedang | 8.000 – 30.000                       |
|                                               | Padat            | 25.000 – 50.000                      |
|                                               | Sangat padat     | 40.000 – 100.000                     |
| Pasir halus                                   | Longgar          | 5.000 – 10.000                       |

**Lanjutan Tabel 3.3 Perkiraan Modulus Elastisitas**

| <b>Tipe</b> | <b>Kondisi</b>                                                  | <b>Modulus Elastis (kN/m<sup>2</sup>)</b>                                                          |
|-------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pasir halus | Kepadatan sedang<br>Padat                                       | 10.000 – 25.000<br>25.000 – 50.000                                                                 |
| Lanau       | Lunak<br>Kaku<br>Keras                                          | <10.000<br>10.000 – 20.000<br>>20.000                                                              |
| Lempung     | Sangat lunak<br>Lunak<br>Sedang<br>Kaku<br>Sangat kaku<br>Keras | <3.000<br>2.000 – 7.000<br>5.000 – 12.000<br>10.000 – 25.000<br>20.000 – 50.000<br>40.000 – 80.000 |

sumber : Hardiyatmo (2014) dalam Putri dkk. (2024)

**Tabel 3.4 Perkiraan Poisson Rasio ( $\mu$ )**

| <b>Jenis Tanah</b> | <b>Poisson Rasio (<math>\mu</math>)</b> |
|--------------------|-----------------------------------------|
| Lempung jenuh      | 0,4 – 0,5                               |
| Lempung tak jenuh  | 0,1 – 0,3                               |
| Lempung berpasir   | 0,2 – 0,3                               |
| Lanau              | 0,3 – 0,35                              |
| Pasir padat        | 0,2 – 0,4                               |
| Pasir kasar        | 0,15                                    |
| Pasir halus        | 0,25                                    |
| Batu               | 0,1 – 0,4                               |
| Loess              | 0,1                                     |

sumber : Hardiyatmo (2014) dalam Putri dkk. (2024)

4. Penurunan tiang dikarenakan beban yang terjadi pada selimut tiang

$$Se_{(3)} = \left( \frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu^2) \times I_{ws} \quad (3.5)$$

dengan,

$p$  = Keliling tiang pancang (m)

$L$  = Panjang tiang pancang (m)

$I_{ws}$  = Faktor pengaruh,  $2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}}$

### 3.6.2 Penurunan elastis kelompok tiang

Penurunan fondasi kelompok tiang lebih besar dari penurunan fondasi tiang tunggal. Menurut Vesic (1977) perhitungan penurunan fondasi tiang kelompok dapat dilihat pada Persamaan 3.6 berikut.

$$S_g = S_e \times \sqrt{\frac{B_g}{D}} \quad (3.6)$$

dengan,

$S_g$  = penurunan elastis kelompok tiang (mm)

$S_e$  = penurunan elastis tiang tunggal (mm)

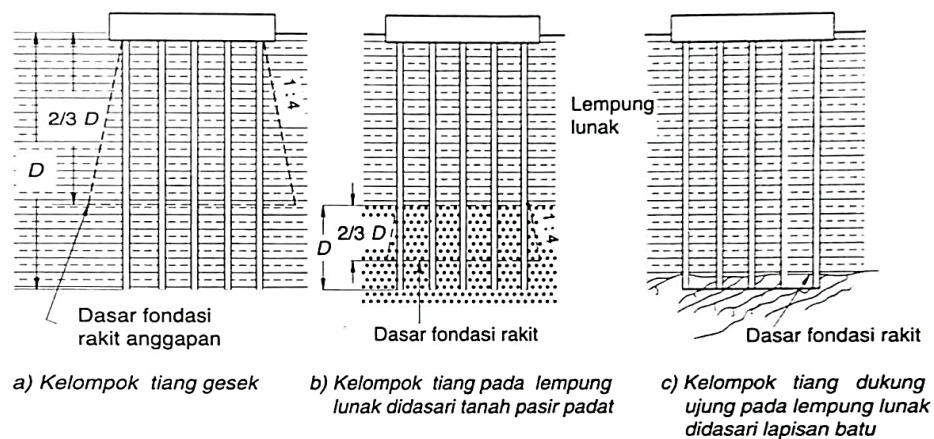
$B_g$  = lebar kelompok tiang (mm)

$D$  = diameter tiang tunggal (mm)

### 3.6.3 Penurunan konsolidasi

#### 1. Distribusi Tegangan

Terzaghi dalam Hardiyatmo (2010) menyarankan penyebaran beban fondasi tiang dianggap berawal dari 2/3 total panjang tiang ke arah bawah. Gambar distribusi tegangan dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut



**Gambar 3.4 Distribusi Beban Kelompok Tiang untuk Menghitung Penurunan**

(Sumber : Hardiyatmo, 2010)

Dari gambar halaman sebelumnya maka beban yang didistribusikan ke kelompok tiang dapat dihitung berdasarkan Persamaan 3.7 berikut.

$$\Delta P = 1/6 \times (\Delta P_{top} + 4 \Delta P_{middle} + \Delta P_{bottom}) \quad (3.7)$$

dengan,

$\Delta P$  = Tekanan yang dirasakan di tengah – tengah lapisan tanah lempung akibat muatan tambahan (muatan fondasi).

## 2. Konsolidasi primer

$$S = \frac{C_c}{1-e_0} H \log \frac{\Delta P + P_0}{P_0} \quad (3.8)$$

dengan,

$C_c$  = index pemampatan,

$e_0$  = angka pori awal,

$H$  = tebal lapisan yang ditinjau,

$P_0$  = tekanan efektif awal akibat berat tanah di atasnya,

### 3.6.4 Penurunan total

Menurut SNI 8460:2017 Badan Standardisasi Nasional (2017) tentang persyaratan perancangan geoteknik, penurunan fondasi harus dibatasi agar tidak melebihi penurunan izin yang ditetapkan. Suatu sistem fondasi dinyatakan memenuhi persyaratan kinerja apabila nilai penurunan total (*total settlement*) sebagaimana Persamaan 3.9 harus lebih kecil atau sama dengan penurunan izin (*allowable settlement*), yang dinyatakan dengan Persamaan 3.9 berikut:

$$S_{total} < S_{izin} \quad (3.9)$$

dengan,

$S_{total}$  = Penurunan total fondasi (mm),

$S_{izin}$  = Penurunan total izin fondasi (mm),

Penurunan total (*total settlement*) didefinisikan sebagai besarnya perpindahan vertikal maksimum yang dialami oleh bangunan atau fondasi akibat pembebanan struktur terhadap tanah pendukungnya. Penurunan total merupakan hasil akumulasi dari penurunan segera (*immediate settlement*), penurunan

konsolidasi primer, serta penurunan konsolidasi sekunder yang berlangsung selama umur layanan bangunan Terzaghi & Peck Ralph B (1967). Penurunan total mencerminkan respons deformasi tanah secara menyeluruh akibat beban yang bekerja dan merupakan salah satu parameter utama dalam evaluasi kinerja serta keamanan fondasi, khususnya pada kondisi tanah lunak Hardiyatmo (2010). Secara umum, penurunan total dapat dinyatakan dengan Persamaan 3.10 berikut

$$S_{total} = S_g + S_c + S_s \quad (3.10)$$

dengan,

$S_g$  = Penurunan elastis kelompok tiang (mm)

$S_c$  = penurunan konsolidasi primer kelompok tiang (mm)

$S_s$  = penurunan konsolidasi sekunder (mm)

Penurunan izin ( $S_{izin}$ ) ditetapkan sebagai batas maksimum penurunan fondasi yang masih dapat diterima tanpa menimbulkan kerusakan struktural maupun gangguan fungsi bangunan. Dalam penelitian ini, kriteria penurunan izin dinyatakan dengan Persamaan 3.11 berikut

$$S_{izin} < 15 \text{ cm} + \frac{B}{600} \quad (3.11)$$

dengan,

$B$  = Lebar bangunan (cm)

### 3.6.5 Perbedaan penurunan

Perbedaan penurunan (*differential settlement*) terjadi apabila besarnya penurunan pada setiap titik fondasi tidak sama, sehingga membentuk profil penurunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Pada kondisi penurunan tanpa kemiringan (*settlement without tilt*), penurunan maksimum terjadi di bagian tengah struktur sementara kedua ujung mengalami penurunan yang relatif sama, sehingga tidak menimbulkan rotasi bangunan. Sebaliknya, pada kondisi penurunan dengan kemiringan (*settlement with tilt*), perbedaan penurunan antara dua titik ujung struktur menyebabkan terjadinya sudut kemiringan atau rotasi bangunan, yang berpotensi menimbulkan retak dan gangguan fungsi struktur.

Untuk mengendalikan perbedaan penurunan, dilakukan evaluasi terhadap distorsi sudut (*angular distortion*), yaitu perbandingan antara selisih penurunan pada dua titik pengamatan dengan jarak horizontal di antaranya, yang dinyatakan dengan Persamaan 3.12 sebagai berikut:

$$\theta = \frac{\Delta s}{L} \leq \frac{1}{300} \quad (3.12)$$

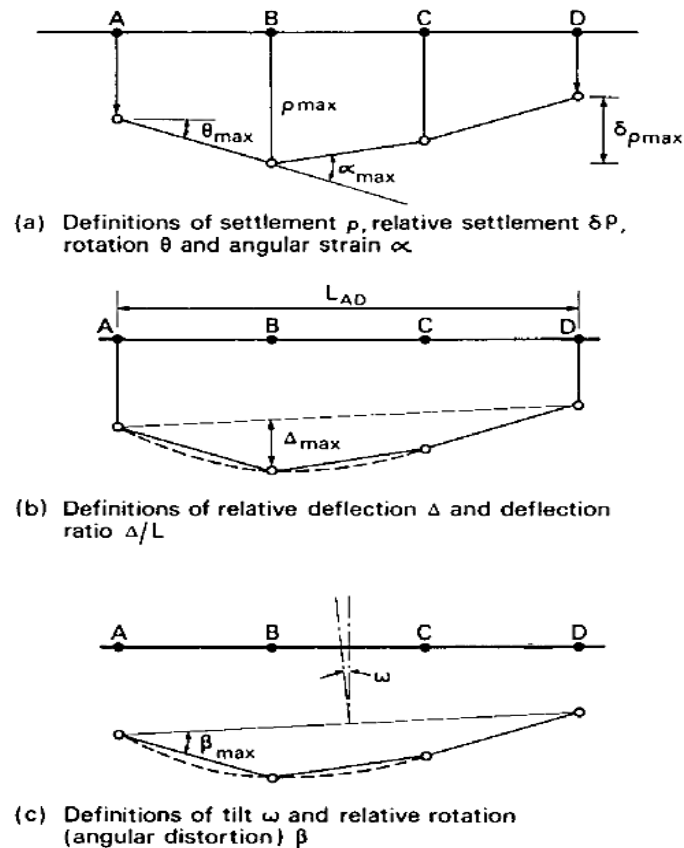
$$\tan \theta = \frac{1}{300}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{300}$$

dengan,

$\Delta s$  = selisih penurunan dua titik fondasi (mm),

$L$  = jarak horizontal antara dua titik tersebut (mm),



**Gambar 3.5 Ilustrasi Perbedaan Penurunan**  
(Sumber : Burland dkk., 1977)

### 3.7 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan salah satu pendekatan numerik yang banyak dalam analisis permasalahan geoteknik, khususnya untuk memodelkan perilaku tanah dan struktur fondasi. Prinsip dasar metode elemen hingga adalah membagi suatu sistem menjadi sejumlah elemen kecil yang saling berhubungan, sehingga persamaan diferensial yang kompleks dapat diselesaikan secara numerik.

Menurut Yulianti dkk. (2023), metode elemen hingga memungkinkan analisis perilaku tanah yang tidak linier dengan mempertimbangkan hubungan tegangan-regangan, kondisi batas, serta interaksi antar tanah dan struktur secara lebih realistis. Berbeda dengan metode analitis yang umumnya menggunakan asumsi sederhana, metode elemen hingga mampu memodelkan kondisi geometri, pembebanan, karakteristik material yang kompleks. Oleh karena itu, metode elemen hingga banyak dalam analisis fondasi, timbunan, galian, serta prediksi penurunan tanah.

#### 3.7.1 PLAXIS 2D

*PLAXIS 2D* adalah perangkat lunak analisis geoteknik berbasis elemen hingga yang dikembangkan untuk menganalisis deformasi, stabilitas, dan aliran air tanah pada kondisi 2-dimensi. Program ini banyak digunakan dalam perencanaan dan evaluasi perilaku tanah lunak, fondasi, timbunan, serta struktur penahan tanah.

##### 1. Pendekatan 2-dimensi

*PLAXIS 2D* menggunakan pendekatan 2-dimensi dengan 2 jenis pemodelan utama, yaitu *plane strain* dan *axisymmetric*. Model *plane strain* merupakan model yang mengasumsikan geometri seolah-olah menerus tegak lurus gambar. Model *axisymmetric* merupakan pemodelan untuk geometri silinder.

##### 2. Pemodelan tanah

Perilaku tanah dalam *PLAXIS 2D* dapat dimodelkan dengan berbagai tingkatan ketelitian, mulai dari model sederhana hingga model yang lebih kompleks. Pemilihan model tanah sangat berpengaruh terhadap hasil analisis deformasi dan penurunan yang diperoleh.

Model paling sederhana adalah model elastis linier yang mengikuti Hukum Hooke dengan dua parameter utama, yaitu *Modulus Young*, ( $E$ ) dan *poisson ratio* ( $\mu$ ). Namun, model ini kurang mampu merepresentasikan perilaku tanah yang bersifat nonlinier. Oleh karena itu, *PLAXIS 2D* menyediakan beberapa model konsitutif lanjutan, antara lain model *Soft Soil*, model *Hardening Soil*, model *Mohr-Coulomb*.

a. Model *Soft Soil*

Model *Soft Soil* dirancang untuk memodelkan perilaku tanah lunak yang dominan mengalami kompresi, seperti lempung lunak dan tanah organik. Parameter kekuatan geser tanah dimodelkan menggunakan parameter kohesi, sudut geser dalam, dan sudut dilatasi. Sementara itu, parameter kompresibilitas tanah direpresentasikan oleh parameter lambda ( $\lambda$ ), dan kappa ( $\kappa$ ), yang menggambarkan karakteristik kekakuan tanah dan umumnya diperoleh dari pengujian laboratorium, seperti uji triaksial atau uji konsolidasi oedometer. Menurut Karstunen & Amavasai (2017), nilai parameter lambda ( $\lambda$ ) dan kappa ( $\kappa$ ) dapat ditentukan menggunakan persamaan yang disajikan pada persamaan 3.13 dan persamaan 3.14. Model ini sangat sesuai digunakan untuk analisis penurunan akibat pembebanan jangka panjang yang didominasi oleh konsolidasi.

$$\lambda = \frac{C_c}{2,3 (1+e_0)} \quad (3.13)$$

dengan,

$C_c$  = index pemampatan,

$e_0$  = angka pori awal,

$$\kappa = \frac{C_s}{1+e_0} \quad (3.14)$$

dengan,

$C_s$  = index pengembangan,

$e_0$  = angka pori awal,

b. Model *Hardening Soil*

Model *Hardening Soil* (HS) adalah model geoteknik tingkat lanjut yang digunakan untuk memodelkan hubungan tegangan-regangan tanah secara nonlinier menggunakan pendekatan persamaan hiperbola. Model ini menggunakan parameter kekuatan yang sama seperti model *Mohr-Coulomb*, yaitu kohesi, sudut geser dalam, dan sudut dilatasi. Namun, kekakuan tanah dimodelkan lebih realistis dengan 3 parameter *Modulus Young* ( $E$ ) yaitu:

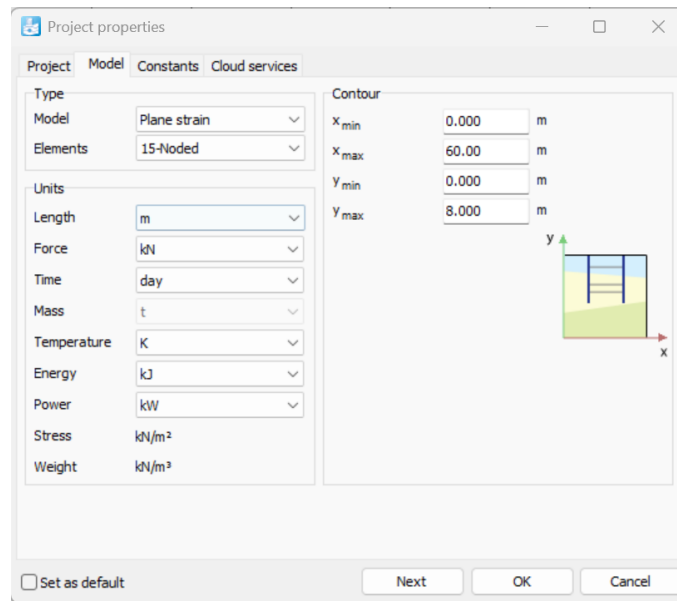
- 1)  $E_{50}$  yang merupakan modulus kekakuan pembebanan triaksial yang diperoleh dari uji triaksial UU (*Unconsolidated Undrained*).
- 2)  $E_u^r$  yang mewakili kekakuan unloading triaksial, dan  $E_{oed}$  yang mewakili kekakuan oedometer, keduanya dihitung berdasarkan  $E_{50}$ .

Sebagai pendekatan empiris, nilai  $E_u^r$  dapat diperkirakan 3 kali  $E_{50}$ , sementara  $E_{50}$  dan  $E_{oed}$  sering dianggap setara (Rizky Pitaloka & Noer Hamdhan, 2024). Model *Hardening Soil* umumnya diaplikasi dalam analisis galian tanah, timbunan, dan kondisi tanah yang mengalami variasi tegangan secara signifikan.

### 3.7.2 Proses analisis *PLAXIS 2D*

#### 1. Pengaturan Awal Model

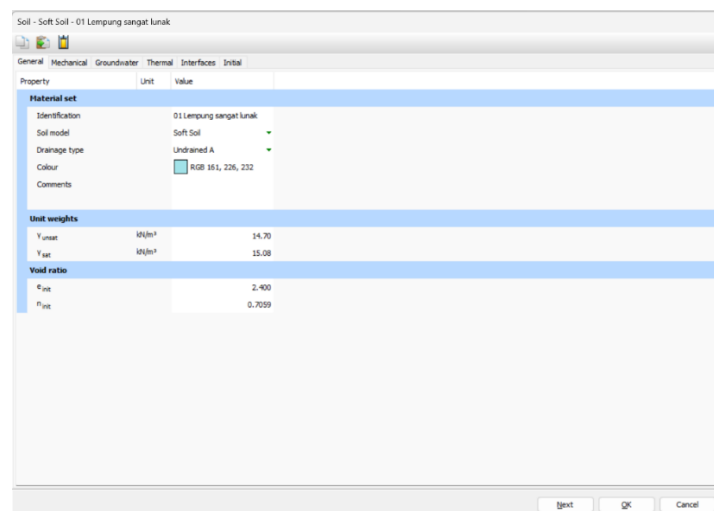
Tahap awal dilakukan dengan membuat proyek baru pada *PLAXIS 2D*. Pada bagian ini ditentukan satuan pemodelan, dimensi model, serta jenis analisis yang digunakan. Pengaturan awal diperlukan agar seluruh data tanah, geometri, dan beban dapat dimasukkan secara konsisten. Untuk pengaturan awal proyek dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut



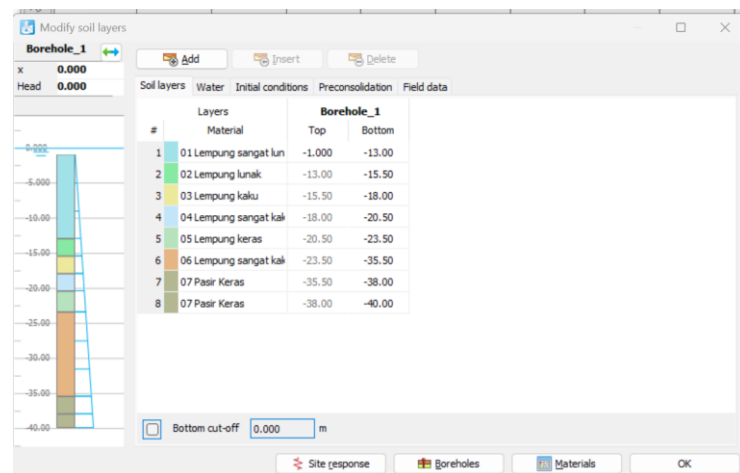
**Gambar 3.6 Project Properties**

2. Pemodelan material dan lapisan tanah

*PLAXIS 2D* digunakan untuk menganalisis penurunan fondasi dengan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga. Tahap awal pemodelan dilakukan dengan memasukkan material tanah ke dalam program, meliputi jenis tanah, model material, kondisi drainase, berat isi tanah, serta parameter lain yang diperlukan dalam analisis.



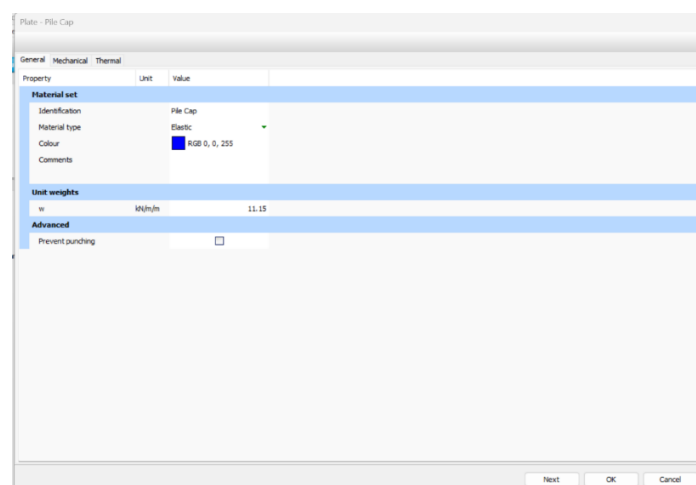
**Gambar 3.7 Tampilan Input Material Tanah pada *PLAXIS 2D***



**Gambar 3.8** Pemodelan Lapisan Tanah pada *PLAXIS 2D*

### 3. Pemodelan fondasi

Pemodelan fondasi pada *PLAXIS 2D* dilakukan dengan mendefinisikan elemen tiang dan *pile cap* sesuai dengan data perencanaan. Tiang pancang dimodelkan menggunakan elemen embedded beam, sedangkan *pile cap* dimodelkan menggunakan elemen plate. Input material kedua elemen tersebut disesuaikan dengan parameter yang digunakan dalam analisis agar model dapat menggambarkan perilaku fondasi terhadap beban yang bekerja. Tampilan input material fondasi pada *PLAXIS 2D* ditunjukkan pada Gambar 5.15 berikut



**Gambar 3.9** Input Parameter untuk *Pile cap*

4. Input beban fondasi

Beban pada *PLAXIS 2D* dimasukkan sebagai beban ekuivalen dua dimensi. Nilai reaksi beban fondasi dari pembacaan tumpuan dikonversi dengan membagi beban aksial terhadap panjang tributary arah keluar bidang, sehingga beban yang dimasukkan ke dalam model telah sesuai dengan asumsi pemodelan plane strain.

$$P_{\text{PLAXIS}} = \frac{P}{L_{\text{Tributary}}}$$

dengan,

$P_{\text{PLAXIS}}$  : beban ekuivalen pada model *PLAXIS 2D*,

$P$  : reaksi beban fondasi dari pembacaan tumpuan,

$L_{\text{tributary}}$  : panjang tributary arah keluar bidang model.

5. Pembuatan *mesh*

Pembuatan mesh merupakan tahap pembagian model menjadi elemen-elemen kecil agar *PLAXIS 2D* dapat melakukan perhitungan numerik. Tahap ini diperlukan untuk memperoleh respons tanah dan fondasi terhadap beban yang bekerja, terutama berupa distribusi tegangan dan penurunan fondasi.

6. Mengatur *flow conditions*

*Flow conditions* merupakan tahap untuk mendefinisikan kondisi aliran air tanah pada model *PLAXIS 2D*. Pada tahap ini, posisi muka air tanah dan kondisi tekanan air pori ditentukan agar perilaku tanah dalam kondisi jenuh maupun tidak jenuh dapat dimodelkan dengan benar. Pengaturan *flow conditions* penting karena kondisi air tanah berpengaruh terhadap tegangan efektif tanah, kuat geser, serta besarnya penurunan fondasi yang terjadi.

7. *Stage construction*

Tahap analisis pada perangkat lunak *PLAXIS2D* terletak pada fase *stage construction*. Rincian setiap fase dalam *stage construction* dapat dilihat pada Tabel 5.12 berikut.

**Tabel 3.5 Fase pada *Stage Construction PLAXIS2D***

| No | Fase                               | Keterangan                                            |
|----|------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1  | <i>Initial Phase</i>               | Kondisi tegangan awal tanah dan tinggi muka air tanah |
| 2  | <i>Install pile &amp; pile cap</i> | Aktivasi elemen tiang dan <i>pile cap</i>             |
| 3  | <i>Loading</i>                     | Tahap penerapan beban eksternal                       |
| 4  | <i>Consolidation</i>               | Tahapan penerapan konsolidasi                         |

#### 8. *Output* Penurunan Kelompok Tiang

*Output* penurunan tiang ini memberikan informasi mengenai pergeseran vertikal seperti perubahan elevasi tanah yang terjadi di sepanjang struktur tiang tersebut. Hal ini dapat mengevaluasi potensi deformasi tanah yang terjadi akibat pengaruh beban dari struktur di atasnya, aktivitas konstruksi, maupun perubahan kondisi lingkungan disekitarnya, seperti penurunan muka air tanah, dan sebagainya. Hasil dari *output* penurunan tiang ini sangat penting untuk menjamin stabilitas dan keamanan jangka panjang dari bangunan infrastruktur yang berdiri diatas tanah tersebut.

### 3.8 *Settle3D*

Menurut Rocscience (2026) *Settle3D* adalah perangkat lunak geoteknik untuk menganalisis penurunan vertikal (*settlement*) dan konsolidasi pada tanah akibat beban permukaan seperti fondasi, timbunan, maupun galian. Karakter utama program ini adalah menggabungkan kesederhanaan konsep konsolidasi 1-dimensi dalam kolom tanah dengan kemampuan pemodelan beban dan visualisasi hasil secara 3-dimensi, sehingga variasi penurunan di area beban termasuk perbedaan penurunan (*differential settlement*) dapat ditinjau secara lebih realistis dibandingkan perhitungan 1-dimensi murni.

#### 3.8.1 Pendekatan 3-dimensi

*Settle3D* memodelkan kondisi geometri beban dalam bidang rencana sehingga distribusi tegangan dan penurunan dapat ditinjau pada berbagai titik di area analisis. Beban yang ditetapkan umumnya berupa beban terdistribusi pada permukaan tanah untuk mensimulasikan fondasi, timbunan, atau beban lain, dan dapat diatur bertahap.

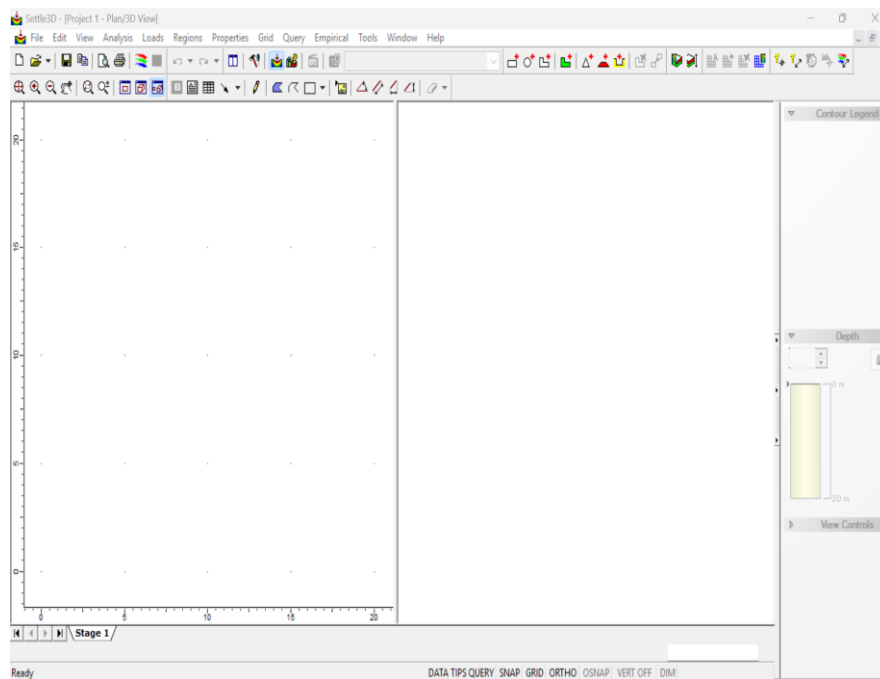
### 3.8.2 Pehitungan distribusi tegangan ( $\Delta\sigma$ ) akibat beban

Penurunan di *Settle3D* sangat ditentukan oleh perubahan tegangan vertikal pada tanah. Untuk menghitung distribusi tegangan 3-dimensi, *Settle3D* menyediakan beberapa metode seperti Boussinesq, Westergaard, 2:1 (vertical ratio/angle) serta Solusi elastis multi-layer. Pemilihan metode distribusi tegangan ini mempengaruhi besarnya  $\Delta\sigma$  pada kedalaman tertentu, yang kemudian digunakan dalam perhitungan penurunan setiap lapisan (Rocscience, 2025).

### 3.8.3 Proses analisis *Settle3D*

Agar proses analisis dapat dijelaskan secara runtut, tahapan penggunaan *Settle3D* disajikan seperti pada tahapan berikut,

1. Pengaturan awal model
  - a. Buka program *Settle3D*

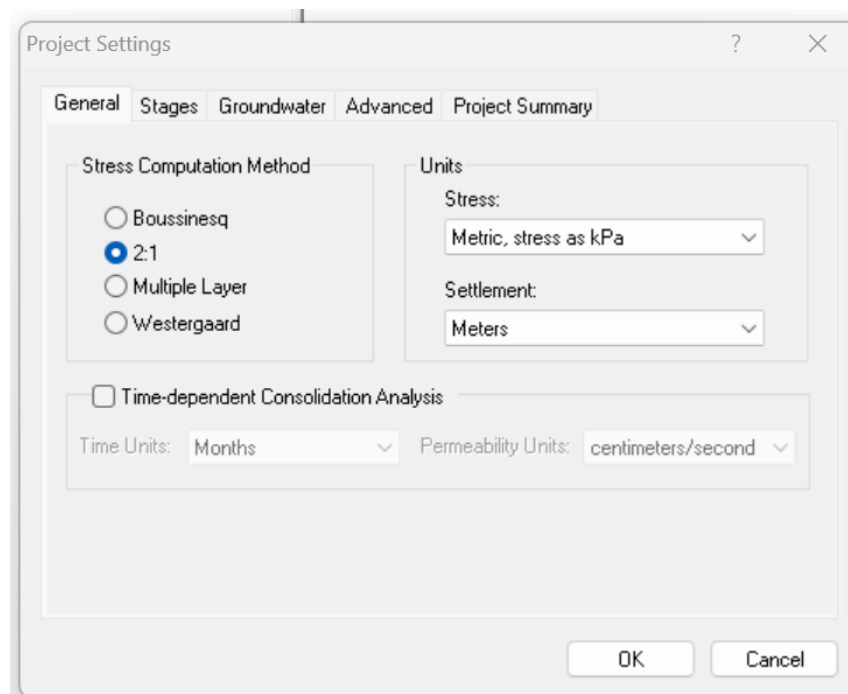


**Gambar 3.10 Tampilan Awal *Settle3D***

- b. Atur *project settings*

Pada tahap *Project Settings*, dilakukan pengaturan awal model berupa metode perhitungan tegangan, satuan, serta kondisi muka air tanah.

Metode *Stress Computation* yang digunakan adalah sesuai dengan kebutuhan analisis penurunan fondasi. Satuan model disesuaikan dengan data perencanaan, yaitu meter untuk panjang, kN untuk gaya, kPa untuk tegangan, dan kN/m<sup>3</sup> untuk berat isi tanah. Tinggi muka air tanah dimasukkan berdasarkan data penyelidikan tanah di lapangan karena berpengaruh terhadap berat isi efektif tanah dan proses konsolidasi. Dengan pengaturan tersebut, model *Settle3D* dapat digunakan untuk menghitung penurunan konsolidasi fondasi.



**Gambar 3.11** Tampilan *Project Settings*

## 2. *Input data*

Input material tanah pada *Settle3D* dilakukan dengan memasukkan parameter tiap jenis lapisan tanah yang digunakan dalam analisis. Parameter yang dimasukkan meliputi berat isi tanah, berat isi jenuh, Poisson's ratio, serta parameter konsolidasi primer seperti  $C_c$ ,  $C_r$ ,  $e_0$ , dan OCR. Selain itu, susunan lapisan tanah juga dimodelkan berdasarkan ketebalan masing-masing lapisan sesuai data penyelidikan tanah di lapangan. Tampilan input material tanah

dan susunan lapisan tanah pada *Settle3D* dapat dilihat pada Gambar 5.7 dan Gambar 5.8 berikut.

Soil Properties

☐ Lempung sangat lunak ☐ Lempung lunak ☐ Lempung kaku ☐ Lempung sangat kaku

Name: Lempung sangat lunak Color: Yellow Hatch: Black

Unit Weight (kN/m<sup>3</sup>): 14.7 Sat. Unit Wt. (kN/m<sup>3</sup>): 15.08 Poisson Ratio: 0.15

☐ Immediate Settlement

Es (kPa): 10000 Esur (kPa): 10000

☒ Primary Consolidation

Material Type: Non-Linear

Cc: 1.18 Cr: 0.112 e0: 2.4

Pc (kPa): 100 OCR: 1 OCM (kPa): 0

Time-dependent Consolidation Analysis:

Cv (cm<sup>2</sup>/s): 0.001 K (cm/s): 1e-007 B-bar: 1

Cvr (cm<sup>2</sup>/s): 0.001 Kr (cm/s): 1e-007

☐ Secondary Consolidation

Method: Standard

Cax: 0.03 Cax: 0.03

☐ Properties vary by depth ☐ Strain based Cc, Cr and Ca Layer Modulus... Wick Drains...

☐ Show only used properties

OK Cancel

**Gambar 3.12 Tampilan *Input Material Tanah Settle3D***

Soil Layers

| # | Name                      | Thickness |
|---|---------------------------|-----------|
| 1 | Lempung sangat lunak      | 13        |
| 2 | Lempung lunak             | 2.5       |
| 3 | Lempung kaku              | 2.5       |
| 4 | Lempung sangat kaku       | 2.5       |
| 5 | Lempung keras             | 2.5       |
| 6 | Lempung sangat kaku bawah | 12.5      |
| 7 | Pasir keras               | 4.5       |

Soil Layer Column

0 m

13

15.5

18

20.5

23

35.5

40 m

Insert Layer Above Insert Layer Below Delete Layer

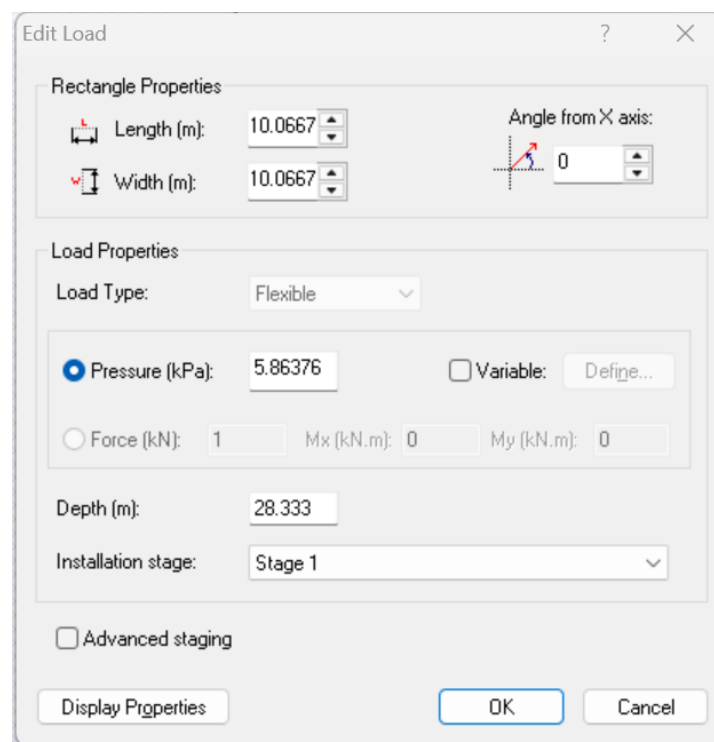
OK Cancel

**Gambar 3.13 Input Susunan Lapisan Tanah pada *Settle3D***

### 3. *Input Geometri dan Beban Pile cap*

Geometri *pile cap* dimodelkan pada *Settle3D* dengan bentuk persegi sesuai dimensi area kelompok tiang yang ditinjau. Beban fondasi dimasukkan

sebagai beban merata sebesar  $P/A$ , yaitu beban aksial kolom dibagi dengan luas area *pile cap*. Kedalaman beban ditetapkan sesuai dengan kedalaman pembebanan yang digunakan pada perhitungan manual, sehingga hasil analisis *Settle3D* dapat dibandingkan dan diverifikasi dengan metode Terzaghi. Tampilan input geometri dan beban *pile cap* dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.



**Gambar 3.14 Input Geometri dan Beban *Pile cap* pada *Settle3D***

#### 4. *Output* penurunan konsolidasi

Setelah seluruh data material tanah, geometri *pile cap*, dan beban dimasukkan, analisis dijalankan untuk memperoleh nilai penurunan fondasi. *Output Settle3D* menampilkan sebaran penurunan konsolidasi pada area pembebanan serta nilai maksimum penurunan yang terjadi.

## BAB IV

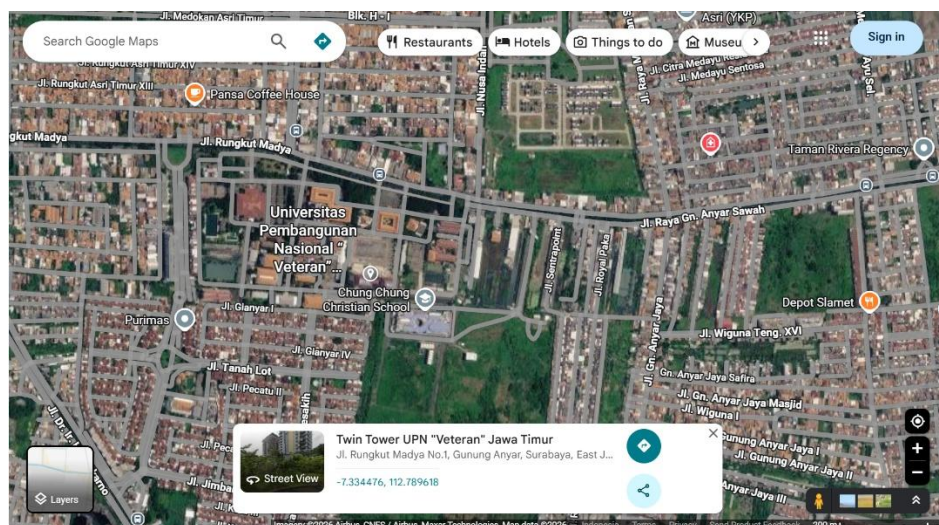
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 4.1 Tinjauan Umum

Analisis penurunan fondasi tiang pancang merupakan bagian penting dalam evaluasi desain untuk memastikan penurunan yang terjadi tidak melampaui batas layanan dan tidak mengganggu kinerja struktur bangunan. Analisis penurunan fondasi tiang pancang pada Gedung Tower Pendidikan di Surabaya dilakukan berdasarkan data teknis yang tersedia sebagai dasar perhitungan dan evaluasi. Bab ini menjelaskan tahapan evaluasi guna menentukan apakah penurunan fondasi tiang pancang telah memenuhi persyaratan.

#### 4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Gedung Tower Pendidikan, Surabaya. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada kondisi tanah setempat yang didominasi oleh tanah lunak, sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan penurunan dan menjadi relevan untuk dikaji. Untuk lokasi pada Gambar 4.1 berikut.



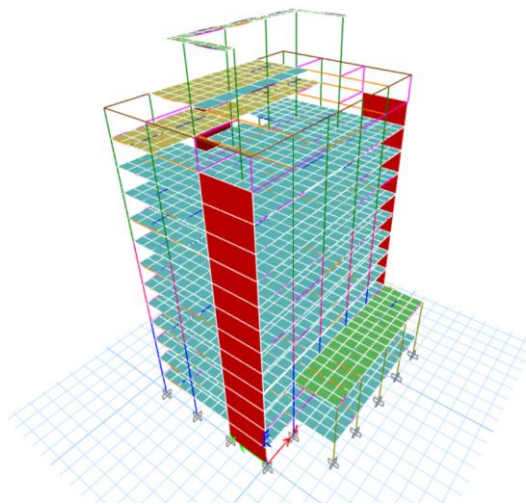
**Gambar 4.1 Lokasi Penelitian**

### 4.3 Data Penelitian

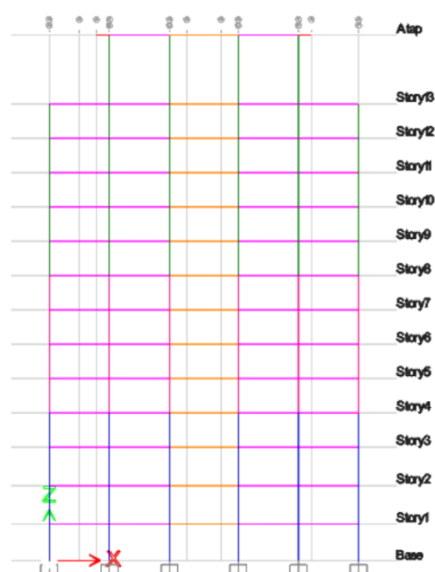
Data penelitian ini diperoleh dari perencanaan proyek pembangunan Gedung Tower Pendidikan di Surabaya yang meliputi data struktur dan data tanah.

#### 4.3.1 Data Struktur

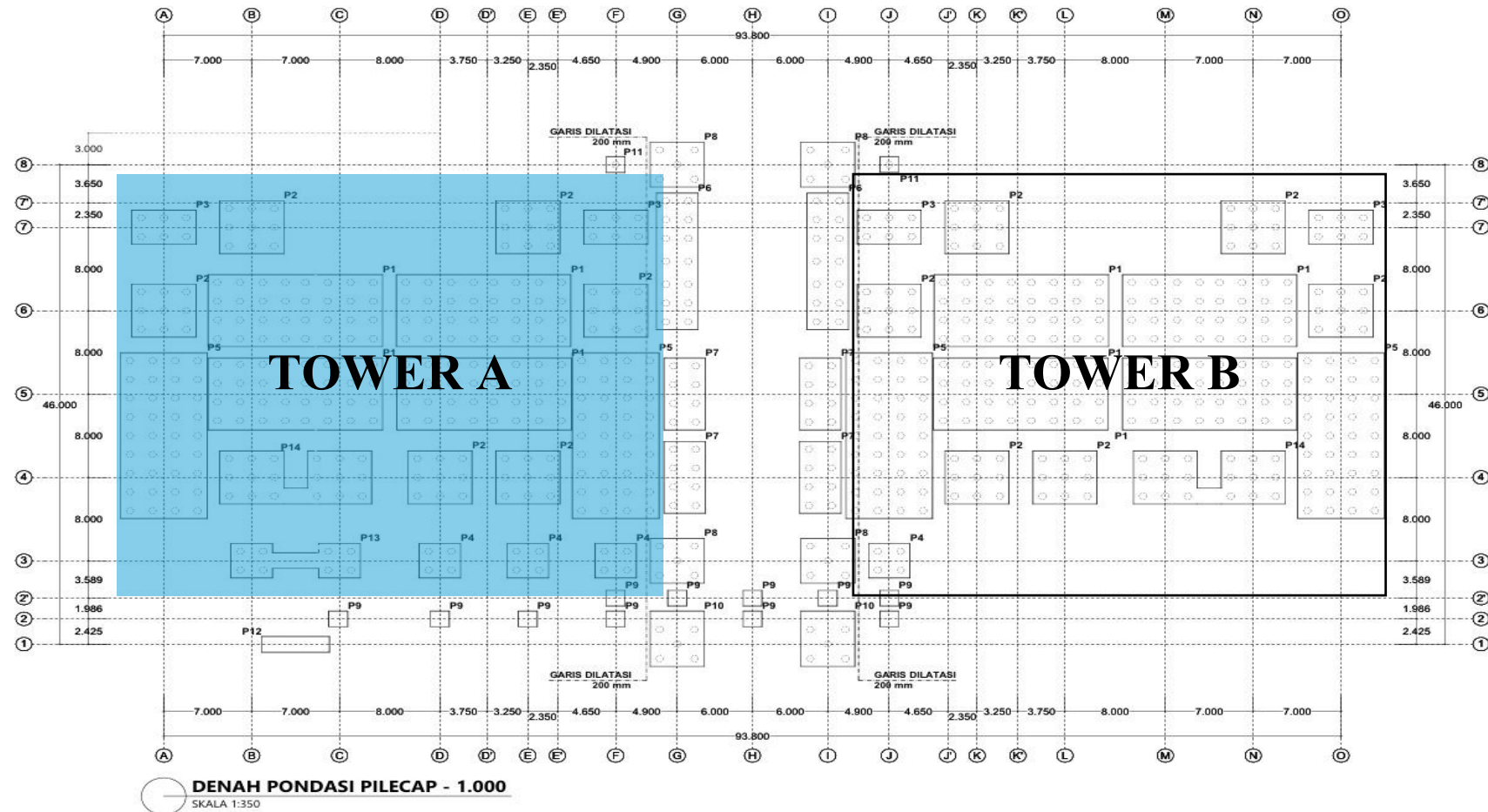
Pemodelan struktur atas menggunakan perangkat lunak *ETABS* ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Sementara itu, gambar struktur bawah ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 berikut.



**Gambar 4.2 Model 3D Struktur Atas**



**Gambar 4.3 Detail Potongan**



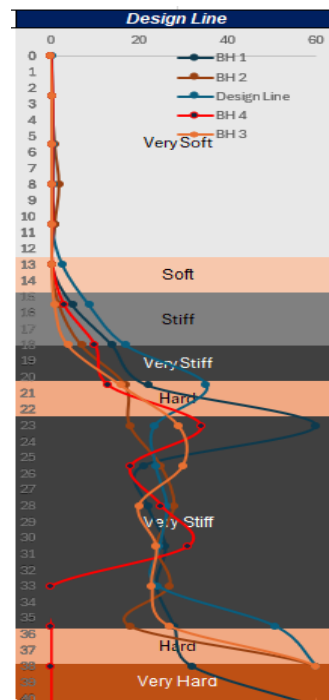
Gambar 4.4 Denah Pilecap

#### 4.3.2 Data Tanah

Pada pengamatan yang dilakukan pada lokasi Proyek Pembangunan Gedung Tower Pendidikan di Surabaya didapatkan jenis tanah lunak dapat dilihat pada Gambar 4.5 *Design Line*. Penyelidikan tanah dilakukan dengan melakukan pemboran dan pengujian sample tanah di laboratorium. Selain itu dilakukan juga pengujian dengan metode *Standart Penetration Test* (SPT). Pengujian tersebut dilakukan pada 4 titik bor. Dari 4 titik bor tersebut didapatkan rerata NSPT dan dibuat *design line* seperti Tabel 4.1 dan *design line* seperti Gambar 4.5 berikut.

**Tabel 4.1 Nilai NSPT**

| Kedalaman     | Jenis Tanah          | N-SPT |
|---------------|----------------------|-------|
| 0,00 – 1,00   | Tanah urukan         |       |
| 1,00 – 13,00  | Lempung sangat lunak | <1    |
| 13,00 – 15,50 | Lempung lunak        | 3     |
| 15,00 – 18,00 | Lempung kaku         | 9     |
| 20,50 – 23,00 | Lempung sangat kaku  | 17    |
| 23,00 – 25,50 | Lempung keras        | 35    |
| 25,50 – 35,50 | Lempung sangat kaku  | 24    |
| 35,50 – 38,00 | Pasir padat          | 51    |
| 38,00 – 40,50 | Pasir sangat padat   | 60    |



**Gambar 4.5 *Design Line***

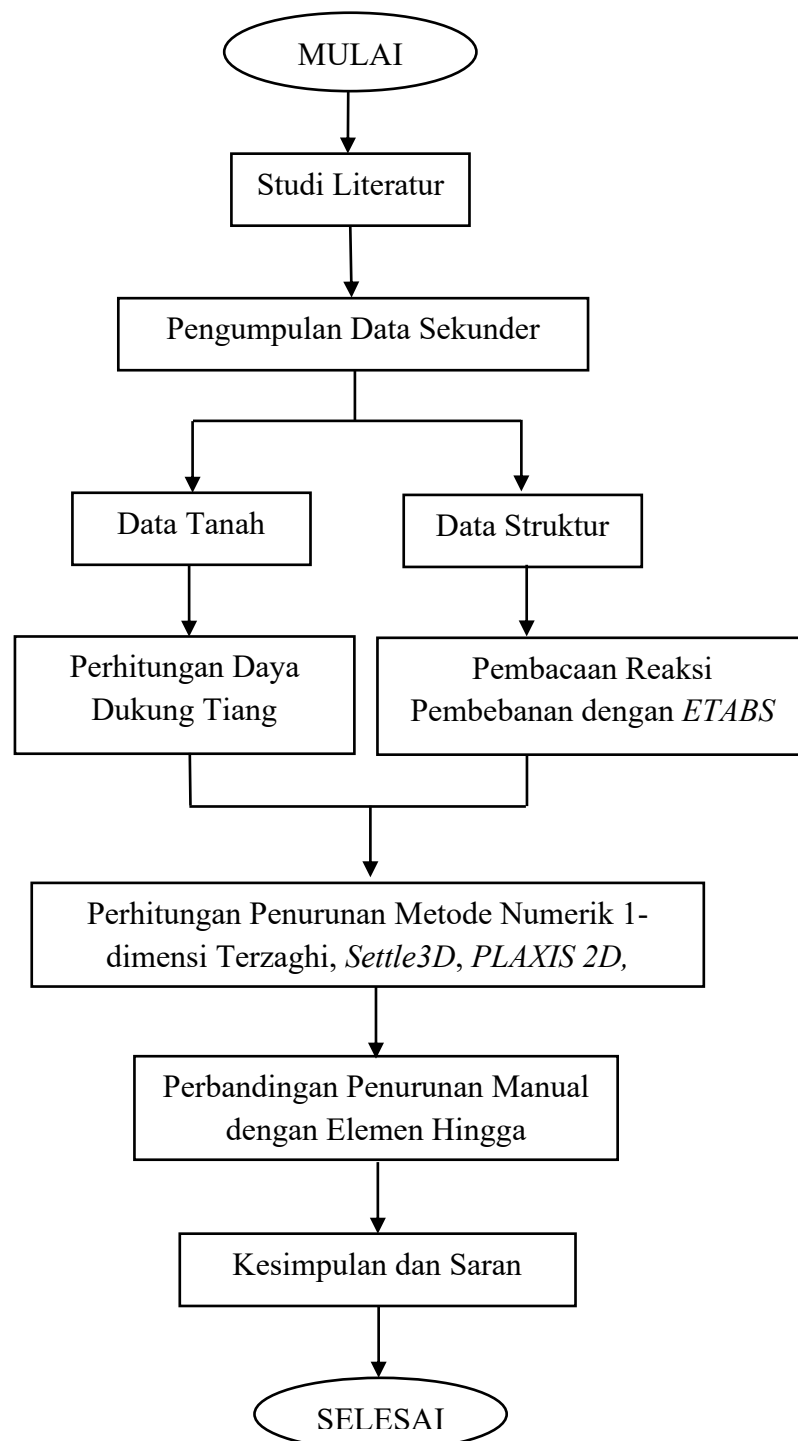
#### 4.4 Tahap Analisis

Dalam penelitian ini proses penelitian dibagi dalam beberapa tahapan, diantaranya adalah sebagai berikut.

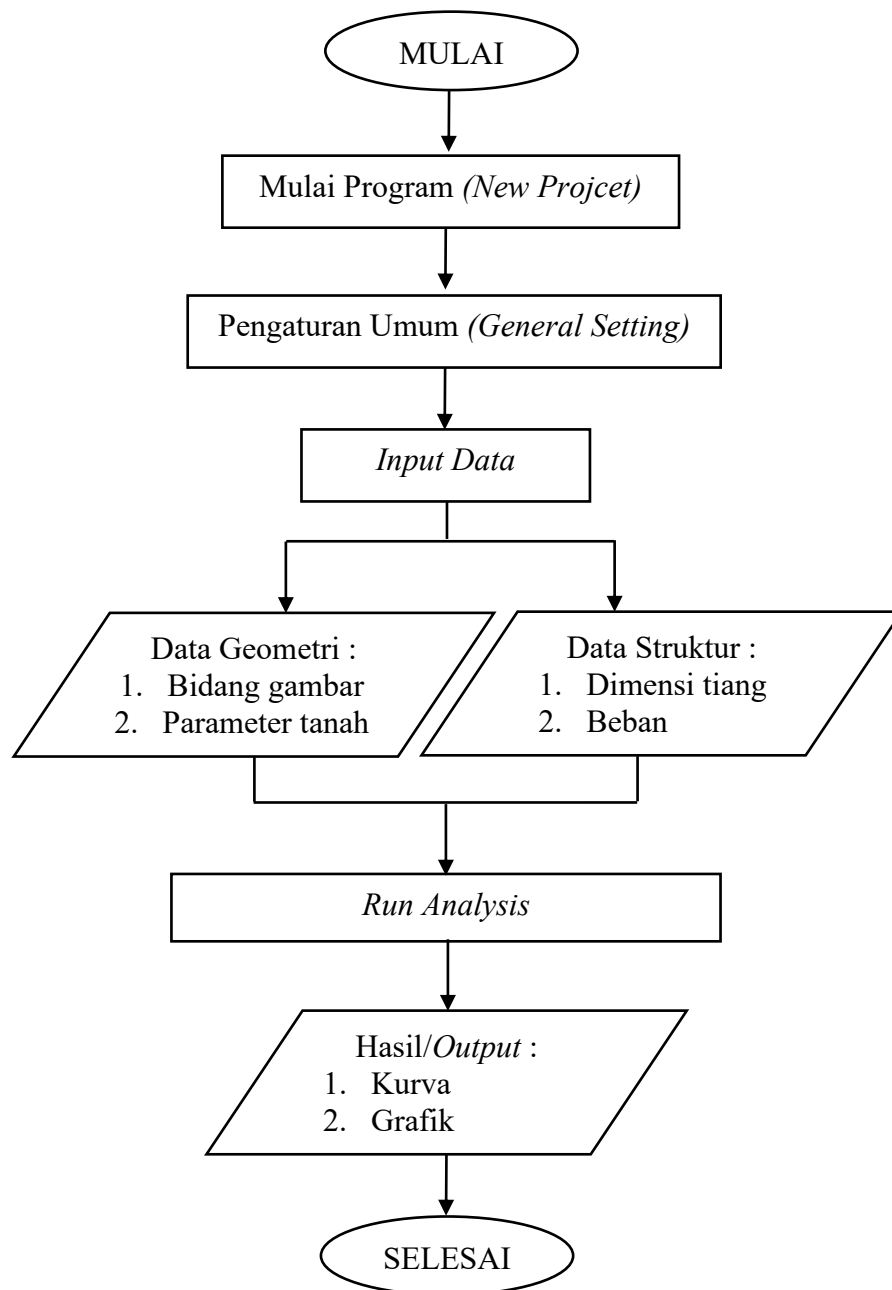
1. Tahap pengumpulan data, meliputi laporan perhitungan struktur atas dan laporan penyelidikan tanah yang didapatkan dari konsultan perencana pembangunan proyek Gedung Tower Pendidikan Surabaya.
2. Tahap analisis dan pengolahan data yang telah diperoleh, analisis daya dukung tiang pancang digunakan metode Decourt (1995), dan untuk analisis penurunan tiang pancang digunakan metode numerik 1-dimensi Terzaghi dan *Settle3D* yang selanjutnya dibandingkan hasilnya dengan menggunakan *software PLAXIS 2D*.
3. Tahapan penulisan dan penarikan kesimpulan  
Tahapan ini meliputi penulisan Laporan Tugas Akhir berdasarkan hasil pengolahan data. Laporan disusun secara sistematis dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil perbandingan metode guna menentukan metode yang paling optimal untuk analisis penurunan fondasi tiang pancang.

#### 4.5 Bagan Alir Penelitian

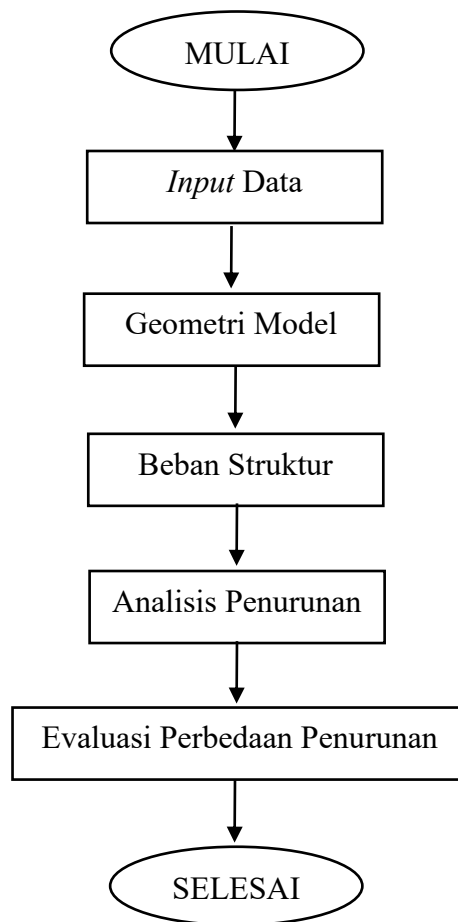
Penulis melakukan penelitian dimulai dari studi literatur hingga membuat kesimpulan. Pembuatan bagan alir dimaksudkan agar memudahkan penulis dalam melakukan penelitian dan memudahkan pembaca untuk memahami. Diagram alir tersebut menggambarkan tahapan yang dilakukan. Adapun diagram alir penelitian, diagram alir menggunakan *PLAXIS 2D*, dan diagram alir menggunakan *Settle3D* ditunjukkan pada Gambar 4.6 sampai Gambar 4.8 di halaman berikutnya.



**Gambar 4.6 Bagan Alir Penelitian**



**Gambar 4.7 Bagan Alir Program *PLAXIS 2D***



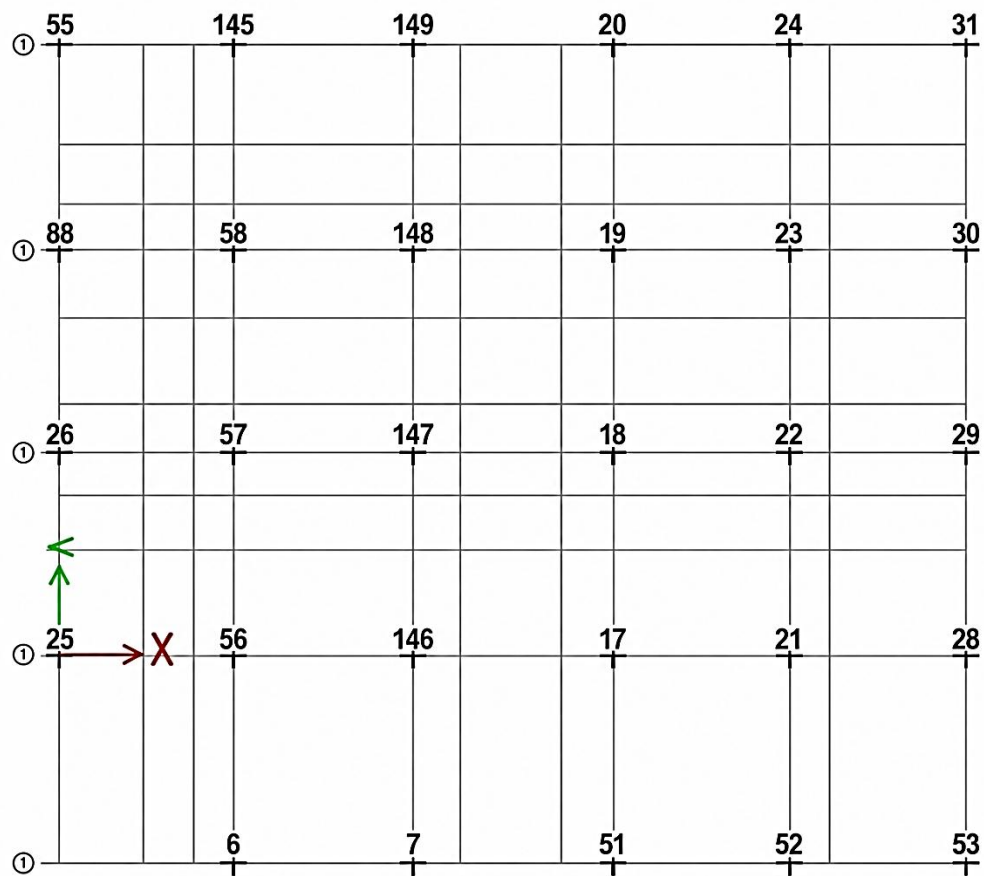
**Gambar 4.8 Digram Alir Program *Settle3D***

## BAB V

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Pembacaan Reaksi Beban Fondasi

Pembacaan reaksi beban fondasi dilakukan berdasarkan data hasil analisis struktur dari konsultan perencana. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengetahui besarnya beban yang bekerja pada setiap titik tumpuan, sehingga dapat dilakukan analisis perhitungan penurunan fondasi. Setiap tumpuan memiliki kode untuk memudahkan identifikasi lokasi fondasi yang akan ditinjau. Kode tumpuan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



**Gambar 5.1 Kode Tumpuan yang Ditinjau**

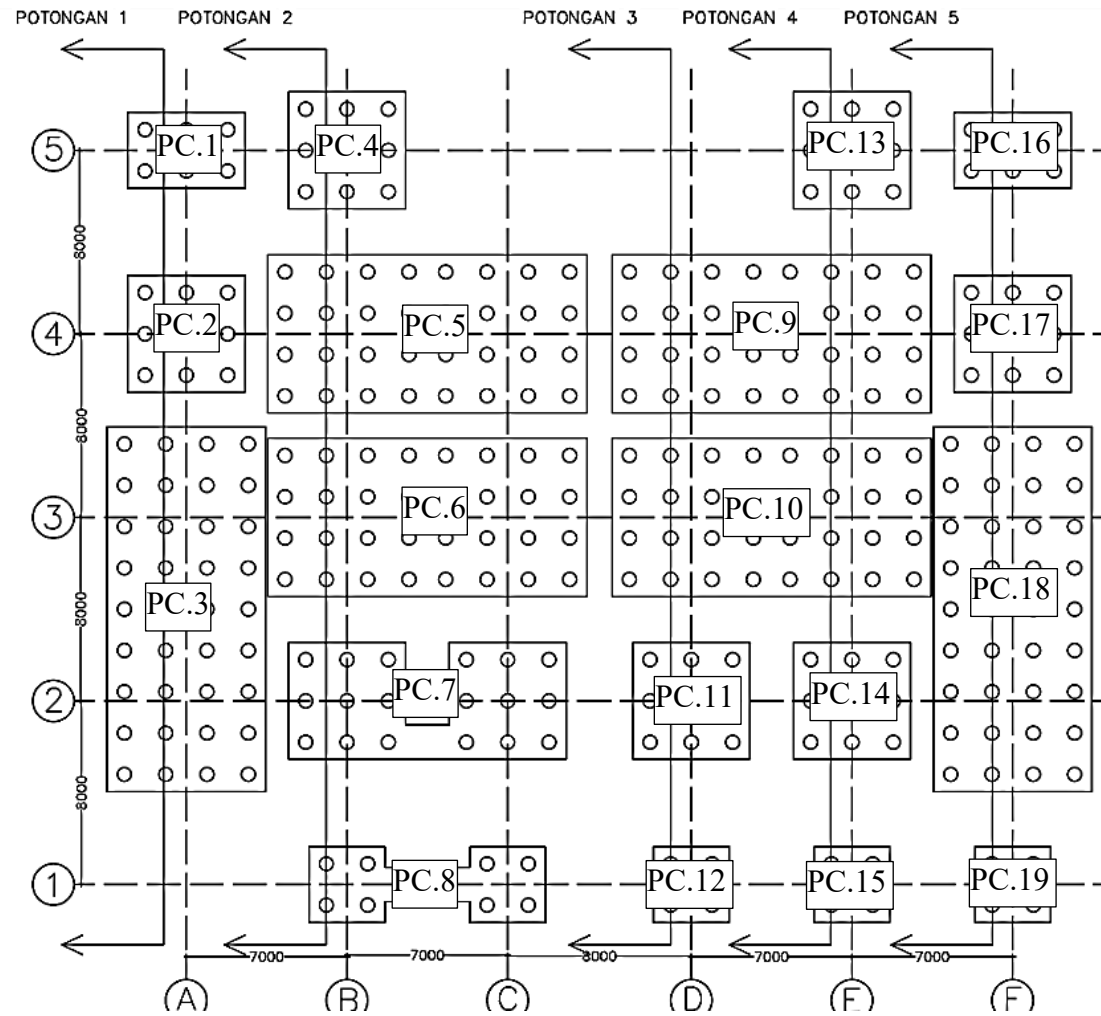
Tumpuan yang digunakan sebagai hasil analisis adalah tumpuan dengan beban aksial terbesar. *Output* gaya-gaya aksial pada setiap tumpuan dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

**Tabel 5.1 *Output* Gaya-Gaya Aksial**

| <b>Kode</b> | <b>Beban (kN)</b> |
|-------------|-------------------|
| 55          | 5331,7072         |
| 88          | 7389,7346         |
| 26          | 26385,1871        |
| 25          | 26278,2121        |
| 145         | 7751,8477         |
| 58          | 12536,7632        |
| 57          | 11348,6760        |
| 56          | 7359,8194         |
| 6           | 576,2891          |
| 148         | 12583,9254        |
| 147         | 11225,2585        |
| 146         | 7589,3386         |
| 7           | 987,1406          |
| 19          | 12459,1194        |
| 18          | 11292,6687        |
| 17          | 7674,7406         |
| 51          | 969,6330          |
| 24          | 7738,8131         |
| 23          | 12328,3228        |
| 22          | 11437,6031        |
| 21          | 7787,4727         |
| 52          | 922,5030          |
| 31          | 5322,4916         |
| 30          | 7319,3230         |
| 29          | 26249,6500        |
| 28          | 26179,9332        |
| 53          | 594,2202          |

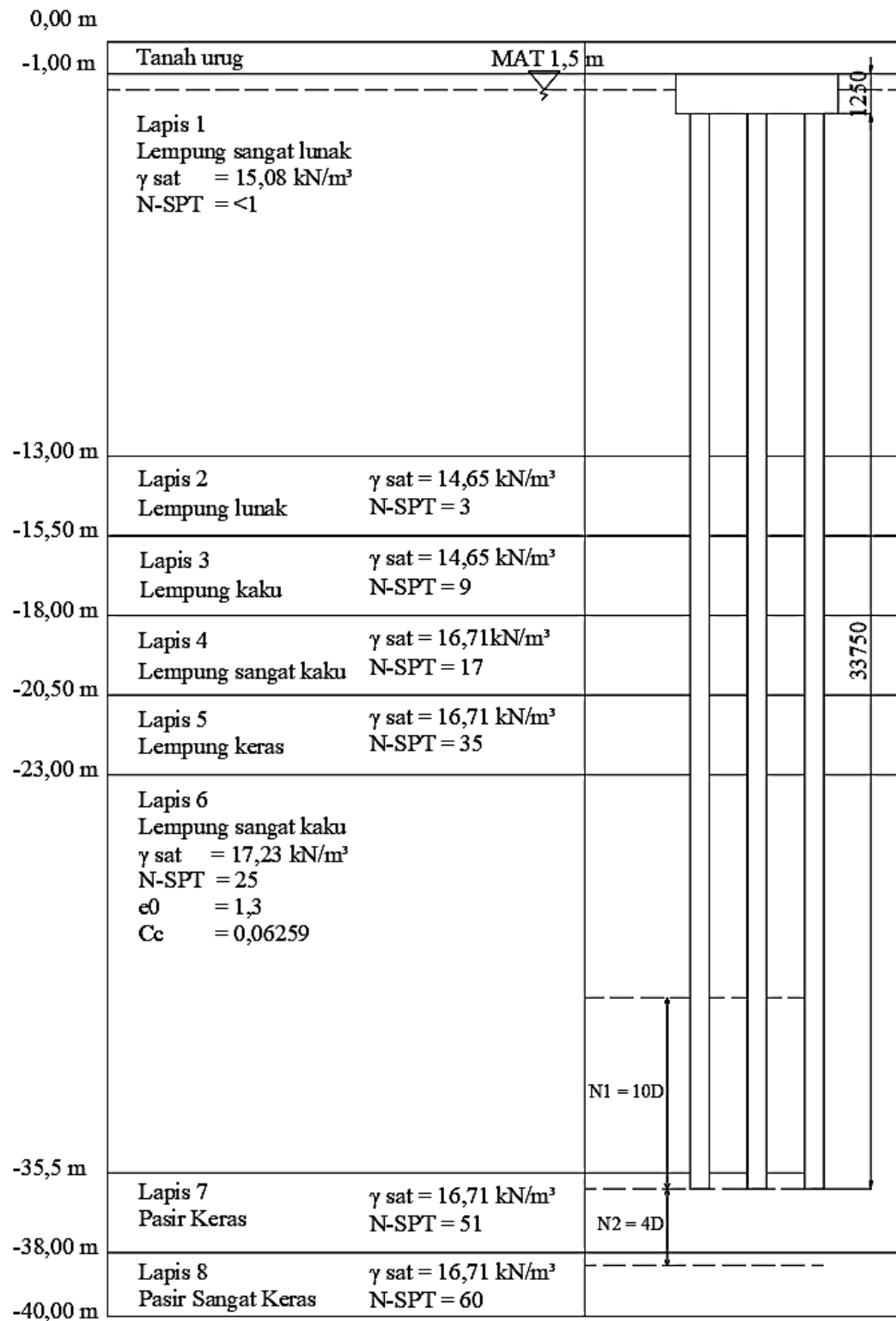
## 5.2 Fondasi

Dalam melakukan analisis penurunan digunakan beban aksial yang telah diperoleh dari *output ETABS* pada Tabel 5.1. Denah kode fondasi yang ditinjau dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



**Gambar 5.2 Denah Kode Fondasi yang Ditinjau**

Susunan lapisan tanah dan rencana kedalaman fondasi tiang berdasarkan data N-SPT dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut



Gambar 5.3 Model Fondasi *Pile cap 2*

### 5.3 Analisis Numerik 1-Dimensi

Analisis numerik 1-dimensi pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui besarnya penurunan fondasi berdasarkan kondisi lapisan tanah dan beban yang bekerja. Perhitungan dilakukan dengan dua metode, yaitu metode 1-dimensi Terzaghi dan analisis menggunakan perangkat lunak *Settle3D*.

Melalui dua pendekatan ini, hasil penurunan fondasi tidak hanya dapat dibandingkan, tetapi juga dapat saling diverifikasi untuk memastikan bahwa nilai penurunan yang diperoleh masih logis dan sesuai dengan kondisi tanah di lapangan.

#### 5.3.1 Analisis Numerik 1-Dimensi Terzaghi

##### 1. Perhitungan Daya Dukung

Perhitungan daya dukung fondasi tiang pancang dihitung menggunakan metode Decourt (1995)

##### i. Menghitung daya dukung ujung tiang ( $Q_p$ )

$$\text{diameter (D)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{luas penampang tiang (A}_p\text{)} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,6^2 \\ &= 0,2827 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N-SPT rata-rata di atas 10D (N}_1\text{)} &= \frac{\text{N-SPT(1)} + \text{N-SPT(2)} + \text{N-SPT(3)}}{3} \\ &= \frac{26 + 25 + 24}{3} \\ &= 25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N-SPT rata-rata di bawah 4D (N}_2\text{)} &= \frac{\text{N-SPT(4)}}{1} \\ &= \frac{51}{1} \\ &= 51 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{N-SPT rata-rata (N}_b\text{)} &= \frac{N_1 + N_2}{2} \\ &= \frac{25 + 51}{2} \\ &= 38 \end{aligned}$$

$$K_b = 0,325$$

$$\text{daya dukung ujung (Q}_p\text{)} = \frac{A_p \times N_b \times K_b \times 1000}{SF} \quad (\text{Persamaan 3.1})$$

$$= \frac{0,2827 \times 38 \times 0,325 \times 1000}{3}$$

$$= 1163,96 \text{ kN}$$

ii. Menghitung tahanan selimut tiang ( $Q_s$ )

1) Lapisan 1 (kedalaman 2,25 m – 13 m)

jenis tanah = lempung sangat lunak

$\alpha$  = 1

tebal lapisan ( $L_i$ ) = 10,75 m

N rata-rata lapisan 1 = 1

diameter tiang (D) = 0,6 m

keliling tiang (p) =  $\pi \times D$

$$= \pi \times 0,6$$

$$= 1,8849 \text{ m}$$

tahanan selimut ( $Q_{s1}$ ) =  $\frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF}$  (Persamaan 3.2)

$$= \frac{1(2,8 \times 1 + 10) \times 10,75 \times 1,8849}{3}$$

$$= 86,4566 \text{ kN}$$

2) Lapisan 2 (kedalaman 13 m – 15,5 m)

jenis tanah = lempung lunak

$\alpha$  = 1

tebal lapisan ( $L_i$ ) = 2,5 m

N rata-rata lapisan 1 = 3

diameter tiang (D) = 0,6 m

keliling tiang (p) =  $\pi \times D$

$$= \pi \times 0,6$$

$$= 1,8849 \text{ m}$$

tahanan selimut ( $Q_{s2}$ ) =  $\frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF}$  (Persamaan 3.2)

$$= \frac{1(2,8 \times 3 + 10) \times 2,5 \times 1,8849}{3}$$

$$= 27,8031 \text{ kN}$$

3) Lapisan 3 (kedalaman 15,5 m – 18 m)

jenis tanah = lempung kaku

$$\begin{aligned}
 \alpha &= 1 \\
 \text{tebal lapisan (L}_i\text{)} &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{N rata-rata lapisan 1} &= 9 \\
 \text{diameter (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,8849 \text{ m} \\
 \text{tahanan selimut (Q}_{s3}\text{)} &= \frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF} & \text{(Persamaan 3.2)} \\
 &= \frac{1(2,8 \times 9 + 10) \times 2,5 \times 1,8849}{3} \\
 &= 54,1925 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4) Lapisan 4 (kedalaman 18 m – 20,5 m)

$$\begin{aligned}
 \text{jenis tanah} &= \text{lempung sangat kaku} \\
 \alpha &= 1 \\
 \text{tebal lapisan (L}_i\text{)} &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{N rata-rata lapisan 1} &= 17 \\
 \text{diameter (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,8849 \text{ m} \\
 \text{tahanan selimut (Q}_{s4}\text{)} &= \frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF} & \text{(Persamaan 3.2)} \\
 &= \frac{1(2,8 \times 17 + 10) \times 2,5 \times 1,8849}{3} \\
 &= 90,4779 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5) Lapisan 5 (kedalaman 20,5 m – 23 m)

$$\begin{aligned}
 \text{jenis tanah} &= \text{lempung keras} \\
 \alpha &= 35 \\
 \text{tebal lapisan (L}_i\text{)} &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{N rata-rata lapisan 1} &= 35 \\
 \text{diameter (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,8849 \text{ m} \\
 \text{tahanan selimut (Q}_{s5}\text{)} &= \frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF} \quad (\text{Persamaan 3.2}) \\
 &= \frac{1(2,8 \times 35 + 10) \times 2,5 \times 1,8849}{3} \\
 &= 170,746 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

6) Lapisan 6 (kedalaman 23 m – 35,5 m)

$$\begin{aligned}
 \text{jenis tanah} &= \text{lempung sangat kaku} \\
 \alpha &= 1 \\
 \text{tebal lapisan (L}_i\text{)} &= 12,5 \text{ m} \\
 \text{N rata-rata lapisan 1} &= 25 \\
 \text{diameter (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,8849 \text{ m} \\
 \text{tahanan selimut (Q}_{s6}\text{)} &= \frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF} \quad (\text{Persamaan 3.2}) \\
 &= \frac{1(2,8 \times 25 + 10) \times 12,5 \times 1,8849}{3} \\
 &= 617,323 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

7) Lapisan 7 (kedalaman 35,5 m – 36 m)

$$\begin{aligned}
 \text{jenis tanah} &= \text{pasir keras} \\
 \alpha &= 0,55 \\
 \text{tebal lapisan (L}_i\text{)} &= 0,5 \text{ m} \\
 \text{N rata-rata lapisan 1} &= 51 \\
 \text{diameter (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,8849 \text{ m} \\
 \text{tahanan selimut (Q}_{s7}\text{)} &= \frac{\alpha(2,8N_s+10) \times L \times p}{SF} \quad (\text{Persamaan 3.2}) \\
 &= \frac{0,55(2,8 \times 51 + 10) \times 0,5 \times 1,8849}{3} \\
 &= 26,2407 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

8)  $Q_s$  Total

$$\begin{aligned}
 \text{tahanan selimut } (Q_{s \text{ total}}) &= Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + Q_{s4} + Q_{s5} + Q_{s6} + Q_{s7} \\
 &= 86,4566 + 27,8031 + 54,1925 + 90,4779 \\
 &\quad + 170,746 + 617,323 + 26,2407 \\
 &= 1073,239 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

## 2. Perhitungan Daya Dukung Izin Tiang

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{izin}} &= Q_p + Q_s \\
 &= 1163,96 + 1073,239 \\
 &= 2237,199 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

## 3. Perhitungan Penurunan Elastis Tiang Tunggal

Perhitungan penurunan elastis tiang tunggal dihitung menggunakan metode Vesic (1977)

## a. Penurunan elastis tiang

$$\text{diameter tiang } (D) = 0,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 \text{luas penampang tiang } (A_p) &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,6^2 \\
 &= 0,2827 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$\text{mutu beton tiang} = 42 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}
 \text{modulus elastis bahan tiang } (E_p) &= 4700 \times \sqrt{f_c} \\
 &= 4700 \times \sqrt{42} \\
 &= 30459,4813 \text{ Mpa} \\
 &= 30459481,28 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\text{kapasitas dukung ujung } (Q_{wp}) = 1163,96 \text{ kN}$$

$$\text{faktor empiris } (\xi) = 0,67$$

$$\text{kapasitas dukung selimut } (Q_{ws}) = 1073,239 \text{ kN}$$

$$\text{panjang tiang } (L) = 33,75 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 S_{e(1)} &= \frac{(Q_{wp} + \xi \times Q_{ws}) \times L}{A_p \times E_p} \quad (\text{Persamaan 3.4}) \\
 &= \frac{(1163,96 + 0,67 \times 1073,239) \times 33,75}{0,2827 \times 30459481,28} \\
 &= 0,0073 \text{ m}
 \end{aligned}$$

## b. Penurunan tiang karena beban pada ujung fondasi

$$\text{diameter tiang (D)} = 0,6 \text{ m}$$

$$Q_{wp} = 1163,96 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{luas penampang tiang (A}_p) &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,6^2 \\ &= 0,2827 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{beban titik per satuan luas (q}_{wp}) &= \frac{Q_{wp}}{A_p} \\ &= \frac{1163,96}{0,2827} \\ &= 4116,6667 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{modulus elastis tanah (E}_s) = 50.000 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{poisson rasio tanah } (\mu) = 0,4$$

$$\text{faktor pengaruh (I}_{wp}) = 0,85$$

$$\begin{aligned} Se_{(2)} &= \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu^2) \times I_{wp} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\ &= \frac{4116,667 \times 0,6}{50.000} (1 - 0,4^2) \times 0,85 \\ &= 0,0353 \text{ m} \end{aligned}$$

## c. Penurunan tiang karena beban pada selimut tiang

## 1) Lapisan 1 (kedalaman 2,25 m – 13 m)

$$\text{tahanan selimut (Q}_{ws1}) = 86,4566 \text{ kN}$$

$$\text{tebal lapisan (L}_i) = 10,75 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (D)} = 0,6$$

$$\text{poisson rasio tanah } (\mu) = 0,15$$

$$\text{modulus elastis tanah (E}_s) = 3.000 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\ &= \pi \times 0,6 \\ &= 1,884 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\ &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{10,75}{0,6}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,4814 \\
 Se_{(3)1} &= \left( \frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\
 &= \left( \frac{86,4566}{1,884 \times 10,75} \right) \frac{0,6}{3.000} (1-0,15^2) \times 3,4814 \\
 &= 0,00290 \text{ m}
 \end{aligned}$$

2) Lapisan 2 (kedalaman 13 m – 15,5 m)

$$\begin{aligned}
 \text{tanahan selimut } (Q_{ws2}) &= 27,8031 \text{ kN} \\
 \text{tebal lapisan } (L_i) &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{diameter tiang } (D) &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{poisson rasio tanah } (\mu) &= 0,2 \\
 \text{modulus elastis tanah } (E_s) &= 7.000 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{keliling tiang } (p) &= \pi \times D \\
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,884 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{faktor pengaruh} &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\
 &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{2,5}{0,6}} \\
 &= 2,7144
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Se_{(3)2} &= \left( \frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\
 &= \left( \frac{27,8031}{1,884 \times 2,5} \right) \frac{0,6}{7.000} (1-0,2^2) \times 2,7144 \\
 &= 0,00132 \text{ m}
 \end{aligned}$$

3) Lapisan 3 (kedalaman 15,5 m – 18 m)

$$\begin{aligned}
 \text{tanahan selimut } (Q_{ws3}) &= 54,1924 \text{ kN} \\
 \text{tebal lapisan } (L_i) &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{diameter tiang } (D) &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{poisson rasio tanah } (\mu) &= 0,3 \\
 \text{modulus elastis tanah } (E_s) &= 25.000 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{keliling tiang } (p) &= \pi \times D \\
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,884 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\
 &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{2,5}{0,6}} \\
 &= 2,7144 \\
 \text{Se}_{(3)3} &= \left( \frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\
 &= \left( \frac{54,1924}{1,884 \times 2,5} \right) \frac{0,6}{25.000} (1-0,3^2) \times 2,7144 \\
 &= 0,00068 \text{ m}
 \end{aligned}$$

4) Lapisan 4 (kedalaman 18 m – 20,5 m)

$$\begin{aligned}
 \text{tanahan selimut (Q}_{ws4}) &= 90,4779 \text{ kN} \\
 \text{tebal lapisan (L}_i) &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{diameter tiang (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{poisson rasio tanah } (\mu) &= 0,4 \\
 \text{modulus elastis tanah (E}_s) &= 50.000 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\
 &= \pi \times 0,6 \\
 &= 1,884 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\
 &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{2,5}{0,6}} \\
 &= 2,7144 \\
 \text{Se}_{(3)4} &= \left( \frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\
 &= \left( \frac{90,4779}{1,884 \times 2,5} \right) \frac{0,6}{50.000} (1-0,4^2) \times 2,7144 \\
 &= 0,00053 \text{ m}
 \end{aligned}$$

5) Lapisan 5 (kedalaman 20,5 m – 23 m)

$$\begin{aligned}
 \text{tanahan selimut (Q}_{ws5}) &= 170,746 \text{ kN} \\
 \text{tebal lapisan (L}_i) &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{diameter tiang (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{poisson rasio tanah } (\mu) &= 0,5
 \end{aligned}$$

$$\text{modulus elastis tanah (Es)} = 80.000 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}\text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\ &= \pi \times 0,6 \\ &= 1,884 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\ &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{2,5}{0,6}} \\ &= 2,7144\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Se_{(3)5} &= \left(\frac{Q_{ws}}{p L}\right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\ &= \left(\frac{170,746}{1,884 \times 2,5}\right) \frac{2,5}{80.000} (1-0,5^2) \times 2,7144 \\ &= 0,00055 \text{ m}\end{aligned}$$

6) Lapisan 6 (kedalaman 23 m – 35,5 m)

$$\text{tanahan selimut (Q}_{ws6}) = 617,323 \text{ kN}$$

$$\text{tebal lapisan (L}_i) = 12,5 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (D)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{poisson rasio tanah } (\mu) = 0,4$$

$$\text{modulus elastis tanah (Es)} = 50.000 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}\text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\ &= \pi \times 0,6 \\ &= 1,884 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\ &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{12,5}{0,6}} \\ &= 3,5975\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Se_{(3)6} &= \left(\frac{Q_{ws}}{p L}\right) \frac{D}{E_s} (1-\mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\ &= \left(\frac{617,323}{1,884 \times 12,5}\right) \frac{0,6}{50.000} (1-0,4^2) \times 3,5975 \\ &= 0,00095\end{aligned}$$

7) Lapisan 7 (kedalaaman 35,5 m – 36 m)

$$\text{tahanan selimut (Q}_{ws7}) = 26,2407 \text{ kN}$$

$$\text{tebal lapisan (L}_i) = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (D)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{poisson rasio tanah } (\mu) = 0,45$$

$$\text{modulus elastis tanah (E}_s) = 50.000 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{keliling tiang (p)} &= \pi \times D \\ &= \pi \times 0,6 \\ &= 1,884 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{faktor pengaruh (I}_{ws}) &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{D}} \\ &= 2 + 0,35 \sqrt{\frac{0,5}{0,6}} \\ &= 2,3195 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Se}_{(3)7} &= \left( \frac{Q_{ws}}{p L} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu^2) \times I_{ws} \quad (\text{Persamaan 3.5}) \\ &= \left( \frac{26,2407}{1,884 \times 0,5} \right) \frac{0,6}{50.000} (1 - 0,45^2) \times 2,3195 \\ &= 0,00062 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8) \text{ Se}_{(3)} &= \text{Se}_{(3)1} + \text{Se}_{(3)2} + \text{Se}_{(3)3} + \text{Se}_{(3)4} + \text{Se}_{(3)5} + \text{Se}_{(3)6} \\ &\quad + \text{Se}_{(3)7} \\ &= 0,00290 + 0,00132 + 0,00068 + 0,00053 \\ &\quad + 0,00055 + 0,00095 + 0,00062 \\ &= 0,00755 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 9) Penurunan elastis tiang

$$\text{Se}_{(1)} = 0,0073 \text{ m}$$

$$\text{Se}_{(2)} = 0,0335 \text{ m}$$

$$\text{Se}_{(3)} = 0,0075 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Se} &= \text{Se}_{(1)} + \text{Se}_{(2)} + \text{Se}_{(3)} \quad (\text{Persamaan 3.3}) \\ &= 0,0073 + 0,0335 + 0,0075 \\ &= 0,0484 \text{ m} \\ &= 48,4166 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### 4. Perhitungan Penurunan Elastis Kelompok Tiang

Penurunan elastis kelompok tiang umumnya lebih besar daripada tiang tunggal karena dipengaruhi oleh tegangan pada daerah yang lebih luas. Perhitungan penurunan elastis kelompok tiang dihitung menggunakan metode Vesic (1977)

a. *Pile cap 1*

$$\text{penurunan elastis (Se)} = 0,0484 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (d)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{lebar kelompok tiang PC.1 (Bg)} = 3,3 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} S_g \text{ PC.1} &= Se \times \sqrt{\frac{Bg}{D}} && \text{(Persamaan 3.6)} \\ &= 0,0484 \times \sqrt{\frac{3,3}{0,6}} \\ &= 0,1135 \text{ m} \\ &= 113,5471 \text{ mm} \end{aligned}$$

b. *Pile cap 2*

$$\text{penurunan elastis (Se)} = 0,0484 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (d)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{lebar kelompok tiang PC.2 (Bg)} = 5,1 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} S_g \text{ PC.2} &= Se \times \sqrt{\frac{Bg}{D}} && \text{(Persamaan 3.6)} \\ &= 0,0484 \times \sqrt{\frac{5,1}{0,6}} \\ &= 0,1411 \text{ m} \\ &= 141,1576 \text{ mm} \end{aligned}$$

c. *Pile cap 3*

$$\text{penurunan elastis (Se)} = 0,0484 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (d)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{lebar kelompok tiang PC.3 (Bg)} = 6,9 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} S_g \text{ PC.3} &= Se \times \sqrt{\frac{Bg}{D}} && \text{(Persamaan 3.6)} \\ &= 0,0484 \times \sqrt{\frac{6,9}{0,6}} \end{aligned}$$

$$= 0,1641 \text{ m}$$

$$= 164,1888 \text{ mm}$$

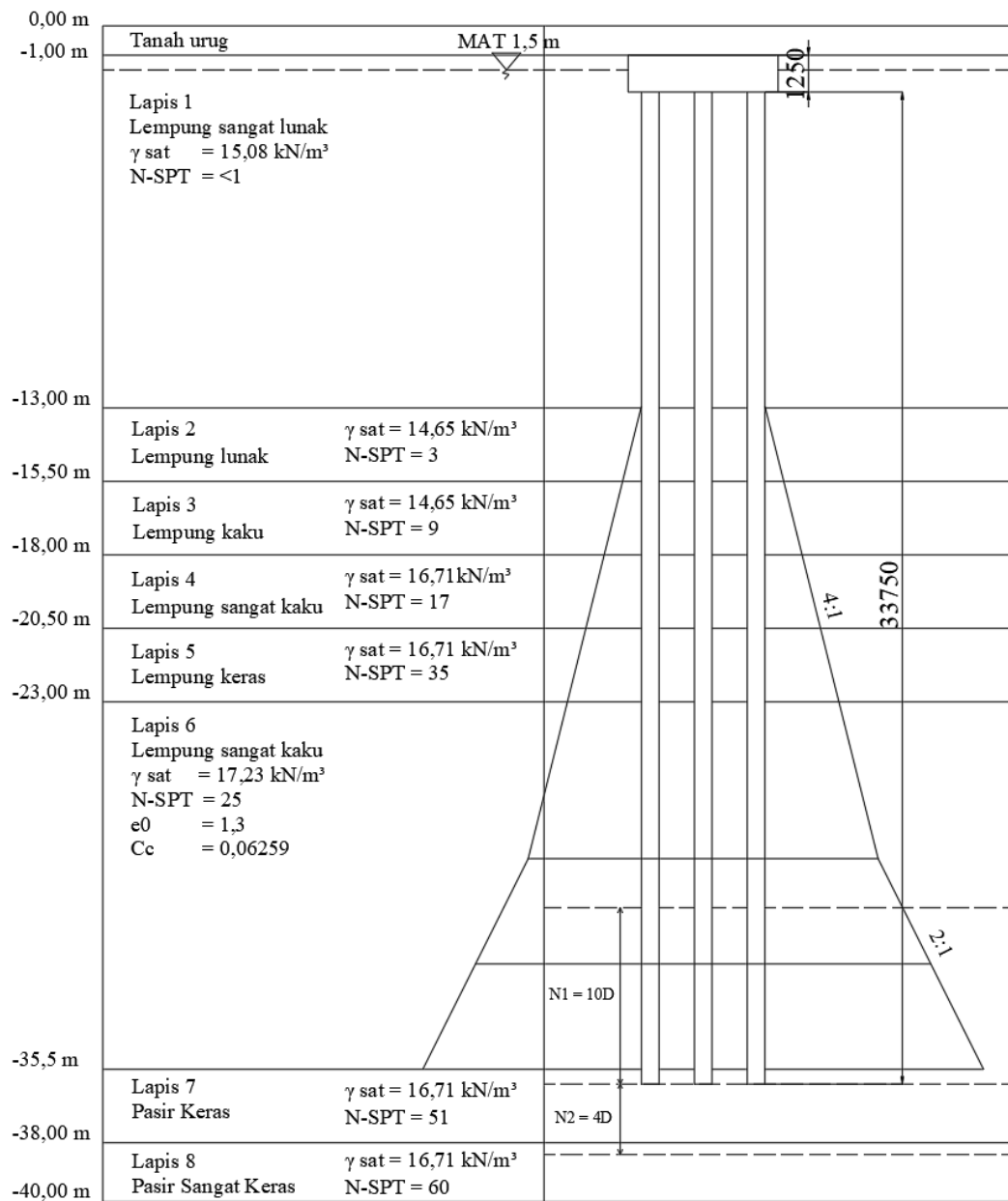
Rekapitulasi perhitungan penurunan elastis kelompok tiang dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

**Tabel 5.2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Penurunan Elastis Kelompok Tiang**

| Kode  | Lg   | Bg  | Sg (mm)  |
|-------|------|-----|----------|
| PC.1  | 5,1  | 3,3 | 113,5471 |
| PC.2  | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.3  | 15,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.4  | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.5  | 13,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.6  | 13,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.7  | 12,1 | 5,1 | 141,1576 |
| PC.8  | 10,3 | 3,3 | 113,5471 |
| PC.9  | 13,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.10 | 13,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.11 | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.12 | 3,3  | 3,3 | 113,5471 |
| PC.13 | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.14 | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.15 | 3,3  | 3,3 | 113,5471 |
| PC.16 | 5,1  | 3,3 | 113,5471 |
| PC.17 | 5,1  | 5,1 | 141,1576 |
| PC.18 | 15,9 | 6,9 | 164,1888 |
| PC.19 | 3,3  | 3,3 | 113,5471 |

##### 5. Perhitungan Penurunan Konsolidasi

Berdasarkan Gambar 3.4 distribusi tegangan pada fondasi kelompok tiang, karena pengalihan beban kerja pada kedalaman  $2/3L$  dibawah *pilecap* itu berada pada lapisan tanah lempung sangat lunak, maka perlu diperhitungkan penurunan konsolidasinya setelah lapisan tanah lempung lunak. Berikut ini merupakan mekanisme penyebaran beban pada kelompok tiang dapat dilihat pada Gambar 5.4



**Gambar 5.4 Mekanisme Penyebaran Beban Kelompok Tiang**

- a. *Pile cap* 1 (lapisan konsolidasi yang ditinjau 26,08 m – 33,25 m)
- beban aksial (P) = Kode 55 (Tabel 5.1)  
= 2632,78 kN
- panjang tiang (L) = 33,75 m
- diameter tiang (D) = 0,6 m
- panjang *pile cap* ( $L_g$ ) = 5,1 m

$$\begin{aligned}
\text{lebar } \textit{pile cap} (B_g) &= 3,3 \text{ m} \\
\text{panjang dari tiang ke tiang } (L_g \text{ bersih}) &= 4,2 \text{ m} \\
\text{lebar dari tiang ke tiang } (B_g \text{ bersih}) &= 2,4 \text{ m} \\
\text{tinggi tanah lunak } (H_1) &= 10,75 \text{ m} \\
\text{tinggi yang ditinjau } (2/3L) &= \frac{2}{3} \times (L - H_1) \\
&= \frac{2}{3} \times (33,75 - 10,75) \\
&= 15,33 \text{ m} \\
L_{g'} &= L_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right) \\
&= 4,2 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right) \\
&= 11,8667 \text{ m} \\
B_{g'} &= B_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right) \\
&= 2,4 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right) \\
&= 10,0667 \text{ m}
\end{aligned}$$

1) Tekanan di tengah-tengah lapisan tanah (kedalaman 26,08 – 33,25)

1. *top* ( $z = 0 \text{ m}$ )

$$\begin{aligned}
L_{g' \text{ top}} &= L_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right) \\
&= 11,8667 + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times 0 \right) \\
&= 11,8667 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{g' \text{ top}} &= B_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right) \\
&= 10,0667 + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times 0 \right) \\
&= 10,0667 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{top}} &= \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}} \\
&= \frac{2632,76}{11,8667 \times 10,0667} \\
&= 22,0394 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

2. *Middle* ( $z = 3,5833 \text{ m}$ )

$$L_{g' \text{ middle}} = L_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right)$$

$$= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right)$$

$$= 15,45 \text{ m}$$

$$B_{g' \text{ middle}} = B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 10,0667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right)$$

$$= 13,65 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\text{middle}} = \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}}$$

$$= \frac{2632,76}{15,45 \times 13,65}$$

$$= 12,4839 \text{ kN/m}^2$$

### 3. *bottom* ( $z = 7,17 \text{ m}$ )

$$L_{g' \text{ bottom}} = L_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right)$$

$$= 19,0333 \text{ m}$$

$$B_{g' \text{ bottom}} = B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 10,0667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right)$$

$$= 17,2333 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\text{bottom}} = \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}}$$

$$= \frac{2632,76}{19,0333 \times 17,2333}$$

$$= 8,0265 \text{ kN/m}^2$$

$$4. \Delta P = 1/6 \times (\Delta P_{\text{top}} + 4 \Delta P_{\text{middle}} + \Delta P_{\text{bottom}}) \quad (3.7)$$

$$= 1/6 \times (22,0394 + 4 \times 12,4839 + 8,0265)$$

$$= 13,33366 \text{ kN/m}^2$$

### 2) Tekanan efektif awal akibat berat tanah di atasnya

$$\text{muka air tanah (MAT)} = 1,5 \text{ m} \quad (\text{Gambar 5.4})$$

$$\gamma_{\text{air}} = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$$P_0 = 1,5 \times 17,235 + 10,75 \times (15,08 - 9,81) + 5 \times (14,65 - 9,81) + 5 \times (16,71 - 9,81) + 12,5 (17,235 - 9,81)$$

$$= 234,0898 \text{ kN/m}^2$$

### 3) Konsolidasi primer

$$e_0 = 1,3$$

$$C_c = 0,06259$$

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H_{\log} \frac{\Delta P + P_0}{P_0} \quad (\text{Persamaan 3.8})$$

$$= \frac{0,06259}{1+1,3} 7,17 \log \frac{13,3336 + 234,0898}{234,0898}$$

$$= 0,0092465 \text{ m}$$

$$= 9,2465 \text{ mm}$$

#### b. *Pile cap* 2 (lapisan konsolidasi yang ditinjau 26,08 m – 33,25 m)

$$\text{beban aksial (P)} = \text{Kode 88 (Tabel 5.1)}$$

$$= 4927,002 \text{ kN}$$

$$\text{panjang tiang (L)} = 33,75 \text{ m}$$

$$\text{diameter tiang (D)} = 0,6 \text{ m}$$

$$\text{panjang } \textit{pile cap} (L_g) = 5,1 \text{ m}$$

$$\text{lebar } \textit{pile cap} (B_g) = 5,1 \text{ m}$$

$$\text{panjang dari tiang ke tiang (L}_g \text{ bersih)} = 4,2 \text{ m}$$

$$\text{lebar dari tiang ke tiang (B}_g \text{ bersih)} = 4,2 \text{ m}$$

$$\text{tinggi tanah lunak (H}_1\text{)} = 10,75 \text{ m}$$

$$\text{tinggi yang ditinjau (2/3L)} = \frac{2}{3} \times (L - H_1)$$

$$= \frac{2}{3} \times (33,75 - 10,75)$$

$$= 15,33 \text{ m}$$

$$L_g' = L_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right)$$

$$= 4,2 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right)$$

$$= 11,8667 \text{ m}$$

$$B_g' = B_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right)$$

$$= 4,2 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right)$$

$$= 11,8667 \text{ m}$$

#### 1) Tekanan di tengah-tengah lapisan tanah (kedalaman 26,08 – 33,25)

a) *top* ( $z = 0$  m)

$$\begin{aligned} L_{g', top} &= L_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right) \\ &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 0\right) \\ &= 11,8667 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{g', top} &= B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right) \\ &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 0\right) \\ &= 11,8667 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{top} &= \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}} \\ &= \frac{4927,002}{11,8667 \times 11,8667} \\ &= 34,9884 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

b) *Middle* ( $z = 3,5833$  m)

$$\begin{aligned} L_{g', middle} &= L_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right) \\ &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right) \\ &= 15,45 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{g', middle} &= B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right) \\ &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right) \\ &= 15,45 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{middle} &= \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}} \\ &= \frac{4927,002}{15,45 \times 15,45} \\ &= 20,6407 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

c) *bottom* ( $z = 7,17$  m)

$$\begin{aligned} L_{g', bottom} &= L_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right) \\ &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right) \\ &= 19,0333 \text{ m} \end{aligned}$$

$$B_{g', bottom} = B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$\begin{aligned}
 &= 11,8667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right) \\
 &= 19,0333 \text{ m} \\
 \Delta P_{bottom} &= \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}} \\
 &= \frac{4927,002}{19,0333 + 19,0333} \\
 &= 13,6004 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{d) } \Delta P &= 1/6 \times (\Delta P_{top} + 4 \Delta P_{middle} + \Delta P_{bottom}) \quad (3.7) \\
 &= 1/6 \times (34,9884 + 4 \times 20,6407 + 13,6004) \\
 &= 21,8586 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

2) Tekanan efektif awal akibat berat tanah di atasnya

$$\begin{aligned}
 \text{muka air tanah (MAT)} &= 1,5 \text{ m} && \text{(Gambar 5.4)} \\
 \gamma_{air} &= 9,81 \text{ kN/m}^3 \\
 P_0 &= 1,5 \times 17,235 + 10,75 \times (15,08 - 9,81) + 5 \times \\
 &\quad (14,65 - 9,81) + 5 \times (16,71 - 9,81) + 12,5 \\
 &\quad (17,235 - 9,81) \\
 &= 234,0898 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

3) Konsolidasi primer

$$\begin{aligned}
 e_0 &= 1,3 \\
 C_c &= 0,06259 \\
 S_c &= \frac{C_c}{1+e_0} H_{log} \frac{\Delta P + P_0}{P_0} && \text{(Persamaan 3.8)} \\
 &= \frac{0,06259}{1+1,3} 7,17_{log} \frac{21,8586 + 234,0898}{234,0898} \\
 &= 0,01110 \text{ m} \\
 &= 11,102 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

c. *Pile cap* 3 (lapisan konsolidasi yang ditinjau 26,08 m – 33,25 m)

$$\begin{aligned}
 \text{beban aksial (P)} &= \text{Kode 26 dan Kode 25 (Tabel 5.1)} \\
 &= \frac{26278,212 + 24038,029}{2} \\
 &= 25158,1207 \text{ kN} \\
 \text{panjang tiang (L)} &= 33,75 \text{ m} \\
 \text{diameter tiang (D)} &= 0,6 \text{ m} \\
 \text{panjang } pile \text{ cap (L}_g\text{)} &= 15,9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{lebar } \textit{pile cap} (B_g) &= 6,9 \text{ m} \\
\text{panjang dari tiang ke tiang } (L_g \text{ bersih}) &= 15 \text{ m} \\
\text{lebar dari tiang ke tiang } (B_g \text{ bersih}) &= 6 \text{ m} \\
\text{tinggi tanah lunak } (H_1) &= 10,75 \text{ m} \\
\text{tinggi yang ditinjau } (2/3L) &= \frac{2}{3} \times (L - H_1) \\
&= \frac{2}{3} \times (33,75 - 10,75) \\
&= 15,33 \text{ m} \\
L_{g'} &= L_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right) \\
&= 15 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right) \\
&= 22,6667 \text{ m} \\
B_{g'} &= B_g \text{ bersih} + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times \frac{2}{3} L \right) \\
&= 6 + 2 \times \left( \frac{1}{4} \times 15,33 \right) \\
&= 13,6667 \text{ m}
\end{aligned}$$

1) Tekanan di tengah-tengah lapisan tanah (kedalaman 26,08 – 33,25)

a) *top* ( $z = 0 \text{ m}$ )

$$\begin{aligned}
L_{g' \text{ top}} &= L_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right) \\
&= 22,6667 + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times 0 \right) \\
&= 22,6667 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{g' \text{ top}} &= B_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right) \\
&= 13,6667 + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times 0 \right) \\
&= 13,6667 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{top}} &= \frac{P}{L_{g' \text{ top}} \times B_{g' \text{ top}}} \\
&= \frac{25158,12}{22,6667 \times 13,6667} \\
&= 81,2134 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

b) *Middle* ( $z = 3,5833 \text{ m}$ )

$$L_{g' \text{ middle}} = L_{g'} + 2 \times \left( \frac{1}{2} \times Z \right)$$

$$= 22,6667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right)$$

$$= 26,25 \text{ m}$$

$$B_{g' \text{ middle}} = B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 13,6667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 3,5833\right)$$

$$= 17,25 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\text{middle}} = \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}}$$

$$= \frac{25158,12}{26,25 \times 17,25}$$

$$= 55,5596 \text{ kN/m}^2$$

c) *bottom* ( $z = 7,17 \text{ m}$ )

$$L_{g' \text{ bottom}} = L_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 22,6667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right)$$

$$= 29,8333 \text{ m}$$

$$B_{g' \text{ bottom}} = B_{g'} + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times Z\right)$$

$$= 13,6667 + 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 7,17\right)$$

$$= 20,8333 \text{ m}$$

$$\Delta P_{\text{bottom}} = \frac{P}{L_{g'} \times B_{g'}}$$

$$= \frac{25158,12}{29,8333 \times 20,8333}$$

$$= 8,0265 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{d) } \Delta P = 1/6 \times (\Delta P_{\text{top}} + 4 \Delta P_{\text{middle}} + \Delta P_{\text{bottom}}) \quad (3.7)$$

$$= 1/6 \times (81,2134 + 4 \times 55,5596 + 40,4778)$$

$$= 57,3216 \text{ kN/m}^2$$

2) Tekanan efektif awal akibat berat tanah di atasnya

$$\text{muka air tanah (MAT)} = 1,5 \text{ m} \quad (\text{Gambar 5.4})$$

$$\gamma_{\text{air}} = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$$P_0 = 1,5 \times 17,235 + 10,75 \times (15,08 - 9,81) + 5 \times (14,65 - 9,81) + 5 \times (16,71 - 9,81) + 12,5 (17,235 - 9,81)$$

$$= 234,0898 \text{ kN/m}^2$$

### 3) Konsolidasi primer

$$e_0 = 1,3$$

$$C_c = 0,06259$$

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\Delta P + P_0}{P_0} \quad (\text{Persamaan 3.8})$$

$$= \frac{0,06259}{1+1,3} 7,17 \log \frac{57,3216 + 234,0898}{234,0898}$$

$$= 0,019325 \text{ m}$$

$$= 19,325 \text{ mm}$$

Rekapitulasi perhitungan penurunan konsolidasi kelompok tiang dapat dilihat pada Tabel 5.3.

**Tabel 5.3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Penurunan Konsolidasi Kelompok Tiang**

| Kode  | Beban (kN) | Lg   | Bg  | Sc (mm) |
|-------|------------|------|-----|---------|
| PC.1  | 5331,7072  | 5,1  | 3,3 | 9,2465  |
| PC.2  | 7389,7346  | 5,1  | 5,1 | 11,1018 |
| PC.3  | 26331,6996 | 15,9 | 6,9 | 19,3254 |
| PC.4  | 7751,8477  | 5,1  | 5,1 | 11,6101 |
| PC.5  | 12560,3443 | 13,9 | 6,9 | 10,5461 |
| PC.6  | 11286,9673 | 13,9 | 6,9 | 9,5348  |
| PC.7  | 7474,5790  | 12,1 | 5,1 | 7,7550  |
| PC.8  | 781,7149   | 10,3 | 3,3 | 1,0497  |
| PC.9  | 12393,7211 | 13,9 | 6,9 | 10,4144 |
| PC.10 | 11365,1359 | 13,9 | 6,9 | 9,5972  |
| PC.11 | 7674,7406  | 5,1  | 5,1 | 11,5021 |
| PC.12 | 969,6330   | 3,3  | 3,3 | 2,0053  |
| PC.13 | 7738,8131  | 5,1  | 5,1 | 11,5919 |
| PC.14 | 7787,4727  | 5,1  | 5,1 | 11,6600 |
| PC.15 | 922,5030   | 3,3  | 3,3 | 1,9089  |
| PC.16 | 5322,4916  | 5,1  | 3,3 | 9,2313  |
| PC.17 | 7319,3230  | 5,1  | 5,1 | 11,0026 |
| PC.18 | 26214,7916 | 15,9 | 6,9 | 19,2487 |
| PC.19 | 594,2202   | 3,3  | 3,3 | 1,2345  |

6. Perhitungan Penurunan Total

a. Penurunaan Total *Pile cap* 1

$$\text{penurunan elastis kelompok tiang (Sg)} = 113,5471 \text{ mm}$$

$$\text{penurunan konsolidasi (Sc)} = 9,2465 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.1}} = S_g + S_c \quad (\text{Persamaan 3.10})$$

$$= 113,5471 + 9,2465$$

$$= 122,7936 \text{ mm}$$

b. Penurunaan Total *Pile cap* 2

$$\text{penurunan elastis kelompok tiang (Sg)} = 141,1576 \text{ mm}$$

$$\text{penurunan konsolidasi (Sc)} = 11,1018 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.2}} = S_g + S_c \quad (\text{Persamaan 3.10})$$

$$= 141,1576 + 11,1018$$

$$= 152,2593 \text{ mm}$$

c. Penurunaan Total *Pile cap* 3

$$\text{penurunan elastis kelompok tiang (Sg)} = 164,1888 \text{ mm}$$

$$\text{penurunan konsolidasi (Sc)} = 19,3254 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.3}} = S_g + S_c \quad (\text{Persamaan 3.10})$$

$$= 164,1888 + 19,3254$$

$$= 183,5142 \text{ mm}$$

Rekapitulasi perhitungan penurunan total kelompok tiang dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

**Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Total Kelompok Tiang**

| Kode | Sg (mm)  | Sc (mm) | Stotal   | Memenuhi Syarat |
|------|----------|---------|----------|-----------------|
| PC.1 | 113,5471 | 9,2465  | 122,7936 | Memenuhi        |
| PC.2 | 141,1576 | 11,1018 | 152,2593 | Memenuhi        |
| PC.3 | 164,1888 | 19,3254 | 183,5142 | Memenuhi        |
| PC.4 | 141,1576 | 11,6101 | 152,7677 | Memenuhi        |
| PC.5 | 164,1888 | 10,5461 | 174,7349 | Memenuhi        |
| PC.6 | 164,1888 | 9,5348  | 173,7236 | Memenuhi        |
| PC.7 | 141,1576 | 7,7550  | 148,9125 | Memenuhi        |
| PC.8 | 113,5471 | 1,0497  | 114,5968 | Memenuhi        |
| PC.9 | 164,1888 | 10,4144 | 174,6032 | Memenuhi        |

**Lanjutan Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Total Kelompok Tiang**

| Kode  | Sg (mm)  | Sc (mm) | Stotal   | Memenuhi Syarat |
|-------|----------|---------|----------|-----------------|
| PC.10 | 164,1888 | 9,5972  | 173,7860 | Memenuhi        |
| PC.11 | 141,1576 | 11,5021 | 152,6597 | Memenuhi        |
| PC.12 | 113,5471 | 2,0053  | 115,5524 | Memenuhi        |
| PC.13 | 141,1576 | 11,5919 | 152,7494 | Memenuhi        |
| PC.14 | 141,1576 | 11,6600 | 152,8175 | Memenuhi        |
| PC.15 | 113,5471 | 1,9089  | 115,4560 | Memenuhi        |
| PC.16 | 113,5471 | 9,2313  | 122,7784 | Memenuhi        |
| PC.17 | 141,1576 | 11,0026 | 152,1601 | Memenuhi        |
| PC.18 | 164,1888 | 19,2487 | 183,4375 | Memenuhi        |
| PC.19 | 113,5471 | 1,2345  | 114,7816 | Memenuhi        |

7. Perhitungan penurunan izin

Batas penurunan izin fondasi kelompok tiang menurut SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017) adalah kurang dari  $15 \text{ cm} + B/600$  (B dalam satuan cm) untuk bangunan tinggi. Maka syarat untuk bangunan pada kasus ini adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 S_{\text{izin}} &= 15 \text{ cm} + B/600 \\
 &= 15 + 3200/600 \\
 &= 20,3333 \text{ cm} \\
 &= 203,3333 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Maka dari perhitungan di atas  $S_{\text{izin}}$  penurunan kelompok tiang memenuhi persyaratan sebagaimana SNI 8460:2017.

8. Perhitungan beda penurunan

Pada perhitungan beda penurunan, dilakukan tinjauan pada dua potongan berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 5.2. *Pile cap* yang memotong potongan 1 memiliki kode PC.1, PC.2, dan PC.3, sementara *pile cap* yang memotong potongan 2 memiliki kode PC.4, PC.5, PC.6, PC.7 dan PC.8. Sesuai syarat kurang dari  $1/300$  atau  $0,1909^\circ$ . Berikut ini adalah perhitungan selisih penurunan (*differential settlement*) yang terjadi pada kedua potongan tersebut.

## a. Potongan 1

## 1) PC.1-PC.2

$$S_{\text{total PC.1}} = 122,7936 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.2}} = 152,2593 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.1-PC.2} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{122,7936 - 152,2593}{8.000} \\ &= 0,211^\circ > 0,1909^\circ \end{aligned}$$

## 2) PC.2-PC.3

$$S_{\text{total PC.2}} = 152,2593 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.3}} = 183,5142 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.2-PC.3} = 12.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{183,5142 - 152,2593}{8.000} \\ &= 0,1423^\circ < 0,1909^\circ \end{aligned}$$

## b. Potongan 2

## 1) PC.4-PC.5

$$S_{\text{total PC.4}} = 152,7677 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.5}} = 174,7349 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.4-PC.5} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{174,7349 - 152,7677}{8.000} \\ &= 0,1573^\circ < 0,1909^\circ \end{aligned}$$

## 2) PC.5-PC.6

$$S_{\text{total PC.5}} = 174,7349 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.6}} = 173,7236 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.6-PC.10} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{173,7236 - 174,7349}{8.000} \\ &= 0,0072^\circ < 0,1909^\circ \end{aligned}$$

## 3) PC.6-PC.7

$$S_{\text{total PC.10}} = 173,7236 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.18}} = 148,9125 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.6-PC.7} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{173,7236 - 148,9125}{8.000}$$

$$= 0,1776^\circ < 0,1909^\circ$$

4) PC.7-PC.8

$$S_{\text{total PC.7}} = 148,9125 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.8}} = 114,5968 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.7-PC.8} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{148,9125 - 114,5968}{8.000}$$

$$= 0,2184^\circ > 0,1909^\circ$$

Rekapitulasi perhitungan beda penurunan metode 1-dimensi Terzaghi kelompok tiang dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

**Tabel 5.5 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 1-Dimensi Terzaghi**

| Potongan      | Kode  | $S_{\text{total}}$<br>(mm) | Jarak<br>(mm) | $\theta$ (°) | Memenuhi<br>Syarat? |
|---------------|-------|----------------------------|---------------|--------------|---------------------|
| Potongan<br>1 | PC.1  | 122,7936                   | 8.000         | 0,2110       | Tidak               |
|               | PC.2  | 152,2593                   |               |              |                     |
|               | PC.3  | 183,5142                   | 8.000         | 0,1492       | Memenuhi            |
| Potongan<br>2 | PC.4  | 152,7677                   | 8.000         | 0,1573       | Memenuhi            |
|               | PC.5  | 174,7349                   |               |              |                     |
|               | PC.6  | 173,7236                   | 8.000         | 0,0072       | Memenuhi            |
|               |       |                            | 8.000         | 0,1776       | Memenuhi            |
|               | PC.7  | 148,9125                   | 8.000         | 0,2457       | Tidak               |
|               | PC.8  | 114,5968                   |               |              |                     |
| Potongan<br>3 | PC.9  | 174,6032                   | 8.000         | 0,0059       | Memenuhi            |
|               | PC.10 | 173,7860                   |               |              |                     |
|               | PC.11 | 152,6597                   | 8.000         | 0,1513       | Memenuhi            |
|               | PC.12 | 115,5524                   |               |              |                     |

**Lanjutan Tabel 5.5 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 1-Dimensi Terzaghi**

| Potongan   | Kode  | Stotal (mm) | Jarak (mm) | $\theta$ (°) | Memenuhi Syarat? |
|------------|-------|-------------|------------|--------------|------------------|
| Potongan 4 | PC.13 | 152,7494    | 8.000      | 0,1565       | Memenuhi         |
|            | PC.9  | 174,6032    |            |              |                  |
|            | PC.14 | 173,7860    | 8.000      | 0,0058       | Memenuhi         |
|            |       |             | 8.000      | 0,1501       | Memenuhi         |
|            | PC.10 | 152,8175    | 8.000      | 0,2675       | Tidak            |
|            | PC.15 | 115,4560    |            |              |                  |
| Potongan 5 | PC.16 | 122,7784    | 8.000      | 0,2104       | Tidak            |
|            | PC.17 | 152,1601    |            |              |                  |
|            | PC.18 | 183,4375    | 8.000      | 0,2240       | Tidak            |
|            |       |             | 8.000      | 0,4917       | Tidak            |
|            | PC.19 | 114,7816    |            |              |                  |

### 5.3.2 Analisis Numerik 1-Dimensi *Settle3D*

Analisis penurunan fondasi menggunakan *Settle3D* dilakukan untuk memodelkan besarnya penurunan konsolidasi akibat beban fondasi berdasarkan kondisi tanah di lapangan. Program ini digunakan sebagai pendekatan *semi-analitik*, karena perhitungan penurunan konsolidasi tetap mengacu pada teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi, bukan pada metode elemen hingga.

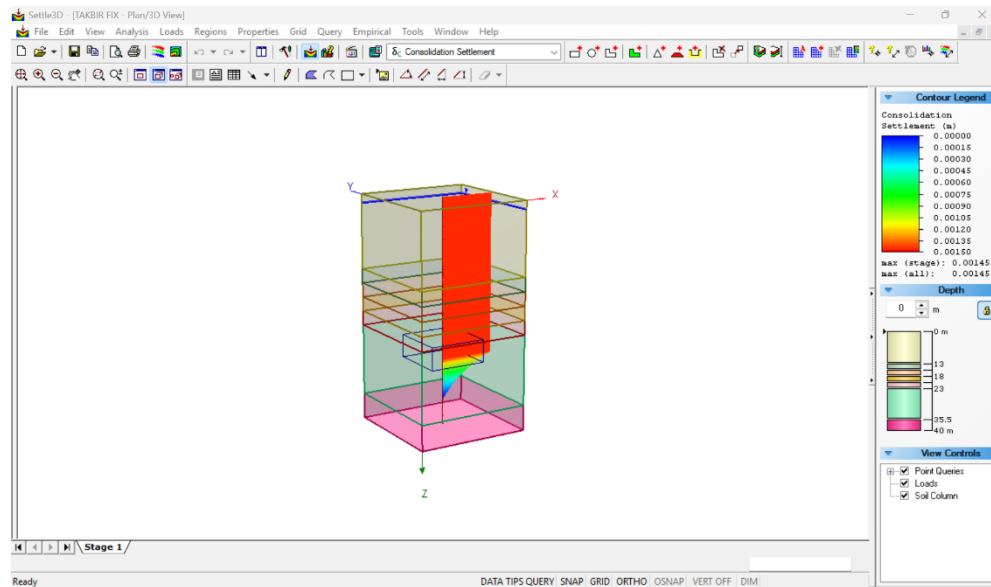
Pada penelitian ini, *Settle3D* digunakan untuk memperoleh nilai penurunan fondasi akibat beban yang bekerja pada kelompok tiang. Beban yang dimasukkan ke dalam model dinyatakan sebagai beban merata sebesar  $P/A$ , yaitu hasil pembagian antara beban aksial kolom pada Tabel 5.1 dengan luas area kelompok tiang. Hasil penurunan dari *Settle3D* kemudian digunakan sebagai pembanding dan dasar verifikasi terhadap hasil perhitungan manual metode Terzaghi.

Data parameter tanah yang digunakan dalam analisis *Settle3D* disajikan pada Tabel 5.6 pada halaman selanjutnya.

**Tabel 5.6 Data Parameter Tanah *Settle3D***

| <b>Data Input</b>                            | <b>Lapis 1</b> | <b>Lapis 2</b> | <b>Lapis 3</b> | <b>Lapis 4</b> | <b>Lapis 5</b> | <b>Lapis 6</b> | <b>Lapis 7</b> |
|----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Jenis tanah                                  | Lempung        | Lempung        | Lempung        | Lempung        | Lempung        | Lempung        | Pasir          |
| Konsistensi tanah                            | Sangat lunak   | Lunak          | Kaku           | Sangat kaku    | Keras          | Sangat kaku    | Keras          |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 14,70          | 14,38          | 14,38          | 16,55          | 16,55          | 17,07          | 16,54          |
| $\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )   | 15,08          | 14,66          | 14,66          | 16,71          | 16,71          | 17,24          | 16,72          |
| $\mu$ (Poisson rasio)                        | 0,15           | 0,2            | 0,3            | 0,4            | 0,45           | 0,4            | 0,45           |
| Konsolidasi Primer                           |                |                |                |                |                |                |                |
| Cc                                           | 1,18           | 0,84           | 0,65           | 0,35           | 0,3            | 0,0625         | 0              |
| Cr                                           | 0,112          | 0,075          | 0,072          | 0,067          | 0,06           | 0,02424        | 0              |
| e <sub>0</sub>                               | 2,4            | 2,29           | 1,95           | 1,34           | 1,2            | 1,3            | 0,35           |
| OCR                                          | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |

Tampilan hasil analisis dan ringkasan nilai *output* dapat dilihat pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.



**Gambar 5.5 Tampilan *Output* Penurunan Konsolidasi pada *Settle3D***

| Data Type                         | Minimum | Maximum     |
|-----------------------------------|---------|-------------|
| Total Settlement [m]              | 0       | 0.00144868  |
| Consolidation Settlement [m]      | 0       | 0.00144868  |
| Immediate Settlement [m]          | 0       | 0           |
| Loading Stress [kPa]              | 0       | 5.86376     |
| Effective Stress [kPa]            | -0      | 266.633     |
| Total Stress [kPa]                | 0       | 644.318     |
| Total Strain                      | -0      | 0.000362445 |
| Pore Water Pressure [kPa]         | 0       | 377.685     |
| Degree of Consolidation [%]       | 0       | 100         |
| Pre-consolidation Stress [kPa]    | 1.1025  | 266.327     |
| Over-consolidation Ratio          | 1       | 1           |
| Void Ratio                        | 0.35    | 2.4         |
| Hydroconsolidation Settlement [m] | 0       | 0           |

**Gambar 5.6 Ringkasan Hasil *Output* Analisis *Settle3D***

Rekapitulasi *Output* penurunan konsolidasi dari analisis menggunakan *Settle3D* dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut.

**Tabel 5.7 Rekapitulasi *Output* Penurunan Konsolidasi *Settle3D***

| <i>Pile cap</i> | <b>Sc (mm)</b> |
|-----------------|----------------|
| PC.1            | 10,6917        |
| PC.2            | 12,791         |
| PC.3            | 21,9828        |
| PC.4            | 13,3672        |
| PC.5            | 12,1157        |
| PC.6            | 10,9671        |
| PC.7            | 8,95274        |
| PC.8            | 1,2626         |
| PC.9            | 11,9663        |
| PC.10           | 11,038         |
| PC.11           | 13,2449        |
| PC.12           | 2,34977        |
| PC.13           | 13,3466        |
| PC.14           | 13,4237        |
| PC.15           | 2,3724         |
| PC.16           | 10,6744        |
| PC.17           | 12,6785        |
| PC.18           | 21,8972        |
| PC.19           | 1,44868        |

### 5.3.3 Perbandingan Hasil Analisis Konsolidasi 1-Dimensi

Perbandingan analisis konsolidasi 1-dimensi berdasarkan perhitungan manual dan pemodelan menggunakan *Settle3D*. Analisis ini dilakukan untuk memperoleh nilai penurunan konsolidasi pada fondasi yang ditinjau. Pada pemodelan *Settle3D*, *output* penurunan konsolidasi diambil dari beberapa titik tinjauan pada area kelompok tiang. Nilai-nilai tersebut kemudian dirata-ratakan agar diperoleh satu nilai penurunan konsolidasi representatif. Rekapitulasi hasil penurunan konsolidasi dari kedua metode disajikan pada Tabel 5.8 berikut.

**Tabel 5.8 Output Penurunan Konsolidasi Rerata**

| <i>Pile cap</i> | <b>Sc Manual<br/>Terzaghi<br/>(mm)</b> | <b>Sc <i>Settle3D</i><br/>(mm)</b> | <b>Sc Rerata<br/>(mm)</b> |
|-----------------|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| PC.1            | 9,2465                                 | 10,6917                            | 9,9691                    |
| PC.2            | 11,1018                                | 12,791                             | 11,9464                   |
| PC.3            | 19,3254                                | 21,9828                            | 20,6541                   |
| PC.4            | 11,6101                                | 13,3672                            | 12,4887                   |
| PC.5            | 10,5461                                | 12,1157                            | 11,3309                   |
| PC.6            | 9,5348                                 | 10,9671                            | 10,2509                   |
| PC.7            | 7,7550                                 | 8,95274                            | 8,3539                    |
| PC.8            | 1,0497                                 | 1,2626                             | 1,1561                    |
| PC.9            | 10,4144                                | 11,9663                            | 11,1904                   |
| PC.10           | 9,5972                                 | 11,038                             | 10,3176                   |
| PC.11           | 11,5021                                | 13,2449                            | 12,3735                   |
| PC.12           | 2,0053                                 | 2,34977                            | 2,1775                    |
| PC.13           | 11,5919                                | 13,3466                            | 12,4692                   |
| PC.14           | 11,6600                                | 13,4237                            | 12,5418                   |
| PC.15           | 1,9089                                 | 2,3724                             | 2,1406                    |
| PC.16           | 9,2313                                 | 10,6744                            | 9,9529                    |
| PC.17           | 11,0026                                | 12,6785                            | 11,8405                   |
| PC.18           | 19,2487                                | 21,8972                            | 20,5729                   |
| PC.19           | 1,2345                                 | 1,44868                            | 1,3416                    |

#### 5.4 Analisis Metode Elemen Hingga

Analisis menggunakan *PLAXIS 2D* dilakukan untuk memodelkan respons tanah dan fondasi terhadap beban yang bekerja secara dua dimensi. Berbeda dengan *Settle3D* yang digunakan sebagai pendekatan numerik, *PLAXIS 2D* menggunakan metode elemen hingga sehingga dapat menggambarkan deformasi tanah, tegangan, dan penurunan fondasi berdasarkan tahapan pemodelan yang lebih detail.

Analisis *PLAXIS 2D* menggunakan metode elemen hingga untuk memodelkan respons tanah dan fondasi akibat beban secara dua dimensi. Pemodelan mempertimbangkan lapisan tanah, parameter material, geometri fondasi, dan beban kerja untuk memperoleh nilai penurunan serta deformasi tanah. Hasil *PLAXIS 2D* kemudian dibandingkan dengan perhitungan Terzaghi dan *Settle3D*. Parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan disajikan pada Tabel 5.9.

**Tabel 5.9 Input Data Tanah**

| <b>Data Input</b>                                    | <b>Lapis 1</b>          | <b>Lapis 2</b>          | <b>Lapis 3</b>          | <b>Lapis 4</b>          | <b>Lapis 5</b>          | <b>Lapis 6</b>          | <b>Lapis 7</b>        |
|------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Jenis tanah                                          | Lempung                 | Lempung                 | Lempung                 | Lempung                 | Lempung                 | Lempung                 | Pasir                 |
| <i>Soil model</i>                                    | <i>Soft soil</i>        | <i>Soft soil</i>        | <i>Hardening soil</i>   | <i>Hardening soil</i>   | <i>Hardening soil</i>   | <i>Hardening soil</i>   | <i>Hardening soil</i> |
| Konsistensi tanah                                    | Sangat lunak            | Lunak                   | Kaku                    | Sangat kaku             | Keras                   | Sangat kaku             | Keras                 |
| <i>Drainage type</i>                                 | <i>Undrained A</i>      | <i>Undrained A</i>      | <i>Undrained A</i>      | <i>Undrained A</i>      | <i>Undrained A</i>      | <i>Undrained A</i>      | <i>Drained A</i>      |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )         | 14,70                   | 14,38                   | 14,38                   | 16,55                   | 16,55                   | 17,07                   | 16,54                 |
| $\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )           | 15,08                   | 14,66                   | 14,66                   | 16,71                   | 16,71                   | 17,24                   | 16,72                 |
| Cc                                                   | 1,180                   | 0,8400                  | -                       | -                       | -                       | -                       | -                     |
| Cs                                                   | 0,1120                  | 0,0750                  | -                       | -                       | -                       | -                       | -                     |
| e <sub>0</sub>                                       | 2,4                     | 2,290                   | 1,950                   | 1,377                   | 1,377                   | 1,2138                  | 1,4196                |
| E <sub>50</sub> (kN/m <sup>2</sup> )                 | -                       | -                       | 1.433                   | 5.256                   | 5.256                   | 7.220                   | 5.883                 |
| E <sub>oed</sub> <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> ) | -                       | -                       | 4.085                   | 5.257                   | 5.257                   | 8.462                   | 5.883                 |
| E <sub>ur</sub> <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> )  | -                       | -                       | 4.298                   | 15.770                  | 15.770                  | 21.660                  | 17.649                |
| $\mu$ (Poisson rasio)                                | 0,15                    | 0,15                    | 0,2                     | 0,2                     | 0,2                     | 0,2                     | 0,2                   |
| C (kN/m <sup>2</sup> )                               | 7,024                   | 9,953                   | 9,953                   | 48,37                   | 48,37                   | 86,52                   | 73,0268               |
| $\Phi$ (°)                                           | 2,5                     | 0,5                     | 0,5                     | 5,8                     | 5,8                     | 5,3                     | 4,4                   |
| Permeabilitas (m/hari)                               | $0,8640 \times 10^{-3}$ | $0,8640 \times 10^{-3}$ | $0,8640 \times 10^{-3}$ | $0,8640 \times 10^{-3}$ | $0,8640 \times 10^{-3}$ | $0,8640 \times 10^{-3}$ | 0,8640                |

Data input parameter untuk elemen tiang pancang dan *pile cap* disajikan pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11. Parameter tersebut meliputi berat isi material, dimensi elemen, modulus elastisitas, serta kekakuan elemen yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan fondasi pada *PLAXIS 2D*.

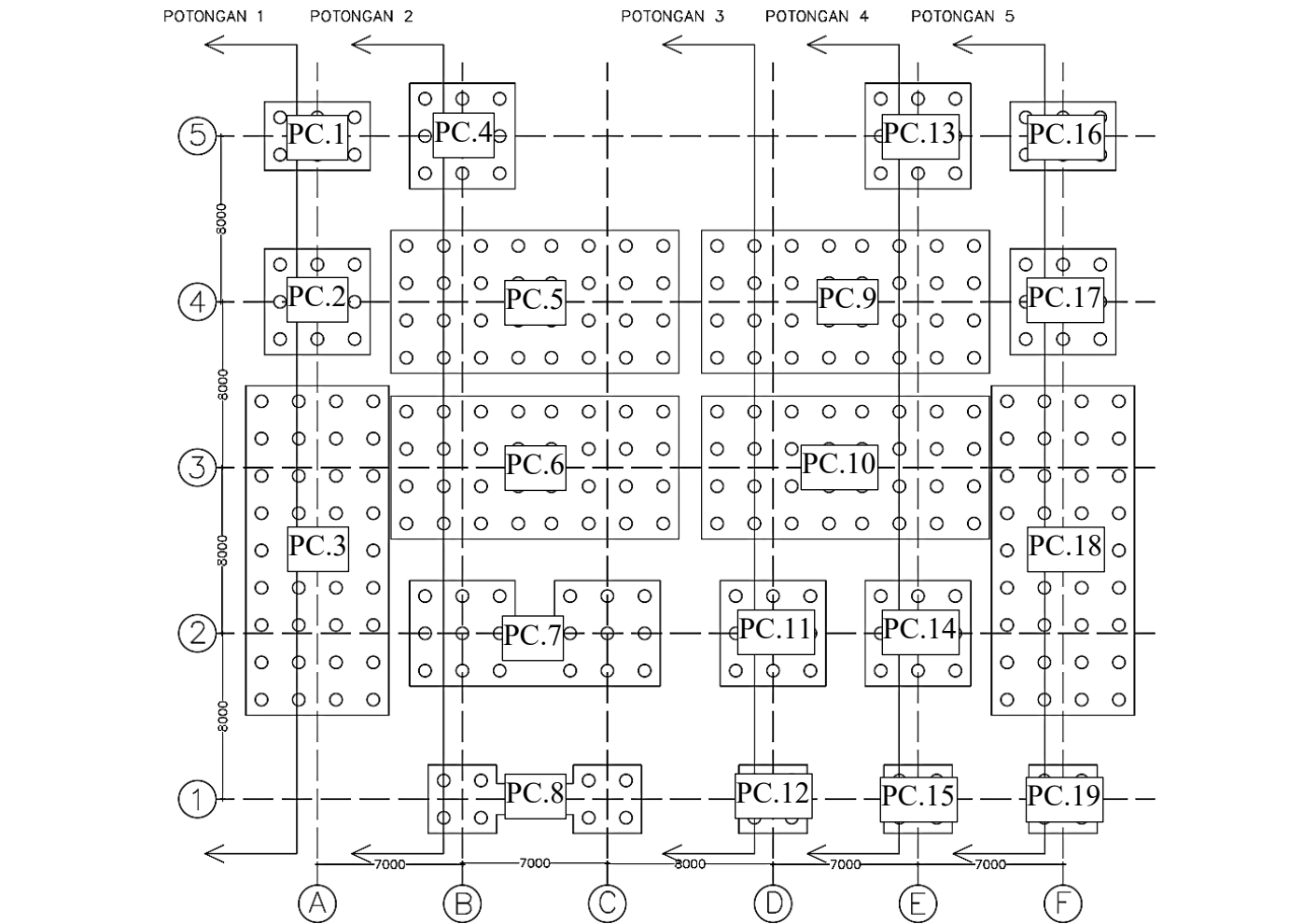
**Tabel 5.10 Data Input Parameter *Pile Propertis* dengan *Embedded Beam***

| <b>Data Input</b>        | <b>Nilai</b> | <b>Satuan</b>     |
|--------------------------|--------------|-------------------|
| $\gamma_{\text{beton}}$  | 24           | kN/m <sup>3</sup> |
| <i>L spacing</i>         | 1,8          | m                 |
| Diameter                 | 0,6          | m                 |
| $f'_c \text{ spun pile}$ | 42           | Mpa               |
| E (modulus elastisitas)  | 30459481,28  | kN/m <sup>2</sup> |

**Tabel 5.11 Data Input *Pile cap* dengan *Plate***

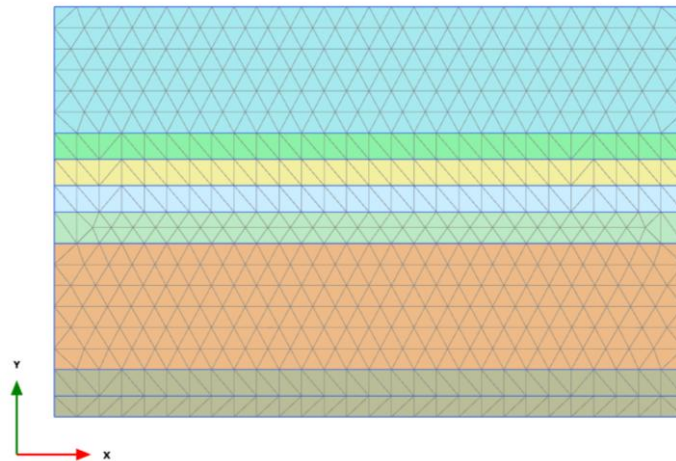
| <b>Data Input</b>                                             | <b>Nilai</b> | <b>Satuan</b>        |
|---------------------------------------------------------------|--------------|----------------------|
| $\gamma_{\text{beton}}$                                       | 24           | kN/m <sup>3</sup>    |
| E (modulus elastisitas)                                       | 25742960,2   | kN/m <sup>2</sup>    |
| W (massa <i>pile cap</i> )                                    | 11.1479      | kN/m/m               |
| H (tebal <i>pile cap</i> )                                    | 1,25         | m                    |
| I (inersia = $\frac{1}{12} \times b \times h^3$ )             | 0,1627       | m <sup>4</sup>       |
| EA ( $E_{\text{ref}} \times \text{area } \textit{pile cap}$ ) | 32178700,25  | kN/m                 |
| EI ( $E_{\text{ref}} \times \text{inersia}$ )                 | 4189934,929  | kN m <sup>2</sup> /m |

Untuk analisis pada program *PLAXIS 2D* dimodelkan dalam bentuk potongan memanjang arah Y yang dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut



**Gambar 5.7 Denah Potongan Arah Y Pile Cap**

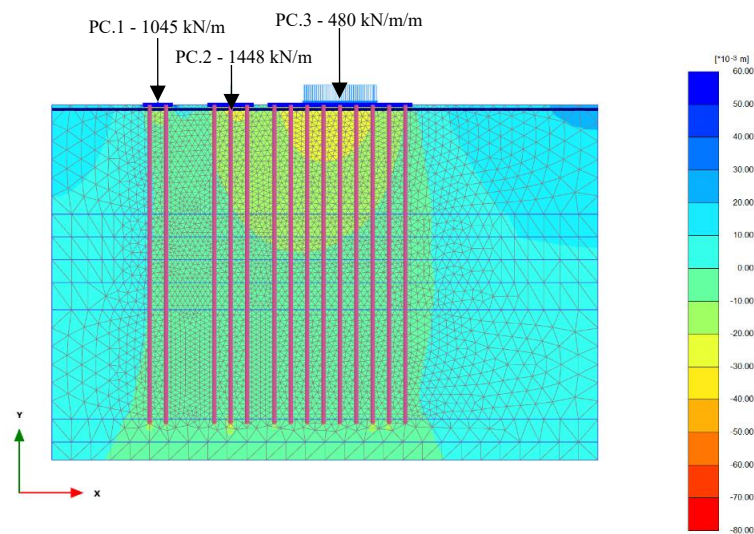
Untuk lapisan tanah program *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut.



**Gambar 5.8 Lapisan Tanah**

#### 1. Potongan 1

Analisis penurunan kelompok tiang pancang pada Potongan 1, yang terdiri atas PC.1, PC.2, dan PC.3 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5, dilakukan menggunakan perangkat lunak *PLAXIS 2D*. Berdasarkan hasil analisis tersebut, diperoleh penurunan yang ditunjukkan pada Gambar 5.18 dan Tabel 5.13 berikut.

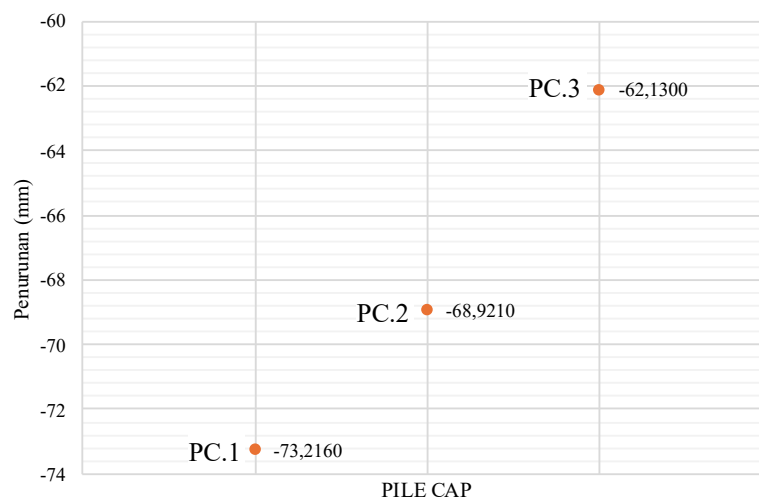


**Gambar 5.9 Output Penurunan Potongan 1**

**Tabel 5.12 Output Penurunan Potongan 1**

|      | Penurunan elastis (mm) | Penurunan konsolidasi (mm) | Penurunan Total (mm) |
|------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| PC.1 | 65,3350                | 7,8810                     | 73,2160              |
| PC.2 | 61,6210                | 7,3000                     | 68,9210              |
| PC.3 | 55,9610                | 6,1690                     | 62,1300              |

Hasil *output* penurunan pada Potongan 1 disajikan pada Tabel 5.13. Data tersebut menunjukkan nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total pada masing-masing titik *pile cap* yang ditinjau, yaitu PC.1, PC.2, dan PC.3. Untuk mempermudah pembacaan pola penurunan, nilai penurunan total dari tabel tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.19 berikut.

**Gambar 5.10 Grafik Penurunan Total pada Potongan 1**

Berdasarkan grafik penurunan total pada Gambar 5.19, terlihat adanya perbedaan nilai penurunan antara titik PC.1, PC.2, dan PC.3. Perbedaan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besarnya beda penurunan (*differential settlement*) pada setiap pasangan titik *pile cap* yang ditinjau. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih nilai penurunan total dan jarak antartitik, sebagaimana disajikan berikut.

## a. PC.1-PC.2

$$S_{\text{total PC.1}} = 73,2160 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.2}} = 68,9210 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.1-PC.2} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{73,2160 - 68,9210}{8.000}$$

$$= 0,0307^\circ$$

## b. PC.2-PC.3

$$S_{\text{total PC.2}} = 68,9210 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.3}} = 62,1300 \text{ mm}$$

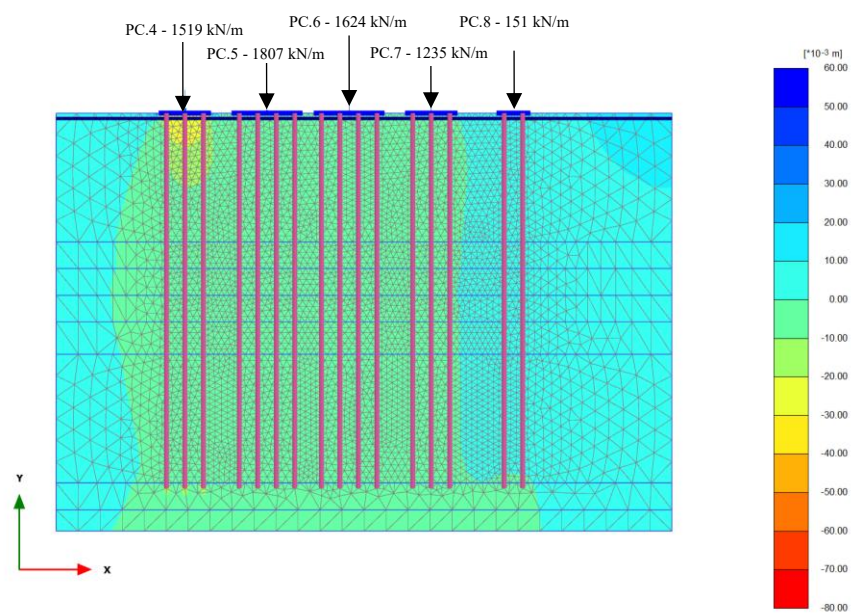
$$\text{jarak kolom PC.2-PC.3} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{68,9210 - 62,1300}{8.000}$$

$$= 0,0324^\circ$$

## 2. Potongan 2

Analisis penurunan kelompok tiang pancang pada Potongan 2, yang terdiri atas PC.4, PC.5, PC.6, PC.7, dan PC.8 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *PLAXIS 2D* diperoleh penurunan yang ditunjukkan pada Gambar 5.20 dan Tabel 5.14 berikut.

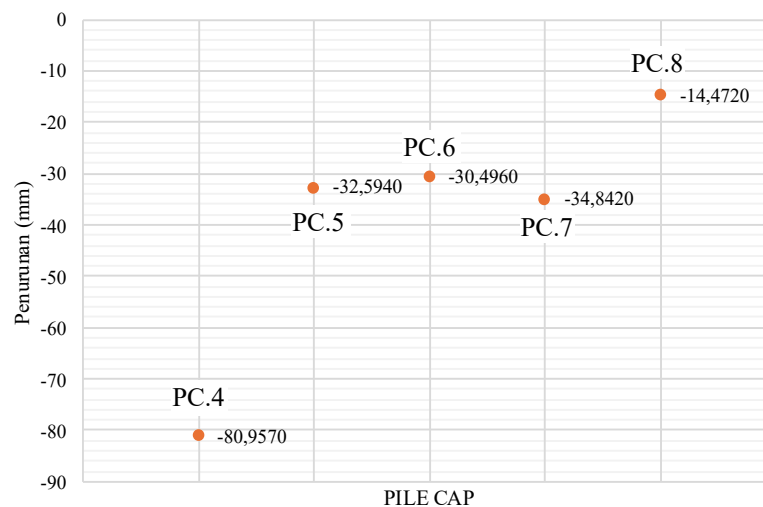


**Gambar 5.11 Output Penurunan Potongan 2**

**Tabel 5.13 Output Penurunan Potongan 2**

|      | <b>Penurunan elastis (mm)</b> | <b>Penurunan konsolidasi (mm)</b> | <b>Penurunan Total (mm)</b> |
|------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| PC.4 | 70,7810                       | 10,1760                           | 80,9570                     |
| PC.5 | 28,8380                       | 3,7560                            | 32,5940                     |
| PC.6 | 26,9180                       | 3,5780                            | 30,4960                     |
| PC.7 | 30,1660                       | 4,6760                            | 34,8420                     |
| PC.8 | 10,9170                       | 3,5550                            | 14,4720                     |

Hasil *output* penurunan pada Potongan 2 disajikan pada Tabel 5.14. Data tersebut menunjukkan nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total pada masing-masing titik *pile cap* yang ditinjau, yaitu PC.4, PC.5, PC.6, PC.7 dan PC.8. Untuk mempermudah pembacaan pola penurunan, nilai penurunan total dari tabel tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.21 berikut.

**Gambar 5.12 Grafik Penurunan Total Potongan 2**

Berdasarkan grafik penurunan total pada Gambar 5.21, terlihat adanya perbedaan nilai penurunan antara titik PC.4, PC.5, PC.6, PC.7 dan PC.8. Perbedaan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besarnya beda penurunan (*differential settlement*) pada setiap pasangan titik *pile cap* yang ditinjau. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih nilai penurunan total dan jarak antartitik, sebagaimana disajikan berikut.

## a. PC.4-PC.5

$$S_{\text{total PC.4}} = 80,9570 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.5}} = 32,5940 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.4-PC.5} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{80,9570 - 32,5940}{8.000}$$

$$= 0,3464^\circ$$

## b. PC.5-PC.6

$$S_{\text{total PC.5}} = 32,5940 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.6}} = 30,4960 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.5-PC.6} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{32,5940 - 30,4960}{8.000}$$

$$= 0,0150^\circ$$

## c. PC.6-PC.7

$$S_{\text{total PC.6}} = 30,4960 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.7}} = 34,8420 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.6-PC.7} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{34,8420 - 30,4960}{8.000}$$

$$= 0,0311^\circ$$

## d. PC.7-PC.8

$$S_{\text{total PC.7}} = 34,8420 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.8}} = 14,4720 \text{ mm}$$

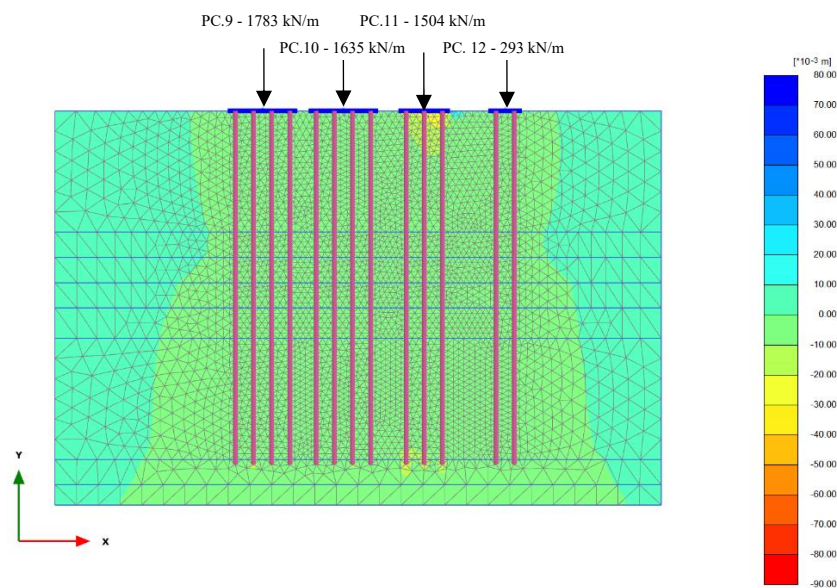
$$\text{jarak kolom PC.7-PC.8} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{34,8420 - 14,4720}{8.000}$$

$$= 0,1297^\circ$$

## 3. Potongan 3

Analisis penurunan kelompok tiang pancang pada Potongan 3, yang terdiri atas PC.9, PC.10, PC.11 dan PC.12 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *PLAXIS 2D* diperoleh penurunan yang ditunjukkan pada Gambar 5.22 dan Tabel 5.15 berikut.

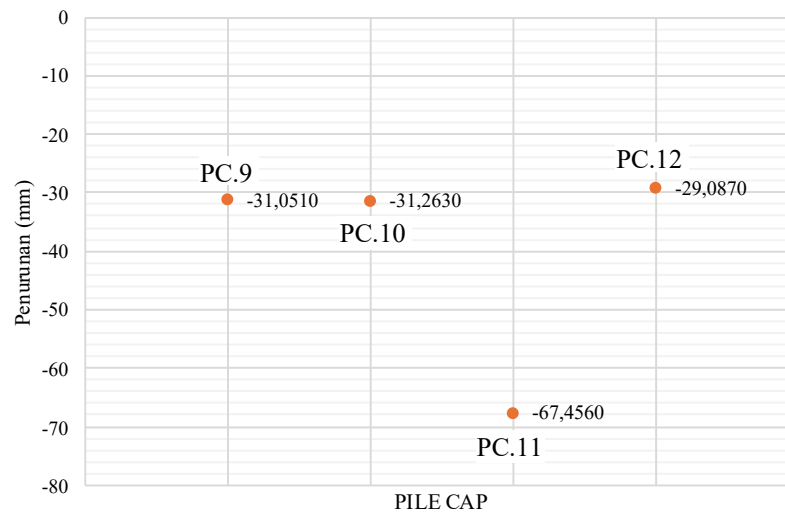


**Gambar 5.13 Output Penurunan Potongan 3**

**Tabel 5.14 Output Penurunan Potongan 3**

|       | <b>Penurunan elastis (mm)</b> | <b>Penurunan konsolidasi (mm)</b> | <b>Penurunan Total (mm)</b> |
|-------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| PC.9  | 27,6130                       | 3,4380                            | 31,0510                     |
| PC.10 | 27,8200                       | 3,4430                            | 31,2630                     |
| PC.11 | 60,7110                       | 6,7450                            | 67,4560                     |
| PC.12 | 24,4200                       | 4,6670                            | 29,0870                     |

Hasil *output* penurunan pada Potongan 3 disajikan pada Tabel 5.15. Data tersebut menunjukkan nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total pada masing-masing titik *pile cap* yang ditinjau, yaitu PC.9, PC.10, PC.11 dan PC.12. Untuk mempermudah pembacaan pola penurunan, nilai penurunan total dari tabel tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.23 berikut.



**Gambar 5.14 Grafik Penurunan Total Potongan 3**

Berdasarkan grafik penurunan total pada Gambar 5.23, terlihat adanya perbedaan nilai penurunan antara titik PC.9, PC.10, PC.11 dan PC.12. Perbedaan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besarnya beda penurunan (*differential settlement*) pada setiap pasangan titik *pile cap* yang ditinjau. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih nilai penurunan total dan jarak antartitik, sebagaimana disajikan berikut.

a. PC.9-PC.10

$$S_{\text{total PC.9}} = 31,0510 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.10}} = 31,2630 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.9-PC.10} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{31,2630 - 31,0510}{8.000} = 0,0015^\circ$$

b. PC.10-PC.11

$$S_{\text{total PC.10}} = 31,2630 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.11}} = 67,4560 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.11-PC.12} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{67,4560 - 31,2630}{8.000} = 0,2592^\circ$$

c. PC.11-PC.12

$$S_{\text{total PC.11}} = 67,4560 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.12}} = 29,0870 \text{ mm}$$

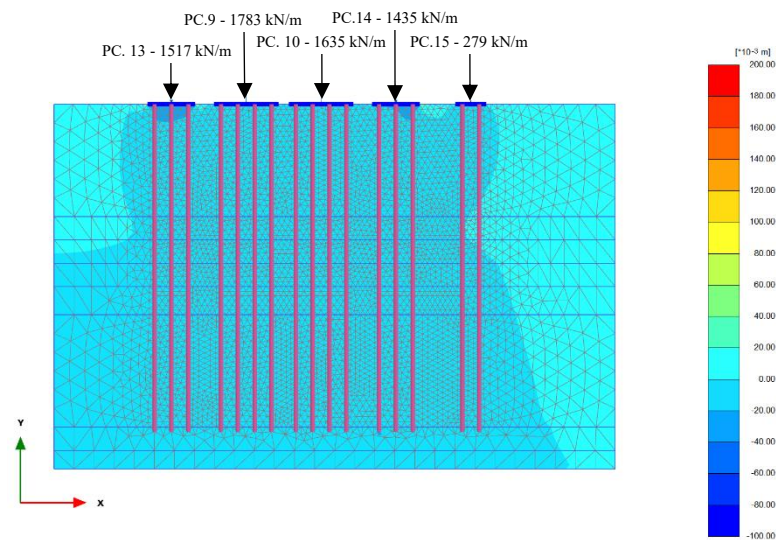
$$\text{jarak kolom PC.11-PC.12} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{67,4560 - 29,0870}{8.000}$$

$$= 0,2748^\circ$$

#### 4. Potongan 4

Analisis penurunan kelompok tiang pancang pada Potongan 4, yang terdiri atas PC.13, PC.9, PC.10, PC.14, dan PC.15 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *PLAXIS 2D* diperoleh penurunan yang ditunjukkan pada Gambar 5.24 dan Tabel 5.16 berikut.

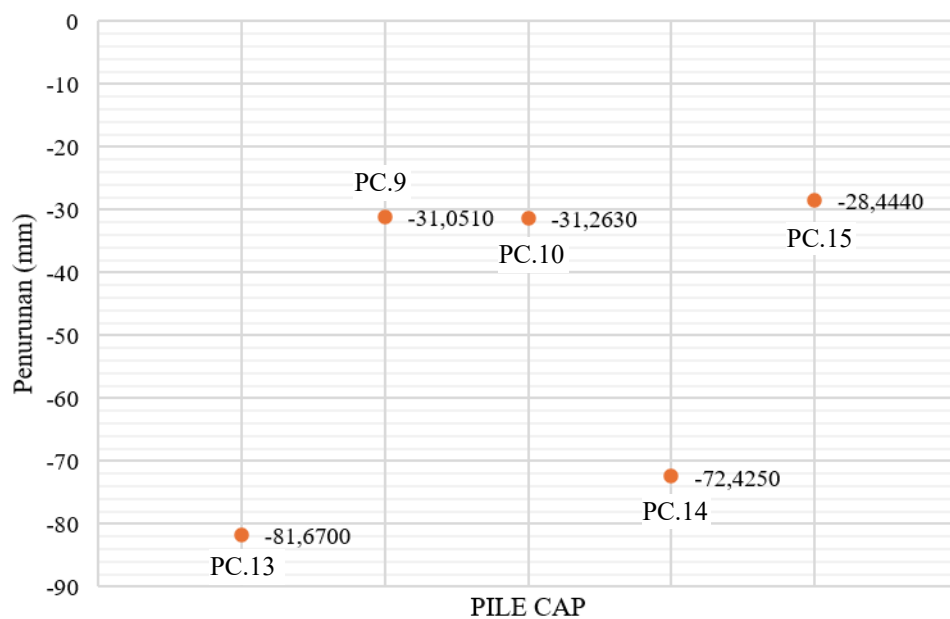


**Gambar 5.15 Output Penurunan Potongan 4**

**Tabel 5.15 Output Penurunan Potongan 4**

|       | Penurunan elastis (mm) | Penurunan konsolidasi (mm) | Penurunan Total (mm) |
|-------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| PC.13 | 70,9230                | 10,7470                    | 81,6700              |
| PC.9  | 27,6130                | 3,4380                     | 31,0510              |
| PC.10 | 27,8200                | 3,4430                     | 31,2630              |
| PC.14 | 64,2680                | 8,1570                     | 72,4250              |
| PC.15 | 22,9700                | 5,4740                     | 28,4440              |

Hasil *output* penurunan pada Potongan 4 disajikan pada Tabel 5.16. Data tersebut menunjukkan nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total pada masing-masing titik *pile cap* yang ditinjau, yaitu PC.13, PC.9, PC.10, PC.14, dan PC.15. Untuk mempermudah pembacaan pola penurunan, nilai penurunan total dari tabel tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.25 berikut.



**Gambar 5.16 Grafik Penurunan Total Potongan 4**

Berdasarkan grafik penurunan total pada Gambar 5.25, terlihat adanya perbedaan nilai penurunan antara titik PC.13, PC.9, PC.10, PC.14, dan PC.15. Perbedaan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besarnya beda penurunan (*differential settlement*) pada setiap pasangan titik *pile cap* yang ditinjau. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih nilai penurunan total dan jarak antartitik, sebagaimana disajikan berikut.

a. PC.13-PC.9

$$S_{\text{total PC.13}} = 81,6700 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.9}} = 31,0510 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.13-PC.9} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \frac{81,6700 - 31,0510}{8.000} \\ &= 0,3625^\circ\end{aligned}$$

## b. PC.9-PC.10

$$S_{\text{total PC.9}} = 31,0510 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.10}} = 31,2630 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.9-PC.10} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \frac{31,2630 - 31,0510}{8.000} \\ &= 0,0015^\circ\end{aligned}$$

## c. PC.10-PC.14

$$S_{\text{total PC.10}} = 31,2630 \text{ mm}$$

$$S_{\text{total PC.14}} = 72,4250 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.10-PC.14} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \frac{72,4250 - 31,2630}{8.000} \\ &= 0,2948^\circ\end{aligned}$$

## d. PC.14-PC.15

$$S_{\text{total PC.14}} = 72,4250 \text{ mm}$$

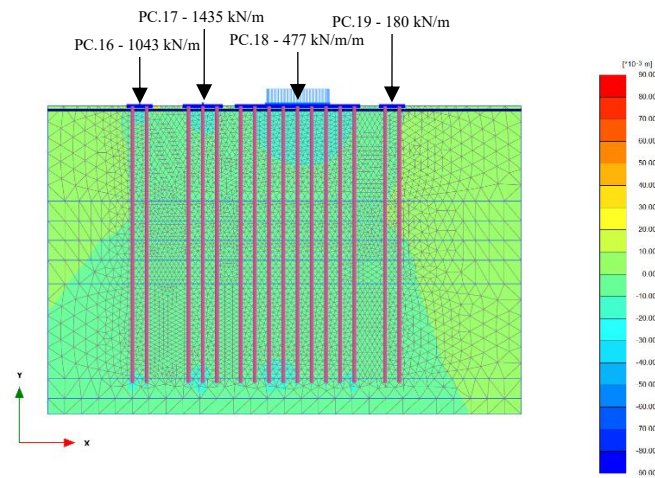
$$S_{\text{total PC.15}} = 28,4440 \text{ mm}$$

$$\text{jarak kolom PC.14-PC.15} = 8.000 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \frac{72,4250 - 28,4440}{8.000} \\ &= 0,3150^\circ\end{aligned}$$

## 5. Potongan 5

Analisis penurunan kelompok tiang pancang pada Potongan 5, yang terdiri atas PC.16, PC.17, PC.18 dan PC.19 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *PLAXIS 2D* diperoleh penurunan yang ditunjukkan pada Gambar 5.26 dan Tabel 5.17 berikut.

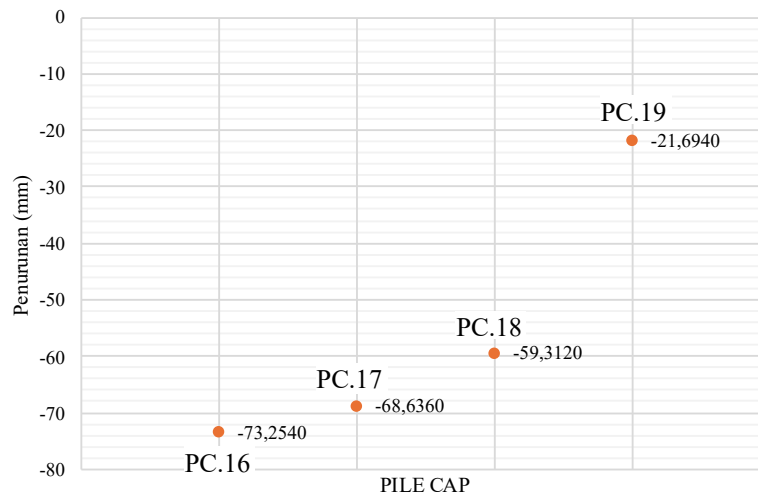


**Gambar 5.17 Output Penurunan Potongan 5**

**Tabel 5.16 Output Penurunan Potongan 5**

|       | <b>Penurunan elastis (mm)</b> | <b>Penurunan konsolidasi (mm)</b> | <b>Penurunan Total (mm)</b> |
|-------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| PC.16 | 65,3230                       | 7,9310                            | 73,2540                     |
| PC.17 | 61,2730                       | 7,3630                            | 68,6360                     |
| PC.18 | 53,5640                       | 5,7480                            | 59,3120                     |
| PC.19 | 17,6120                       | 4,0820                            | 21,6940                     |

Hasil *output* penurunan pada Potongan 5 disajikan pada Tabel 5.17. Data tersebut menunjukkan nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total pada masing-masing titik *pile cap* yang ditinjau, yaitu PC.16, PC.17, PC.18 dan PC.19. Untuk mempermudah pembacaan pola penurunan, nilai penurunan total dari tabel tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.27 berikut.



**Gambar 5.18 Grafik Penurunan Total Potongan 5**

Berdasarkan grafik penurunan total pada Gambar 5.27, terlihat adanya perbedaan nilai penurunan antara titik PC.16, PC.17, PC.18 dan PC.19. Perbedaan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui besarnya beda penurunan (*differential settlement*) pada setiap pasangan titik *pile cap* yang ditinjau. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih nilai penurunan total dan jarak antartitik, sebagaimana disajikan berikut.

a. PC.16-PC.17

$$\begin{aligned}
 S_{\text{total PC.16}} &= 73,2540 \text{ mm} \\
 S_{\text{total PC.17}} &= 68,6360 \text{ mm} \\
 \text{jarak kolom PC.16-PC.17} &= 8.000 \text{ mm} \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{73,2540 - 68,6360}{8.000} \\
 &= 0,0331^\circ
 \end{aligned}$$

b. PC.17-PC.18

$$\begin{aligned}
 S_{\text{total PC.17}} &= 68,6360 \text{ mm} \\
 S_{\text{total PC.18}} &= 59,3120 \text{ mm} \\
 \text{jarak kolom PC.17-PC.18} &= 8.000 \text{ mm} \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{68,6360 - 59,3120}{8.000} \\
 &= 0,0668^\circ
 \end{aligned}$$

c. PC.18-PC.19

$$\begin{aligned}
 S_{\text{total PC.18}} &= 59,3120 \text{ mm} \\
 S_{\text{total PC.19}} &= 21,6940 \text{ mm} \\
 \text{jarak kolom PC.18-PC.19} &= 8.000 \text{ mm} \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{59,3120 - 21,6940}{8.000} \\
 &= 0,2694^\circ
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan beda penurunan metode 2-dimensi *PLAXIS 2D* kelompok tiang dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut.

**Tabel 5.17 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 2-Dimensi  
*PLAXIS 2D***

| Potongan      | Kode  | S <sub>total</sub><br>(mm) | Jarak<br>(mm) | θ (°)  | Memenuhi<br>Syarat? |
|---------------|-------|----------------------------|---------------|--------|---------------------|
| Potongan<br>1 | PC.1  | 73,2160                    | 8.000         | 0,0307 | Memenuhi            |
|               | PC.2  | 68,9210                    |               |        |                     |
|               | PC.3  | 62,1300                    | 8.000         | 0,0324 | Memenuhi            |
| Potongan<br>2 | PC.4  | 80,9570                    | 8.000         | 0,3464 | Tidak               |
|               | PC.5  | 32,5940                    |               |        |                     |
|               |       |                            | 8.000         | 0,0150 | Memenuhi            |
|               | PC.6  | 30,4960                    | 8.000         | 0,0311 | Memenuhi            |
|               | PC.7  | 34,8420                    |               |        |                     |
|               | PC.8  | 14,4720                    | 8.000         | 0,1297 | Memenuhi            |
| Potongan<br>3 | PC.9  | 31,0510                    | 8.000         | 0,0015 | Memenuhi            |
|               | PC.10 | 31,2630                    |               |        |                     |
|               |       |                            | 8.000         | 0,2592 | Tidak               |
|               | PC.11 | 67,4560                    | 8.000         | 0,2748 | Tidak               |
|               | PC.12 | 29,0870                    |               |        |                     |

**Lanjutan Tabel 5.18 Rekapitulasi Perhitungan Beda Penurunan 2-Dimensi**  
***PLAXIS 2D***

|               |       |         |       |        |          |
|---------------|-------|---------|-------|--------|----------|
| Potongan<br>4 | PC.13 | 81,6700 | 8.000 | 0,3625 | Tidak    |
|               | PC.9  | 31,0510 |       |        |          |
|               | PC.10 | 31,2630 | 8.000 | 0,0015 | Memenuhi |
|               |       |         | 8.000 | 0,2948 | Tidak    |
|               | PC.14 | 72,4250 | 8.000 | 0,3150 | Tidak    |
|               | PC.15 | 28,4440 |       |        |          |
| Potongan<br>5 | PC.16 | 73,2540 | 8.000 | 0,0331 | Memenuhi |
|               | PC.17 | 68,6360 | 8.000 | 0,0668 | Memenuhi |
|               |       |         |       |        |          |
|               | PC.18 | 59,3120 | 8.000 | 0,2694 | Tidak    |
|               | PC.19 | 21,6940 |       |        |          |

### 5.5 Perbandingan Hasil Penurunan 1-Dimensi dengan 2-Dimensi

Perbandingan hasil penurunan pada penelitian ini dilakukan dengan meninjau tiga komponen utama, yaitu penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total. Penurunan elastis dibandingkan antara hasil perhitungan manual dan hasil analisis menggunakan *PLAXIS 2D*. Sementara itu, penurunan konsolidasi diperoleh dari nilai rerata hasil perhitungan Terzaghi 1-Dimensi dan *Settle3D*, kemudian dibandingkan dengan hasil analisis *PLAXIS 2D*. Selanjutnya, penurunan total digunakan untuk melihat perbedaan respons akhir tanah dari masing-masing metode analisis yang digunakan. Dengan perbandingan ini, dapat diketahui sejauh mana perbedaan hasil antara pendekatan analitis dan pendekatan numerik dalam memprediksi besarnya penurunan tanah.

Untuk melihat gambaran umum hasil perbandingan penurunan dari masing-masing metode, rekapitulasi nilai penurunan elastis, penurunan konsolidasi, dan penurunan total disajikan pada Tabel 5.19 berikut.

**Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Perbandingan**

| <b>Jenis Penurunan</b> | <b>Metode</b>                          | <b>Nilai Rata-Rata (mm)</b> |
|------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| Penurunan elastis      | Manual                                 | 139,7115                    |
| Penurunan elastis      | <i>PLAXIS 2D</i>                       | 44,5807                     |
| Penurunan konsolidasi  | Rerata Terzaghi 1D dan <i>Settle3D</i> | 10,1615                     |
| Penurunan konsolidasi  | <i>PLAXIS 2D</i>                       | 6,0466                      |
| Penurunan total        | Manual                                 | 149,1623                    |
| Penurunan total        | <i>PLAXIS 2D</i>                       | 50,6274                     |

#### 5.5.1 Perbandingan Penurunan Elastis

Perbandingan pertama dilakukan pada penurunan elastis. Penurunan elastis merupakan penurunan awal yang terjadi akibat perubahan tegangan tanah setelah fondasi menerima beban. Pada penelitian ini, nilai penurunan elastis diperoleh dari dua pendekatan, yaitu perhitungan manual dan analisis numerik menggunakan *PLAXIS 2D*. Perbandingan ini dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai penurunan elastis yang dihasilkan oleh pendekatan analitis dan numerik.

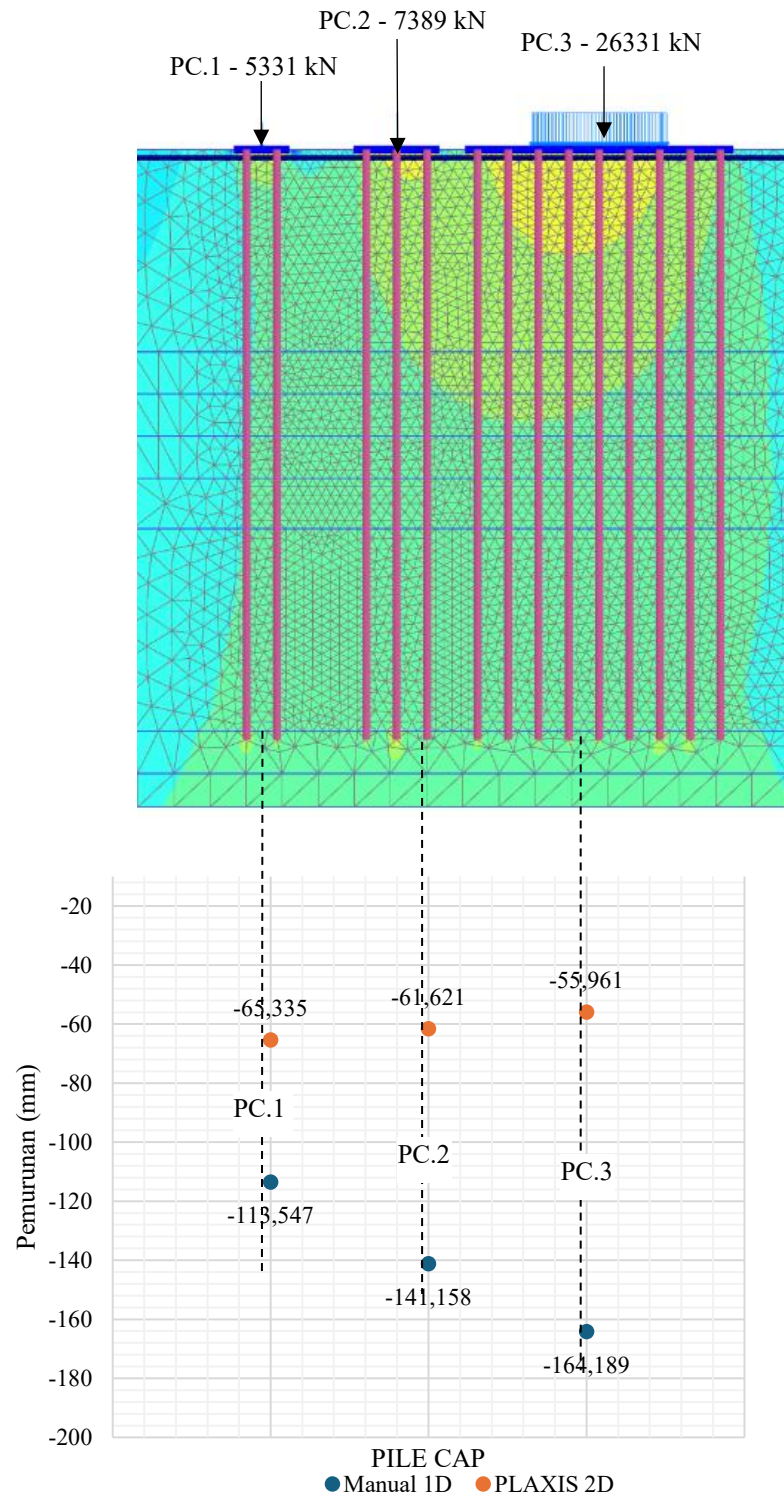
Pada perhitungan manual, nilai penurunan elastis umumnya diperoleh melalui pendekatan analitis yang menyederhanakan perilaku tanah berdasarkan parameter tanah dan beban yang bekerja pada fondasi. Ningsih & Setiawan (2023) menjelaskan bahwa analisis penurunan fondasi dapat dilakukan dengan membandingkan metode analitis dan metode elemen hingga menggunakan bantuan perangkat lunak *PLAXIS*, termasuk untuk menentukan nilai penurunan elastik pada fondasi tiang. Selain itu, pendekatan analitis satu dimensi banyak digunakan dalam perhitungan penurunan karena lebih sederhana, dengan asumsi utama bahwa deformasi yang diperhitungkan dominan terjadi pada arah vertikal, sedangkan deformasi arah horizontal sering diabaikan dalam penyederhanaan analisis manual (Syahbana & Sarah, 2012). Berbeda dengan perhitungan manual, *PLAXIS 2D* menggunakan metode elemen hingga dua dimensi yang memungkinkan pemodelan geometri, parameter tanah, pembebanan, serta respons deformasi tanah secara numerik. Wulandari & Tjandra (2015) menyatakan bahwa analisis numerik menggunakan metode elemen hingga dengan *PLAXIS 2D* dapat digunakan untuk

mengevaluasi settlement fondasi pada tanah lunak. Hal serupa juga ditunjukkan oleh Ardana dkk. (2025), yang membandingkan penurunan fondasi menggunakan metode analitis, metode elemen hingga dengan *PLAXIS 2D*, dan hasil pengujian lapangan. Dengan demikian, analisis numerik menggunakan *PLAXIS 2D* dapat memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap perubahan deformasi dan perilaku fondasi karena mempertimbangkan kondisi tanah dan sistem pembebanan dalam model dua dimensi. Hasil perbandingan penurunan elastis berdasarkan perhitungan manual dan analisis *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut.

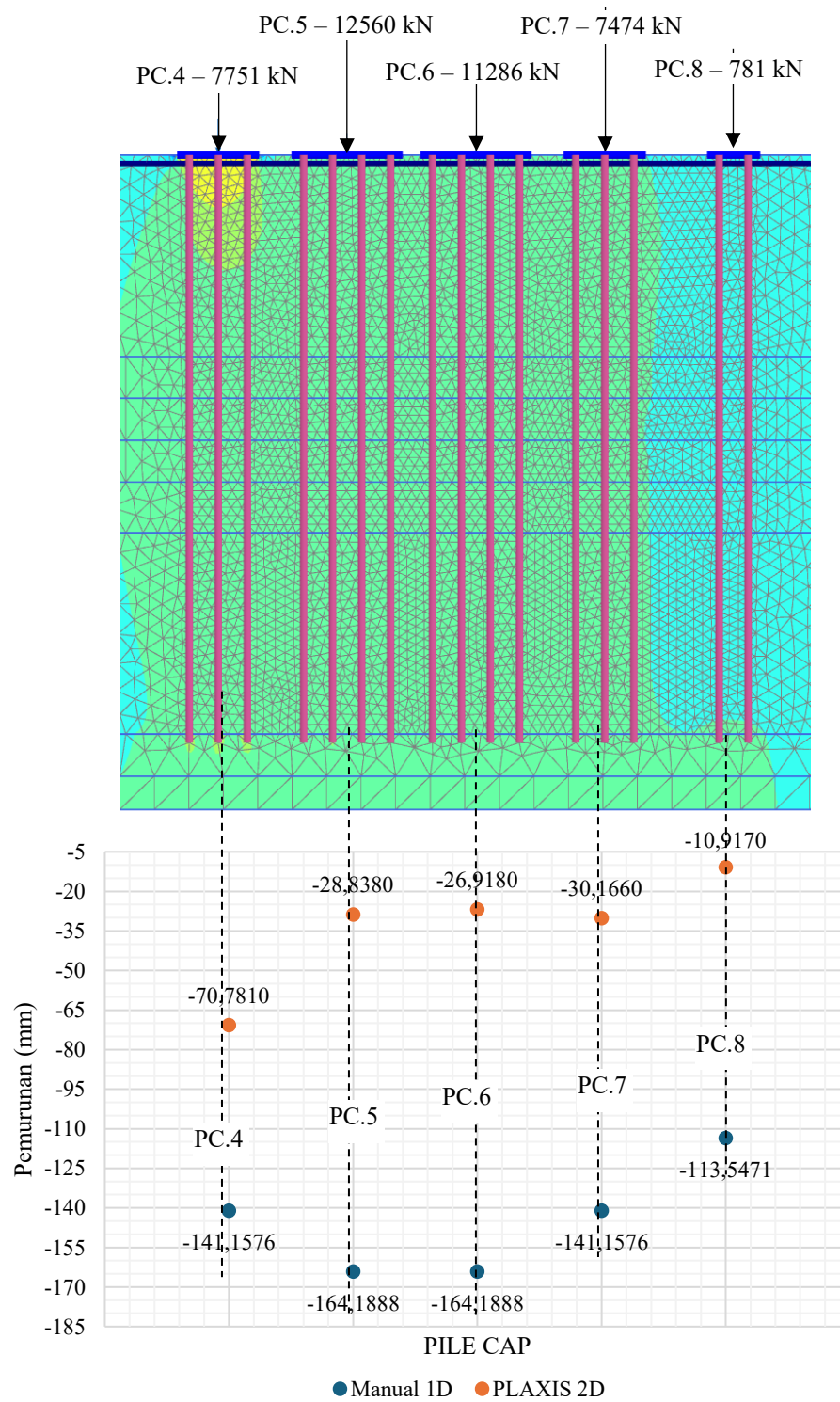
**Tabel 5.19 Perbandingan Penurunan Elastis**

| Kode      | Manual<br>(mm) | <i>PLAXIS 2D</i><br>(mm) | Selisih<br>(mm) | Presentase<br>(%) |
|-----------|----------------|--------------------------|-----------------|-------------------|
|           | a              | b                        | $c = a - b$     | $d = c/a$         |
| PC.1      | 113,5471       | 65,3350                  | 48,2121         | 42,46%            |
| PC.2      | 141,1576       | 61,6210                  | 79,5366         | 56,35%            |
| PC.3      | 164,1888       | 55,9610                  | 108,2278        | 65,92%            |
| PC.4      | 141,1576       | 70,7810                  | 70,3766         | 49,86%            |
| PC.5      | 164,1888       | 28,8380                  | 135,3508        | 82,44%            |
| PC.6      | 164,1888       | 26,9180                  | 137,2708        | 83,61%            |
| PC.7      | 141,1576       | 30,1660                  | 110,9916        | 78,63%            |
| PC.8      | 113,5471       | 10,9170                  | 102,6301        | 90,39%            |
| PC.9      | 164,1888       | 27,6130                  | 136,5758        | 83,18%            |
| PC.10     | 164,1888       | 27,8200                  | 136,3688        | 83,06%            |
| PC.11     | 141,1576       | 60,7110                  | 80,4466         | 56,99%            |
| PC.12     | 113,5471       | 24,4200                  | 89,1271         | 78,49%            |
| PC.13     | 141,1576       | 70,9230                  | 70,2346         | 49,76%            |
| PC.14     | 141,1576       | 64,2680                  | 76,8896         | 54,47%            |
| PC.15     | 113,5471       | 22,9700                  | 90,5771         | 79,77%            |
| PC.16     | 113,5471       | 65,3230                  | 48,2241         | 42,47%            |
| PC.17     | 141,1576       | 61,2730                  | 79,8846         | 56,59%            |
| PC.18     | 164,1888       | 53,5640                  | 110,6248        | 67,38%            |
| PC.19     | 113,5471       | 17,6120                  | 95,9351         | 84,49%            |
| Rata-rata | 139,7115       | 44,5807                  | 95,1308         | 68,09%            |

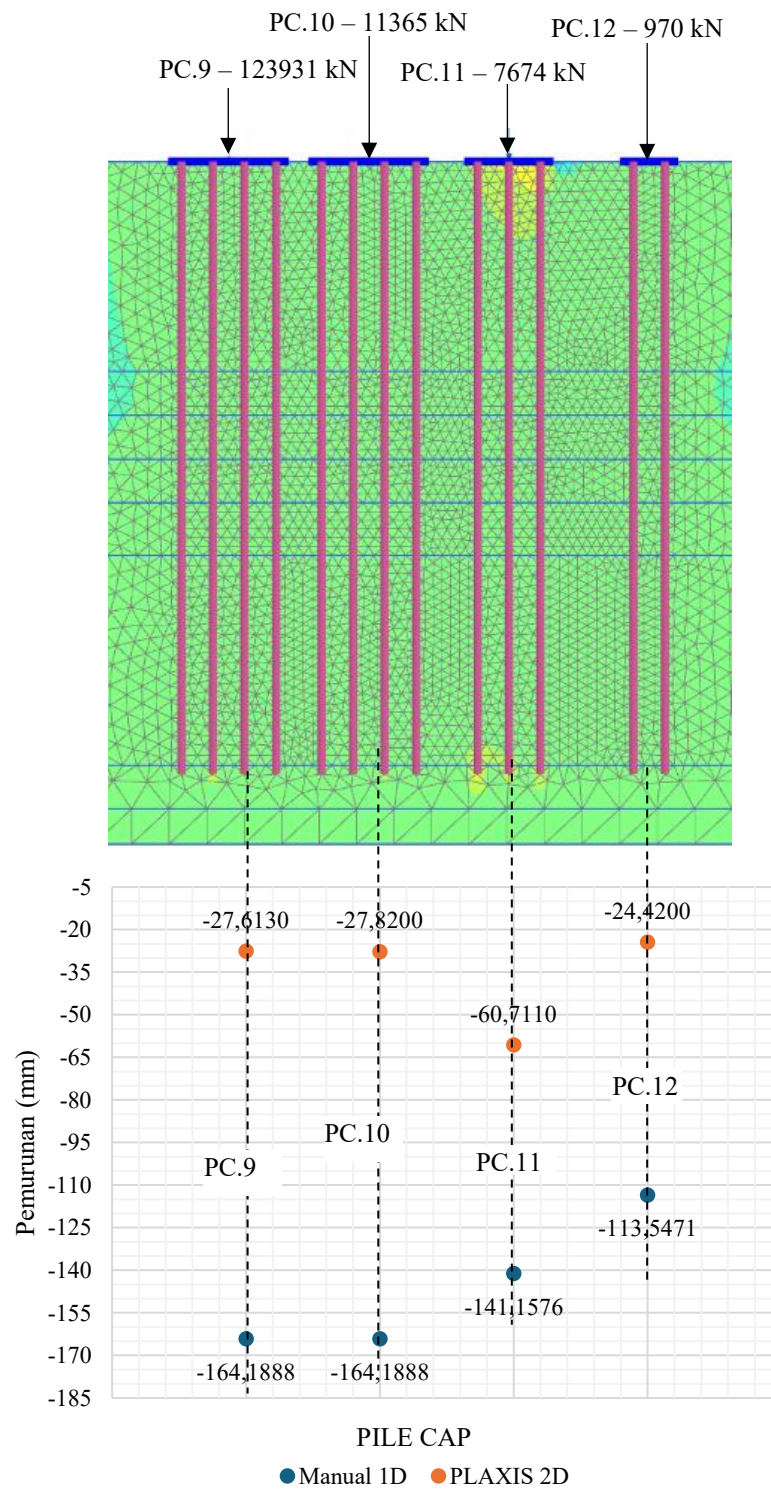
Untuk memperjelas perbedaan nilai penurunan elastis setiap potongan antara Metode manual dan *PLAXIS 2D* pada setiap *pile cap*, hasil pada Tabel 5.19 dapat dilihat pada Gambar 5.28 sampai 5.32 berikut.



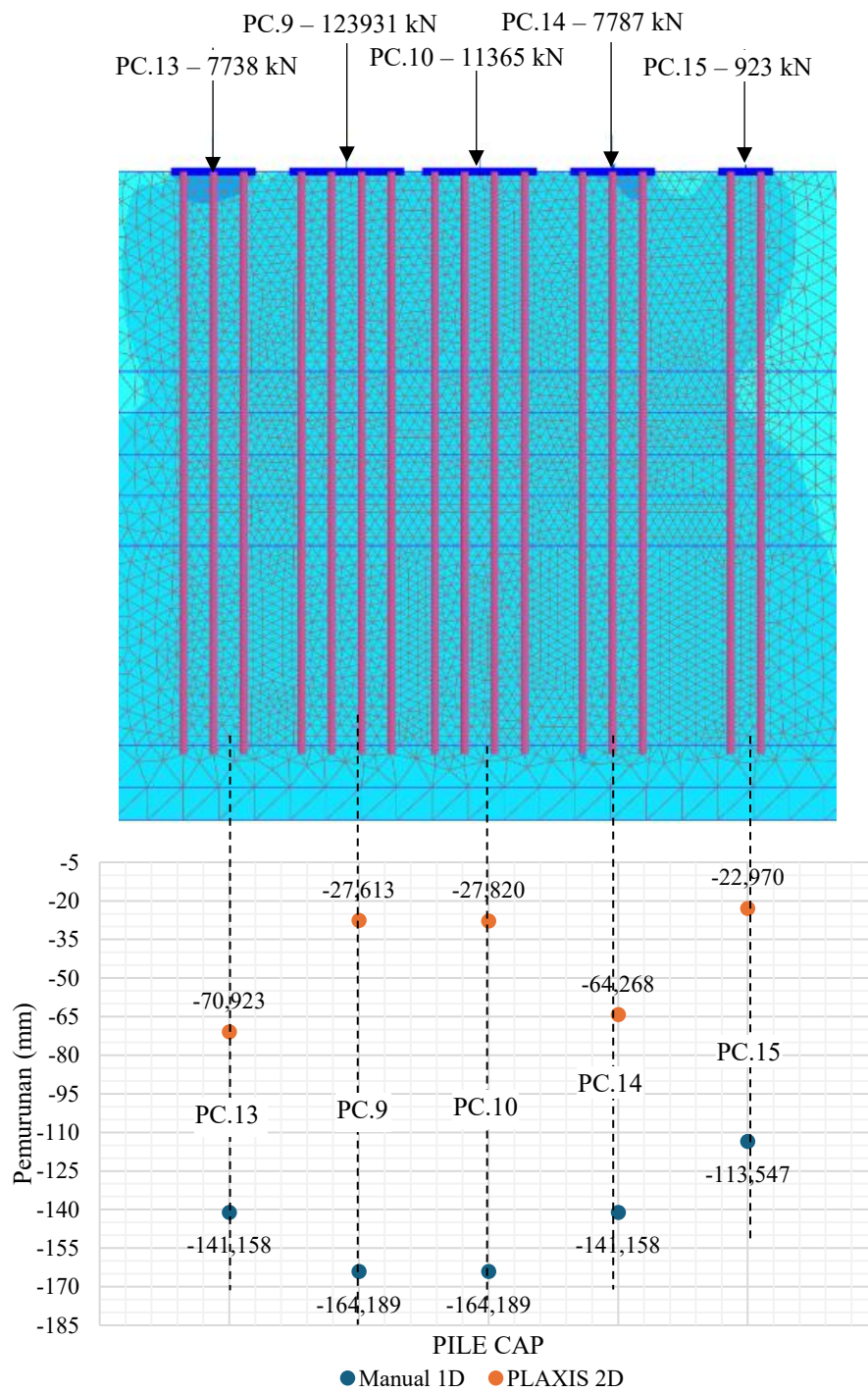
**Gambar 5.19 Perbandingan Potongan 1 Penurunan Elastis Manual dan *PLAXIS 2D***



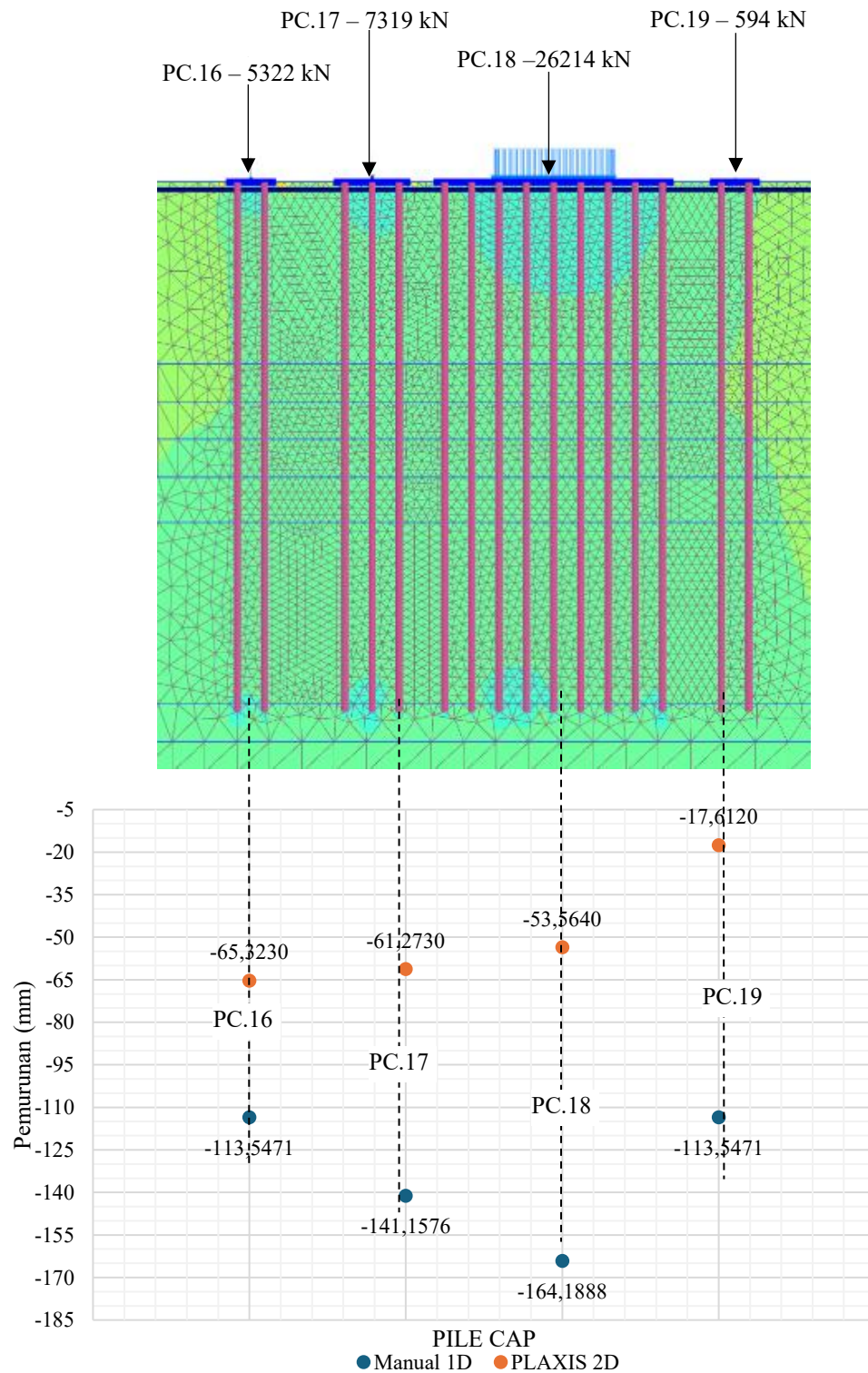
**Gambar 5.20 Perbandingan Potongan 2 Penurunan Elastis Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.21 Perbandingan Potongan 3 Penurunan Elastis Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.22 Perbandingan Potongan 4 Penurunan Elastis Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.23 Perbandingan Potongan 5 Penurunan Elastis Manual dan *PLAXIS 2D***

Berdasarkan Tabel 5.19 dan Gambar 5.28 sampai 5.32 nilai penurunan elastis hasil perhitungan manual secara umum lebih besar dibandingkan hasil analisis *PLAXIS 2D* pada seluruh *pile cap*. Nilai rata-rata penurunan elastis manual adalah sebesar 139,7115 mm, sedangkan hasil *PLAXIS 2D* sebesar 44,5807 mm. selisih rata-rata antara kedua metode adalah sebesar 95,1308 mm atau 68,09% terhadap manual.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode manual menghasilkan nilai yang lebih konservatif dibandingkan *PLAXIS 2D*. Hal ini dapat terjadi karena perhitungan manual menggunakan pendekatan analitis dengan asumsi yang lebih sederhana, sedangkan *PLAXIS 2D* mempertimbangkan kondisi geometri, parameter tanah, kondisi batas, dan deformasi tanah secara numerik dalam 2-dimensi.

#### 5.5.2 Perbandingan Penurunan Konsolidasi

Perbandingan selanjutnya dilakukan terhadap nilai penurunan konsolidasi. Penurunan konsolidasi merupakan penurunan yang terjadi akibat keluarnya air pori dari tanah berbutir halus sehingga tegangan efektif tanah meningkat secara bertahap. Pada penelitian ini, nilai penurunan konsolidasi dari pendekatan analitis diperoleh dari hasil perhitungan konsolidasi 1-dimensi Terzaghi. Selain itu, digunakan juga hasil analisis *Settle3D* sebagai pembanding karena *Settle3D* merupakan program lunak 3-dimensi yang dapat digunakan untuk menganalisis penurunan dan konsolidasi tanah di bawah fondasi, dan timbunan (Rocscience, 2025).

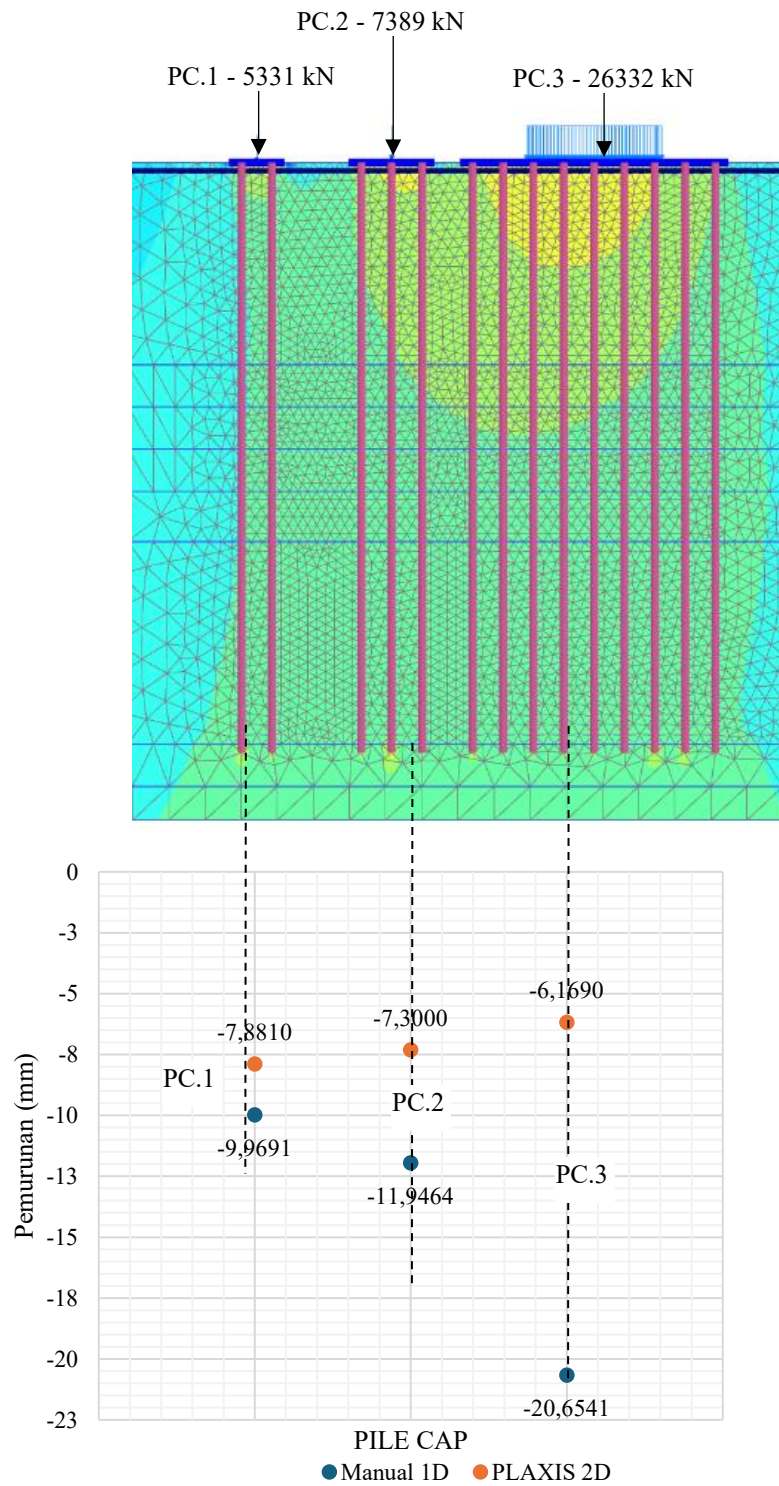
Nilai penurunan konsolidasi pembanding diperoleh dari nilai rata-rata hasil konsolidasi Terzaghi 1-dimensi dan *Settle3D*. Penggunaan nilai rata-rata ini bertujuan untuk memperoleh nilai pembanding yang lebih representative sebelum dibandingkan dengan hasil *PLAXIS 2D*. Metode Terzaghi 1-dimensi digunakan karena mampu menggambarkan proses konsolidasi vertikal secara analitis, sedangkan *Settle3D* digunakan untuk memberikan gambaran tambahan terhadap distribusi penurunan konsolidasi dalam ruang 3-dimensi. Dengan demikian, nilai rata-rata tersebut tidak dimaksudkan untuk menggantikan salah satu metode, tetapi digunakan sebagai nilai pembanding terhadap hasil analisis numerik *PLAXIS 2D*.

Hasil perbandingan penurunan elastis berdasarkan perhitungan manual dan analisis *PLAXIS 2D* dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut.

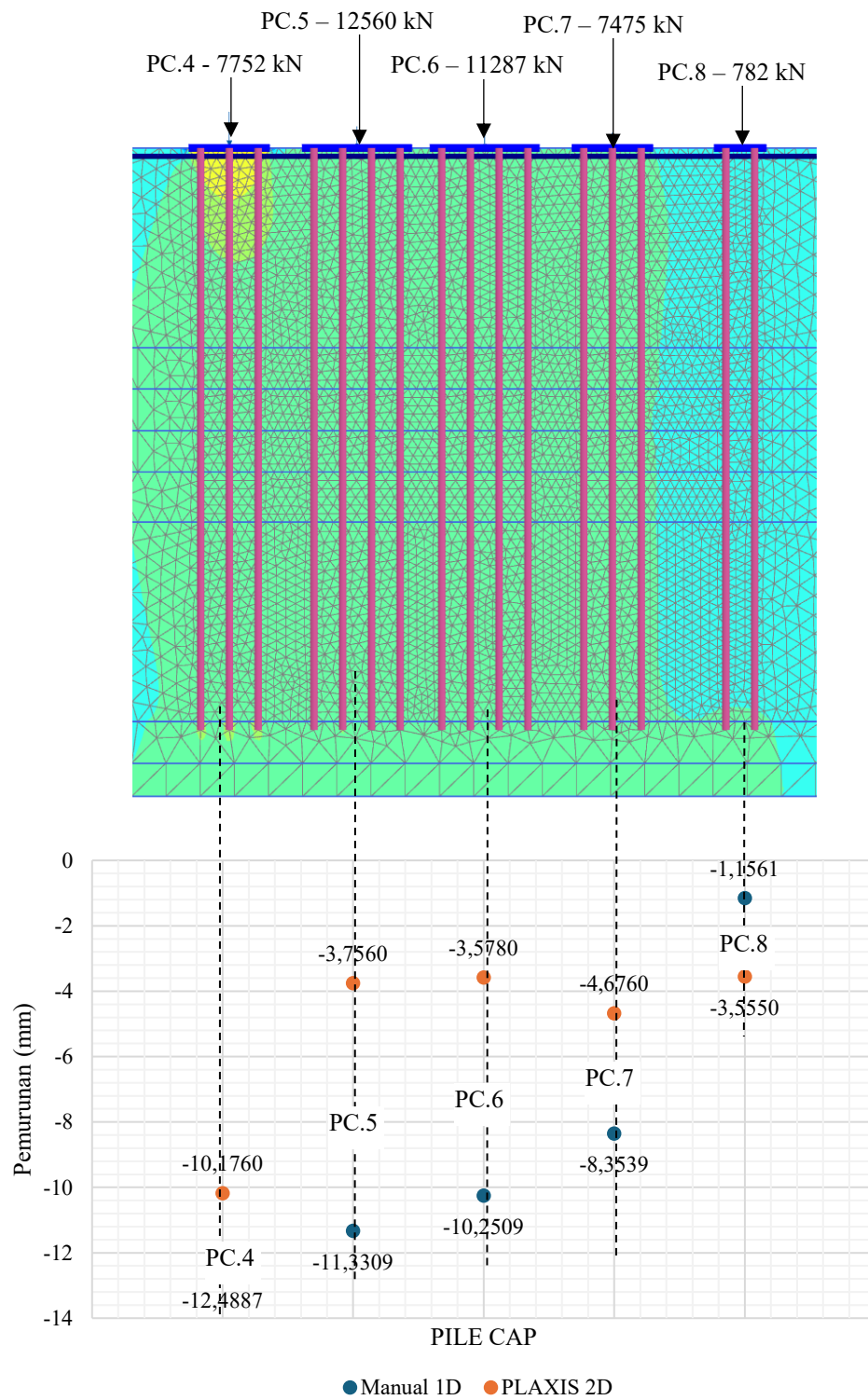
**Tabel 5.20 Perbandingan Penurunan Konsolidasi**

| Kode      | Manual<br>(mm) | <i>PLAXIS 2D</i><br>(mm) | Selisih<br>(mm) | Presentase<br>(%) |
|-----------|----------------|--------------------------|-----------------|-------------------|
|           | a              | b                        | $c = a - b$     | $d = c/a$         |
| PC.1      | 9,9691         | 7,8810                   | 2,0881          | 20,95%            |
| PC.2      | 11,9464        | 7,3000                   | 4,6464          | 38,89%            |
| PC.3      | 20,6541        | 6,1690                   | 14,4851         | 70,13%            |
| PC.4      | 12,4887        | 10,1760                  | 2,3127          | 18,52%            |
| PC.5      | 11,3309        | 3,7560                   | 7,5749          | 66,85%            |
| PC.6      | 10,2509        | 3,5780                   | 6,6729          | 65,10%            |
| PC.7      | 8,3539         | 4,6760                   | 3,6779          | 44,03%            |
| PC.8      | 1,1561         | 3,5550                   | -2,3989         | -207,49%          |
| PC.9      | 11,1904        | 3,4380                   | 7,7524          | 69,28%            |
| PC.10     | 10,3176        | 3,4430                   | 6,8746          | 66,63%            |
| PC.11     | 12,3735        | 6,7450                   | 5,6285          | 45,49%            |
| PC.12     | 2,1775         | 4,6670                   | -2,4895         | -114,33%          |
| PC.13     | 12,4692        | 10,7470                  | 1,7222          | 13,81%            |
| PC.14     | 12,5418        | 8,1570                   | 4,3848          | 34,96%            |
| PC.15     | 2,1406         | 5,4740                   | -3,3334         | -155,72%          |
| PC.16     | 9,9529         | 7,9310                   | 2,0219          | 20,31%            |
| PC.17     | 11,8405        | 7,3630                   | 4,4775          | 37,82%            |
| PC.18     | 20,5729        | 5,7480                   | 14,8249         | 72,06%            |
| PC.19     | 1,3416         | 4,0820                   | -2,7404         | -204,26%          |
| Rata-rata | 10,1615        | 6,0466                   | 4,1149          | 40,49%            |

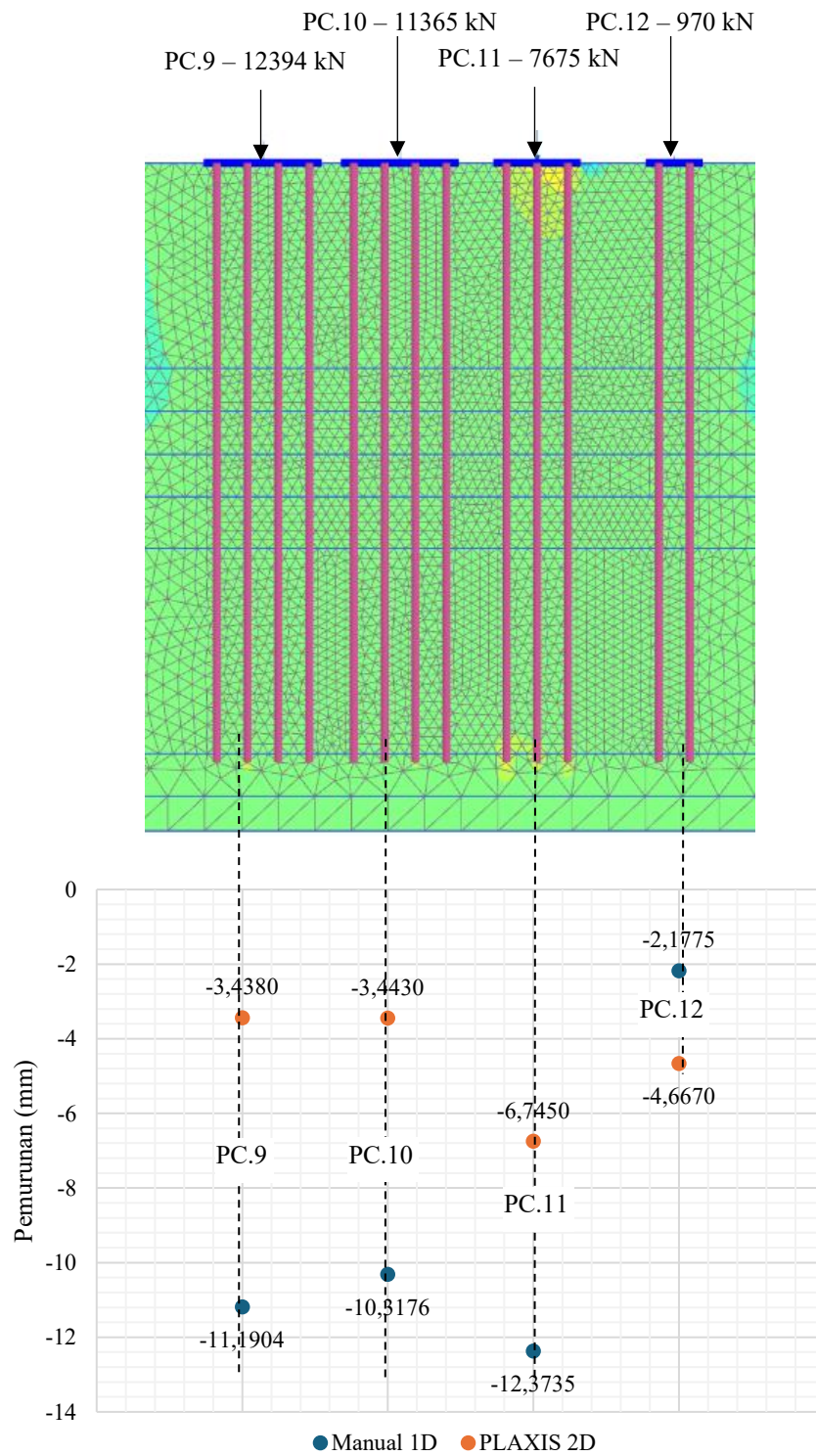
Untuk memperjelas perbandingan nilai penurunan konsolidasi antara rata-rata Terzaghi 1D – *Settle3D* dan *PLAXIS* pada setiap *pile cap*, hasil pada Tabel 5.21 disajikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.33 sampai Gambar 5.37 berikut.



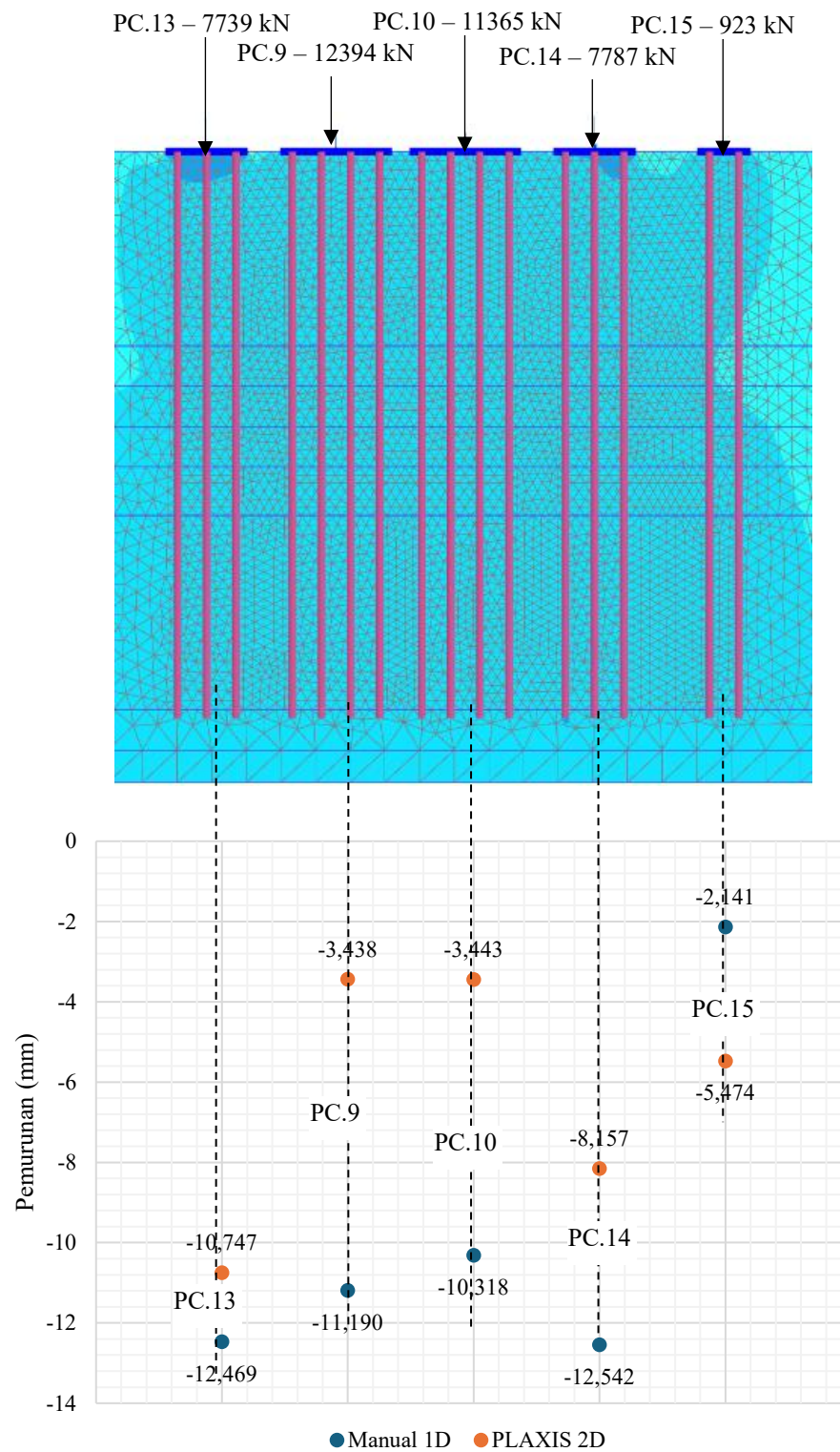
**Gambar 5.24 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 1 Konsolidasi 1-Dimensi dan *PLAXIS 2D***



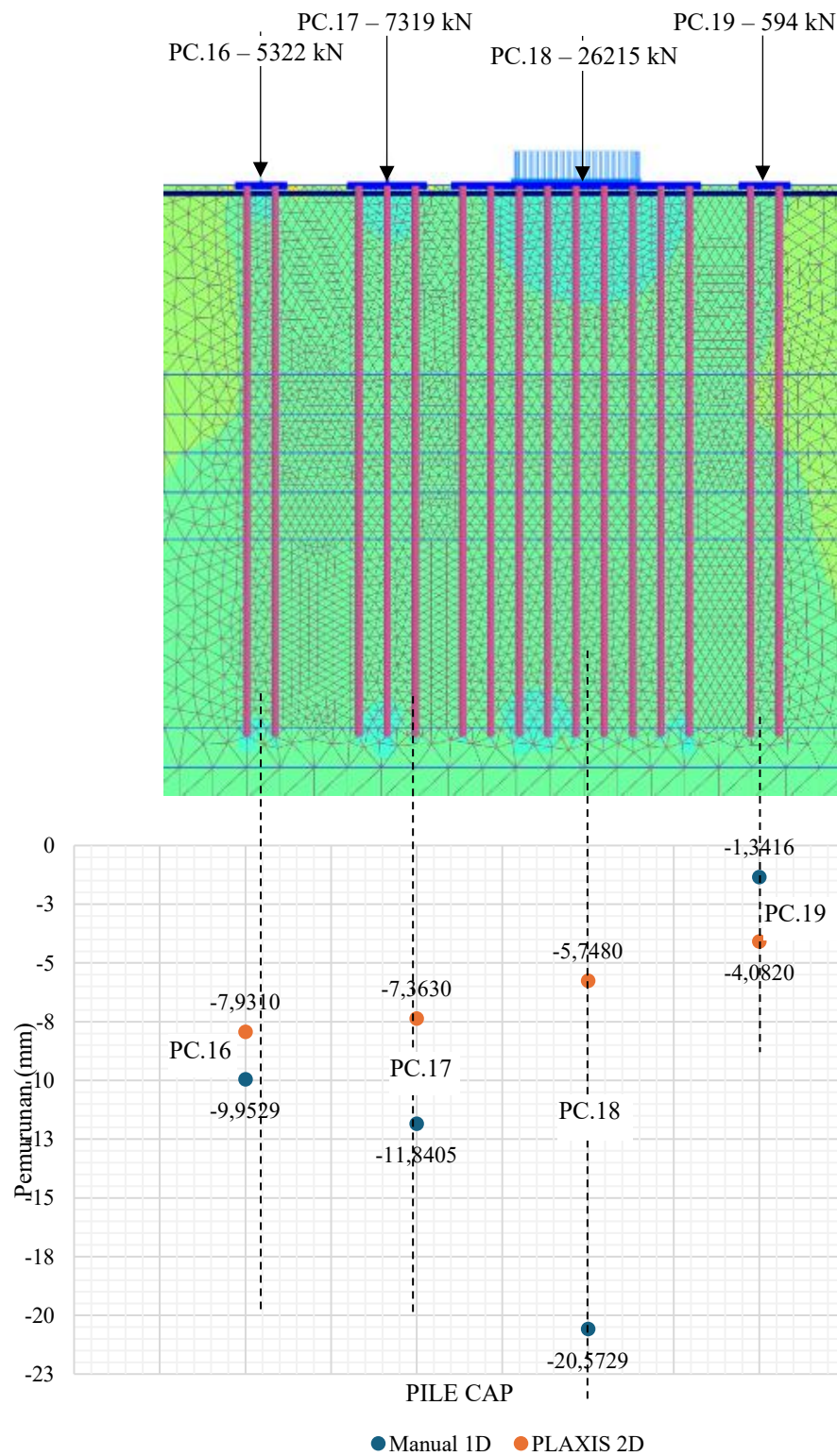
**Gambar 5.25 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 2 Konsolidasi 1-Dimensi dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 3 Konsolidasi 1-Dimensi dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.27 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 4 Konsolidasi 1-Dimensi dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.28 Grafik Perbandingan Penurunan Potongan 5 Konsolidasi 1-Dimensi dan *PLAXIS 2D***

Berdasarkan Tabel 5.21 dan Gambar 5.33 sampai Gambar 5.37, nilai rata-rata penurunan konsolidasi dari Terzaghi 1D dan *Settle3D* adalah sebesar 10,1615 mm, sedangkan nilai rata-rata hasil *PLAXIS 2D* adalah sebesar 6,0466 mm. Selisih rata-rata antara kedua pendekatan tersebut adalah sebesar 4,1149 mm atau 40,49% terhadap nilai rata-rata Terzaghi 1D dan *Settle3D*. Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa nilai penurunan konsolidasi dari pendekatan Terzaghi 1D dan *Settle3D* lebih besar dibandingkan *PLAXIS 2D*. Perbedaan tersebut terjadi karena metode Terzaghi 1D menghitung konsolidasi berdasarkan deformasi vertikal satu dimensi, sedangkan *PLAXIS 2D* menghitung deformasi tanah secara numerik dengan mempertimbangkan kondisi geometri, parameter tanah, kondisi batas, dan distribusi tegangan dalam bidang dua dimensi. Analisis numerik dengan *PLAXIS 2D* dapat digunakan untuk meninjau deformasi fondasi dan perilaku tanah berdasarkan metode elemen hingga.

Selisih terbesar terjadi pada potongan 5 di PC.18, yaitu sebesar 14,8249 mm atau 72,06%, kemudian diikuti potongan 1 di PC.3 sebesar 14,4851 mm atau 70,13%. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh perbedaan pendekatan analisis, kondisi batas, geometri pemodelan, serta interaksi tanah dan fondasi pada masing-masing metode. Sementara itu, pada perhitungan konsolidasi manual, beban yang digunakan tetap berasal dari hasil reaksi *ETABS*, sehingga beban pada *pile cap* tersebut tidak mengalami penyebaran seperti pada model *PLAXIS*. Akibatnya, nilai penurunan konsolidasi pada perhitungan manual dan *Settle3D* menjadi lebih besar dibandingkan hasil *PLAXIS 2D*. Namun, pada beberapa *pile cap* seperti PC.8, PC.12, PC.15, dan PC.19, hasil *PLAXIS 2D* justru lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa hasil numerik tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban, tetapi juga oleh posisi *pile cap*, kondisi batas, dan interaksi tanah-fondasi dalam model.

### 5.5.3 Perbandingan Penurunan Total

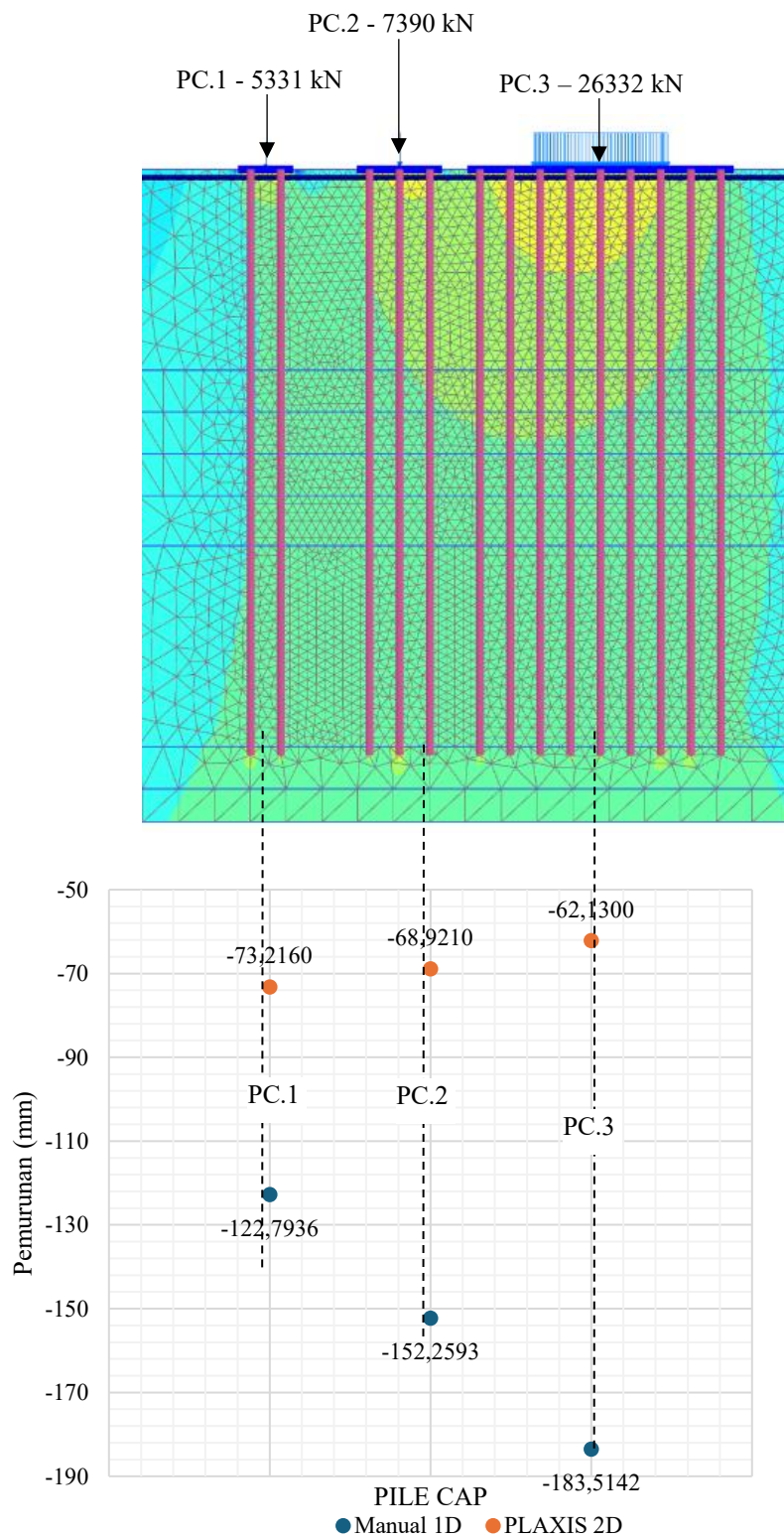
Perbandingan selanjutnya dilakukan terhadap nilai penurunan total. Penurunan total pada penelitian ini diperoleh dari penjumlahan antara penurunan elastis dan penurunan konsolidasi. Pada perhitungan manual, penurunan total dihitung dari hasil penurunan elastis manual dan penurunan konsolidasi Terzaghi 1D, sedangkan pada *PLAXIS 2D* penurunan total diperoleh dari hasil penurunan

elastis dan konsolidasi berdasarkan pemodelan numerik. Penurunan total perlu dianalisis karena nilai ini menunjukkan besarnya deformasi akhir yang terjadi pada sistem fondasi akibat beban struktur. Secara umum, penurunan fondasi dalam dapat terdiri atas penurunan segera, konsolidasi primer, dan kompresi elastis, sehingga penurunan total merupakan gabungan dari beberapa komponen penurunan tersebut.

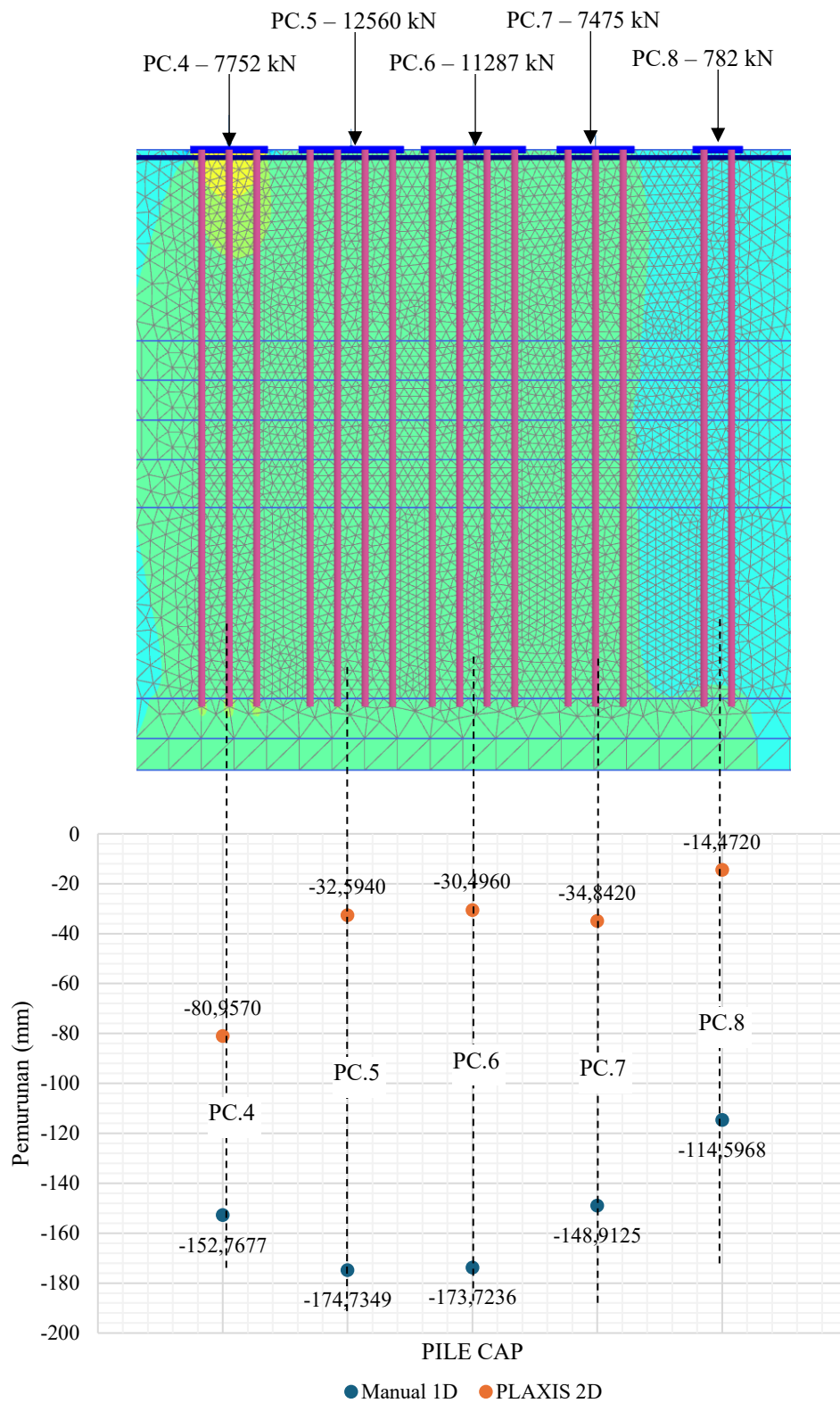
**Tabel 5.21 Perbandingan Penurunan Total**

| Kode      | Manual<br>(mm) | PLAXIS 2D<br>(mm) | Selisih<br>(mm) | Presentase<br>(%) |
|-----------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|           | a              | b                 | c = a – b       | d = c/a           |
| PC.1      | 122,7936       | 73,2160           | 49,5776         | 40,37%            |
| PC.2      | 152,2593       | 68,9210           | 83,3383         | 54,73%            |
| PC.3      | 183,5142       | 62,1300           | 121,3842        | 66,14%            |
| PC.4      | 152,7677       | 80,9570           | 71,8107         | 47,01%            |
| PC.5      | 174,7349       | 32,5940           | 142,1409        | 81,35%            |
| PC.6      | 173,7236       | 30,4960           | 143,2276        | 82,45%            |
| PC.7      | 148,9125       | 34,8420           | 114,0705        | 76,60%            |
| PC.8      | 114,5968       | 14,4720           | 100,1248        | 87,37%            |
| PC.9      | 174,6032       | 31,0510           | 143,5522        | 82,22%            |
| PC.10     | 173,7860       | 31,2630           | 142,5230        | 82,01%            |
| PC.11     | 152,6597       | 67,4560           | 85,2037         | 55,81%            |
| PC.12     | 115,5524       | 29,0870           | 86,4654         | 74,83%            |
| PC.13     | 152,7494       | 81,6700           | 71,0794         | 46,53%            |
| PC.14     | 152,8175       | 72,4250           | 80,3925         | 52,61%            |
| PC.15     | 115,4560       | 28,4440           | 87,0120         | 75,36%            |
| PC.16     | 122,7784       | 73,2540           | 49,5244         | 40,34%            |
| PC.17     | 152,1601       | 68,6360           | 83,5241         | 54,89%            |
| PC.18     | 183,4375       | 59,3120           | 124,1255        | 67,67%            |
| PC.19     | 114,7816       | 21,6940           | 93,0876         | 81,10%            |
| Rata-rata | 149,1623       | 50,6274           | 98,5350         | 65,76%            |

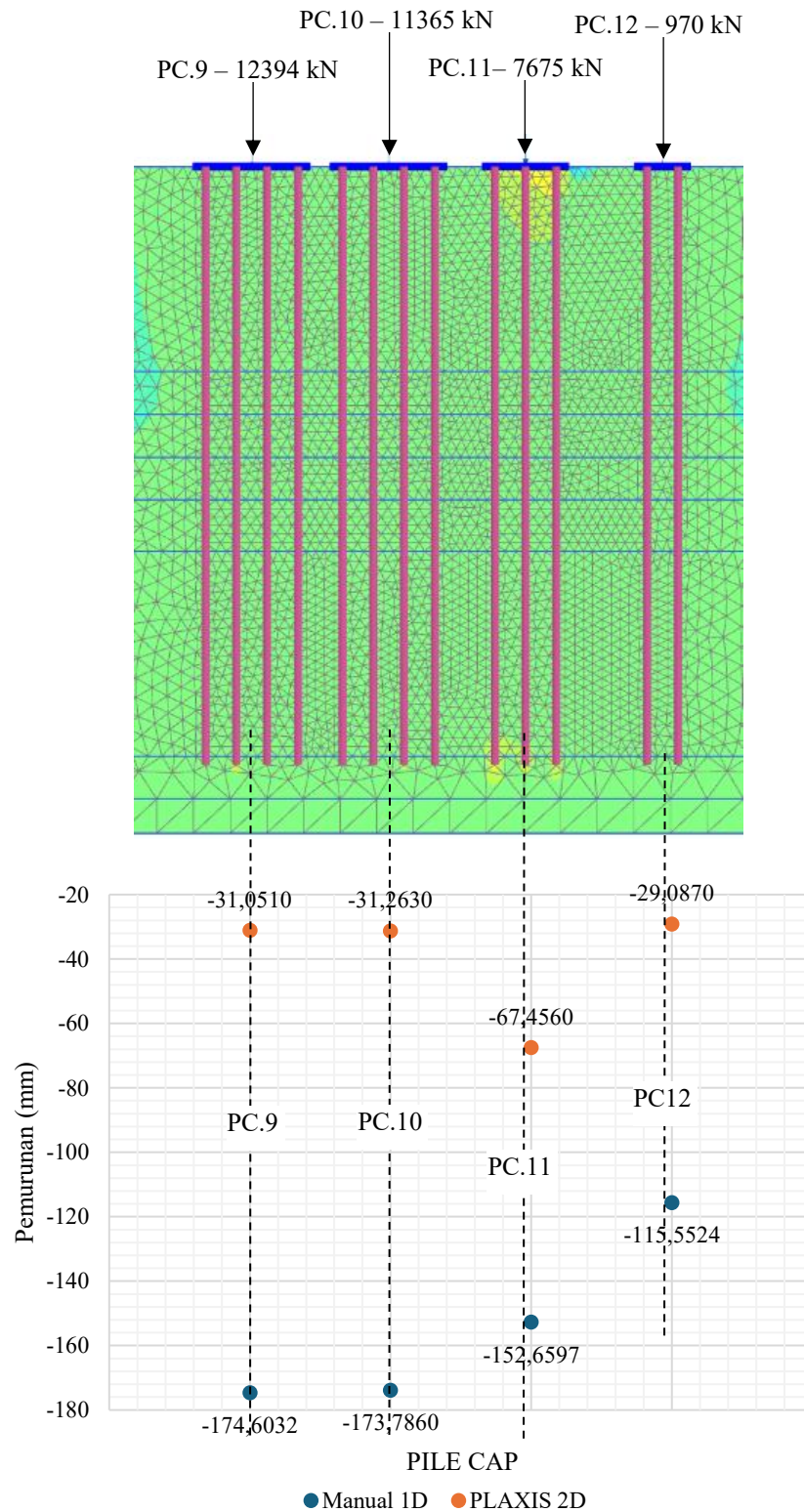
Untuk memperjelas perbandingan nilai penurunan total antara hasil manual dan *PLAXIS 2D* pada setiap *pile cap*, data pada Tabel 5.22 disajikan dalam bentuk grafik setiap potongan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.38 sampai Gambar 5.42 berikut.



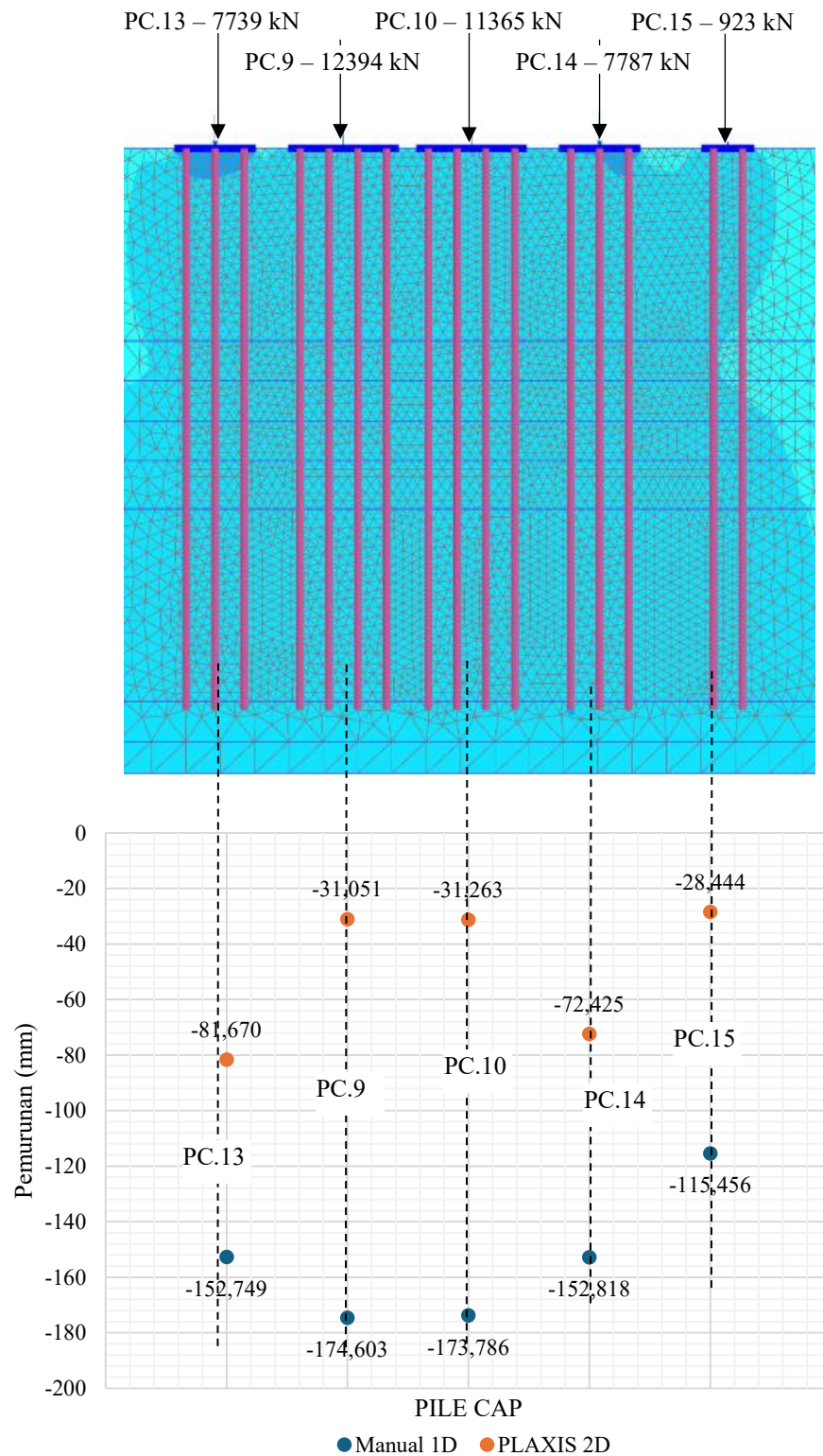
**Gambar 5.29 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 1 Manual dan *PLAXIS 2D***



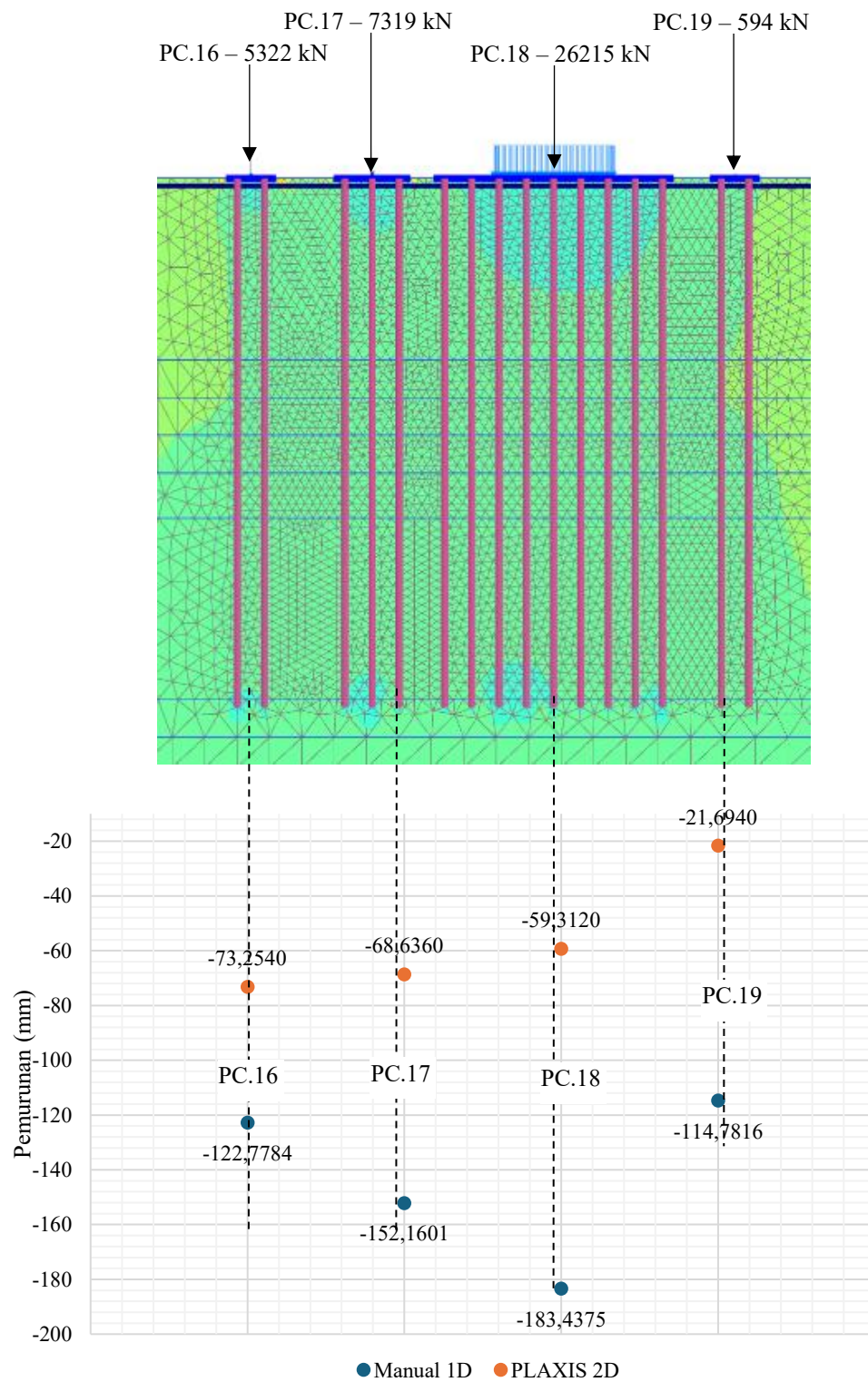
**Gambar 5.30 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 2 Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.31 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 3 Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.32 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 4 Manual dan *PLAXIS 2D***



**Gambar 5.33 Grafik Perbandingan Penurunan Total Potongan 5 Manual dan *PLAXIS 2D***

Berdasarkan Tabel 5.22 dan Gambar 5.38 sampai Gambar 5.42, nilai rata-rata penurunan total hasil perhitungan manual adalah sebesar 149,1623 mm, sedangkan nilai rata-rata penurunan total dari *PLAXIS 2D* adalah sebesar 50,6274 mm. Selisih rata-rata antara kedua metode adalah sebesar 98,5350 mm atau 66,06% terhadap hasil manual. Hasil ini menunjukkan bahwa penurunan total manual lebih besar dibandingkan *PLAXIS 2D* pada seluruh *pile cap*.

Perbedaan tersebut terjadi karena nilai penurunan total manual sangat dipengaruhi oleh penurunan elastis manual yang relatif besar. Selain itu, metode manual menggunakan pendekatan analitis dengan asumsi yang lebih sederhana, sedangkan *PLAXIS 2D* menghitung deformasi tanah melalui pemodelan numerik dua dimensi dengan mempertimbangkan geometri, parameter tanah, kondisi batas, dan distribusi tegangan. Dengan demikian, metode manual cenderung memberikan hasil yang lebih konservatif, sedangkan *PLAXIS 2D* memberikan gambaran deformasi yang lebih rinci sesuai kondisi pemodelan.

#### 5.5.4 Perbandingan Beda Penurunan Manual dan *PLAXIS 2D*

Beda penurunan dianalisis untuk mengetahui perbedaan penurunan antar *pile cap* pada setiap potongan. Pada penelitian ini, beda penurunan dinyatakan dalam bentuk sudut distorsi atau  $\theta$ , yang dihitung berdasarkan selisih penurunan total antar *pile cap* terhadap jarak antar *pile cap*. Nilai  $\theta$  digunakan untuk mengetahui apakah perbedaan penurunan antar *pile cap* masih berada dalam batas yang disyaratkan.

Hasil perhitungan beda penurunan manual 1-dimensi telah disajikan pada Tabel 5.5, sedangkan hasil perhitungan beda penurunan *PLAXIS 2D* telah disajikan pada Tabel 5.18. Untuk mempermudah pembacaan hasil, rekapitulasi perbandingan nilai  $\theta$  dari kedua metode disajikan pada Tabel 5.23 berikut.

**Tabel 5.22 Rekapitulasi Perbandingan Beda Penurunan Manual dan *PLAXIS 2D***

| Keterangan               | Manual 1D     | <i>PLAXIS 2D</i> |
|--------------------------|---------------|------------------|
| Nilai $\theta$ maksimum  | 0,4917        | 0,3625           |
| Lokasi $\theta$ maksimum | PC.18 – PC.19 | PC.13 – PC.9     |

**Lanjutan Tabek 5.23 Rekapitulasi Perbandingan Beda Penurunan Manual dan *PLAXIS 2D***

| <b>Keterangan</b>                   | <b>Manual 1D</b> | <b><i>PLAXIS 2D</i></b> |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------|
| Nilai $\theta$ minimum              | 0,00585          | 0,0015                  |
| Lokasi $\theta$ minimum             | PC.9 – PC.10     | PC.9 – PC.10            |
| Jumlah segmen memenuhi syarat       | 9 segmen         | 9 segmen                |
| Jumlah segmen tidak memenuhi syarat | 7 segmen         | 7 segmen                |

Berdasarkan Tabel 5.23, nilai  $\theta$  maksimum pada metode manual 1-dimensi terjadi pada segmen PC.18–PC.19 sebesar  $0,4917^\circ$ , sedangkan pada *PLAXIS 2D* nilai  $\theta$  maksimum terjadi pada segmen PC.13–PC.9 sebesar  $0,3625^\circ$ . Perbedaan lokasi nilai maksimum ini menunjukkan bahwa pola beda penurunan yang dihasilkan oleh metode manual dan *PLAXIS 2D* tidak sepenuhnya sama. Pada metode manual, nilai  $\theta$  sangat dipengaruhi oleh selisih penurunan total hasil perhitungan analitis antar *pile cap*. Sementara itu, pada *PLAXIS 2D*, nilai  $\theta$  dipengaruhi oleh distribusi deformasi tanah dalam model numerik, kondisi geometri, pembebanan, dan interaksi tanah-fondasi.

Secara jumlah, hasil kedua metode menunjukkan pola yang relatif sebanding, yaitu terdapat 9 segmen memenuhi syarat dan 7 segmen tidak memenuhi syarat. Meskipun demikian, segmen yang tidak memenuhi syarat tidak selalu berada pada lokasi yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa *PLAXIS 2D* mampu menangkap variasi lokal penurunan yang lebih dipengaruhi oleh kondisi pemodelan dua dimensi, sedangkan metode manual memberikan hasil berdasarkan pendekatan perhitungan satu dimensi. Dengan demikian, hasil manual dapat digunakan sebagai kontrol awal, sedangkan *PLAXIS 2D* digunakan untuk melihat pola distribusi beda penurunan secara lebih rinci pada setiap potongan.

#### 5.5.5 Pengaruh Interaksi Antar *Pile cap* Terhadap Pola Penurunan

##### 1. Evaluasi model *pile cap* tunggal

Analisis beda penurunan dilakukan berdasarkan garis potongan *pile cap* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.16. Garis potongan tersebut digunakan untuk meninjau pola penurunan beberapa *pile cap* yang berada

dalam satu jalur analisis. Berdasarkan perbandingan pada Gambar 5.25, beberapa *pile cap* yang terletak pada bagian tepi atau ujung kelompok menunjukkan nilai penurunan konsolidasi hasil *PLAXIS 2D* yang lebih besar dibandingkan hasil perhitungan manual. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pola penurunan dalam model numerik tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban pada setiap *pile cap*, tetapi juga oleh posisi, konfigurasi, jarak antar elemen fondasi, serta interaksi tanah dan fondasi di sekitarnya.

Untuk mengidentifikasi pengaruh interaksi antar *pile cap*, dilakukan pemodelan tambahan terhadap PC.8, PC.12, PC.15, dan PC.19 secara terpisah. Keempat *pile cap* tersebut dipilih karena menunjukkan perbedaan yang cukup jelas antara penurunan konsolidasi hasil model potongan *PLAXIS 2D* dan hasil perhitungan manual. Pada model tunggal, *pile cap* dianalisis tanpa keberadaan *pile cap* lain di sekitarnya. Dengan demikian, perubahan nilai penurunan antara model tunggal dan model potongan dapat digunakan untuk mengevaluasi kontribusi interaksi antarelemen fondasi.

Hasil perbandingan penurunan konsolidasi pada ketiga kondisi analisis disajikan pada Tabel 5.24 berikut.

**Tabel 5.23 Perbandingan Penurunan Hasil Manual, Model *Pile Cap* Tunggal, dan Model Potongan**

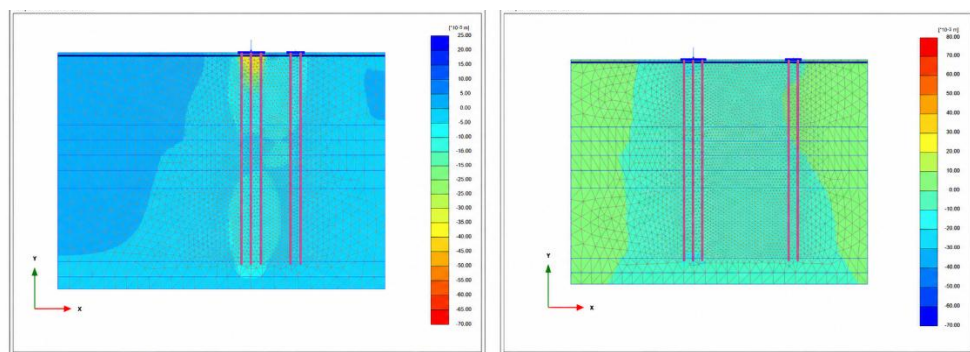
| <b>Kode</b> | <b>Manual<br/>(mm)</b> | <b>PLAXIS Model<br/>Tunggal (mm)</b> | <b>PLAXIS Model<br/>Potongan (mm)</b> |
|-------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| PC.8        | 1,1561                 | 1,0690                               | 3,5550                                |
| PC.12       | 2,1775                 | 2,1130                               | 4,6670                                |
| PC.15       | 2,1406                 | 1,9810                               | 5,4740                                |
| PC.19       | 1,3416                 | 1,5120                               | 4,0820                                |

Berdasarkan Tabel 5.24, hasil pemodelan *pile cap* tunggal pada PC.8, PC.12, dan PC.15 dan PC.19 menunjukkan nilai penurunan konsolidasi yang relatif mendekati hasil perhitungan manual. Namun, ketika *pile cap* tersebut dimodelkan bersama elemen fondasi lain dalam model potongan, nilai penurunannya meningkat.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penurunan pada model potongan tidak hanya dipengaruhi oleh beban masing-masing *pile cap*, tetapi juga oleh interaksi antar *pile cap*, tumpang tindih zona tegangan, dan posisi fondasi dalam kelompok. Pada *pile cap* yang berada di bagian tepi atau ujung kelompok, distribusi tegangan yang tidak simetris serta kemungkinan deformasi lateral dapat menyebabkan nilai penurunan konsolidasi *PLAXIS 2D* lebih besar daripada hasil manual. Dengan demikian, model *pile cap* tunggal digunakan sebagai pembanding untuk melihat respons tunggal sebelum dipengaruhi oleh sistem fondasi secara keseluruhan.

## 2. Pengaruh variasi jarak *pile cap*

Untuk mengetahui pengaruh jarak antar-*pile cap* terhadap pola penurunan, dilakukan pemodelan tambahan menggunakan jarak 20 m dan 3,8 m. Kedua model menggunakan parameter tanah, beban, dimensi fondasi, dan tahapan analisis yang sama. Perbedaannya hanya terletak pada jarak antar-*pile cap*. Hasil pemodelan kedua variasi jarak ditunjukkan pada Gambar 5.31 berikut.



**Gambar 5.34 Perbandingan Model Variasi Jarak Antar-*Pile cap*:**

**(a) jarak 3,8 m dan (b) jarak 20 m**

Nilai penurunan yang diperoleh dari kedua variasi jarak disajikan pada Tabel 5.25 berikut.

**Tabel 5.24 Perbandingan Penurunan Berdasarkan Variasi Jarak Antar-  
*Pile cap***

| Jarak antar- <i>pile cap</i> | Kode  | Penurunan elastis (mm) | Penurunan konsolidasi (mm) | Penurunan total (mm) |
|------------------------------|-------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| 3,8 m                        | PC.11 | 60,7110                | 6,6980                     | 67,4090              |
| 3,8 m                        | PC.12 | 24,4200                | 4,6080                     | 29,0280              |
| 20 m                         | PC.11 | 48,4900                | 4,6590                     | 53,1490              |
| 20 m                         | PC.12 | 26,2160                | 4,1000                     | 30,3160              |

Berdasarkan Tabel 5.25, penambahan jarak antar *pile cap* dari kondisi awal 3,8 m menjadi 20 m menyebabkan penurunan konsolidasi PC.11 berkurang dari 6,6980 mm menjadi 4,6590 mm, sedangkan pada PC.12 berkurang dari 4,6080 mm menjadi 4,1000 mm. Penurunan total PC.11 juga menurun dari 67,4090 mm menjadi 53,1490 mm. Namun, pada PC.12 penurunan total sedikit meningkat karena perubahan komponen penurunan elastis lebih besar daripada penurunan komponen konsolidasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan jarak tidak selalu menghasilkan perubahan penurunan total yang sama pada setiap *pile cap*, karena responsnya turut dipengaruhi oleh posisi fondasi, distribusi beban, dan kekakuan elemen di sekitarnya.

Penurunan nilai konsolidasi pada kedua *pile cap* menunjukkan bahwa penambahan jarak dapat mengurangi interaksi tanah–fondasi. Ketika jarak antar *pile cap* semakin besar, zona pengaruh tegangan dan deformasi dari elemen fondasi yang berdekatan menjadi semakin terpisah sehingga tumpang tindih tegangan dalam tanah berkurang. Hannigan dkk. (2016) menjelaskan bahwa perilaku fondasi kelompok dipengaruhi oleh interaksi antarelelemen dan tumpang tindih zona pengaruh dalam tanah. Temuan Qian dkk. (2025) juga menunjukkan bahwa jarak antarelelemen fondasi memengaruhi distribusi tegangan dan perpindahan pada sistem kelompok. Meskipun penelitian tersebut membahas jarak antar *pile*, konsepnya tetap relevan untuk menjelaskan bahwa penambahan jarak antar *pile cap* dapat mengurangi interaksi dan penurunan konsolidasi.

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengujian SPT, kondisi tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh lempung sangat lunak hingga kedalaman 13 m dengan nilai  $N-SPT < 1$ . Semakin bertambah kedalaman, lapisan tanah berubah menjadi lempung lunak, kaku, sangat kaku, hingga keras. Pada kedalaman 35,5–40,5 m ditemukan lapisan pasir padat hingga sangat padat dengan nilai  $N-SPT$  51–60.
2. Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan nilai penurunan tanah antara perhitungan manual berdasarkan Teori Terzaghi, *Settle3D*, dan *PLAXIS 2D*. Pada penurunan elastis, metode manual menghasilkan rata-rata 139,7115 mm, sedangkan *PLAXIS 2D* sebesar 44,5807 mm, dengan selisih 68,09%. Pada penurunan konsolidasi, rata-rata hasil Terzaghi 1D dan *Settle3D* sebesar 10,1615 mm, sementara *PLAXIS 2D* sebesar 6,0466 mm, dengan selisih 40,49%. Adapun penurunan total rata-rata berdasarkan perhitungan manual mencapai 149,1623 mm, sedangkan *PLAXIS 2D* sebesar 50,6274 mm, dengan selisih 66,06%. Secara umum, metode manual dan *Settle3D* memberikan nilai penurunan yang lebih besar dan cenderung konservatif, sedangkan *PLAXIS 2D* menghasilkan nilai yang lebih rendah karena mempertimbangkan geometri, kondisi batas, distribusi tegangan, serta interaksi tanah dan fondasi secara numerik dua dimensi.
3. Berdasarkan hasil evaluasi, seluruh nilai penurunan fondasi pada PC.1 hingga PC.19, baik dari perhitungan manual maupun *PLAXIS 2D*, masih berada di bawah batas penurunan izin sebesar  $15 \text{ cm} + B/600$ . Nilai penurunan maksimum metode manual sebesar 183,5142 mm, sedangkan *PLAXIS 2D* sebesar 80,9570 mm, dengan nilai rata-rata masing-masing 149,1623 mm dan 50,6274 mm. Meskipun hasil perhitungan manual cenderung lebih besar

dibandingkan *PLAXIS 2D*, seluruh hasil analisis tetap memenuhi persyaratan penurunan izin berdasarkan SNI 8460:2017.

4. Hasil evaluasi beda penurunan menunjukkan bahwa metode manual satu dimensi dan *PLAXIS 2D* sama-sama menghasilkan 9 segmen yang memenuhi persyaratan dan 7 segmen yang tidak memenuhi persyaratan SNI 8460:2017. Nilai sudut distorsi maksimum metode manual terjadi pada segmen PC.18–PC.19 sebesar  $0,4917^\circ$ , sedangkan *PLAXIS 2D* terjadi pada segmen PC.13–PC.9 sebesar  $0,3625^\circ$ . Dengan demikian, meskipun jumlah segmen yang memenuhi dan tidak memenuhi persyaratan relatif sama, kedua metode menghasilkan lokasi kritis yang berbeda akibat perbedaan pendekatan analisis dan distribusi deformasi tanah. Secara keseluruhan, struktur belum sepenuhnya memenuhi persyaratan beda penurunan karena masih terdapat tujuh segmen yang melampaui batas yang diizinkan.
5. Berdasarkan kedua kontur, distribusi penurunan tanah pada area fondasi menunjukkan pola yang tidak merata. Pada metode manual, penurunan terbesar terkonsentrasi di sisi kiri dan kanan area fondasi, terutama sekitar garis 2–3, dengan nilai mendekati 180 mm, sedangkan penurunan terkecil berada di bagian bawah area dengan kisaran 120–150 mm. Sementara itu, hasil *PLAXIS 2D* menunjukkan penurunan terbesar di sepanjang sisi atas fondasi dan secara lokal di sekitar garis D–E pada garis 2 dengan nilai sekitar 70–80 mm, sedangkan penurunan terkecil berada di bagian tengah hingga bawah area fondasi dengan kisaran 25–35 mm. Secara keseluruhan, metode manual menghasilkan nilai penurunan yang lebih besar dan zona penurunan tinggi yang lebih luas dibandingkan *PLAXIS 2D*.

## 6.2 Saran

Dari hasil analisis yang diperoleh, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya maupun evaluasi perencanaan fondasi, sebagai berikut :

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pemodelan tiga dimensi agar pengaruh posisi *pile cap*, distribusi beban, kondisi batas, dan interaksi antar fondasi dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.
2. Pemantauan penurunan di lapangan disarankan dilakukan pada *pile cap* yang menunjukkan nilai kritis. Hasil pemantauan tersebut dapat digunakan untuk membandingkan hasil analisis manual dan numerik dengan perilaku aktual fondasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, D. W., & Dwicahyani, A. (2019). Prediksi Penurunan Tanah Timbunan Studi Kasus Pembangunan Rumah Susun Sewa Intitut Teknologi Kalimantan. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 04.
- Ardana, M. D. W., Predana, I. M. A., & Kartika Dewi, N. K. A. (2025). *Bearing Capacity and Settlement Analysis of Drilled Pile Foundation at The ASN-4 IKN Apartment Construction Project*. <https://doi.org/https://doi.org/10.24843/JITS.2024.v29.i01.p10>
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 6371:2015 Tata cara pengklasifikasian tanah untuk keperluan teknik dengan sistem klasifikasi unifikasi tanah*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- Briaud, J. B., Tucker, L., Lytton, R. L., & Coyle, H. M. (1985). *Behavior of Piles and Pile Groups in Cohesionless Soil*.
- Burland, J. B., Broms, B. B., & De Mello, V. F. B. (1977). *Behaviour Of Foundations And Structures*.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*.
- Davisson. (1972). *High capacity piles. Proc. Lecture Series on Innovations in Foundation Construction. ASCE Illinois Section, Chicago*.
- de Ruiter, J., & Beringen, F. L. (1979). *Pile Foundations for Large North Sea Structures. MarineGeotechnology*. 3(3), 267–314.
- Decourt. (1982). *Prediction of the Bearing Capacity of Piles Based Exclusively on N values of the SPT*. 85–104.
- Decourt. (1995). *Prediction of load-settlement relationships for foundations on the basis of the SPT-T. Ciclo de Conferencias Intern*.
- Hannigan, P. J., Frank, R., Likins, G., Robinson, B., & Becker, M. L. (2016). *Design and Construction of Driven Pile Foundations-Volume II*.
- Hardiyatmo, H. C. (1996). *Teknik Fondasi I*.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*.

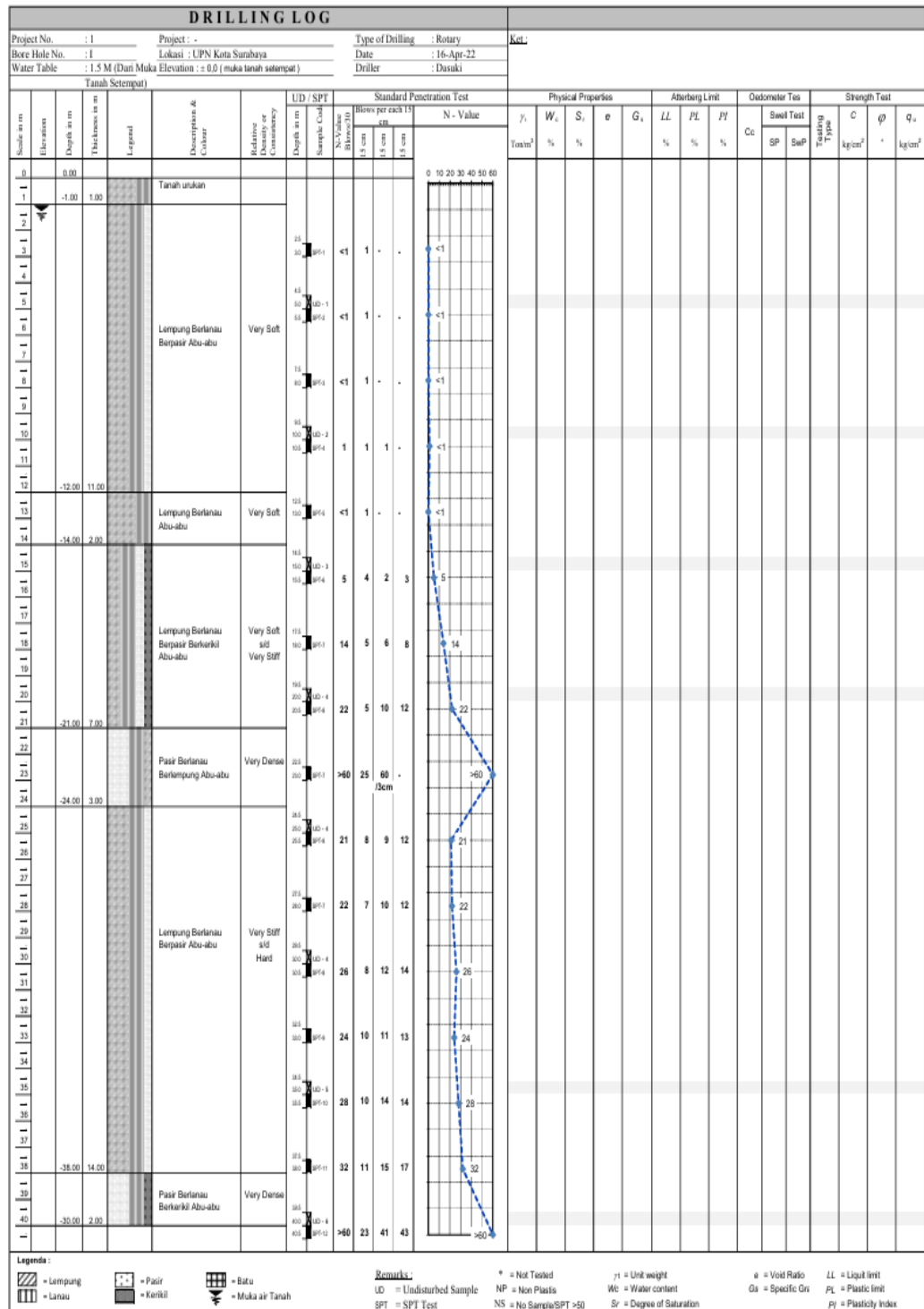
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan Fondasi II*.
- Karstunen, M., & Amavasai, A. (2017). *Best Soil : Soft soil modellig and parameter determination*.
- Lukita, K., Asniar, N., & Noor Annisa, A. R. (2021). *Analisa Daya Dukung Dan Penurunan Elastis Pondasi Tiang Pancang Gedung Creative Center Tasikmalaya*.
- Meyerhof, G. G. (1976). *Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations*. *ASCE J Geotech Eng Div*. 102 (3), 195–228.
- Nabila, K. D. (2025). *Analisis Perbandingan Daya Dukung Fondasi Tiang Bor Berdasarkan Hasil Uji SPT Dan Pengujian Dinamis*.
- Ningsih, A. A., & Setiawan, A. A. (2023). Comparison of Elastic Settlement of Pile Foundations Using Analytical Methods and Finite Element Methods. *Jurnal Komposit*, 7(2), 145–150. <https://doi.org/10.32832/komposit.v7i2.13757>
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*.
- Putri, B. H. S. G., Hoesain, I., & Tri Sulistiyowati. (2024). *Analisis Penurunan Pondasi Tiang Pancang Pada Pembangunan Jembatan Meninting Menggunakan Metode Analitis Dan Metode Numerik*.
- Qian, Y., Li, H., Tian, W., Yu, H., Zhang, Y., Guan, M., & Ma, Z. (2025). Effect of Pile Spacing on Load Bearing Performance of NT-CEP Pile Group Foundation. *Buildings*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/buildings15091404>
- Rafi Rizqullah, R., Muslim, D., Raditya Rendra, P., & Nur Rahdiana, R. (2023). Perbandingan Nilai Penurunan Muka Tanah Di Kelurahan Tambakwedi Dan Kelurahan Bulak, Surabaya. *Padjadjaran Geoscience Journal*.
- Reese, L. C., & O'Neill, M. W. (1999). *Drilled shafts: Construction procedures and design methods*. Publication FHWA-IF-99-025, FHWA, Washington, DC.

- Reese, L. C., & Wright, S. J. (1977). *Drilled Shaft Manual*, Washington, D. C: U. S. Dept. of Transportation Federal Highway Administration, Offices of Research and Development, Implementation Division. .
- Rizkya Pitaloka, S., & Noer Hamdhan, I. (2024). Perbandingan Pemodelan Penurunan Tanah Lunak Menggunakan Plaxis 2D antara Hardening Soil Model dan Soft Soil Model. Dalam *FTSP Series*.
- Rocscience. (2025). *Settlement and Consolidation Analysis Theory Manual*.
- Rocscience. (2026). *Theory Rocscience Knowledge Base*.
- Santi Pratiwi, D., & Warsih Winoto, G. (2025). Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan Plaxis 3D Berdasarkan Data N-SPT. Dalam *Universitas Dharma Andalas* (Vol. 05, Nomor 1).
- Schmertmann. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test (Performance and Design)*.
- Schmertmann, J., & Nottingham, L. (1975). *An investigation of pile capacity design procedures. Final Report D629 to Florida Department of Transportation, Department of Civil Engineering, University of Florida*. .
- Shooshpasha, I., Hasanzadeh, A., & Taghavi, A. (2013). *Prediction of the Axial Bearing Capacity of Piles by SPT-based and Numerical Design Methods*.
- Suharyanto, I., & Sunarta. (2017). Analisis “Pondasi Dalam” Pada Bangunan Kantor 7 (Tujuh) Lantai (Studi Kasus: Gedung Klinik Lingkungan dan Mitigasi Bencana Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada). *Jurnal Teknik Sipil-UCY, XII*.
- Surbakti, R. (2021). Prediksi Penurunan Konsolidasi Tanah Lunak Dengan Metode Analitis Dan Metode Element Hingga. *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, 5(2). <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>
- Syahbana, A. J., & Sarah, D. (2012). Comparison Of Overconsolidated Clay Settlements Calculated By Analytical 1d Terzaghi Consolidation And Biot Numerical Analysis. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 22(2), 81. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2012.v22.60>

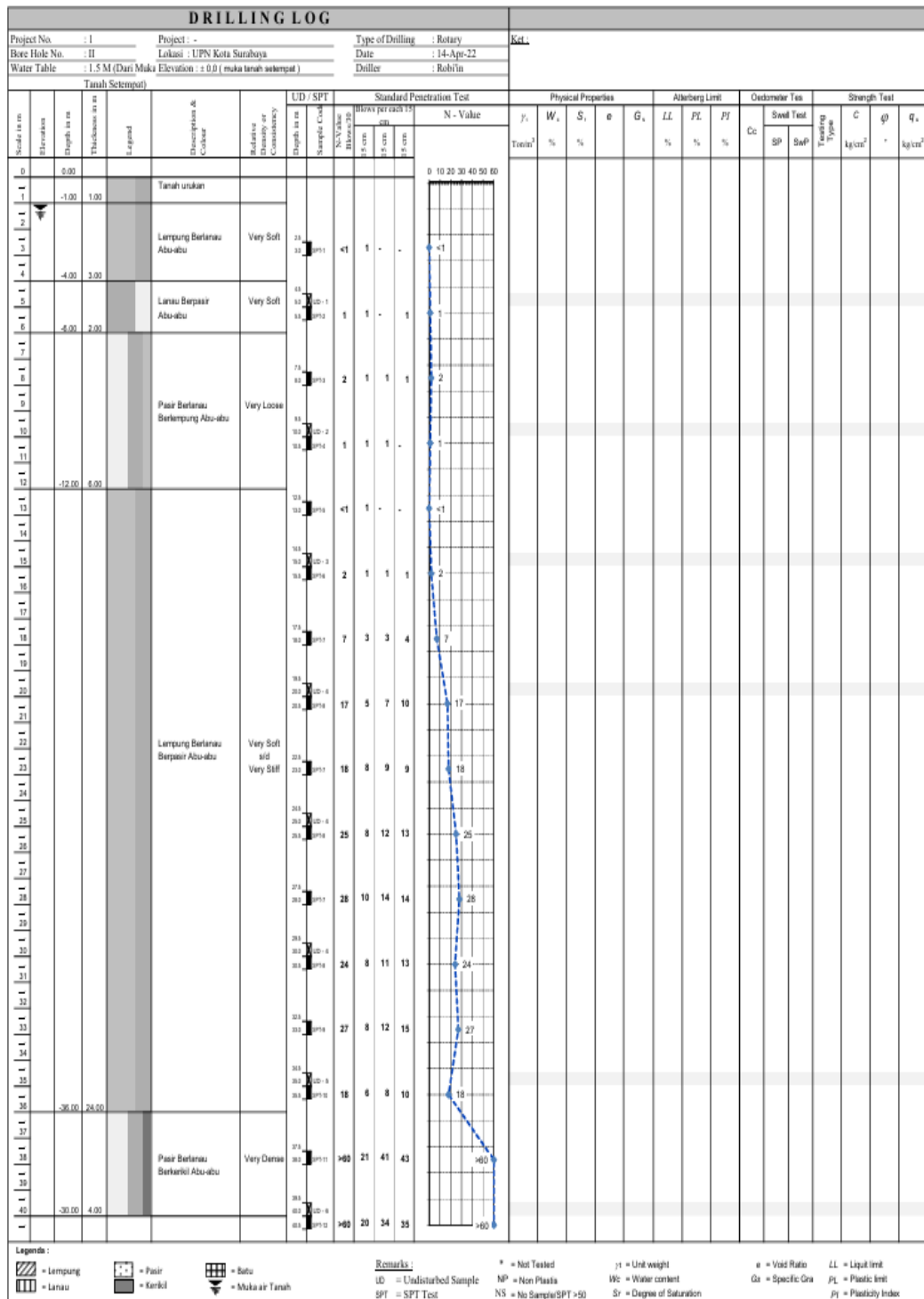
- Terzaghi, K., & Peck Ralph B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Third Edition).
- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2008). *Pile Design and Construction Practice* (Fifth Edition). Taylor & Francis.
- Vesic. (1977). *Design Of Pile Fondation*.
- Wardani, M. K., Syafiarti, A. I. D., Utami, G. S., Lestari, L. L., & Mareta, G. E. (2023). Analisa Perbandingan Daya Dukung Dan Penurunan Terhadap Variasi Bentuk Penampang Fondasi Tiang Pancang. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 6(2), 206. <https://doi.org/10.31602/jk.v6i2.12880>
- Wijaya, J. L., Wijaya, H., & Yuwono, A. (2023). *Analisis Perbandingan Penurunan Terhadap Daya Dukung Fondasi Tiang Pada Tanah Ekspansif Di Karawang Jawa Barat* (Vol. 6, Nomor 4).
- Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2015). Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D. *Procedia Engineering*, 125, 363–367. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.083>
- Yulianti, S., Riza, M., & Pratiwi, V. (2023). Studi Perbandingan Analisis Fem 2D dan 3D Pada Stabilitas Sheet Pile Long Storage Kota Jakarta. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 6(2), 485–494.
- Zikrillah, H., Sungkar, M., & Sundary, D. (2023). Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang Menggunakan Metode Analitik dan Elemen Hingga (Pembangunan Gedung Bank Aceh Syariah Kota Banda Aceh). *Journal of The Civil Engineering Student*, 5(1), 204–210.

# LAMPIRAN

## Lampiran 1 Data Tanah

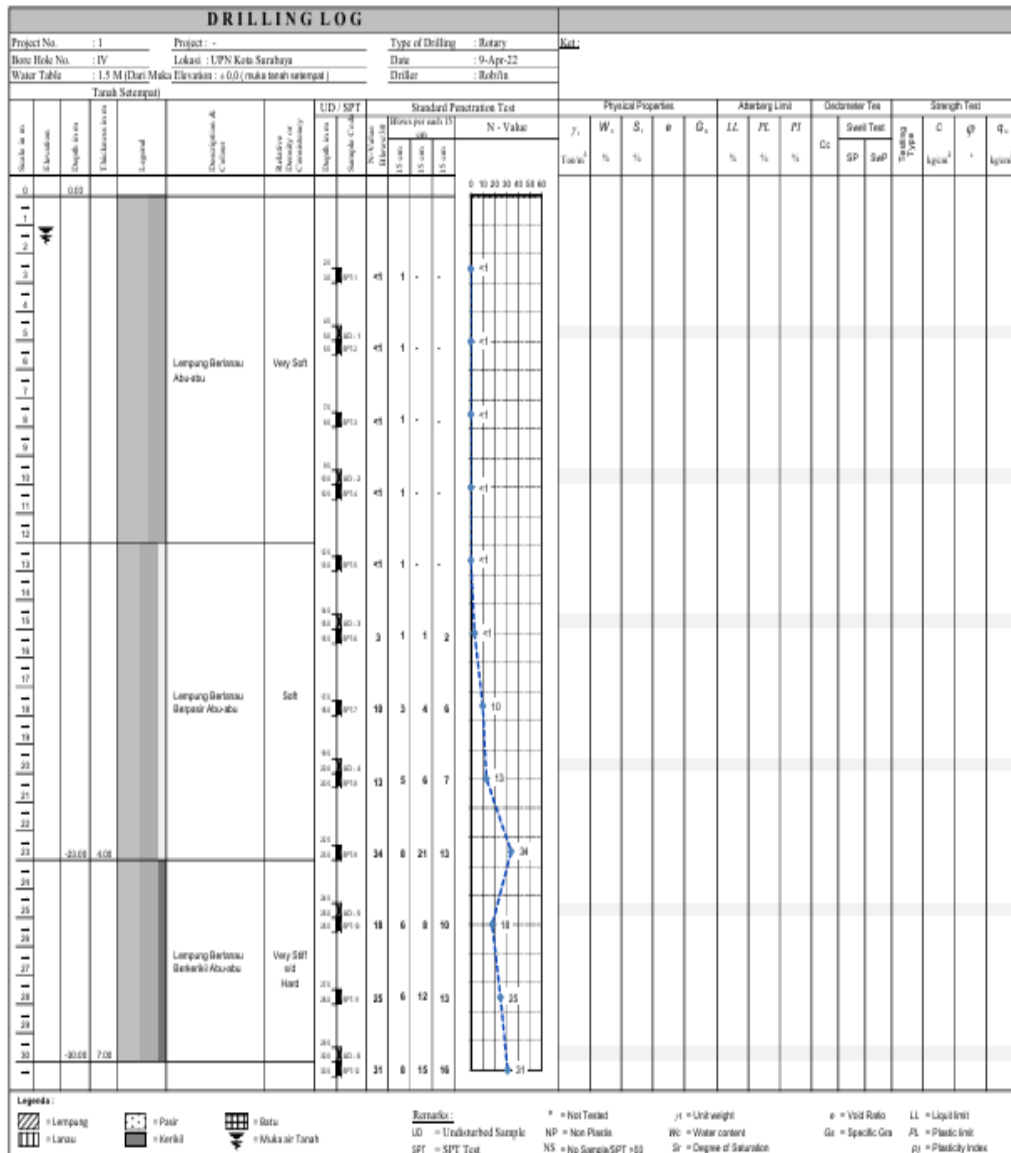


Gambar L-1. 1 B



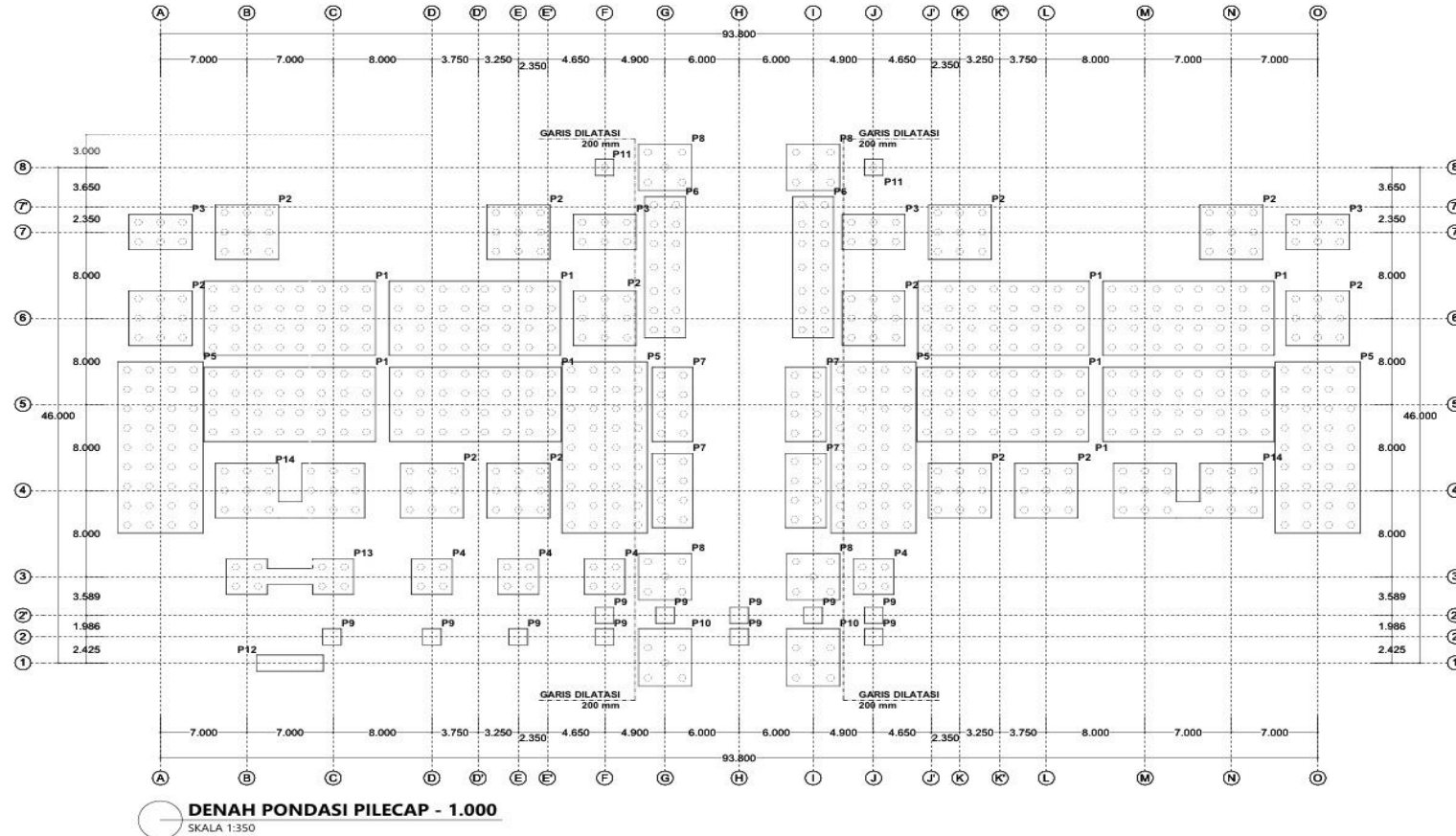
Gambar L-1. 2 BH 2

### Gambar L-1. 3 BH 3



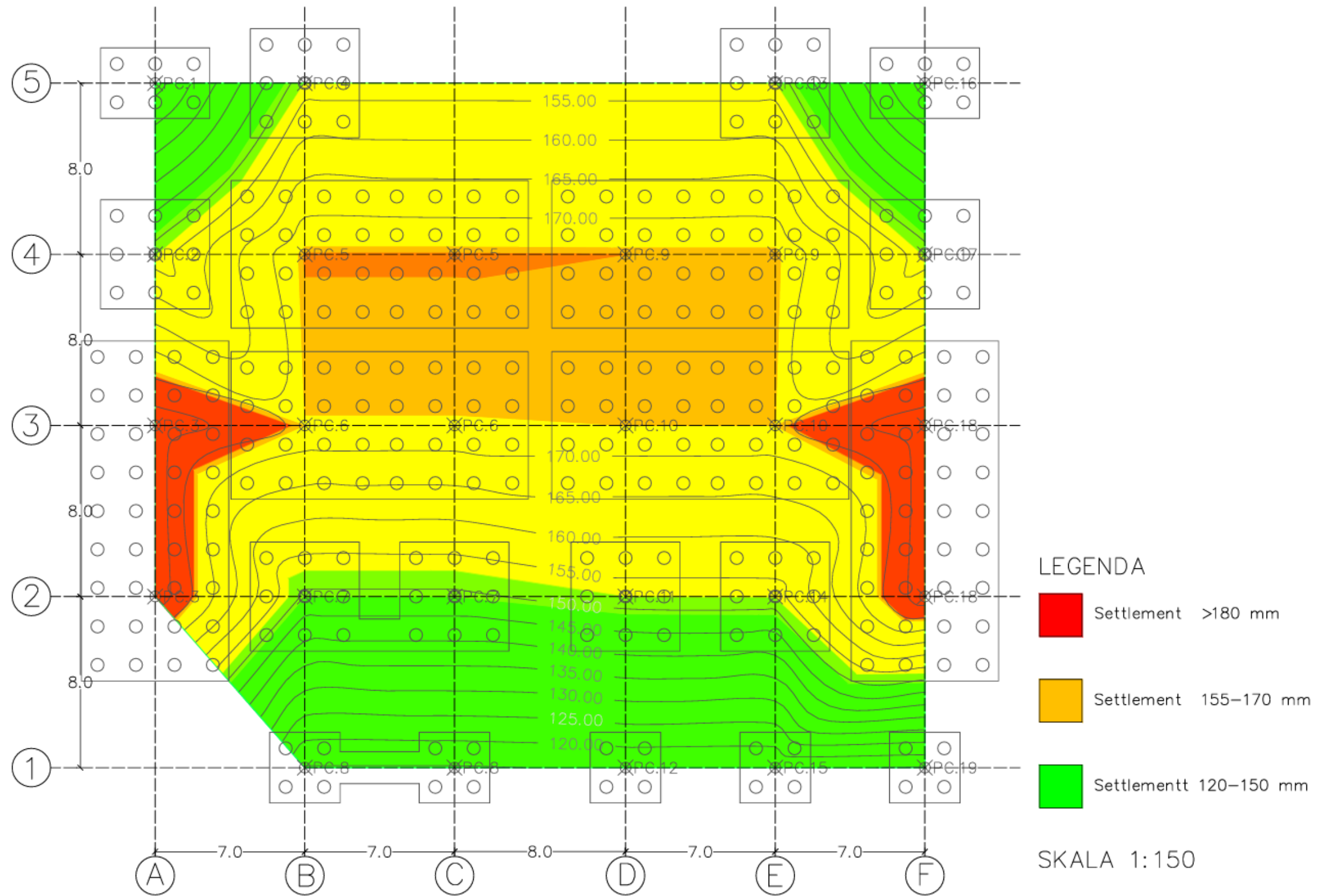
Gambar L-1. 4 BH 3

## Lampiran 2 Gambar Denah *Pile cap*



Gambar L-1. 5 Denah *Pile Cap*

Lampiran 3 Gambar Kontur Penurunan Total Metode Manual



Lampiran 4 Gambar Kontur Penurunan Total Metode Elemen Hingga

