



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PEMAKAIAN PONDASI TIANG-RAKIT PADA  
SEBUAH PROYEK APARTEMEN DI JAKARTA DENGAN  
MENGUNAKAN METODE KONVENSIONAL POULOS DAN  
PLAXIS DUA DIMENSI**

**SKRIPSI**

**BIANCA NATASYA  
0706266121**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JULI 2011**

1038/FT.01/SKRIP/07/2011



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PEMAKAIAN PONDASI TIANG-RAKIT PADA  
SEBUAH PROYEK APARTEMEN DI JAKARTA DENGAN  
MENGUNAKAN METODE KONVENSIONAL POULOS DAN  
PLAXIS DUA DIMENSI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**BIANCA NATASYA**

**0706266121**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JULI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Bianca Natasya**

**NPM : 0706266121**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 11 Juli 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Bianca Natasya  
NPM : 0706266121  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Studi Pemakaian Pondasi Tiang-Rakit pada  
Sebuah Proyek Apartemen di Jakarta dengan  
Menggunakan Metode Konvensional Poulos dan  
Plaxis Dua Dimensi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas, M.Eng  
Penguji : Ir. Widjojo Adi Prakoso, M.Sc., Ph.D  
Penguji : Dr. Ir. Damrizal Damoerin, M.Sc

(*Tommy Ilyas*)  
(*Widjojo Adi Prakoso*)  
(*Damoerin*)

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, Sang *Jehovah Jireh*, karena atas kasih dan kekuatan yang berasal dari Dia, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Hanya bagi Dia-lah segala hormat, kemuliaan, dan pujian.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Tommy Ilyas, M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini, memberikan saya banyak pengetahuan mengenai bidang ilmu Geoteknik, serta peduli kepada saya dan selalu memotivasi saya;
2. Para dosen di kelompok ilmu Geoteknik Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia yang telah banyak memberikan diskusi dan pengetahuan berharga mengenai bidang ilmu Geoteknik;
3. Bapak Matius, Bapak Sendy, Bapak Risa, Ibu Teti, dan para petugas keamanan di PT. Nusa Raya Cipta yang telah sangat banyak membantu saya dalam mengumpulkan data-data yang saya butuhkan untuk penyelesaian skripsi ini;
4. Bapak Budi dan Draga dari PT. Ketira Engineering Consultant yang telah membantu saya untuk memperoleh data perhitungan struktural;
5. Mas Sentot Juliandu yang telah berbaik hati meminjamkan buku "*Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen*" karya Prof. Katzenbach kepada saya;
6. Yustian Heri Suprpto yang memberikan banyak saran, diskusi, bahan, dan informasi berharga selama proses penyelesaian skripsi ini;
7. Kak Hendarsih dan Kak Andre Sumual yang telah memberikan terlalu banyak dukungan doa, moral, bahkan material kepada saya dan keluarga saya selama saya kuliah;

8. Keluarga besar Maridjan dan keluarga besar Salim yang memberikan dukungan moral dan material kepada saya selama ini;
9. Orang tua terkasih yang telah menjadi orang tua, sahabat, kekuatan, motivator, dan tiang doa terkokoh bagi saya bagaimana pun keberadaan mereka dan mengajari saya untuk selalu bersyukur atas apa yang Tuhan telah berikan bagi saya;
10. Destya Pahnael, Christy Titaley, dan teman-teman A1 yang telah dan tetap menjadi sahabat terbaik yang selalu setia mendengarkan, mendoakan, dan berbicara kepada saya selama ini;
11. Para PKK PO FTUI 2007, terutama PKK Sipil-Lingkungan 2007, yang cukup menjadi cermin bagi saya untuk memberikan usaha dan sikap hidup yang terbaik selama saya kuliah;
12. Anak-anak Kelompok Kecil terkasih (Vicki, Friska, Febrina, Visarah, Stephanie, Rianti, Emma, Anita) yang telah menjadi penghiburan dan penguat komitmen untuk tetap menjadi teladan melalui kuliah dan sikap hidup saya selama menjadi mahasiswa;
13. Teman-teman Sipil-Lingkungan Angkatan 2007, terutama peminatan Geoteknik, yang sudah menemani dan memotivasi saya selama kuliah.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu mendatang.

Depok, 11 Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bianca Natasya  
NPM : 0706266121  
Program Studi : Teknik Sipil  
Departemen : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**STUDI PEMAKAIAN PONDASI TIANG-RAKIT PADA SEBUAH PROYEK  
APARTEMEN DI JAKARTA DENGAN MENGGUNAKAN METODE  
KONVENSIONAL POULOS DAN PLAXIS DUA DIMENSI**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 Juli 2011

Yang menyatakan



( Bianca Natasya )

## ABSTRAK

Nama : Bianca Natasya  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Studi Pemakaian Pondasi Tiang-Rakit pada Sebuah Proyek Apartemen di Jakarta dengan Menggunakan Metode Konvensional Poulos dan PLAXIS Dua Dimensi

Fokus dari skripsi ini adalah studi mengenai desain pondasi tiang-rakit pada sebuah proyek apartemen di Jakarta. Konsep utama dari pondasi tiang-rakit adalah untuk menempatkan tiang pada posisi yang tepat agar penurunan dan perbedaan penurunan dapat direduksi. Adapun desain preliminari dilakukan dengan menggunakan metode konvensional milik Poulos, sementara desain detail dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS dua dimensi. Hasil penelitian dari tahap desain preliminari berisi pembahasan bagaimana dimensi dan jumlah dari tiang mempengaruhi kinerja pondasi. Sementara itu, desain detail menunjukkan bahwa konfigurasi dan peletakkan tiang pada lokasi yang tepat akan menghasilkan profil penurunan yang optimal bagi desain.

Kata kunci:

Pondasi tiang-rakit, penurunan, perbedaan penurunan, metode konvensional Poulos, PLAXIS

## ABSTRACT

Name : Bianca Natasya  
Study Program : Teknik Sipil  
Title : Study in Piled Raft Foundation Implementation in an Apartment  
Project Located in Jakarta Based on Poulos Conventional  
Method and Two-Dimensional PLAXIS

The focus of this study is about the piled raft foundation design in an apartment project located in Jakarta. The fundamental concept of piled raft foundation is to place the piles at right positions so that the settlement and differential settlement can be reduced. Preliminary design is done based on the conventional method made by Poulos, while the detailed design is done with the assistance of two-dimensional PLAXIS software. The research result from the preliminary stage is about how dimensions and number of piles influence the performance of the foundation. The detailed design then shows that the right configuration and location of piles will produce an optimum settlement profile for the design.

Key words:

Piled raft foundation, settlement, differential settlement, Poulos's conventional method, PLAXIS

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR PERSAMAAN .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Metode Penulisan.....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>2. STUDI LITERATUR.....</b>	<b>6</b>
2.1 Karakteristik Pondasi Tiang-Rakit.....	6
2.1.1 Pondasi Tiang-Rakit sebagai Bentuk Pengembangan Desain dari Pondasi Rakit .....	6
2.1.2 Konsep Desain Pondasi Tiang-Rakit .....	9
2.1.3 Analisis Pondasi Tiang-Rakit.....	14
2.1.4 Pengaruh Dimensi Pondasi Rakit dan Grup Tiang terhadap Perilaku Pondasi Tiang-Rakit .....	18
2.2 Basis Teori Perangkat Lunak PLAXIS 2 Dimensi.....	23
2.2.1 Pendekatan Elemen Hingga .....	23
2.2.2 Penggunaan Perangkat Lunak PLAXIS 2 Dimensi Versi 8.2.....	24
<b>3. METODOLOGI ANALISIS .....</b>	<b>29</b>
3.1 Studi Literatur .....	30
3.2 Pengumpulan Parameter .....	30
3.2.1 Data Penyelidikan Tanah .....	30
3.2.2 Denah Struktural dan Kondisi Pembebanan .....	38
3.2.3 Data Properti Pondasi.....	42
3.3 Penetapan Tujuan Desain dan Batas-Batas Desain.....	42
3.3.1 Tujuan Desain .....	42
3.3.2 Batas-Batas Desain.....	42
3.3.3 Variabel Optimalisasi Desain.....	43
3.4 Desain Preliminari dengan Metode Konvensional Poulos.....	43
3.4.1 Estimasi Kapasitas Geoteknik Ultimat.....	43

3.4.2	Estimasi Perilaku Hubungan Beban-Penurunan dari Pondasi Tiang-Rakit .....	44
3.5	Desain Detail dengan PLAXIS Versi 8.2.....	48
3.5.1	Pemodelan Tanah.....	48
3.5.2	Pemodelan Komponen Rakit .....	49
3.5.3	Pemodelan Komponen Tiang.....	50
3.5.4	Pemodelan Pembebanan .....	53
3.5.5	Penetapan <i>Boundary Conditions</i> .....	53
3.5.6	Penetapan <i>Initial Conditions</i> .....	53
3.5.7	Tahap Perhitungan .....	54
3.5.8	Output.....	54
3.6	Diskusi Hasil Desain Preliminari dan Desain Detail .....	54
<b>4.</b>	<b>PEMODELAN DAN ANALISIS .....</b>	<b>55</b>
4.1	Basis Pemodelan .....	55
4.2	Desain Preliminari.....	55
4.2.1	Set Desain Preliminari 1: Pengaruh Ukuran Tiang terhadap Kinerja Pondasi .....	57
4.2.2	Set Desain Preliminari 2: Pengaruh Panjang Tiang terhadap Kinerja Pondasi .....	61
4.2.3	Set Desain Preliminari 3: Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Kinerja Pondasi .....	64
4.2.4	Hasil Desain Preliminari .....	68
4.3	Analisis dengan Perangkat Lunak PLAXIS 2 Dimensi .....	71
4.3.1	Konstruksi Model .....	71
4.3.2	Hasil Analisis Model .....	75
4.4	Diskusi .....	91
<b>5.</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>96</b>
5.1	Kesimpulan .....	96
5.2	Saran.....	97
	<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>98</b>
	<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>101</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi Penurunan yang terjadi pada Pondasi Rakit dan Pondasi Tiang-Rakit .....	7
Gambar 2.2	Alur Pertimbangan Pemilihan Pondasi .....	8
Gambar 2.3	Jenis Interaksi pada Pondasi Tiang-Rakit .....	10
Gambar 2.4	Perbandingan Kurva Beban-Penurunan pada Beberapa Jenis Pondasi .....	11
Gambar 2.5	Representasi Sederhana Pengaruh Modulus Elastisitas Sistem Pondasi Tiang-Rakit .....	15
Gambar 2.6	Kurva Beban-Penurunan Tri-Linear untuk Analisis Preliminari ....	16
Gambar 2.7	Keterangan Dimensi Sistem Pondasi Tiang-Rakit .....	18
Gambar 2.8	Definisi Penurunan pada Sistem Pondasi Tiang-Rakit .....	18
Gambar 2.9	Pengaruh Panjang Tiang terhadap Penurunan Rata-Rata .....	19
Gambar 2.10	Pengaruh Rasio Bg/Br terhadap Perbedaan Penurunan .....	19
Gambar 2.11	Pengaruh Jarak Antar-Tiang terhadap Perbedaan Penurunan .....	20
Gambar 2.12	Pengaruh Ketebalan Komponen Rakit terhadap Perbedaan Penurunan .....	21
Gambar 2.13	Pengaruh Panjang Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit ....	21
Gambar 2.14	Pengaruh Diameter Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit ..	22
Gambar 2.15	Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit ....	22
Gambar 2.16	Ilustrasi Pemodelan <i>Plane-Strain</i> dan <i>Axisymmetric</i> .....	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Proses Desain .....	29
Gambar 3.2	Denah Titik Sondir dan Bor Dalam .....	31
Gambar 3.3	Profil Data $N_{SPT}$ terhadap Kedalaman pada 3 Titik Boring .....	32
Gambar 3.4	Set Lapisan Tanah yang digunakan dalam Pemodelan .....	33
Gambar 3.5	Variasi Sinus Sudut Geser Internal Tanah Kohesif terhadap Indeks Plastisitas.....	36
Gambar 3.6	Koefisien $\beta_x$ , $\beta_z$ , $\beta_\psi$ untuk Pondasi Segiempat .....	45
Gambar 3.7	Ilustrasi Pemodelan Kekakuan Material Pelat untuk Komponen Rakit .....	49
Gambar 3.8	Contoh Input Parameter Komponen Pelat .....	59
Gambar 3.9	Ilustrasi Pemodelan Kekakuan Material Pelat untuk Komponen Tiang .....	52
Gambar 4.1	Pengaruh Ukuran Tiang terhadap Pembagian Kontribusi Tahanan Beban pada Pondasi Tiang-Rakit.....	59
Gambar 4.2	Perkembangan Ukuran Tiang terhadap Penurunan .....	59
Gambar 4.3	Perkembangan Modulus Geser Rata-Rata Tanah terhadap Panjang Tiang.....	62
Gambar 4.4	Pengaruh Panjang Tiang terhadap Pembagian Kontribusi Tahanan Beban pada Pondasi Tiang-Rakit .....	63
Gambar 4.5	Pengaruh Panjang Tiang terhadap Penurunan.....	63
Gambar 4.6	Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Penurunan .....	65

Gambar 4.7	Perbandingan Persentase Beban yang ditanggung Tiang, Persentase Mobilisasi Kapasitas Tiang, dan Penurunan untuk Jumlah Tiang yang Berbeda .....	67
Gambar 4.8	Kurva Tri-Linear Desain Preliminari Final .....	70
Gambar 4.9	Ilustrasi Simplifikasi Pembebanan pada Pemodelan dengan PLAXIS Versi 8.2.....	73
Gambar 4.10	Model A pada PLAXIS Versi 8.2 .....	76
Gambar 4.11	Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model A .....	77
Gambar 4.12	Model B pada PLAXIS Versi 8.2 .....	80
Gambar 4.13	Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model B .....	82
Gambar 4.14	Model C pada PLAXIS Versi 8.2 .....	85
Gambar 4.15	Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model C .....	86
Gambar 4.16	Model D pada PLAXIS Versi 8.2 .....	89
Gambar 4.17	Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model D .....	90



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Parameter Tanah dari Uji Laboratorium .....	34
Tabel 3.2	Angka Poisson untuk Beberapa Jenis Tanah .....	35
Tabel 3.3	Nilai Permeabilitas (k) dalam Satuan cm/sec .....	35
Tabel 3.4	Kuat Geser Efektif Tanah Kohesif .....	36
Tabel 3.5	Parameter Elastis dari Berbagai Jenis Tanah .....	37
Tabel 3.6	Detail Parameter Tanah dalam Desain Preliminari .....	37
Tabel 3.7	Detail Parameter Tanah dalam Pemodelan PLAXIS Versi 8.2 .....	38
Tabel 3.8	Faktor Koreksi $K_1$ dan $K_2$ untuk Daya Dukung Ultimat .....	44
Tabel 4.1	Rekapitulasi Hasil Analisis dengan Variasi Ukuran Tiang .....	58
Tabel 4.2	Proporsi Beban yang ditanggung Tiang – Set Desain Preliminari 1 ...	60
Tabel 4.3	Rekapitulasi Hasil Analisis dengan Variasi Panjang Tiang .....	61
Tabel 4.4	Proporsi Beban yang ditanggung Tiang – Set Desain Preliminari 2 ...	64
Tabel 4.5	Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model A .....	75
Tabel 4.6	Kinerja Aksial Tiang pada Model A .....	78
Tabel 4.7	Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model A .....	78
Tabel 4.8	Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model B .....	81
Tabel 4.9	Kinerja Aksial Tiang pada Model B .....	81
Tabel 4.10	Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model B .....	83
Tabel 4.11	Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model C .....	84
Tabel 4.12	Kinerja Aksial Tiang pada Model C .....	84
Tabel 4.13	Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model C .....	87
Tabel 4.14	Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model D .....	88
Tabel 4.15	Kinerja Aksial Tiang pada Model D .....	88
Tabel 4.16	Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model D .....	91

## DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1 .....	9
Persamaan 2.2 .....	14
Persamaan 2.3 .....	15
Persamaan 2.4 .....	15
Persamaan 2.5 .....	16
Persamaan 2.6 .....	17
Persamaan 2.7 .....	17
Persamaan 3.1 .....	44
Persamaan 3.2 .....	44
Persamaan 3.3 .....	44
Persamaan 3.4 .....	45
Persamaan 3.5 .....	46
Persamaan 3.6 .....	46
Persamaan 3.7 .....	46
Persamaan 3.8 .....	46
Persamaan 3.9 .....	46
Persamaan 3.10 .....	46
Persamaan 3.11 .....	46
Persamaan 3.12 .....	47
Persamaan 3.13 .....	47
Persamaan 3.14 .....	48
Persamaan 3.15 .....	49
Persamaan 3.16 .....	49
Persamaan 3.17 .....	49
Persamaan 3.18 .....	50
Persamaan 3.19 .....	51
Persamaan 3.20 .....	52
Persamaan 3.21 .....	52
Persamaan 3.22 .....	53
Persamaan 4.1 .....	60

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1	Denah Struktural dan Tiang Pancang Eksisting Lantai <i>Basement</i> Proyek .....	101
Lampiran 1.2	Nodal Pembebanan pada ETABS Versi 9.2.0 .....	102
Lampiran 1.3	Ilustrasi Potongan pada Pemodelan PLAXIS Versi 8.2 .....	103
Lampiran 1.4	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model A .....	104
Lampiran 1.5	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model A terhadap Lokasi Beban .....	105
Lampiran 1.6	Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – <i>Mesh</i> Terdeformasi ..	106
Lampiran 1.7	Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – Distribusi Gaya Geser Rakit .....	107
Lampiran 1.8	Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – Distribusi Momen Lentur Rakit .....	108
Lampiran 1.9	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model B .....	109
Lampiran 1.10	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model B terhadap Lokasi Beban .....	110
Lampiran 1.11	Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – <i>Mesh</i> Terdeformasi...	111
Lampiran 1.12	Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – Distribusi Gaya Geser Rakit .....	112
Lampiran 1.13	Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – Distribusi Momen Lentur Rakit .....	113
Lampiran 1.14	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model C .....	114
Lampiran 1.15	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model C terhadap Lokasi Beban .....	115
Lampiran 1.16	Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – <i>Mesh</i> Terdeformasi...	116
Lampiran 1.17	Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – Distribusi Gaya Geser Rakit .....	117
Lampiran 1.18	Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – Distribusi Momen Lentur Rakit .....	118
Lampiran 1.19	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model D .....	119
Lampiran 1.20	Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model D terhadap Lokasi Beban .....	120
Lampiran 1.21	Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – <i>Mesh</i> Terdeformasi ..	121
Lampiran 1.22	Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – Distribusi Gaya Geser Rakit .....	122
Lampiran 1.23	Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – Distribusi Momen Lentur Rakit .....	123
Lampiran 2.1	Detail Besar Beban pada Setiap Nodal .....	124
Lampiran 2.2	Besar Beban dalam Pemodelan PLAXIS Versi 8.2 .....	129
Lampiran 3.1	Contoh Detail Perhitungan Desain Preliminari.....	130

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Pada dasarnya, semua struktur, bagaimana pun karakteristiknya, selalu didukung oleh pondasi karena pondasilah yang akan menyalurkan beban struktur secara keseluruhan ke dalam tanah. Pemilihan jenis pondasi yang akan digunakan sangat bergantung terhadap fungsi struktur yang akan ditopang, kondisi tanah di bawah struktur, serta perbandingan biaya pondasi terhadap biaya struktur secara keseluruhan. Pertimbangan fungsi struktur yang ditopang akan menunjukkan secara tidak langsung gambaran besar beban yang akan ditanggung oleh pondasi. Sementara itu, kondisi tanah di bawah struktur sangat berkaitan dengan perilaku tanah itu sendiri ketika menerima beban.

Jenis pondasi yang merupakan kombinasi antara tiang dengan pondasi rakit, atau biasa disebut sebagai *piled raft*, telah mendapatkan perhatian yang besar dalam bidang desain pondasi bertahun-tahun belakangan ini. Adanya penambahan tiang pada pondasi rakit akan membantu pondasi rakit dalam mengatasi masalah penurunan yang terjadi pada tanah. Dengan memanfaatkan tahanan friksi tiang, penurunan yang terjadi pada tanah akan dapat diminimalisasi. Dengan demikian, kedalaman tiang tidak perlu mencapai kedalaman lapisan tanah keras karena tahanan ujung tiang bukanlah karakteristik utama tiang yang ingin dimanfaatkan dalam pondasi tiang-rakit. Oleh karena itu, konsep "*floating pile*" sangat penting dalam memahami kinerja dari pondasi tiang-rakit.

Adanya kombinasi kinerja antara komponen pondasi rakit, tiang pancang, dan lapisan tanah membuat jenis pondasi tiang-rakit ini efektif untuk mengurangi penurunan total dan penurunan differensial yang terjadi pada keseluruhan struktur. Komponen rakit diharapkan tetap dapat menahan beban dengan tingkat keamanan yang cukup, sementara komponen tiang lebih berperan dalam mengatasi penurunan tanah. Hal ini berarti bahwa perilaku pondasi tiang-rakit juga ditentukan oleh efek interaksi antara tanah dengan struktur. Pengetahuan terhadap efek interaksi tersebut terhadap daya dukung pondasi tiang-rakit harus dipahami secara mendalam sehingga desain pondasi yang dihasilkan merupakan desain

yang dapat dipercaya. Oleh karena itu, disadari bahwa proses pembelajaran mengenai proses desain pondasi tiang-rakit beserta berbagai hal yang dijadikan bahan pertimbangan dalam membentuk desain tersebut sangat penting untuk dilakukan.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Sebuah proyek apartemen di Jakarta merupakan proyek konstruksi apartemen dengan luas lahan kurang lebih 4274 meter persegi yang memiliki 1 lantai *basement*, 9 lantai podium di mana 8 lantai terbawah merupakan tempat parkir dan 1 lantai teratas merupakan *lobby*, serta 35 lantai pada bagian *main tower*. Jenis pondasi yang digunakan dalam bangunan ini adalah kombinasi antara pelat beton setebal 1,6 meter dengan 820 tiang berukuran 45 x 45 sentimeter persegi dan berkapasitas 130 ton dengan panjang 18 meter. Adapun denah dapat dilihat pada Lampiran 1.1.

Dengan banyaknya jumlah tiang yang digunakan, perilaku pondasi diprediksi lebih menyerupai grup tiang dibandingkan dengan pondasi tiang-rakit. Pendekatan desain pondasi tiang-rakit memiliki peluang untuk mengurangi jumlah tiang yang ada sementara tingkat keamanan yang diinginkan tetap tercapai. Namun demikian, jenis pondasi tiang-rakit ini tentu tidak dapat digunakan untuk semua jenis lapisan tanah mengingat pada jenis pondasi ini, komponen rakit pun diharapkan ikut menyumbangkan kontribusi dalam menanggung beban. Oleh karena itu, perlu dianalisis apakah jenis pondasi tiang-rakit ini dapat diaplikasikan pada jenis tanah pada proyek apartemen tersebut. Selanjutnya, apabila jenis pondasi tiang-rakit ini dapat diaplikasikan, maka proses pembuatan alternatif desain pun dapat dilakukan.

## 1.3 TUJUAN

Secara umum, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku teknis dari pondasi tiang-rakit. Adapun maksud dan tujuan dilakukannya penelitian ini secara detail adalah:

- a. untuk mempelajari beberapa metode yang dapat digunakan untuk menganalisis dan membuat desain pondasi tiang-rakit,
- b. untuk mengetahui kinerja tiang dalam sistem pondasi tiang-rakit dalam mengatasi penurunan yang terjadi,
- c. untuk mengetahui perilaku pembagian proporsi beban yang terjadi pada pondasi tiang-rakit sebagai sebuah kesatuan sistem akibat beban ultimat yang bekerja pada pondasi, dan
- d. untuk mempelajari mekanisme pengaruh kekakuan komponen rakit dan komponen tiang dalam sistem pondasi tiang-rakit terhadap kinerja pondasi.

#### **1.4 BATASAN MASALAH**

Dengan tujuan untuk memfokuskan pembahasan dari penelitian ini, maka dibuat beberapa batasan masalah yang akan dicermati dalam penelitian ini. Adapun pembahasan pada analisis ini dibatasi pada beberapa dasar penelitian dan asumsi, yaitu:

- a. Lapisan tanah yang digunakan merupakan lapisan tanah pada sebuah proyek apartemen di Jakarta yang berlokasi pada Jl. K.H. Mas Mansyur, Jakarta Pusat. Adapun lapisan tanah pada proyek tersebut berada dalam rentang lempung kelanauan.
- b. Kondisi pembebanan yang digunakan merupakan kondisi pembebanan asli vertikal pada proyek apartemen di Jakarta tersebut.
- c. Penelitian tidak akan mencakup desain struktural (perhitungan tulangan) yang dibutuhkan oleh desain yang telah dibuat.

#### **1.5 METODE PENULISAN**

Langkah pertama yang dilakukan dalam penulisan karya ilmiah ini adalah dengan mempelajari berbagai tinjauan materi terkait desain dan perilaku pondasi tiang-rakit. Selanjutnya, desain preliminari pondasi tiang-rakit akan dibuat berdasarkan metode konvensional yang diusulkan oleh Poulos. Apabila desain preliminari telah dihasilkan, desain tersebut akan dianalisis kembali dengan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2 Dimensi Versi 8.2 untuk menghasilkan

desain detail. Desain detail akan memperlihatkan gambaran jelas dari kinerja pondasi tiang-rakit yang telah dibuat konfigurasinya. Hasil dari desain preliminari dan desain detail akan didiskusikan untuk melihat bagaimana hasil analisis menjawab tujuan-tujuan yang telah ditetapkan dalam penelitian ini.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika penulisan laporan analisis ini mengikuti kaidah sebagai berikut:

- Bab 1 Pendahuluan

Bab 1 menyajikan latar belakang dibuatnya penelitian ini dan gambaran umum mengenai penelitian yang akan dilakukan. Tujuan yang ingin dicapai dari hasil penelitian serta lingkup dan batasan dari penelitian pun ditetapkan.

- Bab 2 Studi Literatur

Bab 2 memaparkan basis teori dari pondasi tiang-rakit di mana secara umum pondasi tiang-rakit sebenarnya merupakan sebuah bentuk pengembangan desain dari pondasi rakit. Konsep desain pondasi tiang-rakit didasarkan pada beberapa pendekatan yang berbeda tergantung dari tujuan utama ditambahkannya tiang pada komponen rakit, yaitu apakah sebagai pereduksi penurunan atau hanya penambah kapasitas semata. Pada bab ini juga dibahas kedua metode yang akan digunakan untuk membuat desain pondasi tiang-rakit dalam penelitian ini, yaitu metode konvensional Poulos dan metode elemen hingga yang menjadi basis dari perangkat lunak PLAXIS 2 dimensi.

- Bab 3 Metodologi Analisis

Bab 3 membahas langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini. Oleh karena penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan sebuah desain, maka bab 3 akan memaparkan proses desain yang dilakukan. Langkah pertama terkait dengan justifikasi parameter tanah dan kondisi pembebanan yang ada. Langkah kedua berupa penetapan batas dan syarat desain yang harus dicapai. Batas dan syarat ini mencakup besarnya tingkat keamanan yang ingin diperoleh serta besarnya deformasi dan penurunan maksimum yang diizinkan. Langkah ketiga terkait dengan desain preliminari pondasi tiang-rakit yang menggunakan metode konvensional Poulos. Langkah keempat terkait dengan

input parameter ke dalam perangkat lunak PLAXIS 2 dimensi untuk menghasilkan desain detail.

- Bab 4 Pemodelan dan Diskusi

Bab 4 membahas hasil desain dalam penelitian ini. Oleh karena proses desain merupakan sebuah proses yang bersifat coba-coba (*trial and error*), maka melalui tahap desain preliminari juga diperoleh pengetahuan mengenai pengaruh dimensi dan jumlah tiang terhadap kinerja pondasi tiang-rakit. Desain preliminari final merupakan desain yang mampu memenuhi semua syarat dan batasan desain yang telah ditetapkan. Hasil dari desain preliminari kemudian dikonversi agar dapat dimodelkan dengan benar ke dalam perangkat lunak PLAXIS 2 dimensi untuk dapat dilihat bagaimana profil penurunan detail yang terjadi melalui metode elemen hingga. Hasil dari desain preliminari dan desain detail pun didiskusikan untuk melihat bagaimana jawaban atas tujuan penelitian ini dapat diperoleh.

- Bab 5 Penutup

Bab 5 berisi kesimpulan mengenai hasil yang diperoleh melalui penelitian ini. Di dalam bab ini juga dipaparkan saran-saran untuk kepentingan penelitian selanjutnya mengenai tema yang terkait dengan penelitian ini.

## BAB 2

### STUDI LITERATUR

#### 2.1 KARAKTERISTIK PONDASI TIANG-RAKIT

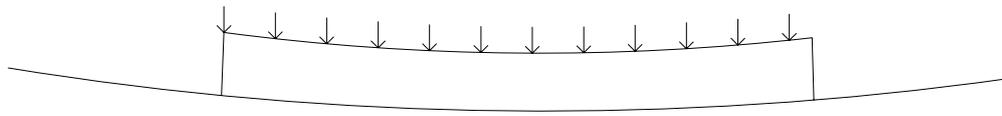
##### 2.1.1 Pondasi Tiang-Rakit sebagai Bentuk Pengembangan Desain dari Pondasi Rakit

Pada dasarnya, pondasi tiang-rakit merupakan sebuah bentuk pengembangan desain dari pondasi rakit. Pondasi rakit sendiri sangat umum dijadikan pilihan pada beberapa kasus di bawah ini (NAVFAC DM-7.2, 1982):

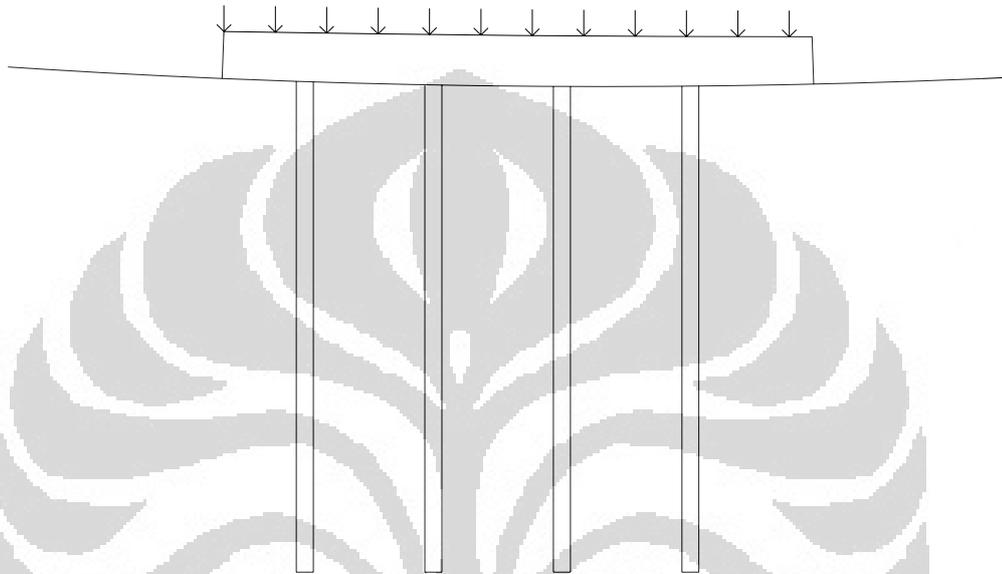
- a. Pergerakan dan distribusi beban (vertikal, horizontal, *uplift*) antara satu bagian tanah dengan bagian tanah lainnya sangat besar dan tidak seragam sehingga sangat mungkin terjadi perbedaan penurunan yang besar pada keseluruhan area. Dalam hal ini, kontinuitas struktur dan kekuatan lentur dari pondasi rakit dapat mengurangi efek ini.
- b. Dasar struktur berada di bawah muka air tanah sehingga sangat diperlukan sebuah penghalang yang bersifat tahan air. Oleh karena pondasi rakit merupakan sebuah struktur yang monolit, maka air akan sulit merembes ke dalam struktur. Berat sendiri pondasi rakit juga dapat menahan gaya tekan ke atas akibat adanya efek hidrostatis dari air tanah.

Namun demikian, terkadang dalam kondisi di mana lapisan tanah keras di lapangan terdapat pada kedalaman yang sangat jauh dari permukaan tanah, maka desain pondasi rakit akan membutuhkan ketebalan yang sangat besar. Sementara itu, apabila digunakan pondasi tiang, panjang tiang pun akan sangat besar karena tiang harus mencapai kedalaman tanah keras. Oleh karena itu, terbentuklah sebuah pengembangan desain pondasi tiang-rakit di mana tiang yang ada seolah “melayang” karena tidak perlu menyentuh lapisan tanah keras. Komponen rakit dalam pondasi tiang-rakit hanya menyediakan tingkat keamanan yang cukup, sementara komponen tiang akan berperan dalam mereduksi nilai penurunan yang terjadi.

**Pondasi rakit yang diberi beban terdistribusi merata**



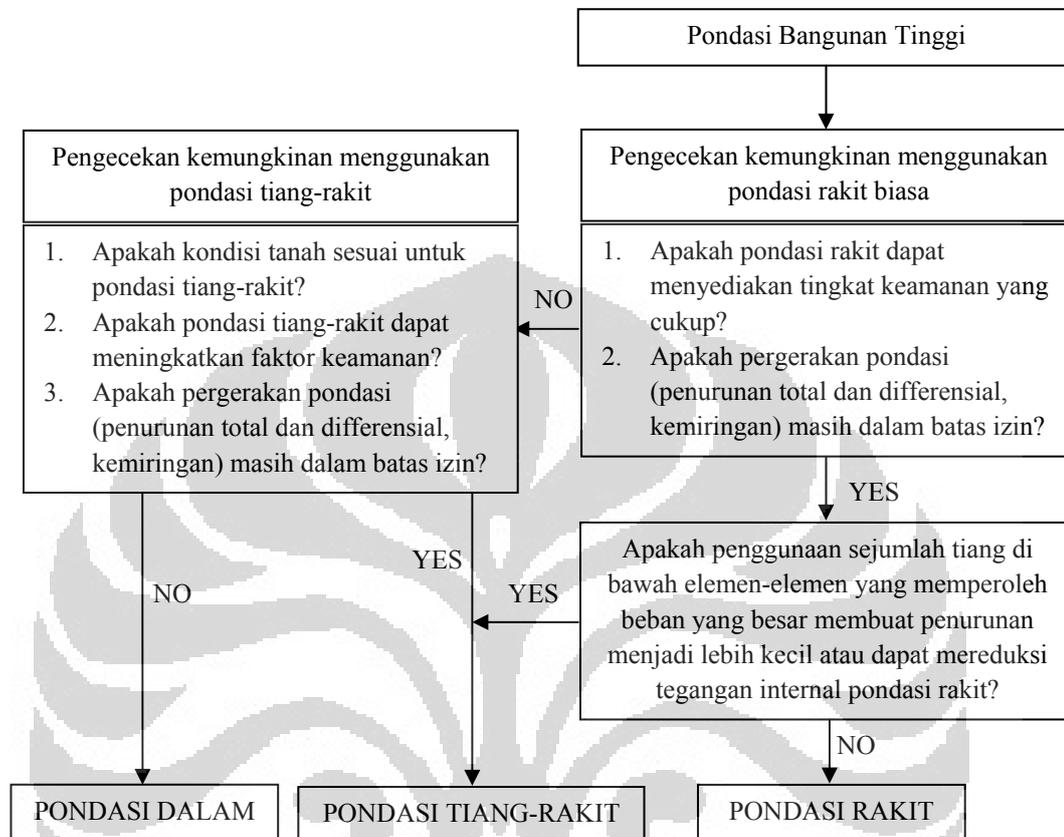
**Pondasi rakit yang ditambahkan dengan tiang pancang menghasilkan penurunan yang lebih kecil di bagian tengah pondasi**



**Gambar 2.1 Ilustrasi Penurunan yang terjadi pada Pondasi Rakit dan Pondasi Tiang-Rakit**

Konsep umum pondasi tiang-rakit dengan menggunakan tiang yang mereduksi penurunan tanah dapat terlihat lewat ilustrasi yang disajikan pada Gambar 2.1. Pada dasarnya, metode ini pertama kali diajukan oleh Burland pada tahun 1977 dan kemudian disusul dengan diadakannya berbagai studi kasus mengenai aplikasi pondasi tiang-rakit ini. Apabila sebuah pondasi rakit biasa diberikan gaya terdistribusi merata di atasnya, maka dalam kondisi yang diidealisasi, profil penurunan tanah yang terjadi akibat beban tersebut terlihat seperti “mangkuk”. Hal ini disebabkan penurunan yang terjadi di bagian tengah pondasi rakit memiliki nilai terbesar, sementara penurunan yang terjadi di bagian pinggir pondasi rakit memiliki nilai terkecil. Oleh karena itu, tiang yang berfungsi untuk mereduksi penurunan kemudian ditambahkan pada bagian tengah pondasi

rakit untuk memperkecil penurunan pondasi rakit di bagian tengah dan dengan demikian memperkecil penurunan differensial.



Gambar 2.2 Alur Pertimbangan Pemilihan Pondasi

Sumber: *Calculation Methods for Raft Foundations in Germany* (Franke, El-Mossallamy, dan Wittmann, 2000)

Di samping itu, penting juga untuk diketahui bahwa penggunaan tiang yang dapat mereduksi penurunan juga akan membantu memperkecil tingkat tegangan yang terjadi pada struktur pondasi rakit. Sebelum metode ini dikembangkan, tiang umumnya digunakan sebagai pondasi ketika penurunan secara keseluruhan dari pondasi rakit sudah tidak dapat ditoleransi lagi terkait dengan fungsi struktur itu sendiri. Namun demikian, dengan mengasumsikan bahwa beban ditahan secara keseluruhan oleh tiang saja akan menghasilkan desain konservatif di mana penurunan yang terjadi hanya direduksi sebagian kecil saja dari yang sesungguhnya dibutuhkan. Di samping itu, jumlah dan total panjang

tiang yang lebih banyak dibutuhkan saat kontribusi pondasi rakit dalam menahan beban diabaikan.

Menurut Poulos (2000), kondisi tanah yang sesuai untuk pemakaian sistem pondasi tiang rakit adalah sebagai berikut:

1. Lapisan tanah yang terdiri dari lempung keras/kaku
2. Lapisan tanah yang terdiri dari pasir padat
3. Tanah berlapis di mana di bawah tanah pendukung pondasi tiang tidak ada lapisan tanah lunak

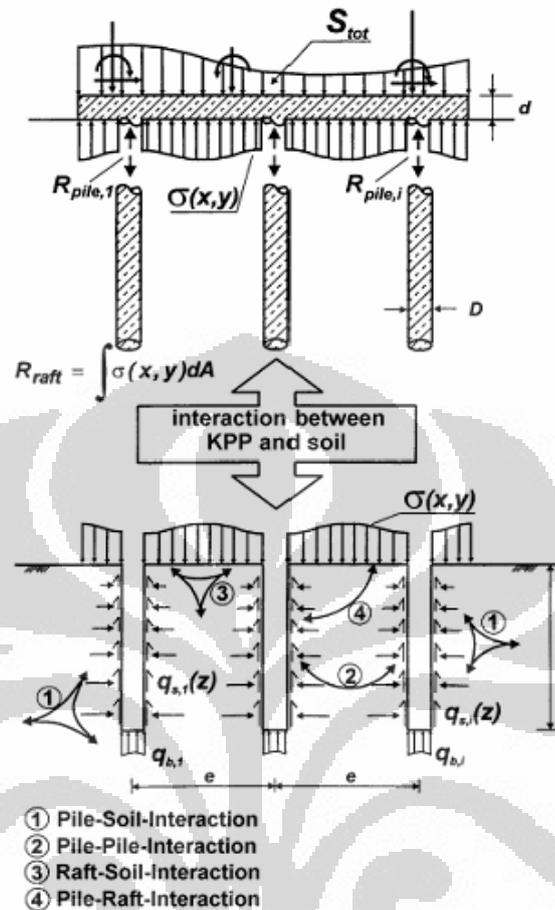
Pondasi tiang-rakit sendiri kurang tepat digunakan apabila terdapat lapisan tanah lempung lunak atau pasir lepas yang berada di dekat permukaan tanah. Apabila lapisan tersebut ada, komponen rakit akan memiliki daya dukung yang rendah. Padahal, dalam sistem pondasi tiang-rakit, komponen rakitlah yang diharapkan menyediakan daya dukung yang cukup bagi beban yang bekerja.

### 2.1.2 Konsep Desain Pondasi Tiang-Rakit

Katzenbach, Arslan, dan Moormann (2000) mendefinisikan pondasi tiang-rakit sebagai jenis pondasi yang bekerja sebagai struktur komposit dengan memanfaatkan tiga elemen penahan beban, yaitu tiang pancang, pondasi rakit, dan tanah di bawah struktur. Oleh karena itu, sebenarnya terdapat empat jenis interaksi yang terjadi dalam struktur pondasi tiang-rakit (Gambar 2.3). Keempat interaksi tersebut adalah interaksi antara tiang dengan tanah, interaksi antara tiang dengan tiang di sebelahnya, interaksi antara pondasi rakit dengan tanah, dan interaksi antara tiang dengan pondasi rakit.

Pada dasarnya, pondasi rakit mendistribusikan beban total dari struktur ( $S_{tot}$ ) sebagai tegangan kontak, yang direpresentasikan oleh  $R_{rakit}$ . Di samping itu, sejumlah tiang juga ikut mendistribusikan beban tersebut melalui jumlah tahanan tiang ( $\sum R_{tiang,i}$ ) yang berada di dalam lapisan tanah. Oleh karena itu, jumlah tahanan total dari pondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut:

$$R_{tot} = R_{rakit} + \sum_{i=1}^n R_{tiang,i} \geq S_{tot} \quad (2.1)$$



Gambar 2.3 Jenis Interaksi pada Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: *Piled Raft Foundation Projects in Germany* (Katzenbach, Arslan, dan Moormann, 2000)

Menurut Randolph (1994), ada tiga buah filosofi desain yang berbeda mengenai pondasi tiang-rakit, yaitu:

a. Pendekatan konvensional

Pendekatan ini didasari pada desain tiang sebagai sebuah grup yang akan menahan persentase beban terbesar, sementara persentase sisanya akan ditahan oleh pondasi rakit.

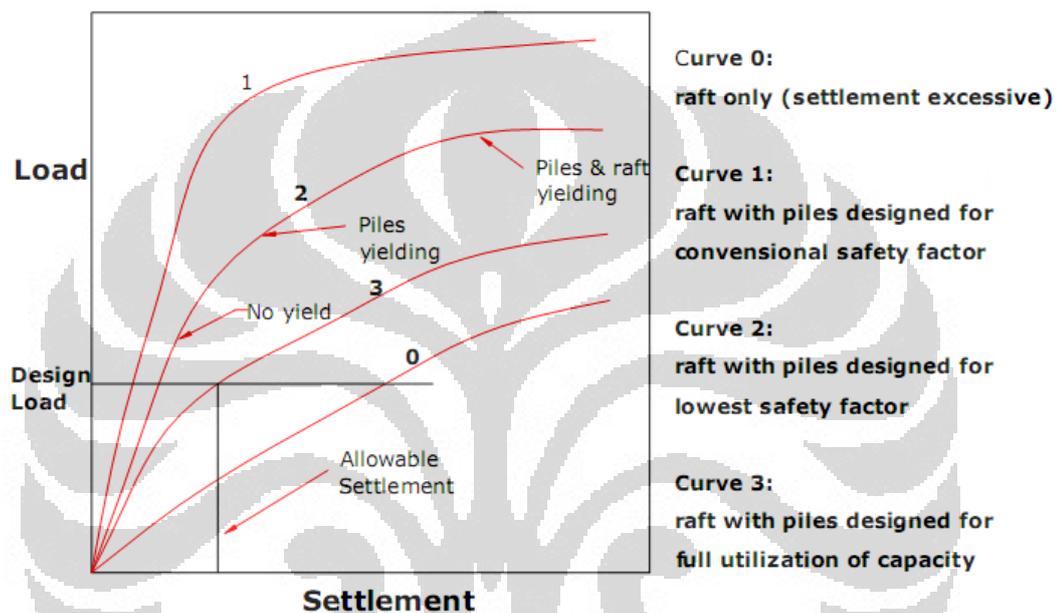
b. Pendekatan *Creep Piling*

Pendekatan ini didasari pada desain tiang untuk menahan beban yang bekerja saat rangkai mulai terjadi, yaitu biasanya sekitar 70-80% dari besar kapasitas beban ultimat. Jumlah tiang yang cukup juga diperhitungkan untuk

mengurangi tegangan kontak yang terjadi antara pondasi rakit dengan tanah akibat tegangan prekonsolidasi yang terjadi pada tanah.

c. Pendekatan Kontrol Penurunan Differensial

Pendekatan ini didasari pada penempatan tiang yang strategis untuk membantu mengurangi perbedaan penurunan yang terjadi, namun tidak serta merta mengurangi secara signifikan besar penurunan keseluruhan yang terjadi.



Gambar 2.4 Perbandingan Kurva Beban-Penurunan pada Beberapa Jenis Pondasi

Sumber: *Practical Design Procedures for Piled Raft Foundations* (Poulos, 2000)

Pada Gambar 2.4, Kurva 0 menunjukkan perilaku pondasi rakit tanpa tiang di mana mengakibatkan penurunan yang besar akibat beban rencana. Kurva 1 menggambarkan pendekatan konvensional di mana perilaku keseluruhan dari sistem pondasi tiang-rakit dikuasai oleh perilaku grup tiang. Kurva 1 ini juga menunjukkan adanya linearitas yang besar pada penurunan akibat beban rencana karena dalam kasus ini, mayoritas beban ditanggung oleh tiang. Kurva 2 merepresentasikan pendekatan *Creep Piling* di mana tiang-tiang bekerja pada faktor keamanan yang cukup rendah, namun karena hanya terdapat sedikit tiang, maka pondasi rakit menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan Kurva 1. Kurva 3 mengilustrasikan sistem pondasi tiang-rakit dengan pendekatan kontrol penurunan differensial sehingga tiang hanya digunakan sebagai pereduksi

penurunan yang terjadi. Konsekuensi dari pendekatan terakhir ini adalah hubungan antara beban dan penurunan bisa jadi tidak bersifat linear pada batas beban rencana, tetapi sistem pondasi tiang-rakit secara keseluruhan memiliki tingkat keamanan yang cukup sementara batas izin penurunan dapat diperoleh. Oleh karena itu, desain pada Kurva 3 jauh lebih ekonomis dibandingkan desain pada Kurva 1 dan Kurva 2.

Menurut Poulos (2001), De Sanctis (2001) dan Viggiani (2001) telah mengklasifikasikan pondasi tiang-rakit ke dalam dua buah ekstrem besar. Ekstrem pertama disebut sebagai pondasi tiang-rakit “kecil” di mana alasan utama untuk menambahkan tiang pada pondasi rakit adalah untuk meningkatkan faktor keamanan. Ekstrem kedua disebut sebagai pondasi tiang-rakit “besar” di mana daya dukung pondasi rakit didesain pada batas yang cukup untuk menahan beban dengan faktor keamanan yang masuk akal, sementara tiang digunakan untuk mengurangi perbedaan penurunan yang terjadi. Dalam beberapa kasus pada ekstrem kedua, lebar dari pondasi rakit sangat besar dibandingkan dengan panjang tiang.

Pada dasarnya, dalam melakukan desain sistem pondasi tiang-rakit, terdapat beberapa hal yang harus menjadi perhatian, yaitu kapasitas maksimum untuk beban vertikal, lateral, dan momen, penurunan maksimum yang diizinkan, analisis penurunan differensial yang terjadi, besar momen lentur dan geser yang dialami oleh pondasi rakit, serta beban dan momen lentur yang dialami oleh tiang. Di Indonesia sendiri, khususnya Jakarta, Peraturan Kepala Dinas P2B Provinsi DKI Jakarta Nomor 50 Tahun 2007 bagian Lampiran menetapkan bahwa desain pondasi tiang-rakit perlu meliputi analisis sebagai berikut:

- a. distribusi beban pada masing-masing tiang,
- b. daya dukung pondasi tiang-rakit,
- c. perhitungan poer dan *tie-beam* (khususnya kekuatan *tie-beam* terhadap penurunan differensial),
- d. efek kelompok tiang,
- e. pengaruh beban lateral pada kepala tiang,
- f. penurunan elastis dan konsolidasi,

- g. gaya angkat (*uplift*) oleh tekanan hidrostatis atau gaya cabut oleh pengaruh gempa,
- h. kapasitas pondasi yang harus dibuat lebih kuat dari kolom dasar dan/atau dinding geser, dan
- i. sambungan tiang kecuali dengan sistem yang telah melalui serangkaian tes.

Di samping itu, Peraturan Kepala Dinas P2B Provinsi DKI Jakarta Nomor 50 Tahun 2007 juga menyebutkan bahwa penggunaan sistem pondasi yang merupakan gabungan antara pondasi tiang dan pondasi rakit diperkenankan dengan memperhatikan beberapa kondisi, yaitu:

- a. Tiang pondasi yang digunakan bersifat tiang friksi.
- b. 75% beban yang bekerja pada pondasi harus bisa ditahan oleh daya dukung izin salah satu sistem dari sistem gabungan pondasi tiang-rakit tersebut, baik oleh pondasi tiang atau oleh pondasi rakit.
- c. Distribusi gaya-gaya yang masuk ke sistem pondasi tiang dan pondasi rakit harus dilakukan dengan metode numerik yang rasional.
- d. Pada penggunaan tiang pondasi yang tidak berfungsi sebagai pondasi tiang permanen, maka perencana harus bisa menunjukkan bahwa pada saat tiang tidak dibutuhkan, tiang tersebut harus sudah gagal terlebih dahulu.
- e. Penurunan bangunan yang menggunakan sistem pondasi tiang-rakit tidak boleh lebih dari 15 cm, kecuali dapat dibuktikan atau ditunjukkan bahwa struktur bangunan mampu mendukung penurunan maksimum yang terjadi dan tidak akan menimbulkan pengaruh pada lingkungan. Besaran ini bisa dilampaui apabila dapat dibuktikan tidak akan terjadi hal-hal negatif pada bangunan tersebut sendiri maupun terhadap lingkungan sekitarnya.

Tiang friksi yang disebutkan di atas merupakan tiang yang kapasitas utamanya terletak pada hambatan kulitnya, bukan pada hambatan ujung. Oleh karena itu, tiang yang digunakan dalam sistem pondasi tiang-rakit umumnya berperilaku sebagai tiang "*float*" karena biasanya ujung tiang tidak perlu mencapai lapisan tanah keras. Adapun perilaku hubungan antara beban dan penurunan pada tiang ini sangat dipengaruhi oleh adanya interaksi antar tiang.

### 2.1.3 Analisis Pondasi Tiang-Rakit

Poulos (2000, 2001) membuat ringkasan daftar metode yang umum digunakan untuk membuat desain pondasi tiang-rakit. Terdapat tiga tipe analisis yang telah diidentifikasi, yaitu metode perhitungan yang disederhanakan (metode Poulos-Davis-Randolph dan metode Burland), metode perhitungan sederhana berbasis komputer (metode “*strip on strings*” dan metode “*plate on springs*”), dan metode perhitungan kompleks berbasis komputer (metode berbasis analisis elemen hingga dan differensial hingga). Pada karya ilmiah ini, hanya akan dibahas tinjauan literatur dengan metode Poulos-Davis-Randolph, metode berbasis analisis elemen hingga, dan metode berbasis analisis differensial hingga.

#### Metode Poulos-Davis-Randolph (PDR)

Untuk membuat estimasi awal mengenai perilaku dari pondasi tiang-rakit, sebuah metode mudah dikembangkan oleh Poulos dan Davis (1980) dan Randolph (1994). Metode ini melibatkan dua langkah utama, yaitu estimasi kapasitas beban ultimat dari pondasi dan estimasi perilaku beban-penurunan lewat hubungan sederhana tri-linear. Untuk mengetahui daya dukung vertikal dari pondasi tiang-rakit, dapat diambil nilai terkecil antara jumlah dari kapasitas ultimat keseluruhan antara komponen rakit dan semua komponen tiang atau kapasitas ultimat dari sebuah blok termasuk tiang dan rakit ditambah dengan bagian rakit yang berada di luar keliling tiang.

Untuk mengestimasi perilaku beban-penurunan pada pondasi rakit, dapat digunakan metode sederhana untuk mengestimasi pembagian kontribusi tahanan beban antara komponen rakit dan komponen tiang (Randolph, 1994). Kontribusi tahanan beban tersebut tentu melibatkan kekakuan dari pondasi tiang-rakit itu sendiri. Adapun kekakuan dari sistem pondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut:

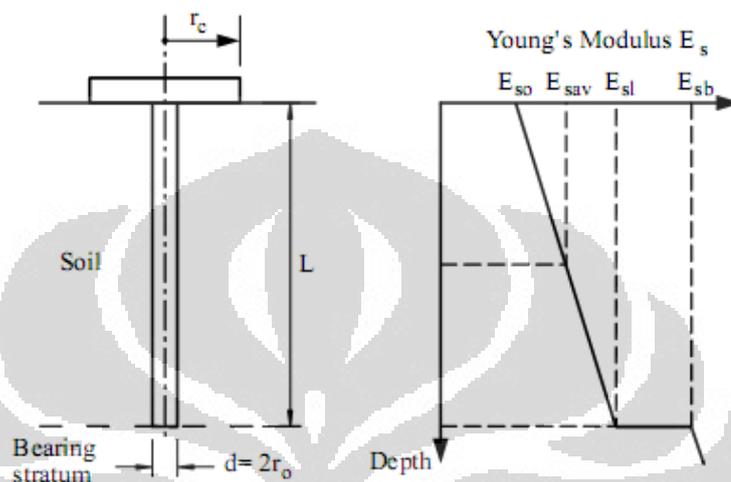
$$K_{pr} = \frac{1 - 0,6 \left( \frac{K_r}{K_p} \right)}{1 - 0,64 \left( \frac{K_r}{K_p} \right)} K_p \quad (2.2)$$

di mana:

$K_{pr}$  = kekakuan sistem pondasi tiang-rakit

$K_p$  = kekakuan grup tiang

$K_r$  = kekakuan komponen rakit



Gambar 2.5 Representasi Sederhana Pengaruh Modulus Elastisitas Sistem Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: *Methods of Analysis of Piled Raft Foundations* (Poulos, 2001)

Kekakuan dari komponen rakit dapat diestimasi dengan memanfaatkan teori elastis, misalnya dengan menggunakan solusi yang diberikan oleh Fraser dan Wardle (1976) atau pun Richart, dkk. (1970). Kekakuan grup tiang juga dapat diestimasi dengan memanfaatkan teori elastis, seperti pendekatan yang diberikan oleh Poulos dan Davis (1980), Poulos (1989), atau dengan menggunakan teori elastis yang dibuat oleh Randolph dan Wroth (1978) untuk kekakuan tiang tunggal dan kemudian mengalikannya dengan faktor efisiensi kekakuan grup.

Adapun proporsi beban yang ditahan oleh komponen tiang dalam sistem pondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis sebagai berikut:

$$\beta_p = \frac{1}{1+a} \quad (2.3)$$

dengan:

$$a = \frac{0,2}{1 - 0,8(K_r/K_p)} \left( \frac{K_r}{K_p} \right) \quad (2.4)$$

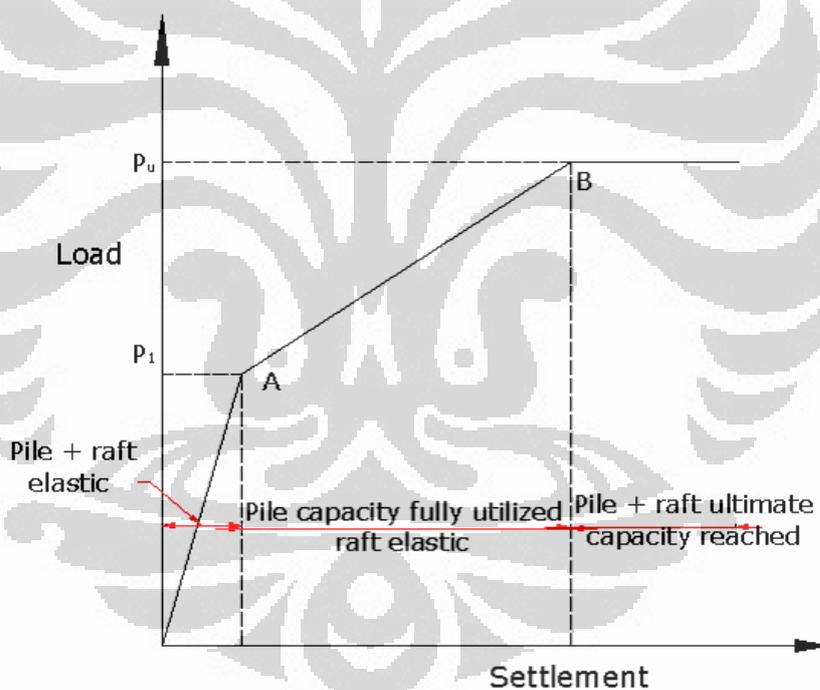
Persamaan di atas dapat digunakan untuk membuat kurva tri-linear yang menyatakan hubungan beban-penurunan. Pertama-tama, kekakuan sistem pondasi tiang-rakit dihitung berdasarkan jumlah tiang yang telah ditetapkan. Kekakuan ini akan terus efektif sampai kapasitas tiang telah sepenuhnya bekerja. Maka, apabila diasumsikan bahwa kapasitas tiang termobilisasi secara simultan satu sama lain, besarnya  $P_1$  (Gambar 2.6) dapat dihitung berdasarkan:

$$P_1 = \frac{P_{up}}{\beta_p} \quad (2.5)$$

di mana:

$P_{up}$  = kapasitas beban ultimat grup tiang

$\beta_p$  = proporsi beban yang ditahan oleh komponen tiang



Gambar 2.6 Kurva Beban-Penurunan Tri-Linear untuk Analisis Preliminari

Sumber: *Methods of Analysis of Piled Raft Foundations* (Poulos, 2001)

Di atas titik A pada Gambar 2.6, kekakuan sistem pondasi tiang-rakit hanya dipengaruhi oleh kekakuan komponen rakit saja ( $K_r$ ) dan hal ini berlangsung hingga kapasitas beban ultimat dari sistem pondasi tiang-rakit tercapai (titik B). Pada tahap ini, hubungan antara beban dan penurunan

digambarkan dengan garis horizontal. Adapun besarnya beban yang ditanggung oleh masing-masing komponen tiang dan rakit dapat dilihat pada Persamaan 2.6 dan 2.7 di bawah ini.

$$P_p = \beta_p P \leq P_{up} \quad (2.6)$$

$$P_r = P - P_p \quad (2.7)$$

di mana:

$P_p$  = beban yang ditanggung tiang

$P_r$  = beban yang ditanggung pada rakit

$P$  = beban yang bekerja pada sistem pondasi tiang-rakit

$P_{up}$  = kapasitas beban ultimat grup tiang

$\beta_p$  = proporsi beban yang ditahan oleh komponen tiang

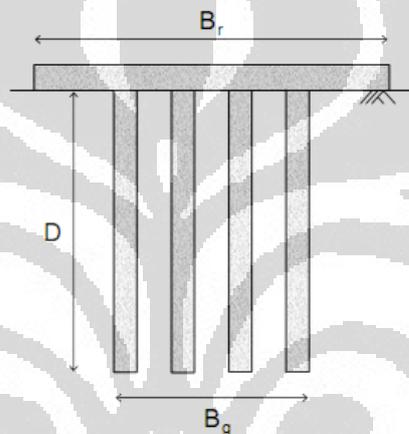
Untuk proses desain sendiri, Horikoshi dan Randolph (1996) telah mengusulkan beberapa langkah yang dapat dilakukan untuk menghasilkan desain pondasi tiang-rakit yang optimum. Adapun usulan ini didasarkan pada penelitian mereka mengenai kinerja pondasi tiang-rakit terhadap beban vertikal yang terdistribusi merata. Menurut mereka, tiang harus didistribusikan pada daerah tengah rakit dengan luas 16-25% dari luas permukaan rakit. Selain itu, kekakuan grup tiang harus kurang lebih sama dengan kekakuan aksial dari komponen rakit sendiri.

Kapasitas total tiang juga harus didesain agar tiang dapat menahan 40-70% beban rencana. Akan tetapi, rentang ini bergantung pada rasio luas antara grup tiang dengan komponen rakit dan angka Poisson dari tanah. Hal ini terkait dengan tingkat mobilisasi kapasitas tiang. Tingkat mobilisasi kapasitas tiang tidak boleh melebihi 80% untuk menghindari peningkatan signifikan dari perbedaan penurunan yang terjadi.

Namun demikian, tetap disadari bahwa untuk beban yang terpusat, langkah-langkah yang diusulkan tersebut mungkin memang tidak terlalu sesuai. Hal ini terutama terletak pada penempatan tiang di daerah tengah rakit. Akan tetapi, langkah-langkah tersebut dapat dilakukan untuk memulai proses desain meskipun selanjutnya dapat disesuaikan dengan kondisi yang sebenarnya.

### 2.1.4 Pengaruh Dimensi Pondasi Rakit dan Grup Tiang terhadap Perilaku Pondasi Tiang-Rakit

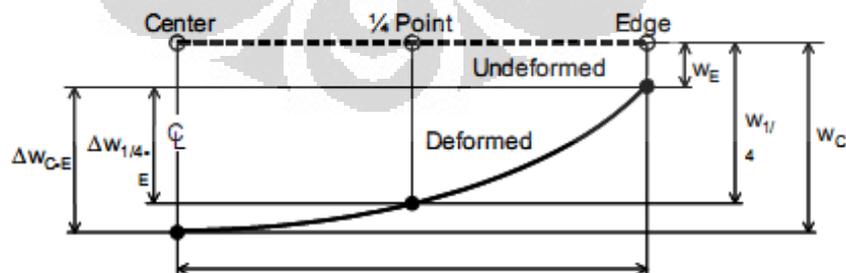
Prakoso dan Kulhawy (2001) melakukan sebuah studi parameter yang memperlihatkan pengaruh dimensi komponen rakit dan grup tiang maupun kombinasi di antara keduanya terhadap perbedaan penurunan yang terjadi pada sistem pondasi tiang-rakit dengan menggunakan bantuan PLAXIS 2 Dimensi. Secara garis besar, kinerja sistem pondasi tiang-rakit dilihat dari pendekatan penurunan yang terjadi ternyata sangat dipengaruhi oleh rasio antara lebar pondasi rakit ( $B_r$ ) dengan lebar grup tiang ( $B_g$ ).



Gambar 2.7 Keterangan Dimensi Sistem Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: Presentasi Kuliah Teknik Pondasi Lanjutan (Prakoso, 2009)

Studi parameter ini menetapkan definisi penurunan yang terjadi sebagai berikut:



$$\text{Reference Displacement} = w_{ref} = (w_C + 2w_{1/4} + 2w_E) / 5$$

$$\text{Differential Displacement} = \Delta w_{C-E} = w_C - w_E$$

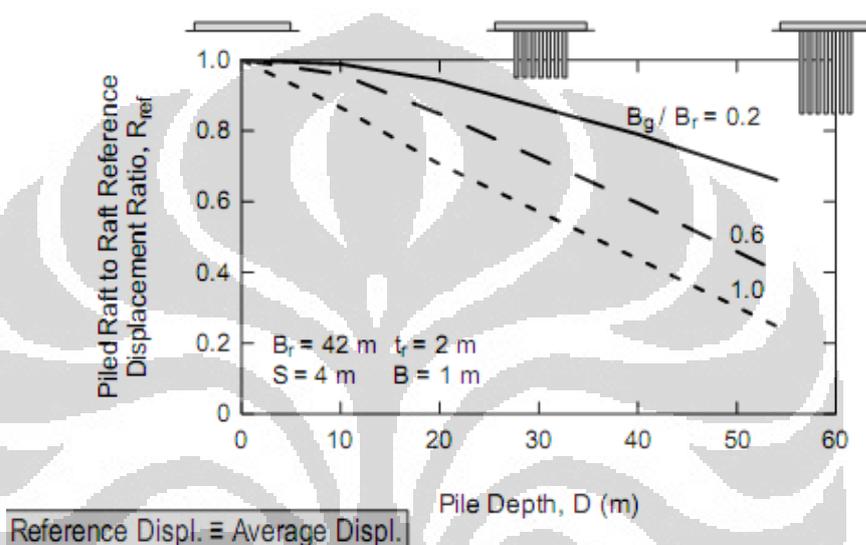
Gambar 2.8 Definisi Penurunan pada Sistem Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: *Contribution to Piled Raft Foundation Design* (Prakoso dan Kulhawy, 2001)

di mana *reference displacement* sebenarnya identik dengan penurunan rata-rata dari sistem pondasi tiang-rakit.

a. Pengaruh panjang tiang terhadap penurunan rata-rata

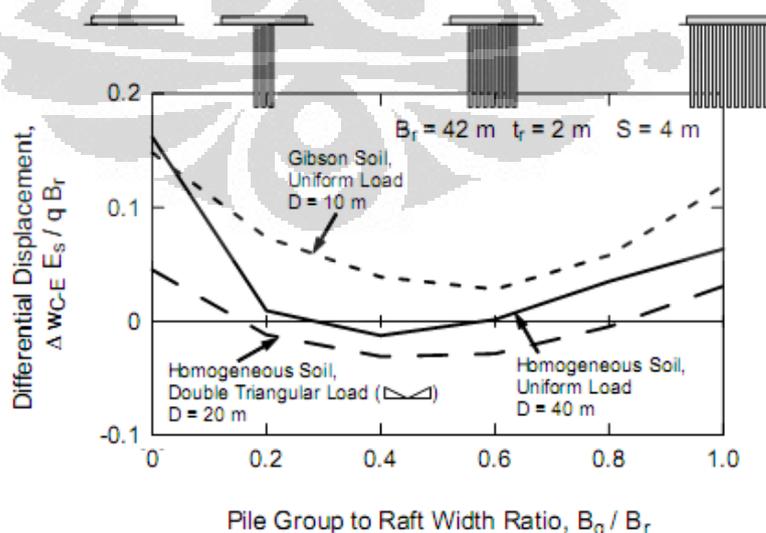
Seperti terlihat pada Gambar 2.9, semakin besar panjang tiang maka semakin kecil penurunan rata-rata yang terjadi pada sistem pondasi tiang-rakit. Hal ini berlaku pada semua rentang rasio  $B_g/B_r$ .



Gambar 2.9 Pengaruh Panjang Tiang terhadap Penurunan Rata-Rata

Sumber: *Contribution to Piled Raft Foundation Design* (Prakoso dan Kulhawy, 2001)

b. Pengaruh rasio  $B_g/B_r$  terhadap perbedaan penurunan

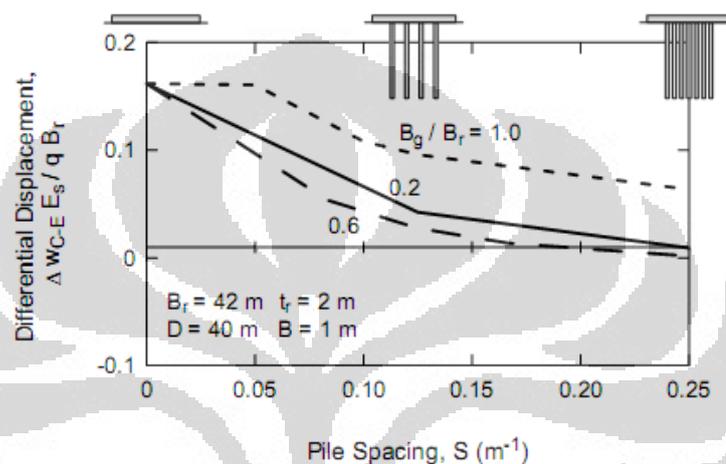


Gambar 2.10 Pengaruh Rasio  $B_g/B_r$  terhadap Perbedaan Penurunan

Sumber: *Contribution to Piled Raft Foundation Design* (Prakoso dan Kulhawy, 2001)

Pada Gambar 2.10, terlihat bahwa perbedaan penurunan berada pada tren menurun, lalu cukup mendatar, dan akhirnya meningkat kembali seiring dengan semakin besarnya rasio  $B_g/B_r$ . Hal ini berarti bahwa terdapat nilai rasio  $B_g/B_r$  yang optimum. Berdasarkan penelitian Prakoso dan Kulhawy (2001), rasio  $B_g/B_r$  yang optimum tercapai pada rentang 0,4-0,6.

- c. Pengaruh jarak antar tiang terhadap perbedaan penurunan



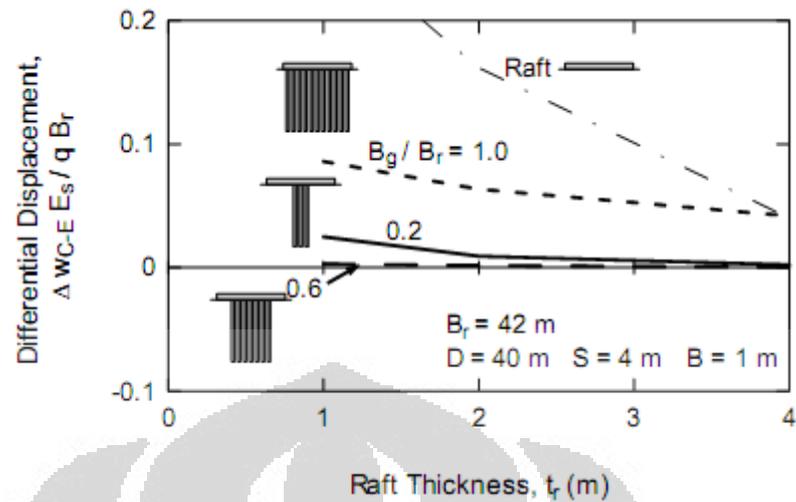
Gambar 2.11 Pengaruh Jarak Antar-Tiang terhadap Perbedaan Penurunan

Sumber: *Contribution to Piled Raft Foundation Design* (Prakoso dan Kulhawy, 2001)

Gambar 2.11 menggambarkan bahwa semakin dekat jarak antar tiang, perbedaan penurunan yang terjadi pun mengecil. Namun demikian, pada spasi lebih dari 6-8 meter, reduksi nilai perbedaan penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan.

- d. Pengaruh ketebalan komponen rakit terhadap perbedaan penurunan

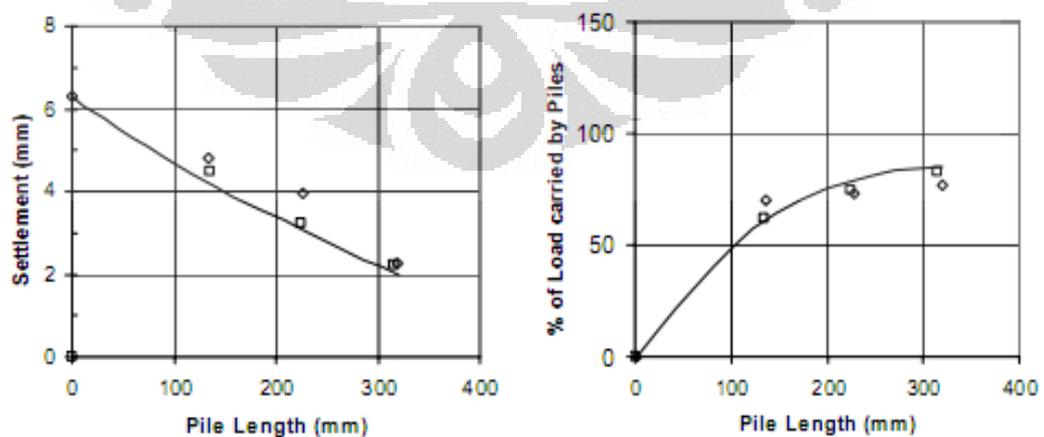
Ketebalan pondasi rakit secara tidak langsung sebenarnya menunjukkan kekakuan pondasi rakit itu sendiri. Gambar 2.12 memperlihatkan bahwa semakin tebal komponen rakit, maka perbedaan penurunan mengecil. Namun demikian, sepertinya hal ini tidak terlalu menghasilkan efek sistem pondasi tiang-rakit dengan  $0,2 \leq B_g/B_r \leq 0,8$ . Oleh karena itu, mengoptimasi grup tiang, baik dari aspek jumlah maupun dimensi, akan lebih efektif untuk mengurangi perbedaan penurunan dibandingkan dengan mempertebal komponen rakit.



Gambar 2.12 Pengaruh Ketebalan Komponen Rakit terhadap Perbedaan Penurunan

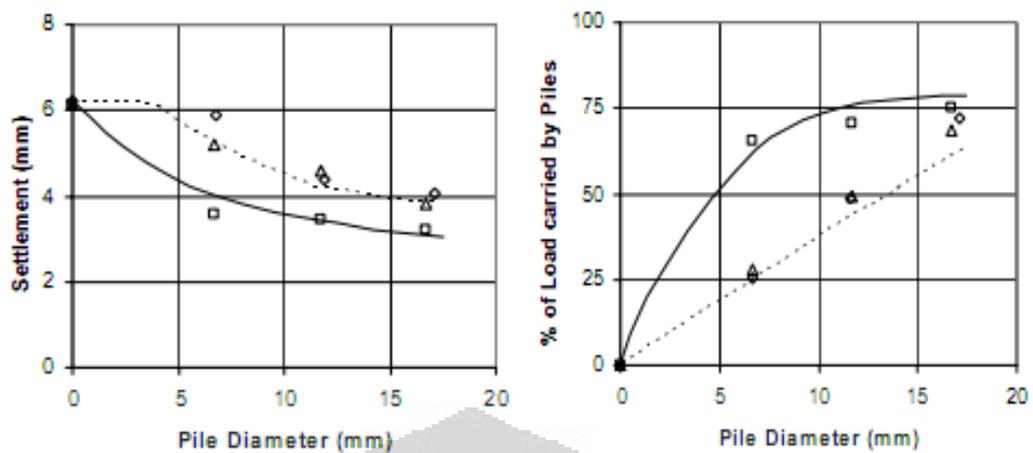
Sumber: *Contribution to Piled Raft Foundation Design* (Prakoso dan Kulhawy, 2001)

Selain itu, Thaher dan Jessberger (1991) seperti dikutip dalam Chow (2007) juga melakukan penelitian terhadap pengaruh jumlah dan dimensi tiang terhadap kinerja pondasi tiang-rakit melalui model sentrifugal melalui beberapa perangkat lunak yang berbeda. Akan tetapi, trend yang terjadi pada hasil semua perangkat lunak tersebut sama. Seperti terlihat pada Gambar 2.13, semakin panjang tiang, maka penurunan yang terjadi pun semakin kecil sementara persentase beban yang ditanggung oleh sistem tiang menjadi lebih besar. Hal yang serupa juga terjadi ketika ukuran tiang semakin besar (Gambar 2.14).



Gambar 2.13 Pengaruh Panjang Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit

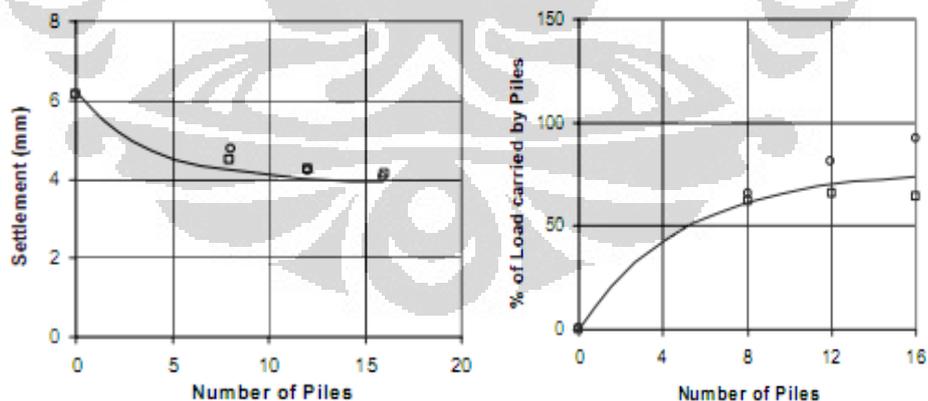
Sumber: *Investigation of the Behaviour of Pile-Raft Foundations by Centrifuge Modelling* (Thaher dan Jessberger, 1991)



Gambar 2.14 Pengaruh Diameter Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: *Investigation of the Behaviour of Pile-Raft Foundations by Centrifuge Modelling* (Thaher dan Jessberger, 1991)

Gambar 2.15 menunjukkan bagaimana jumlah tiang mempengaruhi kinerja pondasi tiang-rakit. Panjang tiang yang digunakan dalam studi parameter yang direpresentasikan oleh Gambar 2.15 tersebut adalah 135 mm, sementara diameter tiang adalah 16,7 mm. Dari studi parameter ini, diperoleh bahwa semakin banyak jumlah tiang, penurunan yang terjadi akan semakin kecil. Akan tetapi, pada tiang dengan jumlah lebih dari 10, reduksi penurunan tidak terlalu signifikan.



Gambar 2.15 Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Kinerja Pondasi Tiang-Rakit

Sumber: *Investigation of the Behaviour of Pile-Raft Foundations by Centrifuge Modelling* (Thaher dan Jessberger, 1991)

## 2.2 BASIS TEORI PERANGKAT LUNAK PLAXIS 2 DIMENSI

Secara umum, PLAXIS 2 Dimensi sebenarnya merupakan perangkat lunak berbasis pendekatan elemen hingga yang digunakan untuk menganalisis berbagai aplikasi geoteknik. Melalui perangkat lunak ini, tanah dapat dimodelkan untuk menstimulasikan perilaku tanah tersebut. Analisis sistem pondasi tiang-rakit pada sebuah lapisan tanah pun dapat dimodelkan lewat perangkat lunak ini.

### 2.2.1 Pendekatan Elemen Hingga

Pada dasarnya, sebuah lapisan tanah dapat diformulasikan dalam sebuah kerangka mekanika yang kontinu sehingga setiap deformasi statis yang terjadi pada sebuah titik akan mempengaruhi titik lain meskipun dalam kapasitas yang berbeda. Sebuah struktur yang bersifat kontinu dapat dianalisis dengan lebih mudah apabila struktur tersebut dibagi-bagi ke dalam beberapa elemen atau volume. Analisis berdasarkan elemen yang lebih kecil itulah yang disebut sebagai metode elemen hingga. Oleh karena itu, metode elemen hingga merupakan sebuah rekayasa numerik yang mentransformasikan ekspresi mekanika kontinu yang berbentuk kalkulus dan persamaan differensial menjadi sebuah ekspresi mekanika diskrit yang berbentuk matriks.

Ada beberapa bentuk elemen 2 dimensi. Setiap elemen diidentifikasi berdasarkan bentuk perbatasannya. Untuk menyederhanakan definisi analitik elemen yang bentuk dan ukuran yang beragam digunakan elemen referensi. Suatu elemen referensi adalah suatu elemen dengan bentuk simple dan mempunyai sistim koordinat dalam ruang referensi, yang dapat ditransformasikan menjadi setiap elemen riil dengan cara transformasi geometri, di mana satu elemen referensi yang sama dapat mentransformasikan semua elemen riil tipe yang sama dengan transformasi yang berbeda.

Adapun aplikasi metode elemen hingga dalam bidang geoteknik telah dapat menyelesaikan berbagai masalah, antara lain:

1. Masalah kesetimbangan, di mana dilakukan analisis tegangan 2D dan 3D, interaksi tanah dan struktur, konstruksi dan penggalian.
2. Masalah nilai eigen, di mana dilakukan analisis mengenai frekuensi natural dan mode getar pada kombinasi tanah struktur.

3. Masalah perambatan, di mana dilakukan analisis mengenai konsolidasi aliran pada media *deformable porous*, interaksi dinamis tanah dan struktur

Secara umum, terdapat beberapa langkah tipikal yang dilakukan saat metode elemen hingga dilakukan. Langkah pertama adalah melakukan diskritisasi dari elemen asli. Elemen asli yang umumnya memiliki kompleksitas yang tinggi, berbentuk tidak simetris, memiliki karakteristik material non linier, atau kondisi pembebanan yang rumit harus dimodelkan ke dalam elemen-elemen kecil yang lebih detail sehingga karakteristik elemen asli dapat digambarkan dengan lebih baik. Langkah kedua adalah merumuskan properti yang dimiliki oleh setiap elemen. Setelah properti elemen dirumuskan, struktur pun siap untuk dimodelkan. Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis model elemen dengan kondisi batas dan peralihan nodal yang telah ditetapkan. Hasil dari analisis tersebut adalah nilai-nilai yang ingin diperoleh.

Setiap elemen terdiri atas beberapa noda. Setiap noda ini memiliki sejumlah derajat kebebasan yang berhubungan satu sama lain untuk membagi variabel yang tidak diketahui di dalam batasan masalah yang ingin dipecahkan. Dalam kasus ini, derajat kebebasan tersebut berhubungan dengan deformasi ataupun perpindahan yang terjadi. Oleh karena itu, lewat pendekatan ini, dapat diketahui pula bagaimana detail profil penurunan yang terjadi pada tanah akibat menerima beban.

### **2.2.2 Penggunaan Perangkat Lunak PLAXIS 2 Dimensi Versi 8.2**

PLAXIS versi 8.2 adalah program elemen hingga yang secara khusus digunakan untuk menganalisis deformasi dan penurunan pada bidang geoteknik. Untuk setiap kasus yang akan dianalisis, model geometri harus dibuat terlebih dahulu. Model geometri ini merupakan representasi dua dimensi dari masalah tiga dimensi yang nyata di lapangan.

Pada PLAXIS 2 dimensi, pondasi dimodelkan sebagai elemen triangular 2 dimensi dengan memiliki hanya dua derajat kebebasan per nodal. Setiap elemen pondasi didefinisikan oleh 15 nodal geometri. Pemodelan dengan 15 nodal dipilih untuk setiap elemen agar memperoleh perhitungan yang lebih akurat meskipun

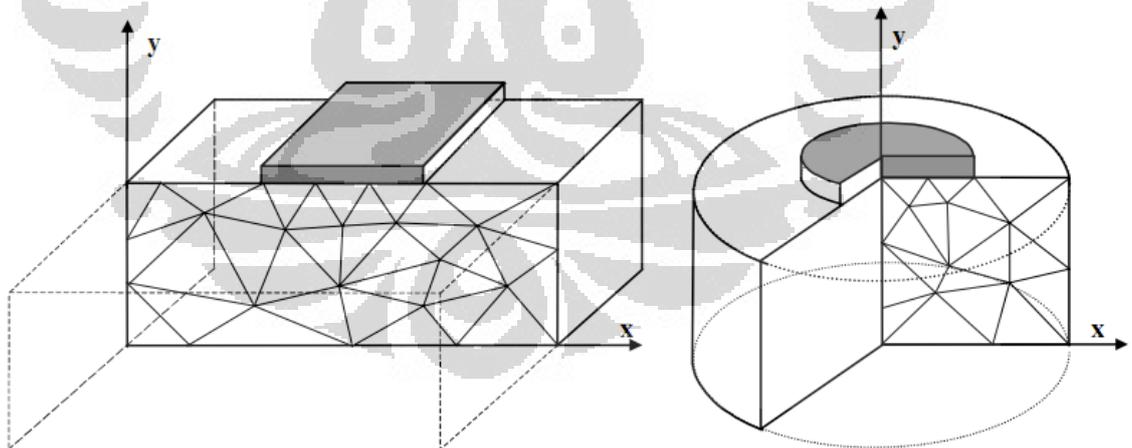
akan menjadi lebih rumit. Adapun terdapat dua bentuk pemodelan dari 3 dimensi ke dalam 2 dimensi dalam PLAXIS, yaitu bentuk *plane strain* dan bentuk *axisymmetric*.

### 1. *Plane Strain*

Model *plane strain* digunakan untuk geometri dengan potongan melintang yang relatif seragam. Selain itu, kondisi tegangan dan skema pembebanan dengan panjang tertentu dan tegak lurus terhadap arah sumbu z juga harus relatif seragam (Gambar 2.16). Perpindahan dan regangan pada arah sumbu z diasumsikan nol. Namun demikian, tegangan normal pada arah sumbu z tetap memiliki nilai.

### 2. *Axisymmetric*

Model ini digunakan untuk struktur melingkar dengan potongan melintang secara radial dan skema pembebanan yang relatif seragam di sekitar titik pusat lingkaran di mana deformasi dan kondisi tegangan yang terjadi diasumsikan identik dalam semua arah radial. Sumbu x pada pemodelan ini merepresentasikan radius sementara sumbu y merepresentasikan garis sumbu simetri. Adapun koordinat x negatif tidak dapat digunakan.



Gambar 2.16 Ilustrasi Pemodelan *Plane-Strain* dan *Axisymmetric*

Sumber: PLAXIS 2D – Version 8 Manual (Brinkgreve, 2002)

Model geometri pada PLAXIS didasarkan pada pemodelan *plane strain* atau *axisymmetric* tersebut. Adapun terdapat tiga komponen utama model geometri pada PLAXIS, yaitu:

1. Titik → menunjukkan awal dan akhir garis. Titik juga digunakan untuk menempatkan ankur, gaya, dan lainnya.
2. Garis → digunakan untuk menyatakan ikatan geometri, model, dan diskontinuitas pada geometri seperti dinding, pelat, dan lainnya. Garis bisa mempunyai beberapa fungsi dan material yang berbeda.
3. *Cluster* → luasan area tertutup yang dibatasi penuh oleh garis. Dalam satu cluster hanya terdapat satu material sehingga homogen. *Cluster* dapat diaplikasikan sebagai lapisan tanah.

Proses simulasi pada PLAXIS terdiri dari 3 tahap, yaitu: input data, perhitungan, dan output.

1. Input data → membuat dan memodifikasi geometri model sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi asli kasus.
2. Perhitungan → Setelah dibuat pemodelan, maka perlu dilakukan pemilihan tipe perhitungan yang sesuai.
3. Output program → perhitungan dilakukan hingga keseimbangan tercapai. Adapun keluaran utama yang bisa diperoleh adalah deformasi *mesh*, perkembangan profil penurunan, besarnya tegangan di dalam lapisan tanah, serta gaya-gaya dalam yang diderita oleh struktur yang dimodelkan.

Proses diskritisasi akan berlangsung secara otomatis di dalam PLAXIS. Banyaknya elemen yang dihasilkan tergantung pada pemilihan tingkat kekasaran (*Global Coarseness*). PLAXIS menyediakan 5 tingkat kekasaran, dari sangat kasar, kasar, sedang, halus, sangat halus. Semakin halus tingkatannya, maka jumlah elemennya semakin banyak. Dengan demikian, ketelitian hasil perhitungannya pun semakin tinggi. Namun demikian, tentu saja memakan proses yang juga semakin lama karena memakan memori yang semakin besar.

PLAXIS memiliki beberapa fitur yang dapat digunakan untuk memodelkan struktur (Brinkgreve, 2002). Fitur-fitur pemodelan tersebut adalah:

### 1. Tanah

Fitur pemodelan ini digunakan untuk menyatakan karakteristik tanah dan interaksi antara elemen. Pada PLAXIS Versi 8.2 sendiri, tersedia lima jenis pemodelan yang dapat digunakan, yaitu Mohr-Coulomb, Jointed Rock, Hardening Soil, Soft-Soil-Creep, dan Soft Soil. Kelima jenis ini harus digunakan berdasarkan kondisi tanah asli.

### 2. Pelat dan cangkang

Jenis ini dimodelkan dengan elemen 3 nodal atau elemen 5 nodal. Setiap noda memiliki 3 derajat kebebasan. Jenis perilaku dari bentuk pemodelan ini dapat berupa elastis atau elastoplastis. Bentuk ini umumnya digunakan untuk memodelkan dinding, lantai, dan terowongan. Perilaku dari elemen-elemen ini didefinisikan dengan kekakuan fleksural, kekakuan normal, dan tebal elemen.

### 3. Angkur

Jenis ini merupakan elemen pegas elastoplastik yang digunakan untuk memodelkan perletakan, angkur dan strut. Perilaku elemen-elemen ini didefinisikan dengan menggunakan kekakuan normal dan beban maksimum.

### 4. Geogrid

Model ini sering digunakan untuk perkuatan konstruksi tanggul atau struktur penahan tanah. Geogrid hanya memiliki EA dan digunakan untuk menahan tarikan.

### 5. Elemen *Interface*

Model ini digunakan untuk menggambarkan interaksi antara tanah dengan struktur, seperti friksi pada dinding penahan tanah. Properti materialnya diambil dari properti material tanah dengan menggunakan faktor reduksi  $R_{inter}$ .

Dalam penggunaan perangkat lunak PLAXIS 2 Dimensi, tentu ada batasan-batasan yang akan diambil. Batasan pertama adalah bagaimana pemodelan material yang digunakan. Berbagai perilaku mekanis tanah dapat dimodelkan pada berbagai derajat akurasi. Sebagai contoh, hukum Hooke mengenai elastisitas linear dan bersifat isotropis menggambarkan hubungan tegangan-regangan yang paling sederhana. Penggunaan modulus Young dan angka Poisson menyajikan perilaku tanah dan batuan yang cukup kasar.

Sementara itu, untuk memodelkan elemen struktural yang besar dan lapisan batuan dasar mungkin lebih diperlukan pemodelan elastisitas linear. Oleh karena itu, pemodelan tanah sendiri sangat penting untuk diperhatikan karena akan menentukan karakter *output* yang dihasilkan.

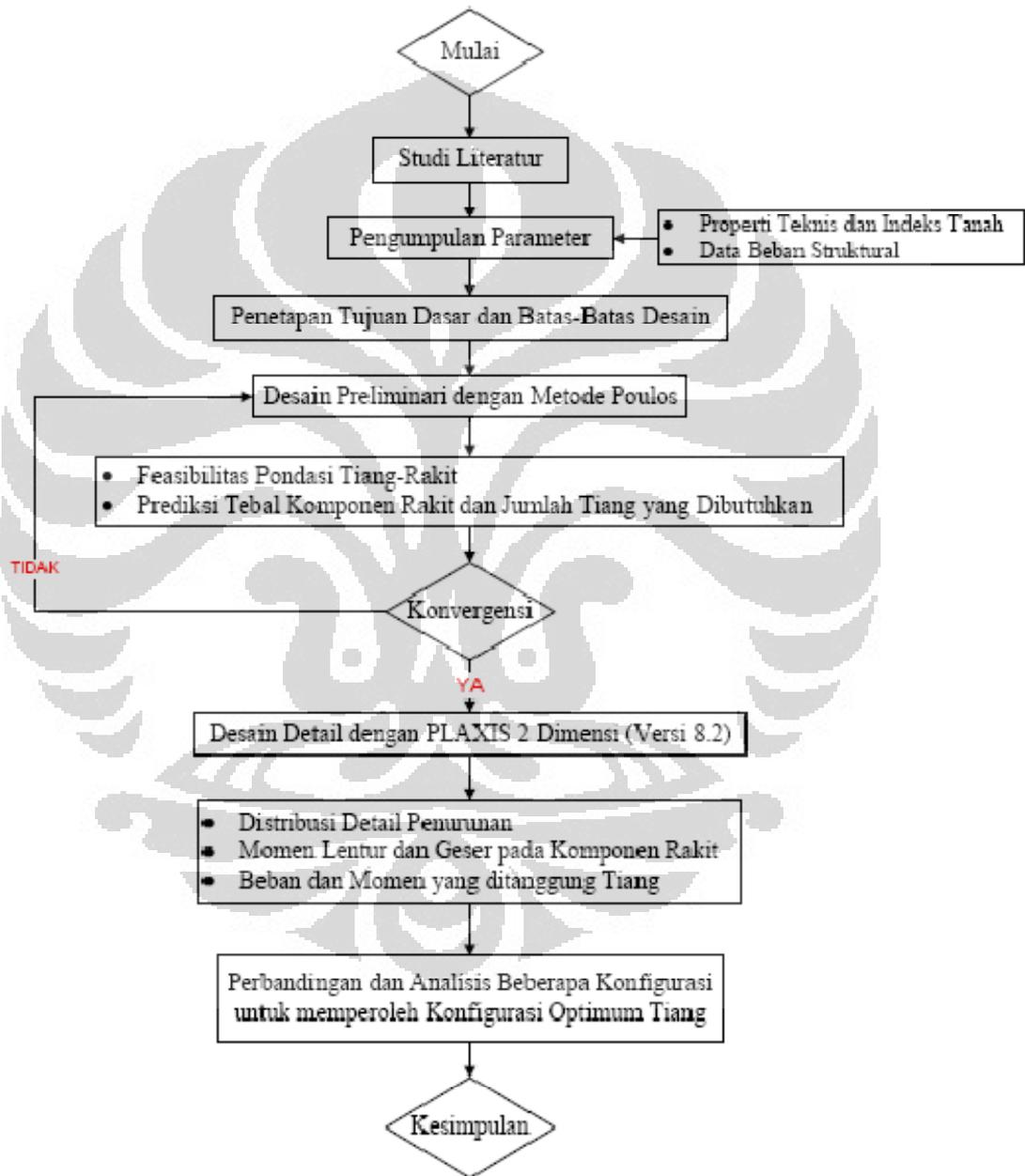
Secara umum, pada analisis yang dilakukan untuk penelitian ini, tanah akan dimodelkan dalam bentuk Mohr-Coulomb. Model Mohr-Coloumb melibatkan lima parameter masukan, yaitu modulus Young dan rasio Poisson untuk menggambarkan elastisitas tanah, sudut geser dan kohesi untuk menggambarkan plastisitas tanah, dan sudut dilatansi dari tanah. Model ini merepresentasikan orde pertama dari perilaku tanah atau batuan.

Jenis model ini sangat direkomendasikan sebagai analisis pertama dari setiap masalah yang akan dibahas. Setiap lapisan tanah harus dicari rata-rata kekakuannya dan kekakuan tersebut harus bersifat konstan. Oleh karena kekakuan yang digunakan bersifat konstan, maka perhitungan akan relatif cepat dan hasil deformasi yang terjadi pada tanah akan langsung terlihat. Namun demikian, di samping kelima parameter yang telah disebutkan sebelumnya, kondisi awal tanah juga memainkan peranan penting pada sebuah masalah deformasi tanah. Tekanan lateral awal tanah juga harus sangat berpengaruh sehingga nilai  $K_0$  harus dipilih dengan benar.

Namun demikian, meskipun PLAXIS telah dikembangkan untuk menstimulasikan proses dan fenomena geoteknik yang nyata, tetapi simulasi yang dihasilkan sebenarnya pun hanya merupakan aproksimasi saja, di mana bisa jadi melibatkan kesalahan numerik dan pemodelan yang tidak dapat dihindari. Akurasi dari simulasi yang dihasilkan sangat bergantung pada bagaimana permasalahan dasar dimodelkan, pemahaman terhadap pemodelan tanah dan batasan-batasannya, pemilihan parameter model, dan kemampuan untuk menjustifikasi apakah hasil dari simulasi tersebut dapat dipercaya atau tidak.

### BAB 3 METODOLOGI ANALISIS

Diagram alir proses desain pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Desain

### 3.1 STUDI LITERATUR

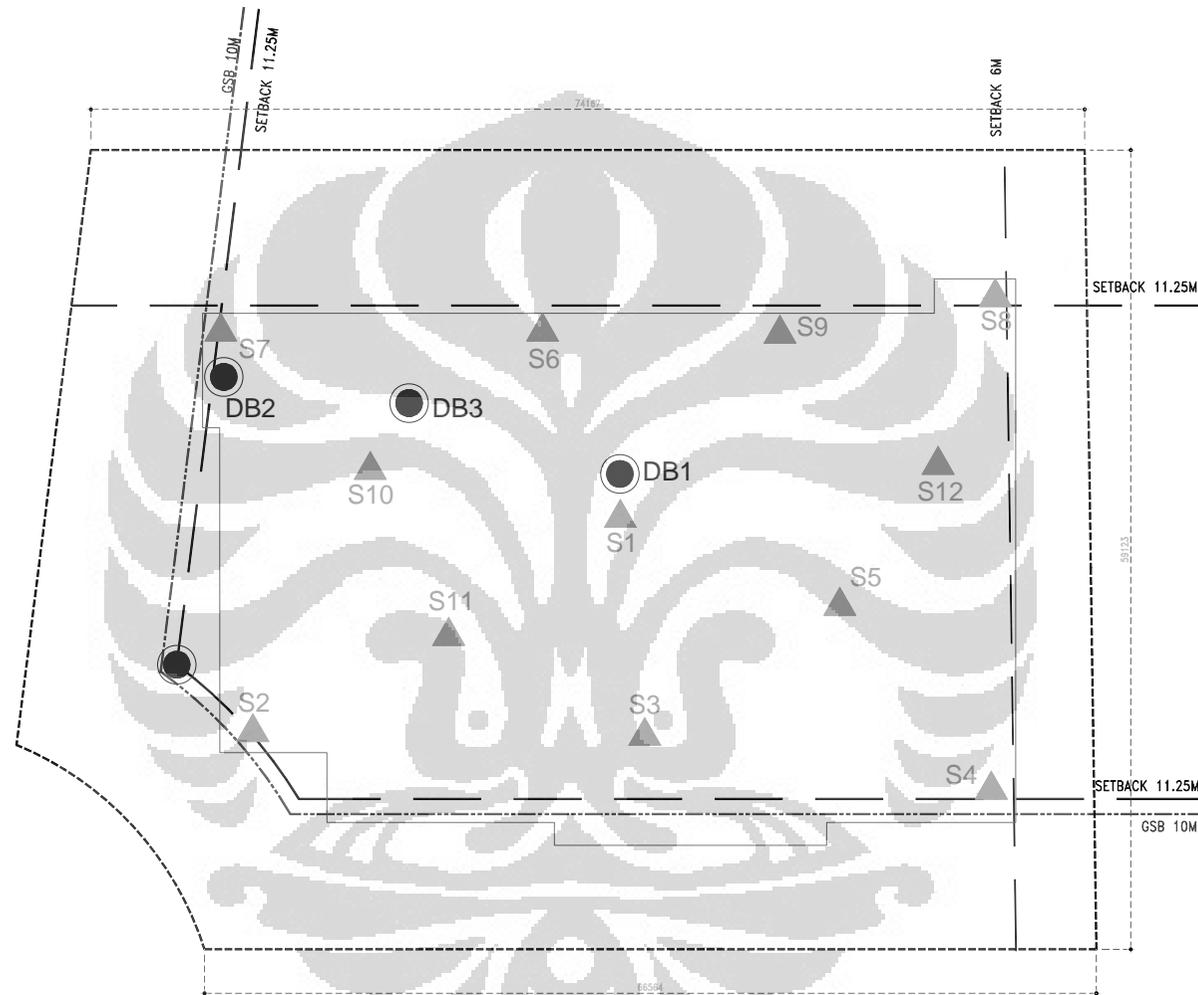
Untuk dapat melakukan penelitian dengan baik, harus dilakukan studi literatur terlebih dahulu. Adapun studi literatur yang dilakukan meliputi perilaku pondasi tiang-rakit dan berbagai karakteristiknya, cara kerja PLAXIS versi 8.2, serta metode perhitungan manual dari Poulos untuk memperlihatkan gambaran kontribusi pembagian beban yang terjadi antara komponen tiang dan rakit. Literatur mengenai perilaku pondasi tiang-rakit diambil dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan telah dipublikasikan dalam bentuk buku maupun jurnal-jurnal ilmiah.

### 3.2 PENGUMPULAN PARAMETER

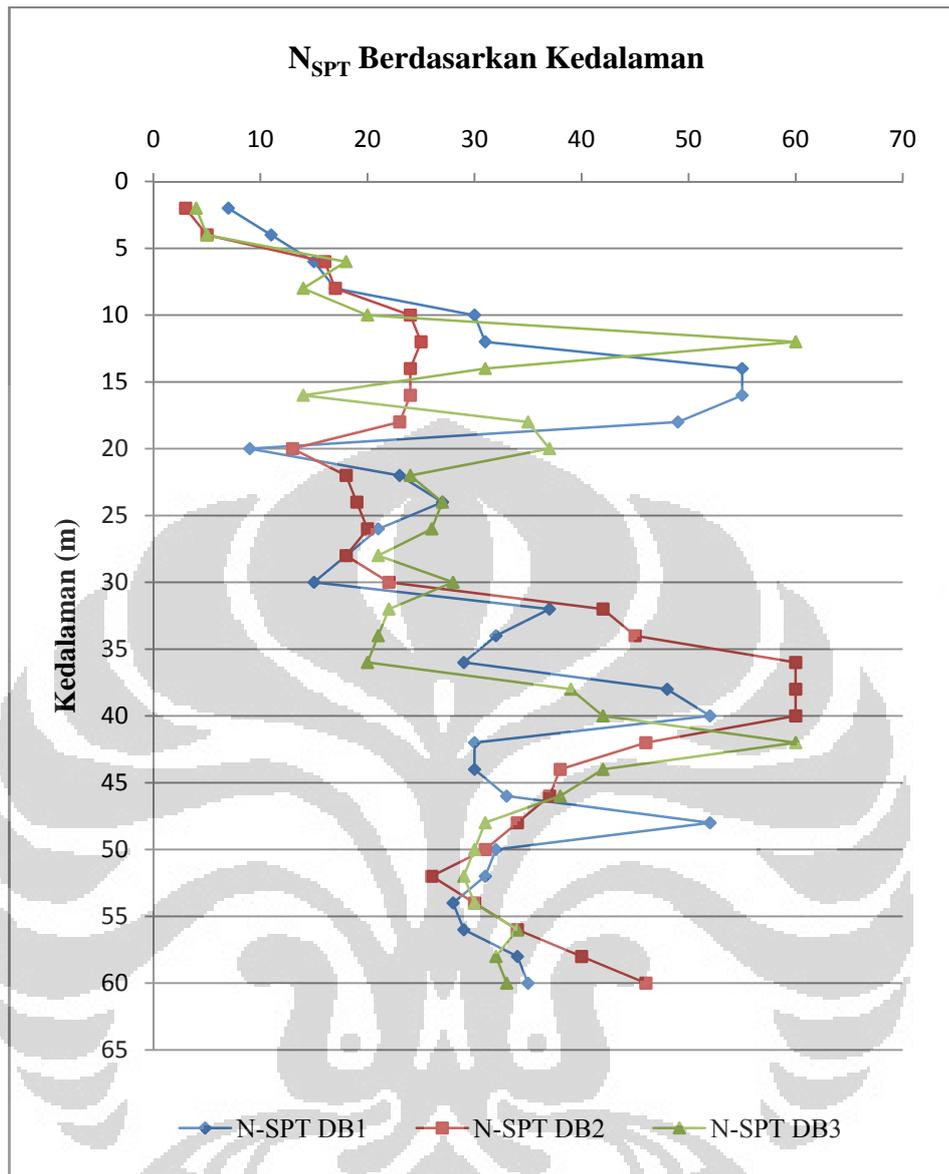
Parameter yang harus dikumpulkan adalah data lapisan tanah, denah struktural, dan data pembebanan dari bangunan yang didesain. Data tersebut diperoleh dari Proyek Apartemen X. Adapun data tanah diperoleh dari laporan uji SPT, CPT, Pressuremeter, dan uji laboratorium untuk memperoleh properti teknis dari tanah. Data lain yang dibutuhkan adalah mengenai beban-beban struktural yang diberikan pada kolom-kolom. Oleh karena itu, denah struktural dari bangunan harus juga ditinjau.

#### 3.2.1 Data Penyelidikan Tanah

Data penyelidikan tanah yang digunakan dalam analisis meliputi pengujian di lapangan dan laboratorium. Di lapangan, dilakukan pengeboran teknik dengan kedalaman 60 meter dan uji sondir dengan kapasitas alat 2,5 tonf, sedangkan pengambilan nilai  $N_{SPT}$  dilakukan dengan interval pengujian setiap 2,00 meter. Adapun denah titik-titik penyelidikan tanah yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.2. Gambar 3.3 menunjukkan profil  $N_{SPT}$  terhadap elevasi, di mana kondisi pelapisan tanah bervariasi dengan lapisan tanah keras  $N_{SPT} > 30$  berupa lapisan lanau kelempungan atau pasir sangat padat saat  $N_{SPT} > 60$  yang sampai akhir pengeboran tidak konsisten ketebalannya, sementara lapisan cukup keras mulai ditemui pada kedalaman 10 meter di bawah level permukaan tanah eksisting dari penyelidikan tanah.

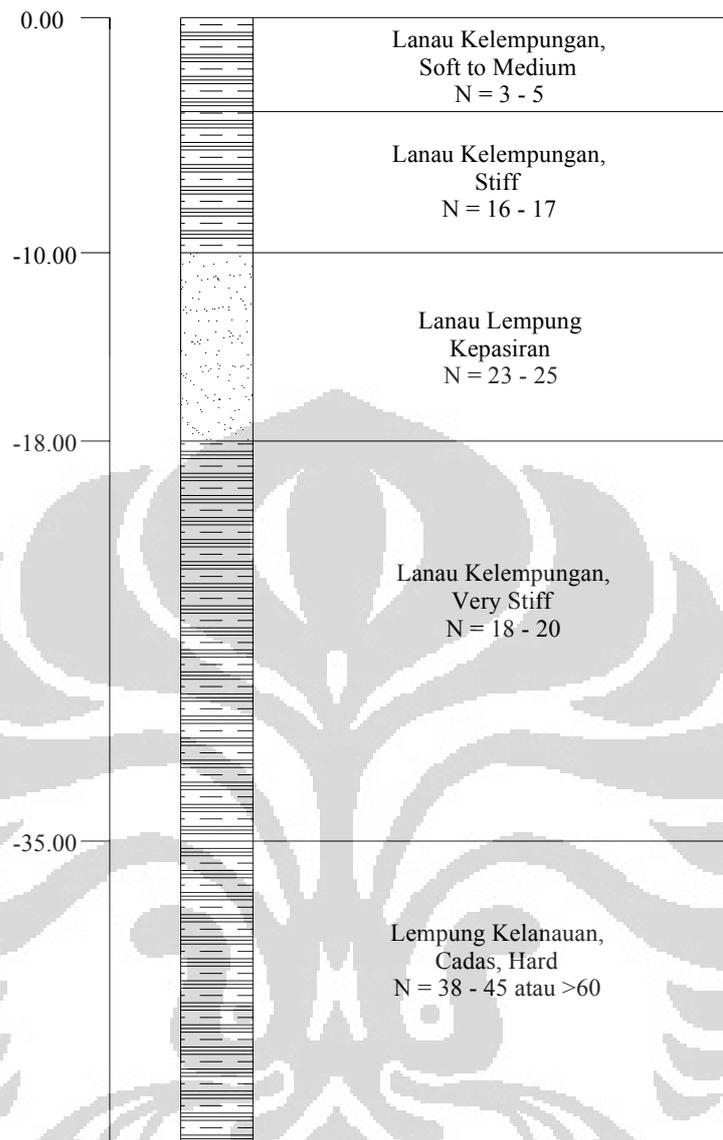


Gambar 3.2 Denah Titik Sondir dan Bor Dalam



Gambar 3.3 Profil Data  $N_{SPT}$  terhadap Kedalaman pada 3 Titik Boring

Dari semua hasil penyelidikan di berbagai titik sondir maupun bor dalam tersebut, data lapisan-lapisan tanah akan digeneralisasi sehingga pada pemodelan nantinya hanya akan digunakan satu set struktur tanah saja. Set lapisan tanah yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Set Lapisan Tanah yang digunakan dalam Pemodelan

Selain uji lapangan, dilakukan juga pengambilan sampel tak terganggu (*undisturbed sample*) untuk kemudian dilakukan pengujian di laboratorium. Uji laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik dan mekanis dari tanah. Namun demikian, hasil dari uji laboratorium yang digunakan sebagai input analisis hanyalah meliputi uji untuk mengetahui properti indeks tanah saja. Adapun pengambilan sampel tak terganggu tentu tidak dapat diambil pada setiap lapisan tanah yang memiliki tingkat kekerasan dan kepadatan yang tinggi. Adapun

ringkasan data hasil uji properti indeks dan teknis dari sampel tanah di laboratorium dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Parameter Tanah dari Uji Laboratorium

Deep Boring No.		DB1				DB2		
Kedalaman Sampel (m)		1.50-2.00	3.50-4.00	5.50-6.00	27.50-28.00	3.50 - 4.00	7.50 - 8.00	19.50 - 20.00
Berat isi tanah, $\gamma_{wet}$ (ton/m <sup>3</sup> )		1.61	1.46	1.59	1.19	1.55	1.45	1.28
Angka pori natural, e		1.55	1.93	1.58	2.15	1.82	2.03	1.88
Specific Gravity, G <sub>s</sub>		2.61	2.62	2.61	2.55	2.63	2.63	2.52
Berat isi tersaturasi, $\gamma_{sat}$ (ton/m <sup>3</sup> )		1.63	1.55	1.62	1.49	1.58	1.54	1.53
Derajat saturasi, S <sub>r</sub> (%)		96.28	86.08	94.18	55.35	95.82	86.71	62.23
Gradasi	Kerikil	-	-	-	-	-	-	-
	Pasir	4.09	1.14	7.25	1.03	5.07	6.43	0.95
	Lanau	54.33	51.34	48.89	53.64	61.25	47.45	56.18
	Lempung	53.60	41.58	47.52	43.86	33.68	46.12	42.87
Atterberg Limits	Kadar air natural, w <sub>n</sub> (%)	57.10	63.44	57.09	46.58	66.27	66.88	46.47
	Batas Cair (%)	85.75	92.50	88.00	84.00	88.60	89.70	79.00
	Batas Plastis (%)	36.64	37.16	35.81	35.64	37.36	36.47	26.14
	Indeks Plastisitas (%)	49.11	55.34	52.19	48.36	51.24	53.23	52.86

Dalam analisis, parameter tanah yang diperlukan adalah berat isi tanah, koefisien permeabilitas, kohesi, sudut geser, sudut dilatansi (jika digunakan), modulus elastisitas tanah, serta angka Poisson. Namun demikian, nilai dari beberapa parameter tersebut tidak dapat diperoleh dari uji lapangan dan laboratorium. Dengan demikian, diperlukan korelasi-korelasi antara nilai N<sub>SPT</sub> dan indeks plastisitas tanah yang diketahui dari uji lapangan dan laboratorium untuk mengetahui parameter tanah lain yang diperlukan dalam analisis.

a. Korelasi terhadap angka Poisson

Perlu diketahui bahwa angka Poisson yang digunakan juga akan disesuaikan dengan nilai pada perangkat lunak PLAXIS. Untuk tanah lempung dengan kondisi tak terdrainase, angka Poisson yang digunakan pada perangkat lunak PLAXIS harus kurang dari atau sama dengan 0,35. Apabila angka Poisson yang lebih besar dari 0,35 digunakan, maka terjadilah kondisi di mana air tidak cukup kaku relatif terhadap kerangka tanah.

Tabel 3.2 Angka Poisson untuk Beberapa Jenis Tanah.

Material	Jangka	Jangka
	Pendek	Panjang
Pasir, kerikil, dan tanah non-koheusif	0,3	0,3
Tanah dengan PI rendah ( $PI < 12\%$ )	0,35	0,25
Tanah dengan PI medium ( $12\% < PI < 22\%$ )	0,4	0,3
Tanah dengan PI tinggi ( $22\% < PI < 32\%$ )	0,45	0,35
Tanah dengan PI sangat tinggi ( $PI > 32\%$ )	0,45	0,4

Sumber: *Industrial Floors and Pavements Guidelines* (diterbitkan oleh *Concrete Institute*, 1999)

Tabel 3.2 memperlihatkan korelasi antara nilai indeks plastisitas tanah terhadap rentang angka Poisson yang dapat digunakan. Di samping itu, perlu juga diingat bahwa dalam analisis tak-terdrainase pada perangkat lunak PLAXIS, angka Poisson yang dimasukkan adalah tetap angka Poisson untuk analisis jangka panjang. Hal ini dikarenakan perangkat lunak PLAXIS sendiri yang akan mengkonversinya agar sesuai dengan analisis tak-terdrainase.

b. Korelasi terhadap koefisien permeabilitas

Koefisien permeabilitas tanah dipilih dengan memanfaatkan penelitian yang dilakukan Wesley pada tahun 1977 mengenai koefisien permeabilitas pada berbagai jenis tanah (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Nilai Permeabilitas (k) dalam Satuan cm/sec

Ukuran Partikel	Koefisien Permeabilitas, k (m/s)
Pasir berlempung, pasir berlanau	$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$
Pasir halus	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$
Pasir kelanauan	$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5}$
Lanau	$1 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$
Lempung	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$

Sumber: *Mekanika Tanah* (Wesley, diterbitkan oleh Badan Penerbit Pekerjaan Umum, 1977)

c. Korelasi terhadap kohesi tanah

Pada lapisan tanah yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengambilan sampel tak terganggu, maka parameter kuat geser tanahnya diperoleh melalui korelasi terhadap nilai  $N_{SPT}$ . Oleh karena sebagian besar

lapisan tanah dapat dikatakan cenderung termasuk ke dalam tanah lempung, maka korelasi yang digunakan pun merupakan jenis korelasi untuk tanah lempung.

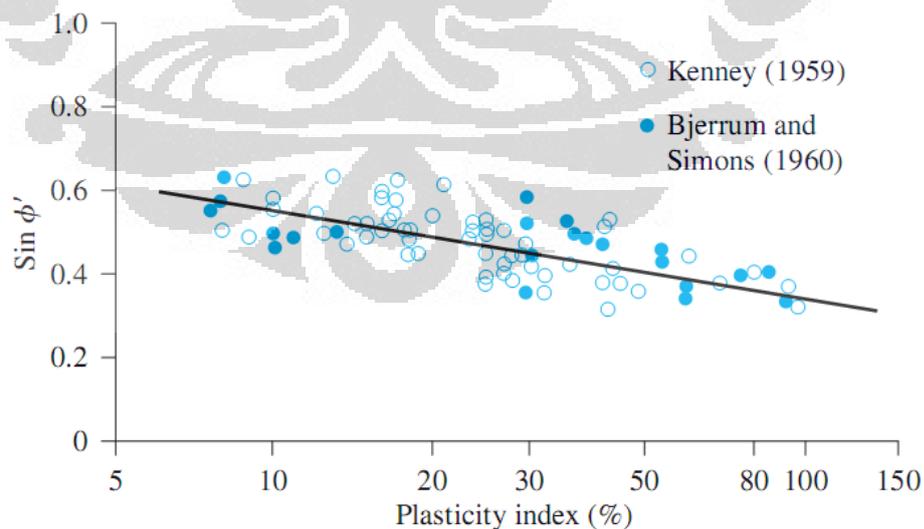
Tabel 3.4 Kuat Geser Efektif Tanah Kohesif

Material	Deskripsi	Kohesi (kPa)
Lempung	Lunak – organik	5-10
	Lunak – non organik	10-20
	Kaku	20-50
	Keras	50-100

Sumber: *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (Look, 2007)

d. Korelasi terhadap sudut geser internal tanah

Di bawah ini merupakan korelasi antara indeks plastisitas dengan nilai sudut geser internal pada tanah yang kohesif. Perlu diperhatikan bahwa sebenarnya terdapat sebaran dari penelitian yang dilakukan oleh Kenney (1959) serta Bjerrum dan Simons (1960). Akan tetapi, trend yang terbentuk adalah bahwa sudut geser internal tanah akan berkurang seiring dengan kenaikan indeks plastisitas.



Gambar 3.5 Variasi Sinus Sudut Geser Internal Tanah Kohesif terhadap Indeks Plastisitas

Sumber: *Principles of Foundation Engineering* (Das, 2011)

e. Korelasi terhadap modulus elastisitas

Sama seperti pada angka Poisson, perlu juga diingat bahwa dalam analisis tak-terdrainase pada perangkat lunak PLAXIS, modulus elastisitas yang dimasukkan adalah modulus elastisitas untuk analisis jangka panjang.

Tabel 3.5 Parameter Elastis dari Berbagai Jenis Tanah

Tipe	Deskripsi	Modulus Elastisitas, E (MPa)	
		Jangka Pendek	Jangka Panjang
Pasir halus	Lepas	5-10	
	Medium	10-25	
	Padat	25-50	
Lanau	Lunak	< 10	< 8
	Kaku	10-20	8-15
	Keras	> 20	> 15
Lempung	Sangat lunak	< 3	< 2
	Lunak	2-7	1-5
	Medium	5-12	4-8
	Kaku	10-25	7-20
	Sangat kaku	20-50	15-35
	Keras	40-80	30-60

Sumber: *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (Look, 2007)

Perlu diketahui bahwa dalam tahap desain preliminari dengan metode Poulos, parameter tanah yang dipakai adalah parameter *undrained*. Hal ini dikarenakan besar penurunan yang ingin diteliti hanyalah penurunan jangka pendek. Namun demikian, dalam tahap desain detail dengan menggunakan PLAXIS Versi 8.2, parameter yang digunakan adalah parameter *drained* meskipun tipe perilaku yang dipilih adalah perilaku *undrained*. Perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 sendiri yang akan melakukan konversi secara otomatis terhadap parameter-parameter tersebut.

Tabel 3.6 Detail Parameter Tanah dalam Desain Preliminari

Parameter	Satuan	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5
Kedalaman	m	0-4	4-10	10-18	18-35	35-70
Modulus Young ( $E_u$ )	kN/m <sup>2</sup>	7000	30000	80000	52500	1,00E+05
Rasio Poisson ( $\nu_u$ )	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Modulus geser (G)	kN/m <sup>2</sup>	2500	10710	28570	18750	35700

Tabel 3.7 Detail Parameter Tanah dalam Pemodelan PLAXIS Versi 8.2

Parameter	Satuan	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5
Kedalaman	m	0-4	4-10	10-18	18-35	35-70
Model material	-	MC*	MC	MC	MC	MC
Tipe perilaku	-	UD**	UD	UD	UD	UD
Berat isi tanah di atas MAT ( $\gamma_{\text{unsat}}$ )	kN/m <sup>3</sup>	14,5	15,2	16,5	16	17,5
Berat isi tanah di bawah MAT ( $\gamma_{\text{sat}}$ )	kN/m <sup>3</sup>	15	16	17	16,5	17,5
Indeks Plastisitas	-	45%	52%	56%	46%	30%
Koef. Permeabilitas Horizontal ( $k_x$ )	m/hari	0,0777	0,0777	0,069	0,0777	6,90E-05
Koef. Permeabilitas Vertikal ( $k_y$ )	m/hari	0,0777	0,0777	0,069	0,0777	6,90E-05
Modulus Young ( $E_{\text{ref}}$ )	kN/m <sup>2</sup>	4500	19000	51000	33400	63500
Rasio Poisson ( $\nu$ )	-	0,35	0,35	0,3	0,35	0,35
Kohesi ( $c_{\text{ref}}$ )	kN/m <sup>2</sup>	17	25	36	30	85
Sudut geser ( $\phi$ )	°	22	21	21	22	25
Sudut dilatasi ( $\psi$ )	°	0	0	0	0	0
Modulus geser (G)	kN/m <sup>2</sup>	1852	7407	11500	8333	23520

Catatan: \* Model material Mohr-Coulomb \*\* Perilaku *Undrained*

### 3.2.2 Denah Struktural dan Kondisi Pembebanan

Pada dasarnya, gedung Apartemen X terdiri dari 1 menara (*tower*). Bangunan apartemen ini terdiri dari 45 lantai dengan 10 lantai podium dan 35 lantai *tower* di atas podium. Struktur bangunan berdiri di atas lantai dasar dan semi-*basement* dengan galian tanah rata-rata sebesar 2 meter dari elevasi tanah eksisting. Denah struktural ini akan mempengaruhi penempatan komponen rakit dan tiang-tiang karena dengan asumsi perletakan yang telah diberikan, akan diperoleh besar reaksi yang diterima kolom-kolom pada bagian *basement* yang kemudian akan diteruskan kepada pondasi. Adapun titik-titik hasil reaksi pembebanan dapat pada daerah *basement* dapat dilihat pada Lampiran 1.2.

Sistem pembebanan struktural yang berlaku pada bangunan ini dikaji berdasarkan utilitas dan lantai yang ada. DL merupakan singkatan bagi *Dead Load* (beban mati), LL merupakan singkatan bagi *Live Load* (beban hidup), dan TL merupakan singkatan bagi *Total Load* (total beban). Reaksi dari sistem pembebanan struktural ini diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak

ETABS Versi 9.2.0 dan akan digunakan sebagai beban dalam desain pondasi tiang-rakit. Adapun beban yang diperhitungkan hanyalah beban vertikal saja. Gambar pemodelan pada perangkat lunak ETABS Versi 9.2.0 serta hasil reaksi dari pembebanan yang ada dapat dilihat pada Lampiran 1.2 dan Lampiran 2.1.

1. Lantai Parkir (P2 s/d P9)
  - a. Slab,  $t = 250 \text{ mm}$  :  $0.25 \times 2400 = 600 \text{ kg/m}^2$
  - b. M/E =  $10 \text{ kg/m}^2$   
DL =  $610 \text{ kg/m}^2$
  - c. Beban Hidup LL =  $400 \text{ kg/m}^2$   
TL =  $1010 \text{ kg/m}^2$
2. Lantai Genset (Lt. *Semi Basement*)
  - a. Beban Genset =  $2000 \text{ kg/m}^2$   
DL =  $2000 \text{ kg/m}^2$
  - b. Beban Hidup (*maintenance*) LL =  $150 \text{ kg/m}^2$   
TL =  $2150 \text{ kg/m}^2$
3. Lantai *Ground Tank* (Lt. *Semi Basement*)
  - a. Beban Air ( $h_{\text{air}} = 1.75 \text{ m}$ ) =  $1750 \text{ kg/m}^2$   
TL =  $1750 \text{ kg/m}^2$
4. Lantai STP (Lt. *Semi Basement*)
  - a. Beban STP (asumsi) =  $2500 \text{ kg/m}^2$   
DL =  $2500 \text{ kg/m}^2$
  - b. Beban Hidup (*maintenance*) LL =  $150 \text{ kg/m}^2$   
TL =  $2650 \text{ kg/m}^2$
5. Lantai Kantor (Lt. Dasar/P1)
  - a. Slab,  $t = 120 \text{ mm}$  :  $0.12 \times 2400 = 288 \text{ kg/m}^2$
  - b. *Finishing* :  $(4 \times 21) + (1 \times 24) = 108 \text{ kg/m}^2$
  - c. M/E =  $10 \text{ kg/m}^2$
  - d. Partisi/Hable =  $180 \text{ kg/m}^2$   
DL =  $586 \text{ kg/m}^2$
  - e. Beban Hidup LL =  $250 \text{ kg/m}^2$   
TL =  $836 \text{ kg/m}^2$

6. Lantai Kelas Kelompok Bermain, *Lobby Lift* (Lt. Dasar/P1)
- a. Slab,  $t = 250 \text{ mm}$  :  $0.25 \times 2400 = 600 \text{ kg/m}^2$
  - b. *Finishing* :  $(4 \times 21) + (1 \times 24) = 108 \text{ kg/m}^2$
  - c. Plafond + Penggantung :  $11 + 7 = 18 \text{ kg/m}^2$
  - d. M/E =  $10 \text{ kg/m}^2$
  - e. Partisi/Hable =  $180 \text{ kg/m}^2$
- DL =  $916 \text{ kg/m}^2$
- f. Beban Hidup LL =  $250 \text{ kg/m}^2$
  - TL =  $1166 \text{ kg/m}^2$
7. Kolam Renang (Lt. Lobby/10)
- a. Slab,  $t = 300 \text{ mm}$  :  $0.3 \times 2400 = 720 \text{ kg/m}^2$
  - b. *Finishing* :  $(4 \times 21) + (1 \times 24) = 108 \text{ kg/m}^2$
- DL =  $828 \text{ kg/m}^2$
- c. Beban Air ( $h = 1.2 \text{ m}$ ) LL =  $1200 \text{ kg/m}^2$
  - TL =  $2028 \text{ kg/m}^2$
8. Taman, Lapangan Golf Mini (Lt. Lobby/10)
- a. Slab,  $t = 300 \text{ mm}$  :  $0.3 \times 2400 = 720 \text{ kg/m}^2$
  - b. *Finishing* :  $(4 \times 21) + (1 \times 24) = 108 \text{ kg/m}^2$
- DL =  $828 \text{ kg/m}^2$
- c. Beban Air ( $h = 1.2 \text{ m}$ ) LL =  $1200 \text{ kg/m}^2$
  - TL =  $2028 \text{ kg/m}^2$
9. Lantai Café, Swalayan, Toko Obat, Salon, *Lobby Lift*, Toilet (Lt. Lobby/10)
- a. Slab,  $t = 250 \text{ mm}$  :  $0.25 \times 2400 = 600 \text{ kg/m}^2$
  - b. *Finishing* :  $(4 \times 21) + (1 \times 24) = 108 \text{ kg/m}^2$
  - c. Plafond + Penggantung :  $11 + 7 = 18 \text{ kg/m}^2$
  - d. M/E =  $10 \text{ kg/m}^2$
  - e. Partisi/Hable =  $180 \text{ kg/m}^2$
- DL =  $916 \text{ kg/m}^2$
- f. Beban Hidup LL =  $250 \text{ kg/m}^2$
  - TL =  $1166 \text{ kg/m}^2$

## 10. Lantai Fitness (Lt. 10/Fasilitas)

a. Slab, $t = 250 \text{ mm}$	: $0.25 \times 2400$	= $600 \text{ kg/m}^2$
b. <i>Finishing</i>	: $(4 \times 21) + (1 \times 24)$	= $108 \text{ kg/m}^2$
c. Plafond + Penggantung	: $11 \times 7$	= $18 \text{ kg/m}^2$
d. M/E		= $10 \text{ kg/m}^2$
e. Partisi/Hable		= $180 \text{ kg/m}^2$
		DL = $916 \text{ kg/m}^2$
f. Beban Hidup		LL = $400 \text{ kg/m}^2$
		TL = $1316 \text{ kg/m}^2$

## 11. Lantai Hunian/Tipikal (Lt. 11 s/d Lt. 45)

a. Slab, $t = 230 \text{ mm}$	: $0.23 \times 2400$	= $552 \text{ kg/m}^2$
b. <i>Finishing</i>	: $(4 \times 21) + (1 \times 24)$	= $108 \text{ kg/m}^2$
c. Partisi/Hable		= $180 \text{ kg/m}^2$
		DL = $840 \text{ kg/m}^2$
d. Beban Hidup		LL = $200 \text{ kg/m}^2$
		TL = $1040 \text{ kg/m}^2$

## 12. Atap/Dak Beton Hunian (Lt. Atap)

a. Slab, $t = 230 \text{ mm}$	: $0.23 \times 2400$	= $552 \text{ kg/m}^2$
b. <i>Waterproofing + Screed</i> , $t = 5 \text{ cm}$ : $5 \times 21$		= $105 \text{ kg/m}^2$
		DL = $657 \text{ kg/m}^2$
c. Beban Hidup		LL = $100 \text{ kg/m}^2$
		TL = $757 \text{ kg/m}^2$

## 13. Atap Hunian

a. Atap Genteng + Konstruksi Atap Baja		TL = $120 \text{ kg/m}^2$
--	--	---------------------------

14. Lantai *Roof Tank* (Lt. Atap)

a. Slab, $t = 350 \text{ mm}$	: $0.35 \times 2400$	= $840 \text{ kg/m}^2$
b. <i>Finishing</i>	: $(4 \times 21) + (1 \times 24)$	= $108 \text{ kg/m}^2$
		DL = $948 \text{ kg/m}^2$
c. Beban Hidup		LL = $1600 \text{ kg/m}^2$
		TL = $2548 \text{ kg/m}^2$

### 3.2.3 Data Properti Pondasi

Data properti pondasi meliputi data kekuatan elemen tiang dan rakit dan properti betonnya. Untuk dimensi dan konfigurasi pondasi justru akan dicari nilai teroptimumnya.

1. Mutu beton komponen rakit K500
2. Mutu beton komponen tiang K500
3. Ukuran maksimal tiang yang diperbolehkan adalah  $70 \times 70 \text{ cm}^2$
4. Angka Poisson untuk komponen rakit dan tiang adalah 0,2
5. Modulus elastisitas beton yang digunakan adalah 30 GPa

## 3.3 PENETAPAN TUJUAN DESAIN DAN BATAS-BATAS DESAIN

### 3.3.1 Tujuan Desain

Tujuan desain adalah untuk mencari desain pondasi tiang-rakit yang optimal untuk membantu mengurangi penurunan yang terjadi pada tanah akibat beban struktural yang diberikan. Desain optimal yang dimaksud merupakan konfigurasi tiang terbaik, ketebalan komponen rakit yang sanggup menyediakan batas keamanan yang cukup, serta kapasitas tiang yang dibutuhkan untuk mengoptimalkan volume material yang digunakan. Oleh karena itu, proses desain akan bersifat *trial and error* hingga diperoleh desain yang paling optimal. Adapun penurunan yang dimaksud adalah penurunan rata-rata bangunan serta perbedaan penurunan yang terjadi.

### 3.3.2 Batas-Batas Desain

Batas-batas desain mencakup besarnya batas keamanan yang harus dicapai serta penurunan dan deformasi komponen sistem pondasi yang diizinkan. Faktor keamanan minimal dari sistem adalah 2,5. Besarnya penurunan jangka pendek yang diizinkan terjadi adalah sebesar 15 cm. Sementara itu, besarnya perbedaan penurunan dibatasi maksimal hanya 10 cm. Adapun definisi dari perbedaan penurunan adalah selisih antara penurunan maksimum dan penurunan minimum yang terjadi tepat di bawah permukaan rakit. Di samping itu, besar deformasi maksimum arah lateral dari tiang tidak boleh melebihi  $L/240$ .

### 3.3.3 Variabel Optimalisasi Desain

Secara umum, hal-hal yang akan menjadi variabel optimalisasi desain adalah sebagai berikut:

1. Jumlah tiang untuk mencapai desain yang dianggap cukup ekonomis
2. Ukuran dan panjang tiang
3. Konfigurasi letak tiang
4. Spasi antar tiang akan disesuaikan dengan keperluan profil penurunan yang diizinkan
5. Persentase tahanan beban yang diberikan tiang dan persentase mobilisasi kapasitas tiang

### 3.4 DESAIN PRELIMINARI DENGAN METODE KONVENSIONAL POULOS

Desain preliminari ini lebih mengarah kepada penilaian feasibilitas penggunaan pondasi tiang-rakit dan jumlah tiang yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan desain yang telah ditetapkan. Hal yang paling pertama harus dilakukan adalah menetapkan konfigurasi dari tiang dan komponen rakit relatif terhadap denah.

#### 3.4.1 Estimasi Kapasitas Geoteknik Ultimat

Hal pertama yang harus dilakukan setelah seluruh data beban diperoleh adalah mengestimasi kapasitas sistem pondasi tiang-rakit terhadap beban-beban struktural tersebut. Apabila kapasitas yang dimiliki dibagi dengan beban yang sesungguhnya bekerja memiliki nilai kurang dari faktor keamanan yang telah ditetapkan, maka konfigurasi desain harus diganti. Oleh karena penelitian ini dibatasi pada kinerja pondasi tiang-rakit terhadap beban vertikal saja, maka yang perlu diketahui hanyalah kapasitas pondasi tiang-rakit terhadap beban vertikal.

Kapasitas sistem pondasi tiang-rakit terhadap beban vertikal dihitung dengan menjumlahkan kapasitas ultimat komponen rakit dengan total kapasitas semua tiang dalam sistem. Adapun nilai-nilai yang digunakan untuk menghitung daya dukung dari komponen rakit dan komponen tiang diperoleh dari korelasi yang dibuat oleh Decourt (1989). Korelasi tersebut dibuat dengan dasar nilai  $N_{SPT}$ .

## 1. Daya dukung ultimat komponen rakit

$$p_{ur} = K_1 N_r \text{ (kPa)} \quad (3.1)$$

di mana:

$p_{ur}$  = daya dukung ultimat komponen rakit

$N_r$  =  $N_{SPT}$  rata-rata sepanjang kedalaman 1,5 kali lebar komponen rakit

$K_1$  = faktor korelasi untuk komponen rakit (Tabel 3.8)

## 2. Daya dukung ultimat komponen tiang

## a. Tahanan friksi ultimat tiang

$$f_s = 2,8N_s + 10 \text{ (kPa)} \quad (3.2)$$

di mana:

$f_s$  = tahanan friksi ultimat tiang

$N_s$  =  $N_{SPT}$  rata-rata sepanjang tiang

## b. Tahanan ujung ultimat tiang

$$f_b = K_2 N_b \text{ (kPa)} \quad (3.3)$$

di mana:

$f_b$  = tahanan ujung ultimat tiang

$N_b$  =  $N_{SPT}$  di dekat ujung tiang

$K_2$  = faktor korelasi untuk komponen tiang (Tabel 3.8)

Tabel 3.8 Faktor Korelasi  $K_1$  dan  $K_2$  untuk Daya Dukung Ultimat

Jenis Tanah	$K_1$	$K_2$ (DP*)	$K_2$ (NDP**)
Pasir	90	325	165
Lanau berpasir	80	205	115
Lanau berlempung	80	165	100
Lempung	65	100	80

Catatan: \* Displacement Piles      \*\* Non-Displacement Piles

Sumber: *The Standard Penetration Test: State-of-the-Art Report* (Decourt, 1989)

### 3.4.2 Estimasi Perilaku Hubungan Beban-Penurunan dari Pondasi Tiang-Rakit

Pada dasarnya, ada dua bentuk analisis yang harus dilakukan untuk memperoleh hubungan antara beban dengan penurunan. Analisis pertama adalah

analisis non-linear yang digunakan untuk mengestimasi hubungan antara beban dengan penurunan primer (*immediate settlement*). Analisis kedua adalah analisis linear pada kondisi terdrainase dan tak terdrainase untuk memperoleh penurunan konsolidasi. Nilai penurunan konsolidasi kemudian dapat dijumlahkan dengan penurunan primer untuk memperoleh penurunan jangka panjang dari tanah. Berikut langkah-langkah yang akan dilakukan:

1. Perhitungan kekakuan komponen rakit ( $K_r$ )

Hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa dalam desain preliminari, nilai kekakuan komponen rakit akan diasumsikan sama untuk semua permukaan rakit. Perhitungan kekakuan komponen rakit didasarkan pada usulan yang dibuat oleh Richart, dkk. (1970).

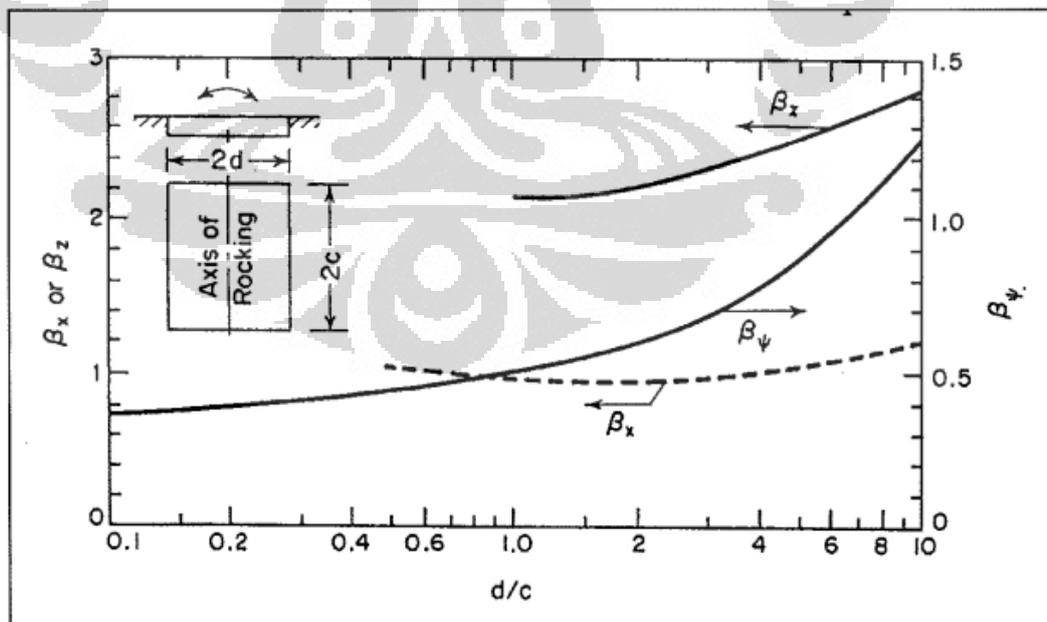
$$K_r = \frac{G_s}{(1 - \nu_s)} \beta_z \sqrt{4cd} \quad (3.4)$$

di mana:

$K_r$  = kekakuan komponen rakit

$G_s$  = modulus geser tanah rata-rata hingga kedalaman ujung tiang

$\beta_z$  = koefisien berdasarkan dimensi rakit,  $c$  dan  $d$  (Gambar 3.6)



Gambar 3.6 Koefisien  $\beta_x$ ,  $\beta_z$ , dan  $\beta_\psi$  untuk Pondasi Segiempat

Sumber: *Design of Piled Raft Foundation on Soft Ground* (Tan dan Chow, 2004)

2. Perhitungan kekakuan komponen tiang ( $K_p$ )

Kekakuan komponen tiang dapat dihitung dengan menggunakan solusi dari teori elastis yang dibuat oleh Randolph dan Wroth (1978) untuk menghitung besar penurunan yang terjadi pada kepala tiang untuk tiang tunggal yang memisahkan respons friksi dan ujung tiang terhadap beban.

$$K_p = \frac{P}{s} = G_L r_o \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu L) L}{\zeta \mu L r_o}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{\tanh(\mu L) L}{\mu L r_o}} \quad (3.5)$$

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right) = \ln\left(\frac{2,5\rho(1-\nu)L}{r_o}\right) \quad (3.6)$$

Persamaan 3.5 di atas mengandung beberapa koreksi, yaitu:

a. Koreksi untuk diameter tiang yang tidak seragam (*under-reamed pile*)

$$\eta = \frac{r_b}{r_o} \quad (3.7)$$

b. Koreksi untuk tiang *end-bearing* (tiang friksi  $\xi = 1$ )

$$\xi = \frac{G_L}{G_b} \quad (3.8)$$

c. Koreksi untuk heterogenitas modulus tanah

$$\rho = \frac{G_{avg}}{G_L} \quad (3.9)$$

d. Koreksi untuk rasio kekakuan tiang terhadap tanah

$$\lambda = \frac{E_p}{G_L} \quad (3.10)$$

e. Koreksi untuk kompresibilitas tiang

$$\mu L = \frac{L}{r_o} \sqrt{\frac{2}{\zeta\lambda}} \quad (3.11)$$

Besar kekakuan grup tiang adalah:

$$K_{p\text{-sys}} = K_p \sqrt{n_p} \quad (3.12)$$

di mana:

$K_p$  = kekakuan satu tiang tunggal

$K_{p\text{-sys}}$  = kekakuan grup tiang

$P$  = besar beban yang diaplikasikan pada rakit

$s$  = penurunan akibat beban yang diaplikasikan

$L$  = panjang tiang

$r_o$  = radius tiang

$G_L$  = modulus geser tanah pada kedalaman ujung tiang (sama dengan  $G_b$ )

$G_{\text{avg}}$  = modulus geser tanah rata-rata sepanjang tiang

$E_p$  = modulus Young tiang

$\nu$  = angka Poisson tanah

$n_p$  = jumlah tiang

3. Perhitungan kekakuan sistem pondasi tiang-rakit

Kekakuan sistem pondasi tiang-rakit dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2 yang terdapat pada Subbab 2.1.3.

4. Perhitungan pembagian proporsi beban antara komponen tiang dengan komponen rakit

Koefisien proporsi beban yang ditahan oleh komponen rakit dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3, 2.4, 2.6, dan 2.7 yang terdapat pada Subbab 2.1.3.

5. Perhitungan beban pada titik A di kurva tri-linear Poulos

Beban pada titik A (lihat Gambar 2.6), yaitu sebesar  $P_1$ , dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.5 yang terdapat pada Subbab 2.1.3.

6. Pembentukan kurva beban-penurunan tri-linear Poulos

a. Untuk  $P \leq P_1$

$$S = \frac{P}{K_{pr}} \quad (3.13)$$

di mana:

$P$  = beban vertikal yang bekerja

$S$  = penurunan yang terjadi

$K_{pr}$  = kekakuan aksial dari sistem pondasi tiang-rakit

b. Untuk  $P > P_1$

$$S = \frac{P_1}{K_{pr}} + \frac{P - P_1}{K_r} \quad (3.14)$$

di mana:

$P$  = beban vertikal yang bekerja

$S$  = penurunan yang terjadi

$K_{pr}$  = kekakuan aksial dari sistem pondasi tiang-rakit

$K_r$  = kekakuan aksial dari sistem komponen rakit

### 3.5 DESAIN DETAIL DENGAN PLAXIS VERSI 8.2

Berdasarkan bentuk dari *main tower* maupun podium bangunan apartemen Thamrin Executive Residence, maka desain pondasi tiang-rakit pada bangunan ini pun akan dimodelkan dalam bentuk *plane strain* dengan elemen 15 nodal meskipun akan tetap terdapat simplifikasi dari bentuk aslinya ke dalam bentuk pemodelan tersebut. Pada pemodelan *plane strain*, gaya-gaya yang termasuk ke dalam analisis merupakan gaya-gaya yang diekspresikan per unit lebar pada arah ke luar bidang (arah sumbu z). Dengan elemen 15 nodal, diharapkan analisis akan menjadi lebih mencerminkan kondisi asli di lapangan.

Adapun dasar pemodelan pertama dalam PLAXIS adalah hasil akhir yang diperoleh dari desain preliminari. Namun demikian, dalam desain detail ini juga akan tetap dicari konfigurasi tiang yang paling strategis dalam menahan penurunan yang terjadi. Apabila diperlukan, maka kedalaman tiang pun dapat ditambah.

#### 3.5.1 Pemodelan Tanah

Semua jenis tanah akan dimodelkan ke dalam model Mohr-Coulomb dan dianalisis dengan basis perilaku tak terdrainase. Perilaku tak terdrainase digunakan untuk menunjukkan adanya tekanan air pori berlebih. Semua tanah dimodelkan setelah geometri tanah dibuat dengan menggunakan *Geometry Line* yang membentuk sebuah ruang-ruang yang disebut sebagai *Cluster*. Dalam

kondisi tak terdrainase, seluruh *Cluster* akan didefinisikan berperilaku tak terdrainase, meskipun *Cluster* tersebut berada di atas level freatik. Parameter-parameter yang dimasukkan adalah parameter model efektif, yaitu  $E'$ ,  $\nu'$ ,  $c'$ , dan  $\phi'$ .

### 3.5.2 Pemodelan Komponen Rakit

Pada PLAXIS, komponen rakit pada desain akan dimodelkan dengan menggunakan pelat (*plate*). Adapun tipe material dari komponen ini adalah *elastoplastic*. Untuk memodelkan komponen rakit, harus dimasukkan beberapa parameter, yaitu:

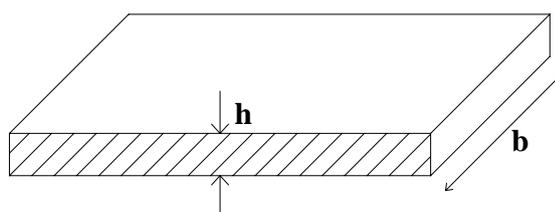
#### 1. Properti kekakuan

Properti kekakuan terkait dengan nilai kekakuan aksial ( $EA$ ) dan kekakuan fleksural ( $EI$ ). Pada pemodelan *plane strain*, nilai  $EA$  dan  $EI$  berkaitan dengan nilai kekakuan per satuan lebar pada arah di luar bidang (*out-of-plane*). Oleh karena itu, kekakuan aksial ( $EA$ ) diberikan dalam gaya per satuan lebar dan kekakuan fleksural ( $EI$ ) diberikan dalam gaya dikali panjang kuadrat per satuan lebar. Nilai tebal ekivalen pelat akan dihitung secara otomatis. Properti kekakuan akan dihitung sesuai dengan dimensi rakit yang diperoleh dari desain preliminari. Dalam pemodelan *plane-strain*, nilai  $b$  diperhitungkan sebagai 1 meter.

$$EI = E \frac{h^3 b}{12} \quad (3.15)$$

$$EA = E(h)(b) \quad (3.16)$$

$$d = h = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (3.17)$$



Gambar 3.7 Ilustrasi Pemodelan Kekakuan Material Pelat untuk Komponen Rakit

## 2. Angka Poisson

Angka Poisson yang digunakan adalah 0,2.

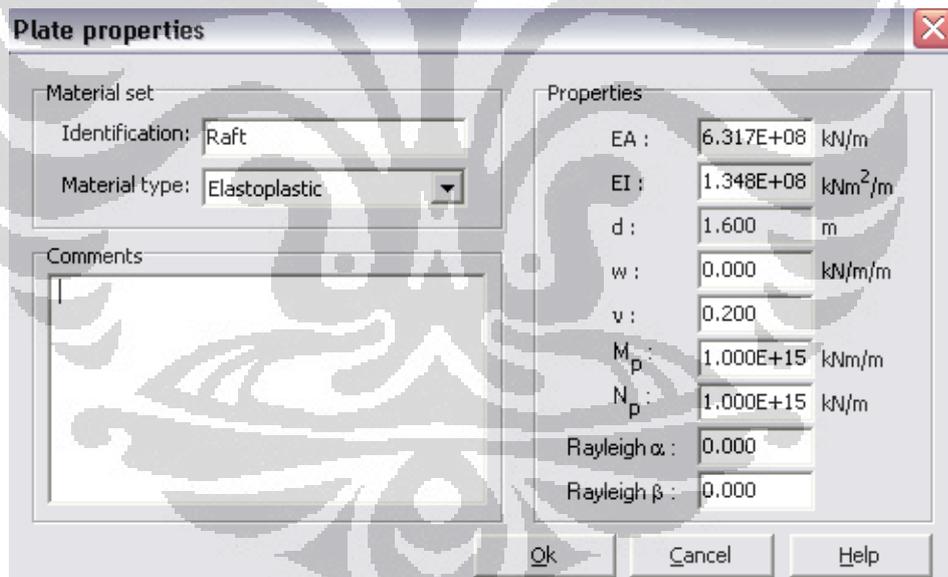
## 3. Berat

Berat pelat akan diberikan dalam gaya per satuan luas. Berat pelat akan dihitung sesuai dengan dimensi rakit yang diperoleh dari desain preliminari.

$$W_{\text{rakit}} = \gamma_{\text{beton}} (h) \quad (3.18)$$

## 4. Parameter kekuatan (plastisitas)

Parameter kekuatan ini dapat diperoleh dengan memasukkan nilai momen lentur maksimum ( $M_p$ ) yang diberikan dalam gaya dikali panjang per satuan lebar. Di samping itu, nilai gaya aksial ( $N_p$ ) juga harus dimasukkan yang diberikan dalam bentuk gaya per satuan lebar. Besar  $N_p$  yang digunakan adalah besar gaya aksial maksimum komponen rakit yang diperoleh dari hasil desain preliminari, yaitu sebesar  $P_{\text{up}}$ .



Gambar 3.8 Contoh Input Parameter Komponen Pelat

### 3.5.3 Pemodelan Komponen Tiang

Pada PLAXIS, komponen tiang pada desain akan dimodelkan dengan menggunakan pelat (*plate*). Adapun tipe material dari komponen ini adalah *elastoplastic*. Untuk memodelkan komponen tiang, harus dimasukkan beberapa parameter, yaitu:

### 1. Properti kekakuan

Properti kekakuan terkait dengan nilai kekakuan aksial ( $EA$ ) dan kekakuan fleksural ( $EI$ ). Pada pemodelan *plane strain*, nilai  $EA$  dan  $EI$  berkaitan dengan nilai kekakuan per satuan lebar pada arah di luar bidang (*out-of-plane*). Oleh karena itu, kekakuan aksial ( $EA$ ) diberikan dalam gaya per satuan lebar dan kekakuan fleksural ( $EI$ ) diberikan dalam gaya dikali panjang kuadrat per satuan lebar. Nilai tebal ekuivalen pelat akan dihitung secara otomatis. Properti kekakuan akan dihitung sesuai dengan dimensi rakit yang diperoleh dari desain preliminari. Namun demikian, dengan pemodelan pondasi tiang-rakit dalam bentuk 2 dimensi, maka diperlukan sebuah nilai yang menyatakan besar modulus Young ekuivalen dari seluruh tiang yang diwakili oleh tiang *plane strain* dalam pemodelan. Dengan menggunakan rumus modulus Young ekuivalen dalam bentuk *plane strain* yang dibuat oleh Prakoso dan Kulhawy (2001), maka:

$$E_{eq} = \frac{n_{p\text{-baris } i} A_p E_p}{L_r B} \quad (3.19)$$

di mana:

$E_{eq}$  = modulus Young ekuivalen tiang *plane-strain*

$n_{p\text{-baris } i}$  = jumlah tiang dalam baris ke- $i$

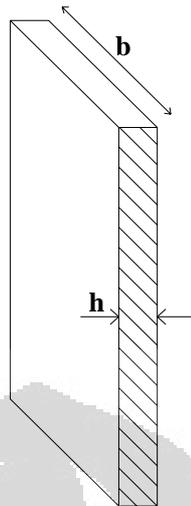
$A_p$  = luas permukaan tiang

$E_p$  = modulus Young tiang

$L_r$  = panjang komponen rakit

$B$  = lebar tiang

Dengan demikian, persamaan 3.15, 3.16, dan 3.17 tetap dapat digunakan untuk komponen tiang dengan mengganti  $E$  menjadi  $E_{eq}$ .



Gambar 3.9 Ilustrasi Pemodelan Kekakuan Material Pelat untuk Komponen Tiang

2. Angka Poisson

Angka Poisson yang digunakan adalah 0,2.

3. Berat

Berat tiang akan diberikan dalam gaya per satuan luas. Perlu diperhatikan bahwa saat memodelkan tiang, terjadi *overlap* antara berat tiang sendiri dengan berat tanah di sekitarnya. Hal ini dikarenakan pada pemodelan, tebal pelat ( $h$ ) yang merepresentasikan struktur tiang mendekati nol. Padahal dalam kenyataannya tidak demikian. Oleh karena itu, untuk menghitung berat tiang sebagai sebuah beban vertikal yang terdistribusi merata pada badan tiang, digunakan persamaan 3.20.

$$w_{\text{tiang}} = (\gamma_{\text{beton}} - \gamma_{\text{tanah}}) h_{\text{asli}} \quad (3.20)$$

Adapun friksi tiang akan dimodelkan dengan elemen *interface*. Friksi tiang akan merupakan bentuk ekuivalen dari semua friksi yang berada di luar bidang potongan (*out-of-plane*). Dengan menggunakan rumus friksi tiang ekuivalen dalam bentuk *plane strain* yang dibuat oleh Prakoso dan Kulhawy (2001), maka:

$$f_{s\text{-eq}} = \frac{n_{p\text{-barisi}} A_s f_s}{2L_r} \quad (3.21)$$

di mana:

$f_{s\text{-eq}}$  = friksi tiang ekivalen tiang *plane-strain*

$n_{p\text{-baris } i}$  = jumlah tiang dalam baris ke- $i$

$A_s$  = luas sisi tiang per satuan kedalaman

$f_s$  = friksi tiang per satuan kedalaman

$L_r$  = panjang komponen rakit

### 3.5.4 Pemodelan Pembebanan

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa data beban yang diperoleh pada penelitian ini merupakan hasil reaksi nodal sehingga merupakan beban terpusat yang berada dalam kondisi tidak terdistribusi merata. Dalam model *plane strain*, sebuah beban titik (terpusat) sebenarnya merupakan beban per unit lebar ke arah luar bidang. Oleh karena itu, beban yang disimulasikan ke dalam pemodelan akan disimplifikasi juga ke dalam bentuk *plane strain*. Adapun simplifikasi yang dilakukan akan mengikuti Persamaan 3.22 di bawah ini.

$$P_{\text{eq}} \text{ (kN/m)} = \frac{\sum P_{\text{baris } i}}{L_r} \quad (3.22)$$

### 3.5.5 Penetapan *Boundary Conditions*

*Boundary Conditions* yang digunakan merupakan *Standard Fixities* sehingga PLAXIS sendiri yang akan menetapkan kondisi batas agar perilaku pemodelan serealistis mungkin.

### 3.5.6 Penetapan *Initial Conditions*

Penetapan *Initial Conditions* melibatkan dua analisis, yaitu analisis *Initial Pore Pressures* dan analisis *Initial Pressures*. Untuk menganalisis tekanan air pori awal, harus ditetapkan terlebih dahulu kedalaman muka air tanah. Pada desain ini, muka air tanah berada pada kedalaman 5 meter dari permukaan tanah eksisting. Sementara itu, analisis tekanan tanah awal dilakukan secara otomatis oleh PLAXIS dengan menggunakan rumus Jaky di mana  $K_0$  bernilai sama dengan  $1 - \sin \phi$ .

### 3.5.7 Tahap Perhitungan

Jenis analisis yang dipilih adalah analisis plastis dengan input pembebanan *Staged Construction* di mana tahap pertama merupakan konstruksi tiang, tahap kedua merupakan konstruksi rakit, dan tahap ketiga merupakan pemberian beban struktural. Oleh karena itu, hasil deformasi yang diperoleh pada akhir perhitungan merupakan deformasi kumulatif dari semua tahap perhitungan.

### 3.5.8 Output

Output data adalah profil penurunan yang terjadi dari masing-masing model sistem pondasi tiang-rakit yang dibuat.

## 3.6 DISKUSI HASIL DESAIN PRELIMINARI DAN DESAIN DETAIL

Hasil desain preliminari dan desain detail kemudian akan dianalisis. Analisis yang akan dilakukan meliputi perbedaan hasil penurunan, gaya-gaya, momen, dan tegangan dalam tanah dan sistem pondasi tiang-rakit. Analisis juga akan mengambil kesimpulan tentang peranan dimensi dan konfigurasi yang telah dibuat terhadap kinerja pondasi tiang-rakit.

## **BAB 4**

### **PEMODELAN DAN ANALISIS**

#### **4.1 BASIS PEMODELAN**

Setiap pemodelan dibuat berdasarkan hasil reaksi yang telah diperoleh dari analisis struktural dengan menggunakan perangkat lunak ETABS Versi 9.2.0. Dengan demikian, konfigurasi tiang akan dibuat dengan mempertimbangkan posisi nodal-nodal reaksi beban struktural dan besar reaksi yang diberikan setiap nodal tersebut. Beban struktural yang diperhitungkan hanyalah beban vertikal dengan total sebesar 902,66 MN.

Seperti dapat terlihat pada diagram alir proses desain (Gambar 3.1), setelah parameter tanah diperoleh dan batasan-batasan desain telah ditetapkan, maka desain preliminari pun dapat mulai dilakukan. Hasil dari desain preliminari akan digunakan sebagai dasar untuk pemodelan dengan perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2. Dengan bantuan perangkat lunak ini, konfigurasi dan posisi tiang yang paling optimal akan dicari untuk memperoleh desain yang sesuai dengan batasan-batas desain yang telah ditetapkan.

#### **4.2 DESAIN PRELIMINARI**

Pada dasarnya, peranan dasar desain preliminari adalah untuk memperkirakan tebal komponen rakit dan jumlah tiang yang dibutuhkan agar syarat penurunan maksimum yang diperbolehkan dapat tercapai di dalam batas keamanan yang diizinkan. Di samping itu, tentu harus ditetapkan terlebih dahulu berapa dimensi dan ukuran tiang yang diinginkan. Seperti telah dijelaskan pada Bab 3, desain preliminari dilakukan dengan menggunakan metode konvensional Poulos. Adapun proses desain merupakan proses coba-coba (*trial and error*) sehingga memang diperlukan kepekaan dan justifikasi yang baik atas pengaruh berbagai dimensi dan aspek dari komponen pondasi terhadap kinerja sistem pondasi tersebut dalam menahan beban. Dengan demikian, melalui proses desain preliminari, pengaruh dari dimensi dan aspek komponen pondasi tersebut terhadap kinerja sistem pondasi juga dapat diketahui.

Pada bagian desain preliminari ini, telah dilakukan perhitungan terhadap beberapa konfigurasi sistem pondasi yang berbeda. Pengecekan kelayakan dari sebuah sistem pondasi yang dibuat didasarkan pertama kali pada kemampuan sistem pondasi untuk menahan beban statis vertikal. Apabila sistem pondasi telah mampu menahan beban statis vertikal tersebut dalam batas keamanan yang telah ditetapkan, yaitu memiliki faktor keamanan minimal sebesar 2,5, maka pengecekan kelayakan sistem pondasi selanjutnya didasarkan pada besarnya penurunan maksimum yang dihasilkan akibat beban statis vertikal aktual.

Perlu diingat bahwa besar penurunan yang dihasilkan pada desain preliminari merupakan besar penurunan maksimum atas asumsi bahwa lendutan maksimum dari komponen rakit terletak di daerah tengah komponen rakit. Hal ini pun mempengaruhi asumsi dasar perhitungan kekakuan komponen rakit dalam desain preliminari. Adapun nilai kekakuan komponen rakit yang digunakan dalam perhitungan merupakan sebuah nilai yang diperoleh dari teori elastis yang dibuat oleh Richart, dkk. (1970). Sementara itu, nilai kekakuan tiang yang digunakan dalam perhitungan diperoleh dari teori elastis untuk perhitungan penurunan pada kepala tiang tunggal yang dibuat oleh Randolph dan Wroth (1978) di mana pada teori ini telah diperhitungkan pemisahan antara respons kulit tiang dan ujung tiang. Adapun contoh detail perhitungan dapat dilihat pada bagian Lampiran 3.1.

Pemikiran utama yang harus selalu diperhatikan saat desain preliminari ini dibuat adalah bahwa kekakuan sistem tiang harus relatif lebih besar dari kekakuan komponen rakit. Apabila kekakuan sistem tiang lebih kecil dari kekakuan komponen rakit, maka tiang relatif tidak memiliki kontribusi dalam menahan beban. Hal inilah yang digambarkan melalui Persamaan 2.2 dan 2.4. Pada Persamaan 2.4, nilai  $a$  sebenarnya merupakan perbandingan antara besar beban yang ditahan oleh rakit terhadap besar beban yang ditahan oleh sistem tiang. Ketika kekakuan sistem tiang lebih kecil dibandingkan dengan kekakuan komponen rakit, maka  $a$  dapat bernilai negatif dan hasil perhitungan pun tidak akan valid. Dengan mengingat bahwa kekakuan grup tiang bergantung pada jumlah tiang (Persamaan 3.12), maka untuk sebuah pondasi tiang-rakit yang telah didefinisikan ukuran dan panjang tiang yang akan digunakan, dapat diketahui

jumlah tiang yang dibutuhkan. Apabila jumlah tiang yang dibutuhkan terlalu banyak, maka ukuran tiang dapat diperbesar atau pun tiang diperpanjang lagi.

Kelayakan sebuah desain preliminari juga dicek terhadap besar beban yang ditanggung oleh komponen tiang. Apabila besar beban yang ditanggung oleh komponen tiang melebihi kapasitas ultimat tiang, maka desain tersebut tidak dapat digunakan. Di samping itu, usaha untuk membuat desain tiang yang telah termobilisasi sekitar 70% juga ikut mempengaruhi pemilihan desain preliminari. Hal ini terkait dengan jenis pendekatan *Creep Piling* dari konsep desain pondasi tiang-rakit di mana jenis pendekatan ini dirasa dapat menghasilkan desain yang paling ekonomis. Akan tetapi, tentu penggunaan pendekatan ini juga disesuaikan dengan kondisi asli di lapangan dan batas-batas desain yang telah ditetapkan.

Konfigurasi awal yang ditetapkan adalah sistem pondasi tiang-rakit dengan tebal rakit 1,6 meter dan 100 buah tiang berukuran  $45 \times 45 \text{ cm}^2$  dengan panjang 18 meter. Selanjutnya, dibuat beberapa set desain preliminari di mana masing-masing set desain tersebut berisi sebuah variabel yang divariasikan dari konfigurasi awal di mana rakit setebal 1,6 meter digunakan pada semua set desain preliminari. Variabel-variabel yang divariasikan adalah ukuran tiang, panjang tiang, dan jumlah tiang dalam sebuah konfigurasi sistem pondasi. Perbedaan kinerja sistem pondasi akibat perbedaan variabel inilah yang akan dianalisis selanjutnya.

#### **4.2.1 Set Desain Preliminari 1: Pengaruh Ukuran Tiang terhadap Kinerja Pondasi**

Dalam set Desain Preliminari 1, analisis dilakukan terhadap kinerja pondasi akibat ukuran tiang yang berbeda-beda. Sistem pondasi memiliki tebal komponen rakit yang sama, yaitu sebesar 1,6 meter. Sementara itu, tiang yang digunakan berjumlah 100 buah dengan panjang tiang sebesar 18 meter. Hasil analisis yang diperoleh dari set Desain Preliminari 1 ini kemudian akan digunakan sebagai tambahan justifikasi mengenai desain preliminari final yang terbaik.

Secara umum, ukuran tiang akan mempengaruhi rasio  $B_g/B_r$  dari sistem pondasi. Akan tetapi, oleh karena jumlah tiang tidak diubah, maka perubahan rasio  $B_g/B_r$  akibat ukuran tiang yang berbeda pun tidak memiliki nilai yang

signifikan. Ukuran tiang justru paling mempengaruhi nilai kekakuan tiang tersebut. Seperti terlihat pada Tabel 4.1, kekakuan sistem tiang meningkat cukup signifikan seiring dengan membesarnya ukuran tiang. Saat kekakuan sistem tiang meningkat, maka kekakuan sistem pondasi tiang-rakit pun ikut meningkat.

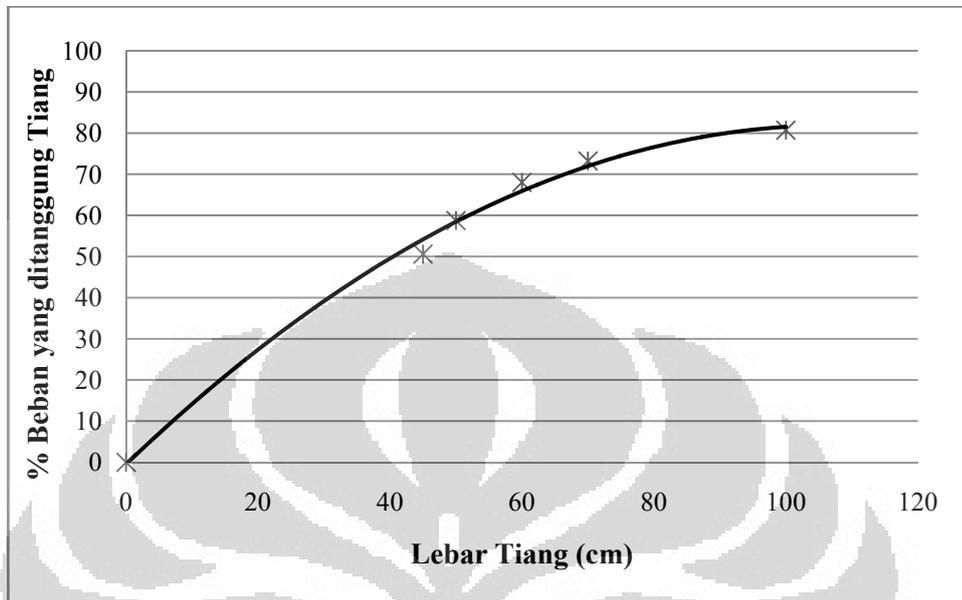
Tabel 4.1 Rekapitulasi Hasil Analisis dengan Variasi Ukuran Tiang

Variasi	1	2	3	4	5
Ukuran tiang (cm <sup>2</sup> )	45x45	50x50	60x60	70x70	100x100
Bg/Br	0,543	0,544	0,546	0,547	0,552
Kapasitas tekan rakit (MN)	4037,5				
Kapasitas tekan tiang (MN)	2,56	2,92	3,68	4,50	7,32
FS <sub>vertikal</sub>	4,61	4,63	4,68	4,72	4,88
K <sub>rakit</sub> (MN/m)	3250				
K <sub>sistem tiang</sub> (MN/m)	3266	3525	3983	4377	5321
K <sub>pondasi</sub> (MN/m)	3624	3842	4255	4625	5534

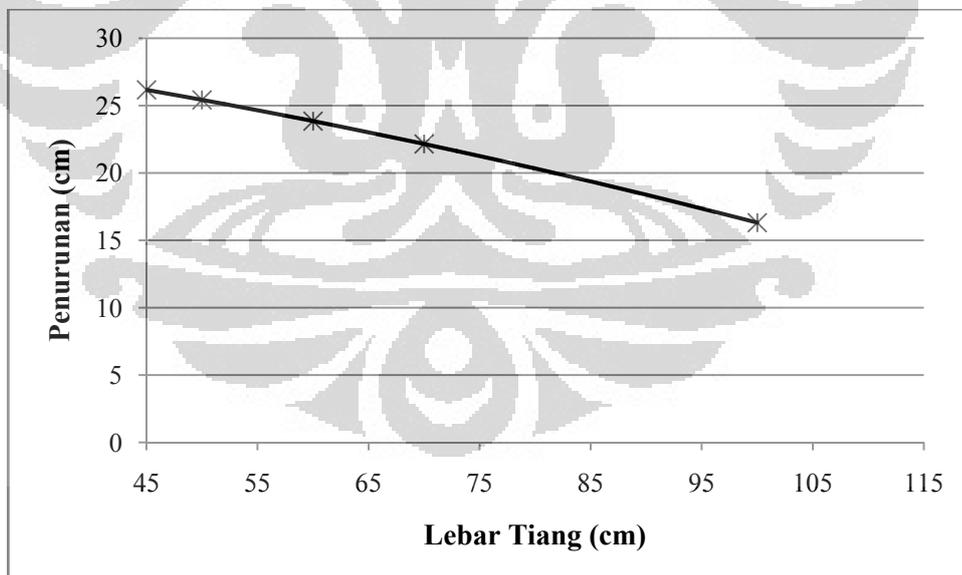
Pada dasarnya, panjang tiang juga akan mempengaruhi kekakuan rakit. Saat tiang semakin panjang, maka kedalaman yang turut diperhitungkan dalam mencari besar modulus geser rata-rata dari lapisan yang mempengaruhi kekakuan rakit juga akan semakin besar. Hal ini tentu akan merubah kekakuan rakit meskipun dengan nilai yang tidak terlalu signifikan. Namun demikian, pada set Desain Preliminari 1 ini, panjang tiang tidak diubah sehingga nilai kekakuan rakit tetap sama untuk semua variasi yang ada.

Dengan demikian, dapat terlihat bahwa kekakuan pondasi mempengaruhi bagaimana kinerja pondasi dalam menahan beban. Semakin besar nilai kekakuan (K), maka semakin besar pula beban yang sanggup ditahan oleh pondasi di dalam batas penurunan dan deformasi yang diizinkan. Perlu diingat bahwa dalam analisis pondasi tiang-rakit, proporsi beban yang ditanggung oleh masing-masing komponen pondasi direpresentasikan melalui perbandingan kekakuan komponen dalam sistem pondasi. Hal ini berarti bahwa tiang memiliki kontribusi yang lebih besar dalam menahan beban dan menanggulangi penurunan ketika ukurannya semakin besar. Gambar 4.1 menunjukkan bagaimana ukuran tiang mempengaruhi persentase beban yang ditanggung baik oleh sistem tiang. Semakin besar ukuran tiang, maka persentase beban yang ditanggung oleh tiang menjadi semakin besar

pula. Saat persentase beban yang ditanggung oleh tiang semakin besar, maka proporsi beban yang ditanggung oleh komponen rakit pun pasti akan mengecil.



Gambar 4.1 Pengaruh Ukuran Tiang terhadap Pembagian Kontribusi Tahanan Beban pada Pondasi Tiang-Rakit



Gambar 4.2 Pengaruh Ukuran Tiang terhadap Penurunan

Seperti telah dipaparkan pada tinjauan literatur, tiang pada pondasi tiang-rakit lebih berperan sebagai tiang friksi karena ujung tiang memang biasanya tidak menyentuh hingga lapisan tanah keras. Dengan demikian, besar tahanan

friksi dari tiang akan lebih berperan dalam mengurangi penurunan dibandingkan dengan tahanan ujungnya. Adapun besar tahanan friksi yang disediakan tiang sangat dipengaruhi oleh luasan permukaan tiang yang terkena kontak dengan lapisan tanah. Hal ini tergambarkan secara matematis oleh Persamaan 4.1. Saat ukuran tiang membesar, keliling tiang akan membesar sehingga tahanan friksi yang dihasilkan pun akan meningkat. Oleh karena itu, seperti terlihat pada Gambar 4.2, besar penurunan rata-rata yang terjadi menjadi semakin kecil seiring dengan bertambah besarnya ukuran tiang. Hasil yang relatif sama juga ditemukan pada studi parameter yang dilakukan oleh Thaher dan Jessberger (1991) serta Prakoso dan Kulhawy (2001).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n f_{s_i} A_{s_i} = \sum_{i=1}^n f_{s_i} (\text{keliling} \times \text{tebal lapisan})_i \quad (4.1)$$

Di samping itu, dengan membesarnya ukuran tiang, maka sebenarnya tahanan ujung tiang juga mengalami peningkatan meskipun tidak terlalu signifikan apabila dibandingkan dengan kenaikan tahanan friksinya. Peningkatan dari tahanan friksi dan tahanan ujung tiang ini akan mengakibatkan peningkatan pada kapasitas tekan tiang. Dengan demikian, faktor keamanan terhadap beban vertikal dari sistem pondasi pun juga akan meningkat ketika ukuran tiang lebih besar. Akan tetapi, peningkatan faktor keamanan ini tidak terlalu signifikan mengingat komponen rakit memberikan kapasitas ultimat tertinggi.

Tabel 4.2 Proporsi Beban yang ditanggung Tiang – Set Desain Preliminari 1

Ukuran Tiang	45x45	50x50	60x60	70x70	100x100
Kapasitas total sistem tiang (MN)	255,84	291,69	367,85	449,95	731,88
Beban yang ditanggung tiang (MN)	456,94	530,21	614,04	660,93	728,61
Keterangan	x	x	x	x	√
Tingkat mobilisasi kapasitas tiang	100%	100%	100%	100%	99,55%

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, diperoleh hasil bahwa pada set Desain Preliminari 1 ini tidak diperoleh sebuah konfigurasi sistem pondasi yang dapat memenuhi syarat besar penurunan maksimum, yaitu sebesar 15 cm. Bahkan, pada tiang berukuran 100x100 cm<sup>2</sup> pun, penurunan yang terjadi masih lebih besar dari 15 cm. Di samping itu, persentase beban yang ditanggung oleh sistem tiang

ternyata telah melebihi kapasitas ultimat sistem tiang, kecuali pada tiang berukuran  $100 \times 100 \text{ cm}^2$  (Tabel 4.2). Apabila ukuran tiang diperbesar kembali, desain dinilai tidak efisien karena dimensi tiang akan menjadi terlalu besar. Untuk itu, dilakukan analisis terhadap variabel lain untuk memperoleh desain preliminari yang lebih efisien.

#### 4.2.2 Set Desain Preliminari 2: Pengaruh Panjang Tiang terhadap Kinerja Pondasi

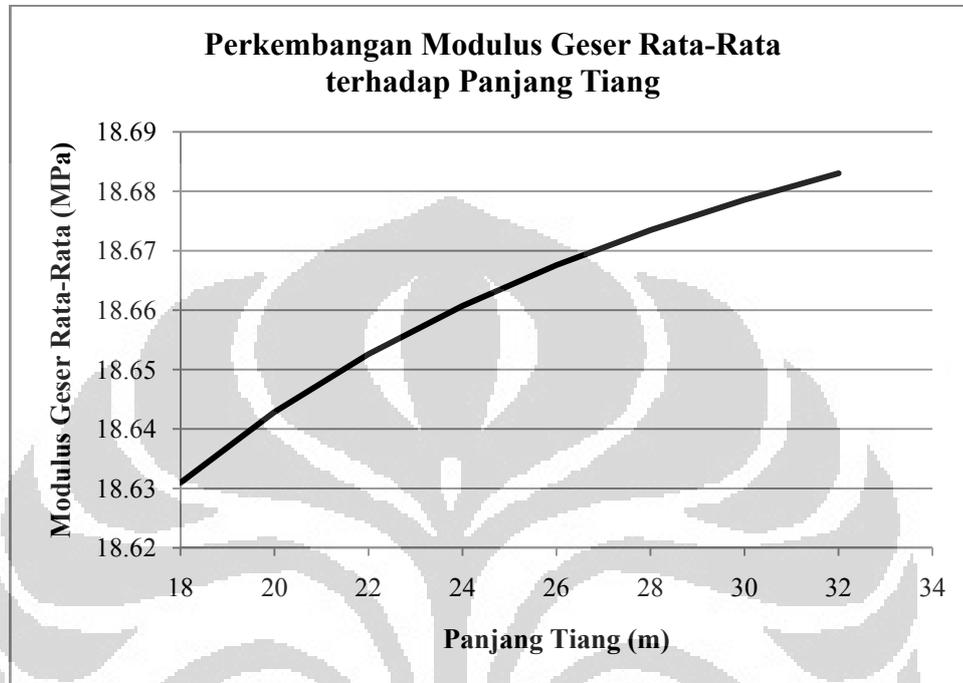
Dalam set Desain Preliminari 2, analisis dilakukan terhadap kinerja pondasi akibat panjang tiang yang berbeda-beda. Sistem pondasi memiliki tebal komponen rakit yang sama, yaitu sebesar 1,6 meter. Sementara itu, tiang yang digunakan berjumlah 100 buah dengan ukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$ . Ukuran tiang ini diambil karena diharapkan tiang dapat memiliki kapasitas tiang yang cukup sementara tetap ekonomis.

Tabel 4.3 Rekapitulasi Hasil Analisis dengan Variasi Panjang Tiang

Variasi	1	2	3	4	5	6
Panjang tiang (m)	18	20	24	28	30	32
Bg/Br	0,546	0,546	0,546	0,546	0,546	0,546
Kapasitas tekan rakit (MN)	4037,5					
Kapasitas tekan tiang (MN)	4,50	4,92	5,60	6,27	6,61	6,95
$FS_{\text{vertikal}}$	4,72	4,75	4,78	4,82	4,84	4,86
$K_{\text{rakit}}$ (MN/m)	3250	3252	3255	3257	3258	3259
$K_{\text{sistem tiang}}$ (MN/m)	4377	4563	4862	5081	5166	5237
$K_{\text{pondasi}}$ (MN/m)	4625	4802	5090	5302	5385	5454

Seperti telah disebutkan pada Subbab 4.2.1, panjang tiang akan mempengaruhi kekakuan rakit dan tiang. Panjang tiang mempengaruhi kedalaman yang ikut diperhitungkan dalam mencari nilai rata-rata modulus geser tanah yang akan digunakan dalam perhitungan kekakuan. Dari Tabel 4.3, dapat terlihat bahwa nilai kekakuan rakit justru meningkat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya modulus geser rata-rata dari lapisan tanah. Perlu diingat bahwa nilai modulus geser tanah dalam tiap lapisan dianggap memiliki sebuah nilai yang konstan. Adapun ujung tiang dari ketiga variasi di atas tetap berada pada satu lapisan yang

sama, yaitu lapisan tanah ke-4, sehingga nilai modulus geser rata-rata dalam hal ini cenderung menjadi lebih besar seiring dengan bertambahnya kedalaman (Gambar 4.3).

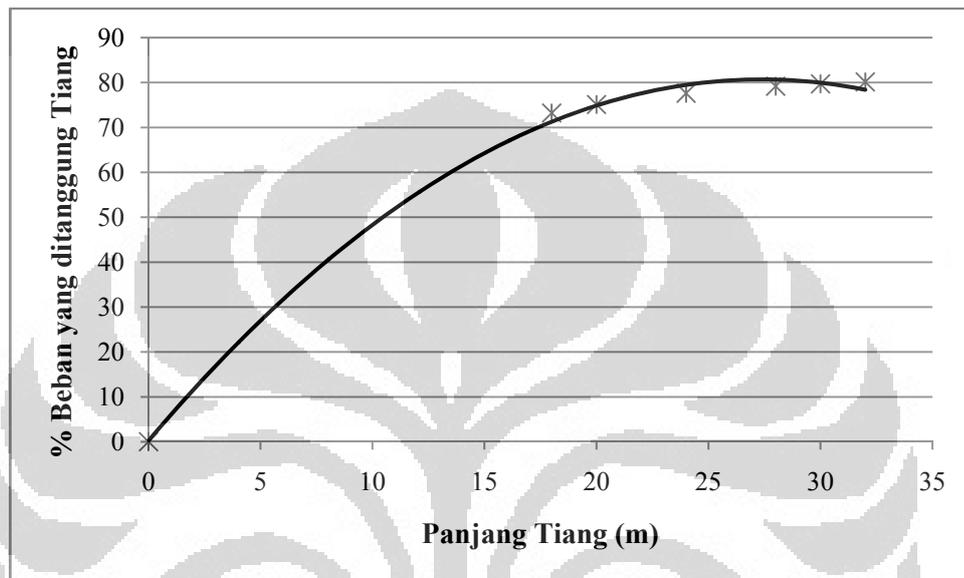


Gambar 4.3 Perkembangan Modulus Geser Rata-Rata Tanah terhadap Panjang Tiang

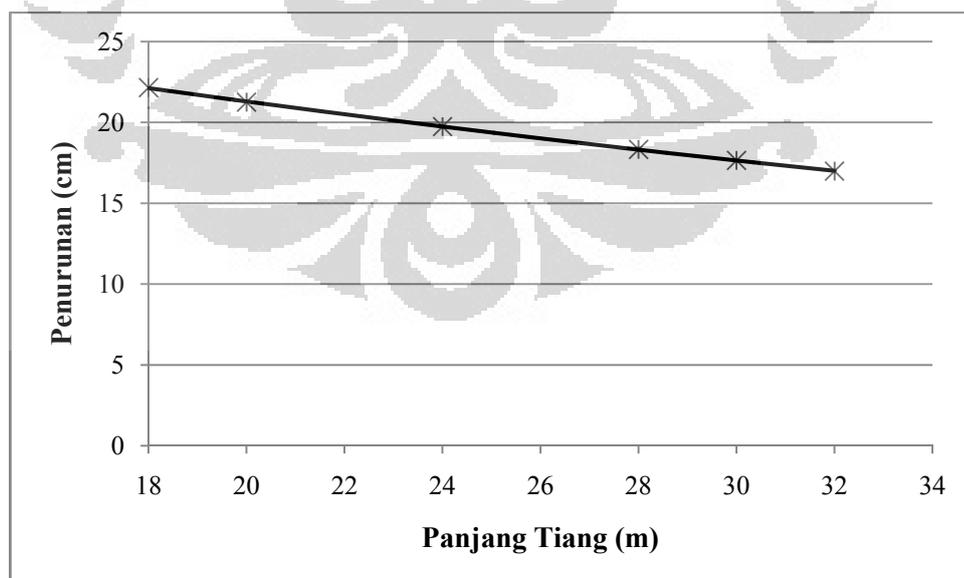
Sementara itu, kekakuan sistem tiang juga meningkat seiring dengan pertambahan panjang tiang. Seiring dengan pertambahan panjang tiang, tahanan friksi dari tiang tentu juga akan meningkat. Hal ini kembali dapat dijelaskan oleh Persamaan 4.1. Selain ikut meningkatkan faktor keamanan sistem terhadap beban vertikal, peningkatan friksi tentu memberi peluang untuk membuat desain di mana persentase beban yang ditanggung tiang bernilai lebih kecil atau sama dengan kapasitas ultimat sistem tiang tersebut. Namun demikian, seperti terlihat pada Gambar 4.4, persentase beban yang ditanggung tiang pun akan meningkat seiring dengan pertambahan panjang tiang.

Dari Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa besar penurunan maksimum yang terjadi mengalami penurunan seiring dengan bertambah panjangnya tiang. Hal ini masuk akal mengingat kekakuan pondasi tiang-rakit yang juga semakin besar saat tiang semakin panjang. Adapun hal serupa juga ditemukan dalam penelitian yang

dilakukan oleh Thaher dan Jessberger (1991). Namun demikian, oleh karena panjang tiang yang diteliti hanya berkisar mulai dari 18 meter hingga 32 meter, maka hasil yang terlihat cenderung bersifat linear. Apabila variabel panjang tiang ini diperbanyak, maka kemungkinan garis pada Gambar 4.5 akan cenderung bersifat polinomial.



Gambar 4.4 Pengaruh Panjang Tiang terhadap Pembagian Kontribusi Tahanan Beban pada Pondasi Tiang-Rakit



Gambar 4.5 Pengaruh Panjang Tiang terhadap Penurunan

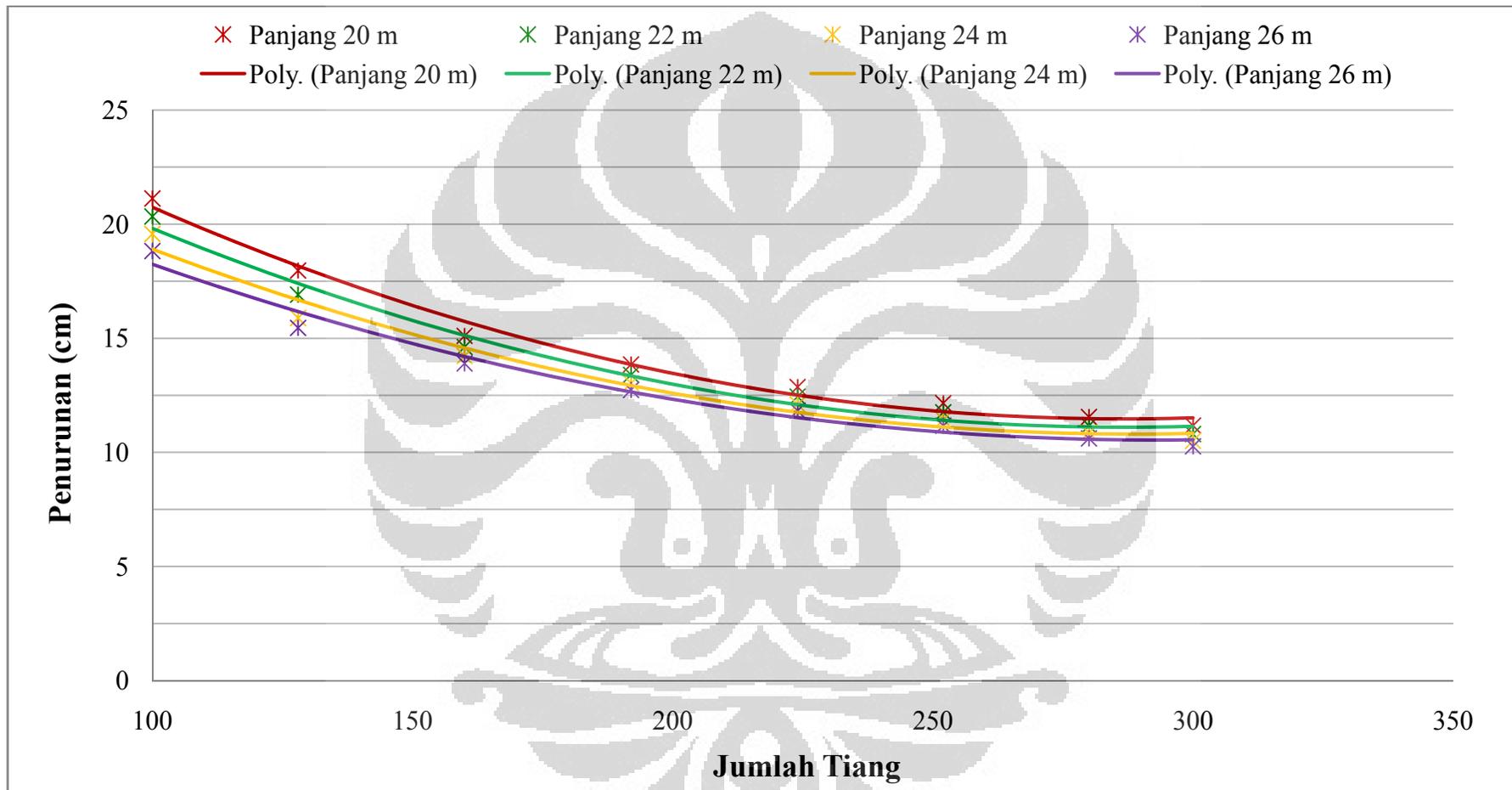
Tabel 4.4 Proporsi Beban yang ditanggung Tiang – Set Desain Preliminari 2

Panjang Tiang (m)	20	24	28	30	32
Kapasitas total sistem tiang (MN)	491,86	559,50	627,15	660,98	694,80
Beban yang ditanggung tiang (MN)	677,89	700,66	714,57	719,47	723,39
Keterangan	x	x	x	x	x
Tingkat mobilisasi kapasitas tiang	100%	100%	100%	100%	100%

Meskipun demikian, sistem pondasi dengan tiang berukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$  sejumlah 100 buah tidak dapat mencukupi syarat penurunan maksimum yang diizinkan bahkan hingga tiang mencapai panjang 32 meter. Tahanan friksi yang disediakan oleh sistem pondasi belum dapat menahan penurunan hingga batas yang diizinkan. Di samping itu, seperti terlihat pada Tabel 4.4, beban yang ditanggung tiang masih lebih besar dibandingkan dengan kapasitas total sistem tiang. Apabila tiang terus diperpanjang, memang ada kemungkinan penurunan akan berada dalam batas yang diizinkan sementara kapasitas total sistem tiang pun meningkat. Akan tetapi, tiang akan menjadi sangat langsing dan penambahan panjang lebih dari 32 meter akan tidak efisien. Dari pemaparan ini, dapat disimpulkan bahwa jumlah tiang masih sangat kurang untuk menahan beban vertikal yang ada. Oleh karena itu, selanjutnya akan dilihat seberapa besar pengaruh jumlah tiang terhadap kinerja pondasi.

#### 4.2.3 Set Desain Preliminari 3: Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Kinerja Pondasi

Dalam set Desain Preliminari 3 ini, analisis dilakukan terhadap kinerja pondasi akibat jumlah tiang yang berbeda-beda. Sistem pondasi memiliki tebal komponen rakit yang sama, yaitu sebesar 1,6 meter. Sementara itu, tiang yang digunakan adalah tiang dengan ukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$ . Untuk memperoleh desain yang optimal, maka dilakukan perbandingan desain preliminari dengan jumlah tiang yang berbeda-beda untuk beberapa panjang tiang. Set Desain Preliminari 3 ini dilakukan untuk sistem tiang dengan panjang 20 meter, 22 meter, 24 meter, dan 26 meter di mana pada masing-masing panjang tiang tersebut, jumlah tiang divariasikan.

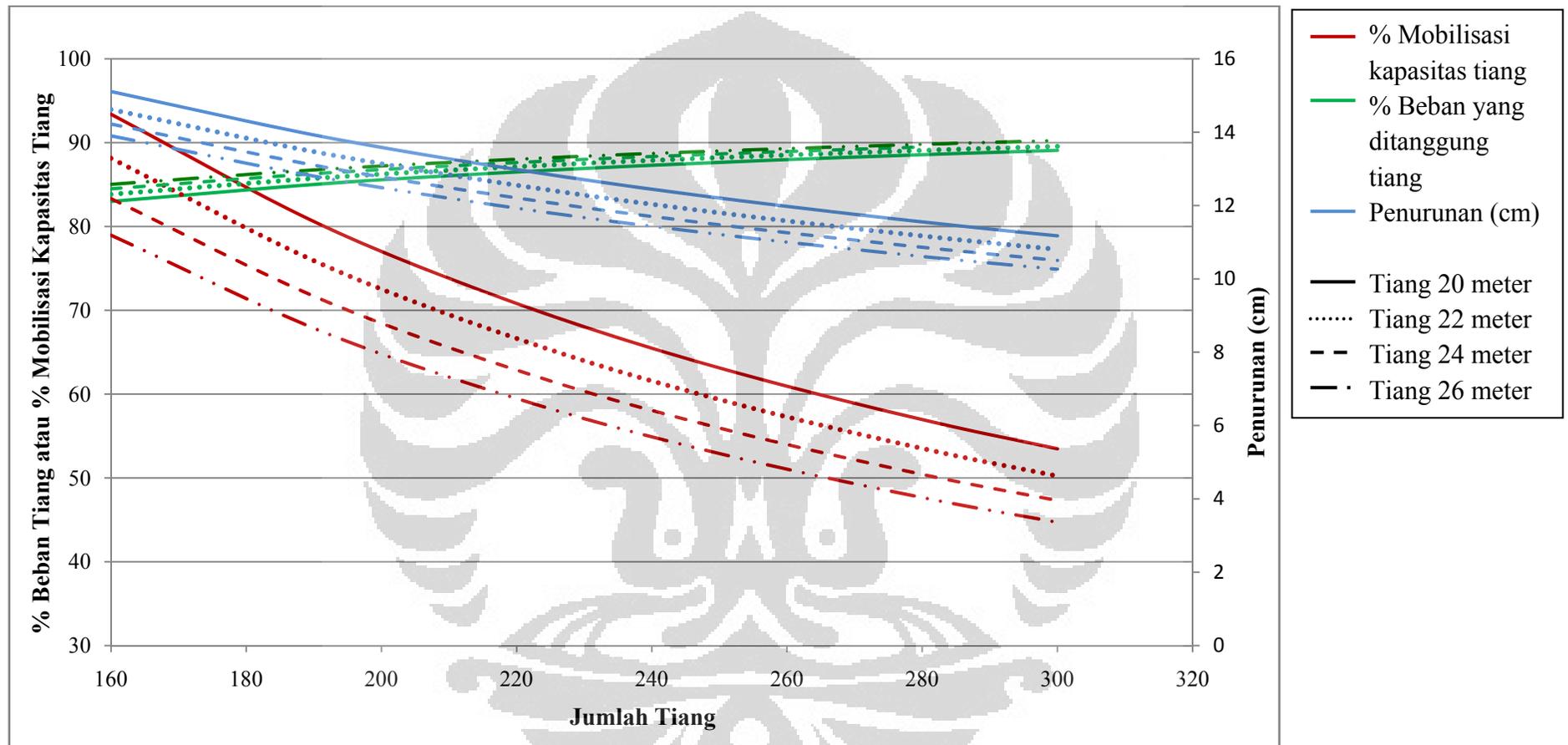


Gambar 4.6 Pengaruh Jumlah Tiang terhadap Penurunan

Pada dasarnya, dengan meningkatnya jumlah tiang, maka faktor pengali untuk efisiensi kekakuan grup tiang pun semakin besar (Persamaan 3.12). Dengan demikian, nilai kekakuan pondasi tiang-rakit pun akan semakin besar. Sama seperti pemaparan pada Subbab 4.2.1 dan 4.2.2, ketika kekakuan pondasi tiang-rakit semakin besar, maka tahanan terhadap beban pun tentu akan meningkat. Ini dikarenakan kapasitas ultimat dari grup tiang juga meningkat. Di samping itu, persentase tahanan beban yang diberikan oleh sistem tiang pun akan bertambah seiring dengan jumlah tiang yang semakin banyak.

Pada lain pihak, ketika kekakuan pondasi tiang-rakit meningkat, maka besar penurunan yang terjadi pun akan mengecil. Perilaku ini terjadi untuk semua panjang tiang yang dianalisis (Gambar 4.6). Hal serupa juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan oleh Thaher dan Jessberger (1991). Namun demikian, apabila diperhatikan, besar reduksi penurunan terjadi secara signifikan hanya hingga jumlah tiang mencapai 220 buah untuk semua panjang tiang yang dianalisis. Ketika jumlah tiang lebih banyak dari 220 buah, besar reduksi penurunan tidak terlalu signifikan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada suatu titik tertentu, tiang yang diperbanyak tidak akan terlalu berguna dalam mereduksi penurunan yang terjadi. Kemungkinan besar jauh lebih efektif untuk memperpanjang tiang dibandingkan menambah jumlah tiang di atas jumlah 220 buah. Kesimpulan serupa juga dibuat oleh Chow (2007).

Untuk semua panjang tiang yang dianalisis, besar penurunan maksimum berada dalam batas yang diizinkan ketika jumlah tiang lebih dari 160 buah. Akan tetapi, tentu perlu kembali dilihat apakah persentase beban yang ditanggung oleh tiang berada dalam kapasitas ultimat sistem tiang atau tidak. Apabila tidak, tentu konfigurasi tidak dapat digunakan sebagai desain. Di samping itu, persentase mobilisasi kapasitas sistem tiang dan besar beban yang harus ditanggung tiang juga harus diperhatikan. Dengan demikian, ada tiga hal yang akan menjadi dasar pertimbangan pemilihan konfigurasi yang menghasilkan desain paling optimum, yaitu besar penurunan yang dihasilkan, besar beban yang ditanggung oleh tiang, dan persentase mobilisasi kapasitas sistem tiang pada saat beban aktual bekerja.



Gambar 4.7 Perbandingan Persentase Beban yang ditanggung Tiang, Persentase Mobilisasi Kapasitas Tiang, dan Penurunan untuk Jumlah Tiang yang Berbeda

Berdasarkan Gambar 4.7, dapat diketahui bahwa persentase mobilisasi kapasitas tiang menurun dengan signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah tiang dan panjang tiang. Sebaliknya, persentase beban yang ditanggung oleh tiang justru meningkat meskipun dalam laju yang tidak signifikan. Sementara itu, penurunan yang terjadi pun sudah pasti memiliki trend yang menurun. Gambar 4.7 ini dapat digunakan sebagai alat bantu untuk menetapkan desain preliminari final yang akan dimodelkan nantinya.

#### 4.2.4 Hasil Desain Preliminari

Berdasarkan hasil analisis dari seluruh set desain preliminari yang telah dibuat, dapat diketahui beberapa poin penting. Poin utama terletak pada bagaimana kontribusi tiang dalam menahan beban. Sistem tiang memang tidak terlalu signifikan dalam meningkatkan faktor keamanan terhadap beban vertikal. Hal ini disebabkan oleh lebih besarnya kapasitas rakit dalam menahan beban vertikal dibandingkan kapasitas sistem tiang. Akan tetapi, keberadaan tiang jelas meningkatkan kapasitas total dari sistem pondasi.

Di samping itu, dapat disimpulkan bahwa semakin besar ukuran, panjang, dan jumlah tiang, maka proporsi beban yang ditahan oleh sistem tiang akan semakin besar pula. Saat persentase beban yang ditahan oleh tiang semakin besar, maka penurunan rata-rata yang terjadi pada sistem pondasi akan diperkecil akibat friksi yang bekerja pada tiang. Dengan demikian, tahanan friksi memegang peranan penting dalam kinerja pondasi tiang-rakit di mana tiang berfungsi untuk mengontrol penurunan maksimum yang terjadi.

Akan tetapi, ketika persentase beban yang ditahan oleh tiang semakin besar, maka desain akan kembali mengarah kepada desain konservatif grup tiang semata di mana komponen rakit dianggap tidak memiliki kontribusi sama sekali dalam menahan beban yang bekerja. Oleh karena itu, besar persentase beban yang ditanggung tiang tentu menjadi sebuah faktor pertimbangan yang penting dalam membuat desain pondasi tiang-rakit. Merujuk kepada tiga buah filosofi desain yang diusulkan oleh Randolph (1994), maka penetapan dari filosofi desain tersebut menjadi sangat penting untuk diaplikasikan.

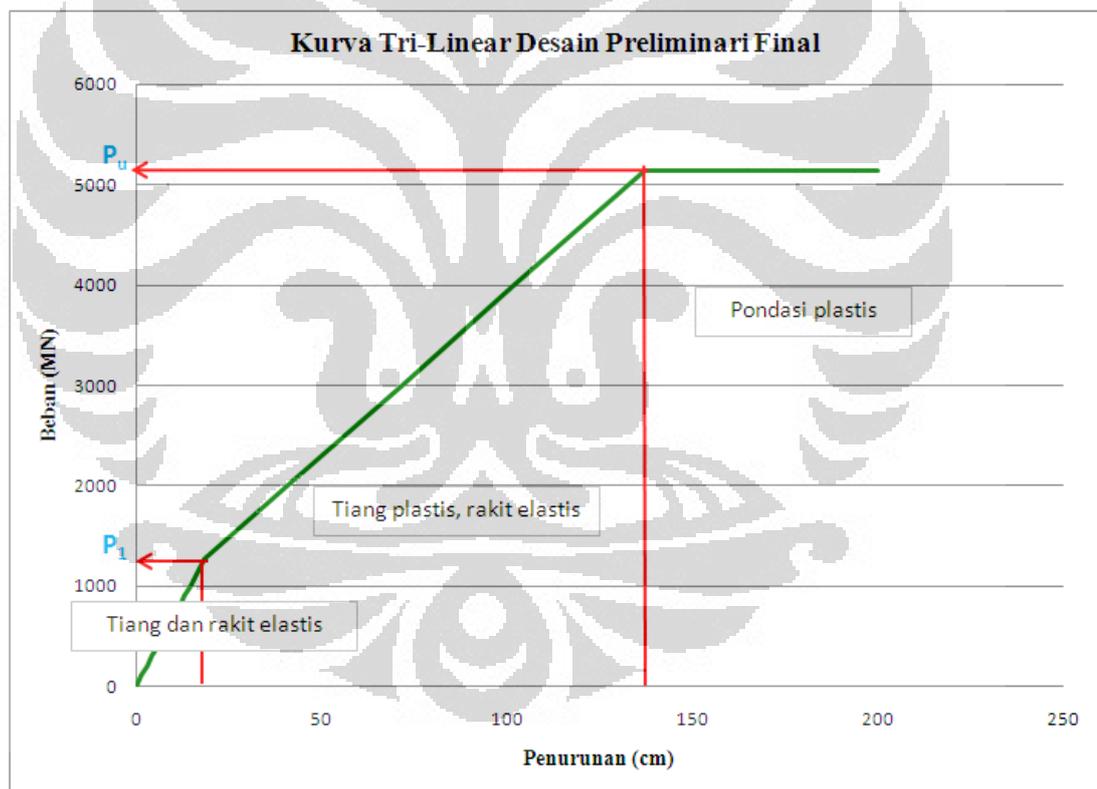
Dari ketiga filosofi desain yang ada, filosofi yang dinilai paling ekonomis adalah filosofi *Creep Piling* di mana beban yang ditanggung oleh tiang berkisar antara 70-80% dari kapasitas ultimat sistem tiang. Rentang tersebut pun dapat digunakan untuk memilih konfigurasi mana yang lebih ekonomis. Akan tetapi, Horikoshi dan Randolph (1996) memberikan catatan bahwa apabila desain yang dipilih membuat kapasitas tiang termobilisasi lebih dari 80% akibat beban yang ditanggungnya, maka perbedaan penurunan yang besar akan terjadi. Sementara itu, besar persentase mobilisasi kapasitas tiang yang semakin kecil akan membuat kontribusi tiang menjadi semakin besar dalam menahan beban sehingga hal ini perlu dihindari agar rakit tetap memiliki kontribusi dalam menahan beban. Hal ini pun membawa kepada pemahaman filosofi desain dengan pendekatan konvensional di mana tiang akan tetap menahan beban terbesar, meskipun kontribusi rakit dalam menahan beban tetap diperhitungkan.

Dengan demikian, terlihat bahwa pendekatan konvensional memang lebih kuat diaplikasikan dalam penelitian ini. Seperti terlihat pada Gambar 4.7, penurunan maksimum baru berada dalam rentang yang diizinkan ketika persentase beban yang ditanggung oleh tiang lebih besar dari 84%. Oleh karena batas penurunan yang ditetapkan merupakan nilai maksimum, maka semua konfigurasi pada Gambar 4.7 sebenarnya dapat diaplikasikan. Akan tetapi, pilihan konfigurasi dengan persentase beban yang ditanggung tiang yang mendekati angka 100% pun bukanlah pilihan yang baik. Dengan demikian, perlu digunakan faktor pertimbangan lain, yaitu besar persentase mobilisasi kapasitas sistem tiang. Adapun konfigurasi yang dipilih adalah konfigurasi dengan persentase mobilisasi kapasitas sistem tiang berada dalam rentang 70-80% sehingga diharapkan desain juga dapat tetap cukup ekonomis.

Berdasarkan seluruh pertimbangan tersebut, maka dipilih konfigurasi pondasi tiang-rakit untuk desain preliminari final di mana ketebalan rakit adalah 1,6 meter dan tiang berukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$  sepanjang 24 meter dengan jumlah 192 buah. Konfigurasi ini memiliki kapasitas ultimat sistem tiang sebesar 1098 MN sementara sistem tiang menanggung 780 MN dari total beban vertikal yang bekerja sehingga persentase mobilisasi kapasitas ultimat sistem tiang adalah sebesar 71%. Persentase beban yang ditanggung oleh sistem tiang adalah sebesar

86%. Adapun penurunan hasil perhitungan pada desain preliminari untuk konfigurasi ini adalah sebesar 13,03 cm.

Selanjutnya, dibuat kurva tri-linear yang merepresentasikan secara sederhana hubungan beban-penurunan pada desain preliminari ini. Untuk itu, perlu dicari terlebih dahulu besar beban saat sistem tiang telah benar-benar berada dalam kondisi plastis, yaitu sebesar  $P_1$  (Gambar 2.6). Saat tiang telah masuk ke dalam fase plastis, komponen rakit masih tetap berada dalam kondisi elastis. Ketika kapasitas ultimat gabungan dari sistem tiang dan komponen rakit telah dilampaui, maka barulah sistem pondasi tersebut telah benar-benar berada dalam kondisi plastis. Hal inilah yang sebenarnya digambarkan oleh kurva tri-linear Poulos.



Gambar 4.8 Kurva Tri-Linear Desain Preliminari Final

Adapun kurva tri-linear dari sistem pondasi ini dapat terlihat pada Gambar 4.8. Dari kurva tri-linear tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa total beban vertikal terfaktor akibat beban struktur, yaitu sebesar 902,66 MN, masih berada

dalam batas elastis sistem tiang dan komponen rakit dari sistem pondasi pada desain preliminari final ini. Dengan demikian, ditetapkan bahwa desain preliminari yang selanjutnya akan dijadikan dasar pemodelan dalam desain detail dengan menggunakan perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 adalah sistem pondasi dengan tebal rakit 1,6 meter dan 192 buah tiang berukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$  dengan panjang 24 meter.

### 4.3 ANALISIS DENGAN PERANGKAT LUNAK PLAXIS 2 DIMENSI

Seperti telah diketahui, desain preliminari hanya menghasilkan data dimensi komponen pondasi dan jumlah tiang yang dibutuhkan. Dengan demikian, tujuan utama dari dilakukannya analisis dengan perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 ini adalah untuk mengetahui posisi-posisi tiang yang menghasilkan desain paling optimal. Adapun justifikasi terhadap optimasi desain terletak pada besar penurunan rata-rata, besar perbedaan penurunan yang terjadi, kondisi gaya geser dan momen lentur dari komponen rakit, serta besar deformasi lateral dari tiang. Akan tetapi, jumlah dan ukuran tiang tidak akan diubah dari apa yang telah diperoleh pada desain preliminari.

#### 4.3.1 Konstruksi Model

Pada dasarnya, pemodelan yang dibuat pada perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 merupakan bentuk dua dimensi dari konfigurasi sistem pondasi yang telah diperoleh dari desain preliminari final. Oleh karena itu, perlu ditetapkan bagaimana konversi bentuk tiga dimensi ke dalam dua dimensi yang dapat mewakili perilaku dari sistem pondasi tersebut. Proses konversi pasti melibatkan beberapa simplifikasi dari bentuk tiga dimensi sehingga analisis terhadap model dua dimensi dapat dilaksanakan namun tetap menghasilkan hasil yang masuk akal dan benar.

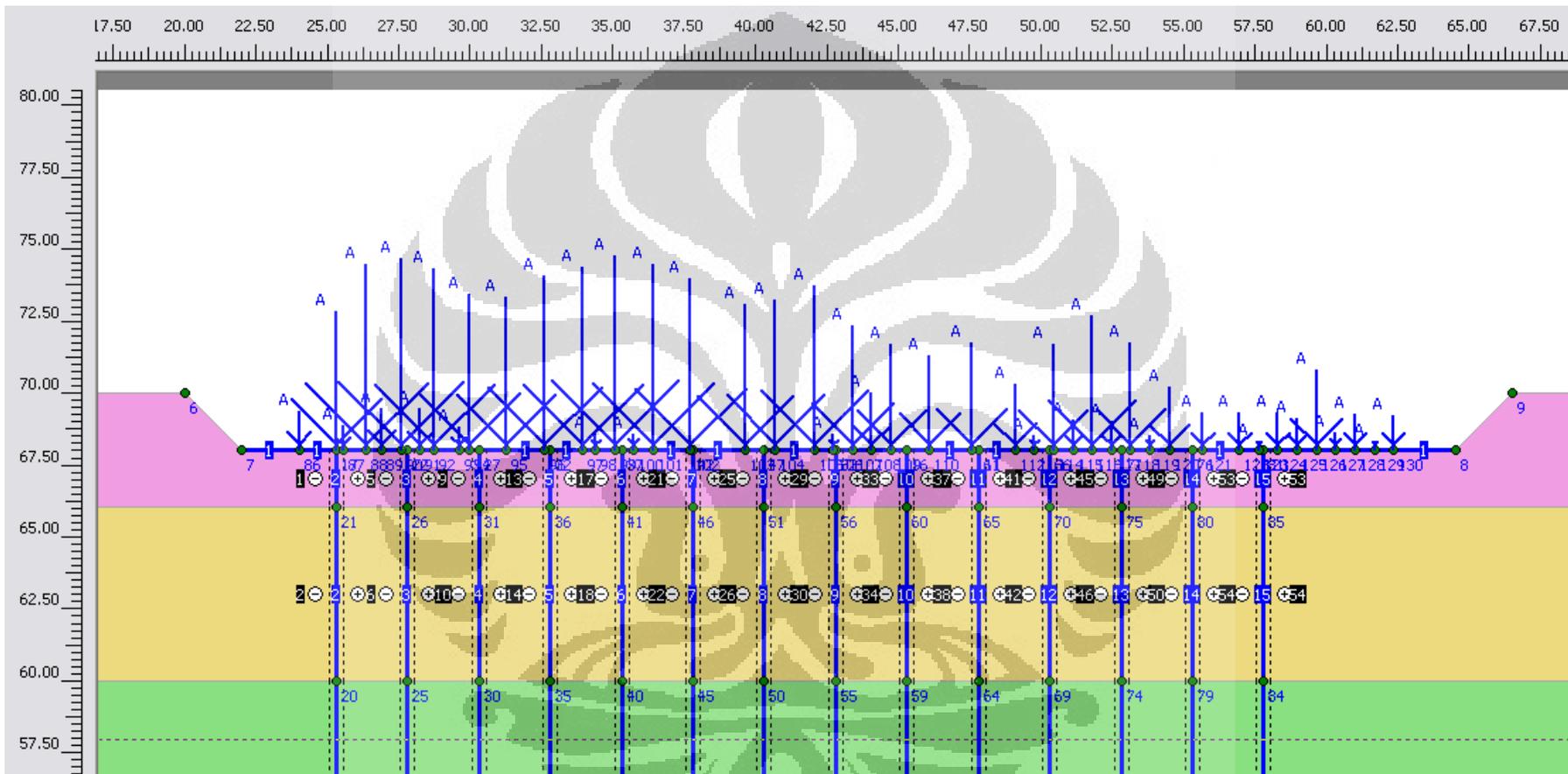
Pada pemodelan dengan PLAXIS Versi 8.2, pertama-tama perlu ditetapkan potongan melintang terhadap sumbu mana yang akan dimodelkan. Pertimbangan yang perlu diperhatikan adalah terkait dengan asumsi dasar model *plane-strain* itu sendiri. Jenis pemodelan ini digunakan untuk geometri dengan potongan melintang yang relatif seragam. Selain itu, kondisi tegangan dan

pembebanan pun dianggap sama sepanjang sumbu  $z$  (lihat Gambar 2.16). Dengan demikian, perpindahan dan regangan pada arah sumbu  $z$  diasumsikan nol.

Pada proyek apartemen yang dianalisis pada penelitian ini, bentuk pembebanan relatif sangat acak. Namun demikian, apabila diperhatikan pada Lampiran 1.2, potongan melintang terhadap sumbu  $z$  memiliki pembebanan yang relatif lebih seragam dibandingkan dengan potongan melintang terhadap sumbu  $x$ . Oleh karena itu, diputuskan untuk memodelkan potongan melintang terhadap sumbu  $z$  tersebut pada PLAXIS Versi 8.2.

Dengan demikian, disadari bahwa perlu dilakukan simplifikasi terhadap beban-beban terpusat yang terdistribusi relatif acak tersebut. Pada penelitian ini, dicoba untuk membuat simplifikasi terhadap pembebanan dengan menggunakan Persamaan 3.22. Beban-beban terpusat yang berada relatif pada satu barisan yang sama di sumbu  $z$  akan dijumlahkan dan kemudian dibagi dengan panjang rakit pada sumbu  $z$ . Pembagian dengan panjang rakit pada sumbu  $z$  dianggap perlu dilakukan mengingat input pembebanan terpusat pada pemodelan *plane strain* di PLAXIS Versi 8.2 merupakan beban per satuan meter arah sumbu  $z$ . Oleh karena itu, pembebanan yang dijadikan input sudah merupakan beban garis sepanjang sumbu  $z$  yang terbobot. Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk melihat seberapa baikkah simplifikasi terhadap kondisi pembebanan ini merepresentasikan kondisi pembebanan asli di lapangan. Adapun ilustrasi simplifikasi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 4.9 sementara besar beban yang dimodelkan dapat dilihat pada Lampiran 2.2.

Di samping itu, dalam pemodelan pada PLAXIS Versi 8.2, tiang-tiang yang berada pada arah sumbu  $z$  hanya diwakilkan oleh satu tiang saja untuk setiap barisan. Untuk itu, perlu juga dilakukan penyetaraan terhadap nilai modulus elastisitas dan friksi tiang pada model *plane-strain* karena kedua besaran tersebut akan sangat mempengaruhi profil penurunan maupun gaya-gaya dalam yang akan dihasilkan melalui analisis PLAXIS Versi 8.2. Seperti telah disebutkan, penyetaraan modulus elastisitas dan friksi tiang dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.19 dan 3.21.



Gambar 4.9 Ilustrasi Simplifikasi Pembebanan pada Pemodelan dengan PLAXIS Versi 8.2

Besar nilai  $P_1$  dan  $P_{up}$  yang diperoleh dari desain preliminari final digunakan sebagai input besaran gaya aksial maksimum pada model tiang dan rakit. Perilaku elastis-plastis dari struktur tiang dan rakit turut diperhitungkan dalam penelitian sehingga perlu diberikan besaran gaya yang menandakan peralihan dari perilaku elastis menuju ke perilaku plastis dari tiang dan rakit tersebut. Adapun  $P_1$  digunakan sebagai input  $N_p$  pada PLAXIS Versi 8.2 untuk struktur tiang, sementara  $P_{up}$  digunakan sebagai input  $N_p$  untuk struktur rakit (Gambar 3.8).

Untuk pemodelan tanah sendiri, dipilih bentuk Mohr-Coulomb di mana nilai-nilai yang digunakan sebagai input parameter dalam PLAXIS Versi 8.2 untuk masing-masing lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 3.7. Model Mohr-Coulomb dianggap cukup sederhana dan sudah dapat memodelkan perilaku elastis-plastis dari material. Di samping itu, tanah memang diasumsikan memiliki modulus elastisitas dan sudut geser internal yang konstan sehingga model ini dapat digunakan. Sementara itu, tipe analisis yang dipilih adalah analisis *undrained*. Tipe analisis ini tepat digunakan pada kondisi di mana permeabilitas tanah rendah sementara laju pembebanan sangat tinggi. Selain itu, tipe analisis ini juga sesuai digunakan apabila perilaku jangka pendek menjadi fokus analisis.

Proses kalkulasi dibagi ke dalam tiga tahap, yaitu konstruksi tiang, konstruksi beban, dan pemberian beban eksternal. Ketiga tahap tersebut merupakan jenis perhitungan plastis di mana struktur yang dimodelkan akan memasuki tahap plastis apabila nilai  $N_p$  yang telah didefinisikan sebelumnya terlampaui. Namun demikian, karena total beban yang bekerja pada pondasi tiang-rakit masih berada dalam batas elastis baik komponen rakit maupun komponen tiang, maka dapat disimpulkan bahwa analisis yang terjadi masih bersifat elastis.

Pada pemodelan dengan menggunakan PLAXIS Versi 8.2 ini, dilakukan analisis terhadap 4 buah model di mana perbedaan masing-masing model terletak pada posisi barisan tiang-tiang. Penilaian kelayakan konfigurasi pada tahap desain detail ini masih sama dengan penilaian kelayakan pada tahap desain preliminari. Dengan tiang sejumlah 192 buah, maka diputuskan untuk membuat konfigurasi yang terdiri dari 12 baris tiang di mana masing-masing baris terdiri dari 16 buah tiang.

### 4.3.2 Hasil Analisis Model

Berikut ini akan dipaparkan hasil analisis dengan menggunakan PLAXIS Versi 8.2 untuk masing-masing model yang telah dibuat. Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam menyusun barisan tiang adalah letak dari beban dengan nilai yang relatif besar.

#### 1. Model A

Model A ini merupakan model yang merepresentasikan konfigurasi tiang sesuai dengan Lampiran 1.4. Adapun tiang baris ke-1 berada pada  $x = 24,5$  meter, sementara tiang baris ke-12 berada pada  $x = 52$  meter (Gambar 4.10). Spasi antar barisan tiang adalah 2,5 meter.

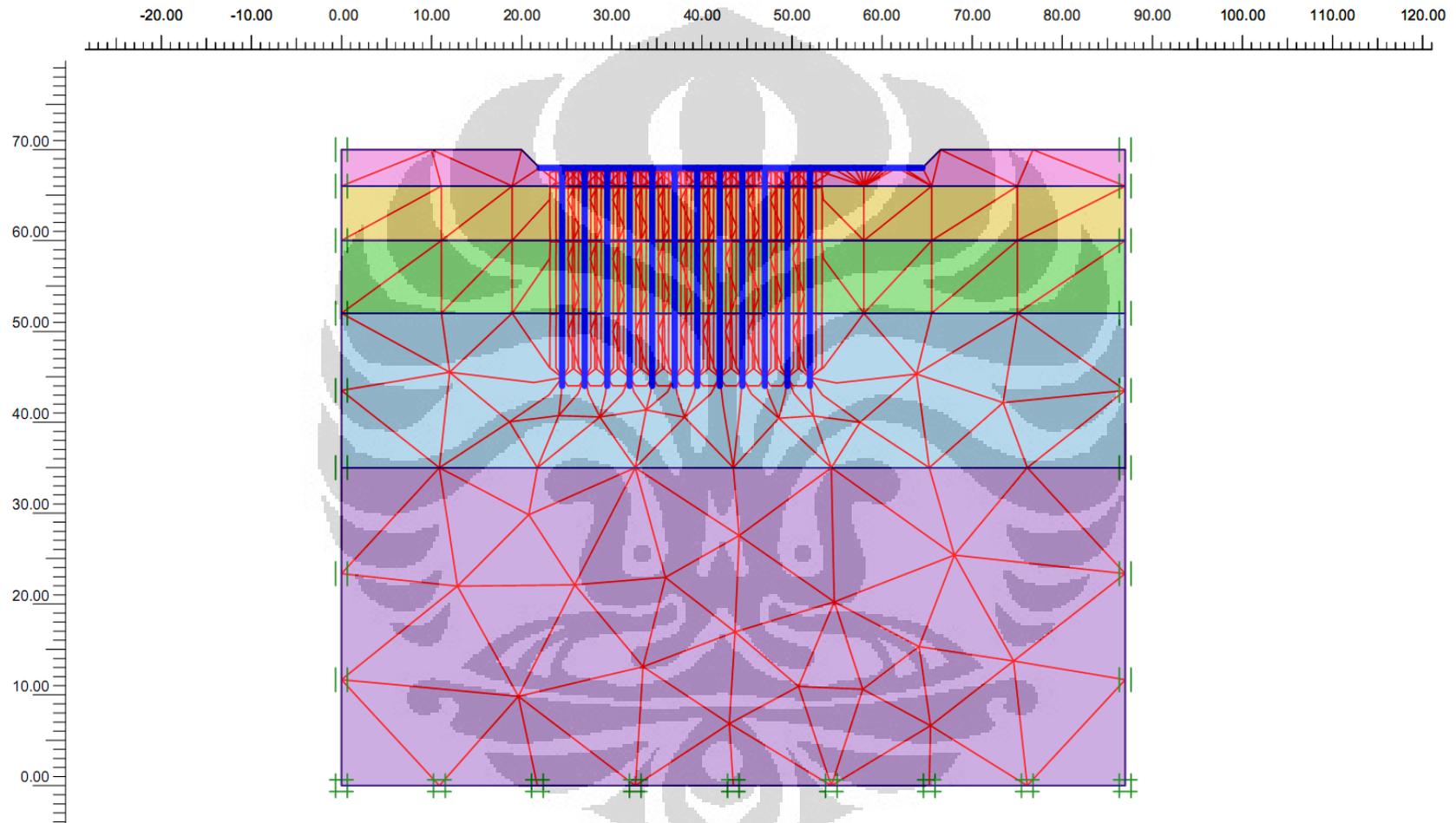
Ukuran tiang	= $70 \times 70 \text{ cm}^2$
Panjang tiang	= 24 meter
Jumlah tiang	= 192 buah
Bg/Br	= 0,66

#### a. Hasil analisis untuk komponen rakit

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen rakit dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model A. Adapun profil penurunan di bawah rakit dapat dilihat pada Gambar 4.11, sementara *mesh* terdeformasi, distribusi gaya geser, dan momen lentur rakit dapat dilihat pada Lampiran 1.6, 1.7, dan 1.8.

Tabel 4.5 Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model A

Penurunan Rata-Rata (cm)			Perbedaan Penurunan (cm)			
Batas	Deformasi Maks.	Ket.	Batas	Deformasi Min.	$\Delta$ Penurunan	Ket.
15	13,60	√	10	1,83	11,77	x



Gambar 4.10 Model A pada PLAXIS Versi 8.2



Gambar 4.11 Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model A

## b. Hasil analisis untuk komponen tiang

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen tiang dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model A.

Tabel 4.6 Kinerja Aksial Tiang pada Model A

No.	Tiang Baris ke-	Kinerja Aksial (MN/m)				
		Kapasitas Tiang	Aksial Maks.	Ket.	% Mobilisasi Kapasitas	Beban Per Baris
1	1	1,44	1,35	√	93,51%	84,38
2	2	1,44	0,83	√	57,42%	51,81
3	3	1,44	1,00	√	69,26%	62,50
4	4	1,44	1,06	√	73,42%	66,25
5	5	1,44	1,04	√	72,03%	65,00
6	6	1,44	0,89	√	61,85%	55,81
7	7	1,44	1,06	√	73,42%	66,25
8	8	1,44	1,02	√	70,65%	63,75
9	9	1,44	0,76	√	52,61%	47,48
10	10	1,44	0,89	√	61,51%	55,50
11	11	1,44	0,72	√	49,70%	44,85
12	12	1,44	1,04	√	72,03%	65,00
<b>Total Beban yang ditanggung Sistem Tiang (MN)</b>						728,58
<b>% Beban yang ditanggung Sistem Tiang</b>						80,71%

Tabel 4.7 Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model A

No.	Tiang Baris ke-	Deformasi Lateral (cm)		
		Batas	Deformasi Maks.	Ket.
1	1	10	6,79	√
2	2	10	3,98	√
3	3	10	3,21	√
4	4	10	2,30	√
5	5	10	2,41	√
6	6	10	2,50	√
7	7	10	2,60	√
8	8	10	2,72	√
9	9	10	3,14	√
10	10	10	4,03	√
11	11	10	4,29	√
12	12	10	5,40	√

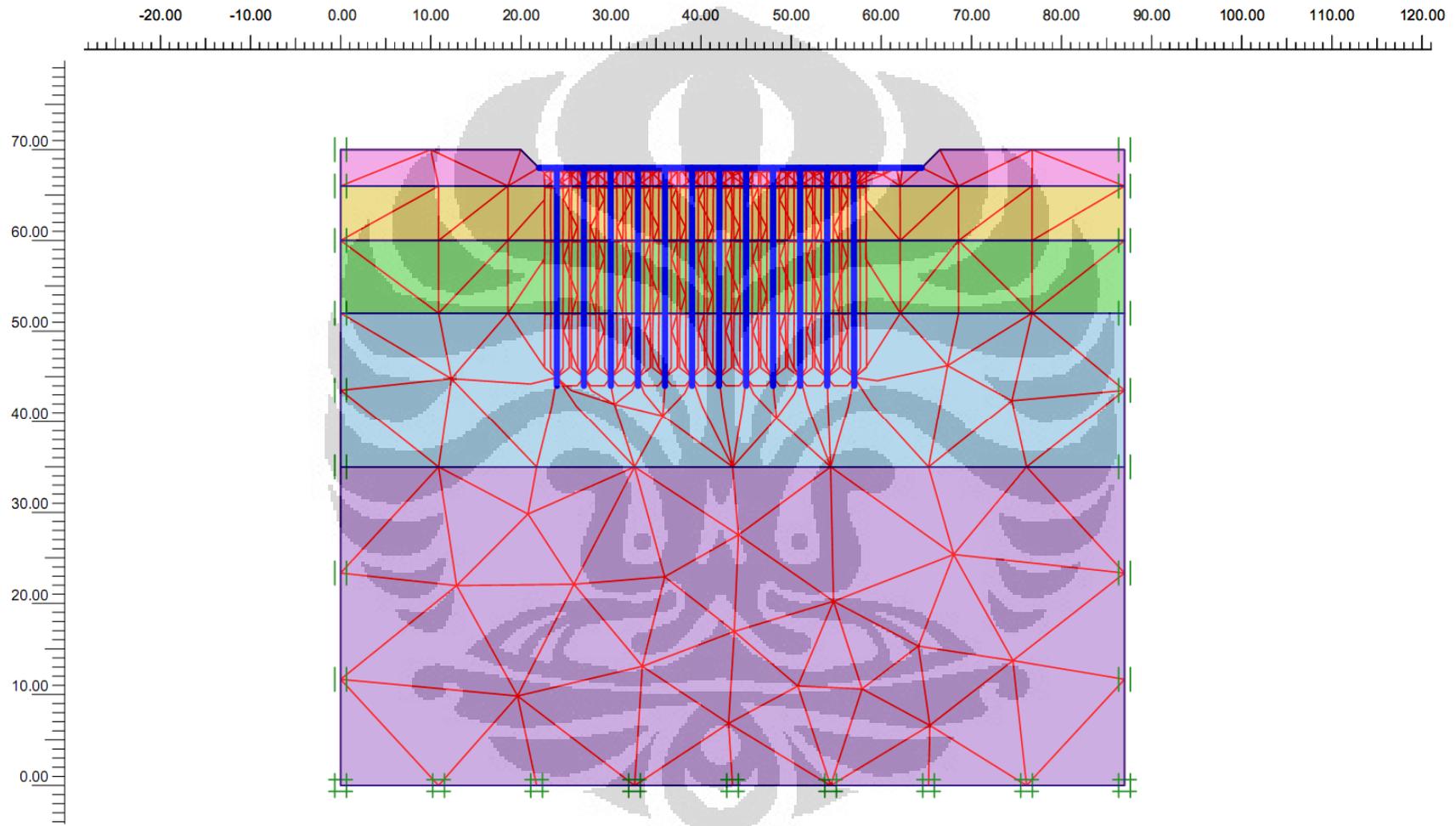
Dari Tabel 4.5, terlihat bahwa perbedaan penurunan yang terjadi ternyata melebihi batas yang ditetapkan, yaitu sebesar 10 cm. Seperti terlihat pada Gambar 4.8, pada  $x > 60$  meter, deformasi yang terjadi pada rakit justru sangat kecil. Hal ini dapat dipahami sebab pada daerah tersebut terdapat beban terpusat yang relatif lebih kecil dibandingkan pada daerah lain (Gambar 4.9). Di samping itu, pada Tabel 4.6 terlihat bahwa tiang pada baris ke-1 kapasitasnya telah termobilisasi lebih dari 80%. Seperti telah dipaparkan sebelumnya, bahwa persentase mobilisasi kapasitas tiang yang lebih dari 80% membuka peluang untuk meningkatkan perbedaan penurunan yang ada. Oleh karena itu, peletakkan tiang-tiang pada model A ini belum tepat karena menghasilkan perbedaan penurunan yang terlalu besar.

Adapun persentase beban yang ditanggung oleh tiang adalah sebesar 80,71%. Besaran ini cukup rendah dibandingkan dengan besaran yang diperoleh dari desain preliminari. Di samping itu, deformasi lateral tiang pada seluruh baris tidak melebihi batas yang diizinkan sehingga kelangsingan tiang tidak menjadi masalah pada model A. Dengan demikian, yang menjadi masalah pada model A ini hanyalah letak barisan tiang saja.

Langkah yang harus dilakukan adalah memindahkan posisi-posisi tiang agar perbedaan penurunan tidak terlalu besar. Dari Gambar 4.11, dapat diketahui bahwa tiang pada baris ke-12 pada model A sepertinya tidak dibutuhkan untuk berada pada  $x = 52$  meter. Sementara itu, penurunan terbesar berada pada daerah  $x < 30$  meter. Dengan demikian, barisan tiang dapat lebih digeser ke arah kiri untuk memperoleh detail penurunan yang lebih baik.

## 2. Model B

Model B ini merupakan model yang merepresentasikan konfigurasi tiang sesuai dengan Lampiran 1.9. Adapun tiang baris ke-1 berada pada  $x = 24$  meter, sementara tiang baris ke-12 berada pada  $x = 57$  meter (Gambar 4.12). Spasi antar barisan tiang adalah 3 meter. Sementara itu, rasio  $B_g/B_r$  berubah menjadi 0,79.



Gambar 4.12 Model B pada PLAXIS Versi 8.2

a. Hasil analisis untuk komponen rakit

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen rakit dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model B. Adapun profil penurunan di bawah rakit dapat dilihat pada Gambar 4.13, sementara *mesh* terdeformasi, distribusi gaya geser, dan momen lentur rakit dapat dilihat pada bagian Lampiran 1.11, 1.12, dan 1.13.

Tabel 4.8 Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model B

Penurunan Rata-Rata (cm)			Perbedaan Penurunan (cm)			
Batas	Deformasi Maks.	Ket.	Batas	Deformasi Min.	$\Delta$ Penurunan	Ket.
15	13,51	√	10	-1,83	15,34	x

b. Hasil analisis untuk komponen tiang

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen tiang dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model B.

Tabel 4.9 Kinerja Aksial Tiang pada Model B

No.	Tiang Baris ke-	Kinerja Aksial (MN/m)				
		Kapasitas Tiang	Aksial Maks.	Ket.	% Mobilisasi Kapasitas	Beban Per Baris
1	1	1,44	1,36	√	94,20%	85,00
2	2	1,44	1,31	√	90,74%	81,88
3	3	1,44	1,11	√	76,88%	69,38
4	4	1,44	1,10	√	76,19%	68,75
5	5	1,44	1,14	√	78,96%	71,25
6	6	1,44	1,18	√	81,73%	73,75
7	7	1,44	1,18	√	81,73%	73,75
8	8	1,44	0,96	√	66,49%	60,00
9	9	1,44	0,93	√	64,17%	57,91
10	10	1,44	0,83	√	57,49%	51,88
11	11	1,44	0,71	√	49,16%	44,36
12	12	1,44	0,77	√	53,13%	47,94
<b>Total Beban yang ditanggung Sistem Tiang (MN)</b>						785,83
<b>% Beban yang ditanggung Sistem Tiang</b>						87,06%



Gambar 4.13 Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model B

Tabel 4.10 Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model B

No.	Tiang Baris ke-	Deformasi Lateral (cm)		
		Batas	Deformasi Maks.	Ket.
1	1	10	6,09	√
2	2	10	5,04	√
3	3	10	3,71	√
4	4	10	1,78	√
5	5	10	1,45	√
6	6	10	2,34	√
7	7	10	2,90	√
8	8	10	3,50	√
9	9	10	4,20	√
10	10	10	4,67	√
11	11	10	4,84	√
12	12	10	4,99	√

Dari Tabel 4.8, terlihat bahwa penurunan rata-rata maksimum tidak melebihi batas yang ditetapkan. Akan tetapi, apabila dilihat, ternyata pada  $x > 60$  meter, deformasi yang terjadi pada komponen rakit justru mengarah ke atas. Kapasitas tiang pada baris ke-1 dan 2 ternyata juga sudah temobilisasi lebih dari 90% (Tabel 4.9). Sementara itu, besarnya beban aksial yang diterima setiap tiang tidak melebihi kapasitas tiang tersebut. Deformasi lateral pada tiang pun masih berada dalam batas yang diizinkan.

Dengan demikian, letak dari barisan tiang pada model B ini masih belum tepat karena perbedaan penurunan yang lebih besar dari batas yang diizinkan. Dari profil penurunan yang dihasilkan, maka dapat disimpulkan bahwa letak tiang pada baris ke-12 terlalu ke kanan sehingga menyebabkan deformasi yang terjadi pada ujung kanan rakit justru mengarah ke atas. Apabila tiang pada baris ke-12 ini dipindahkan, penurunan pada ujung kanan rakit memang akan meningkat. Akan tetapi, selama penurunan tersebut masih dalam batas maksimum yang diizinkan, maka desain dapat tetap dilakukan.

### 3. Model C

Model C ini merupakan model yang merepresentasikan konfigurasi tiang sesuai dengan Lampiran 1.14. Adapun tiang baris ke-1 berada pada  $x = 24$  meter, sementara tiang baris ke-12 berada pada  $x = 46$  meter (Gambar

4.14). Spasi antar barisan tiang adalah 2 meter. Sementara itu, rasio Bg/Br berubah menjadi 0,54.

a. Hasil analisis untuk komponen rakit

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen rakit dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model C. Adapun profil penurunan di bawah rakit dapat dilihat pada Gambar 4.15, sementara *mesh* terdeformasi, distribusi gaya geser, dan momen lentur rakit dapat dilihat pada bagian Lampiran 1.16, 1.17, dan 1.18.

Tabel 4.11 Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model C

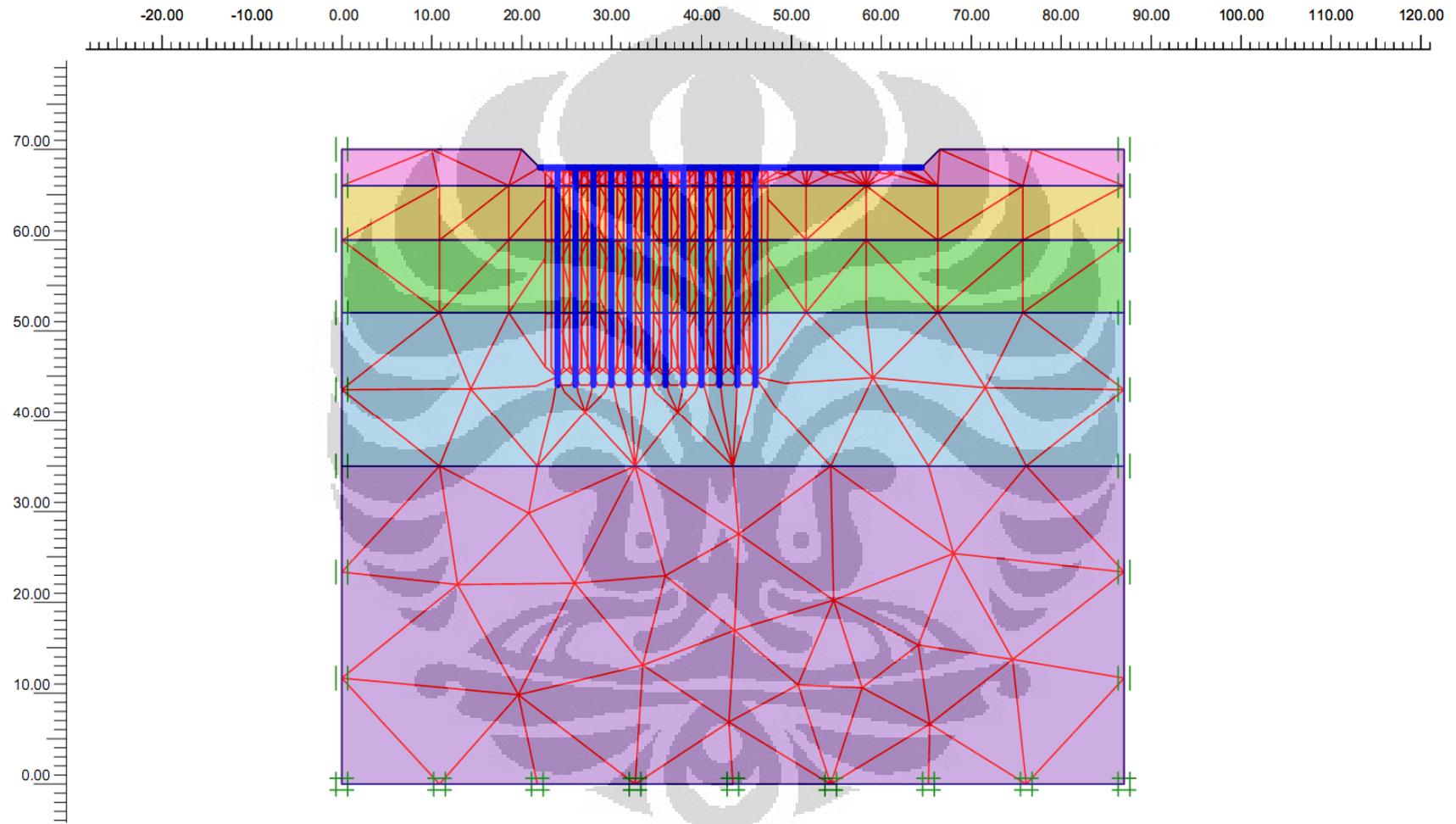
Penurunan Rata-Rata (cm)			Perbedaan Penurunan (cm)			
Batas	Deformasi Maks.	Ket.	Batas	Deformasi Min.	$\Delta$ Penurunan	Ket.
15	14,32	√	10	4,96	9,36	√

b. Hasil analisis untuk komponen tiang

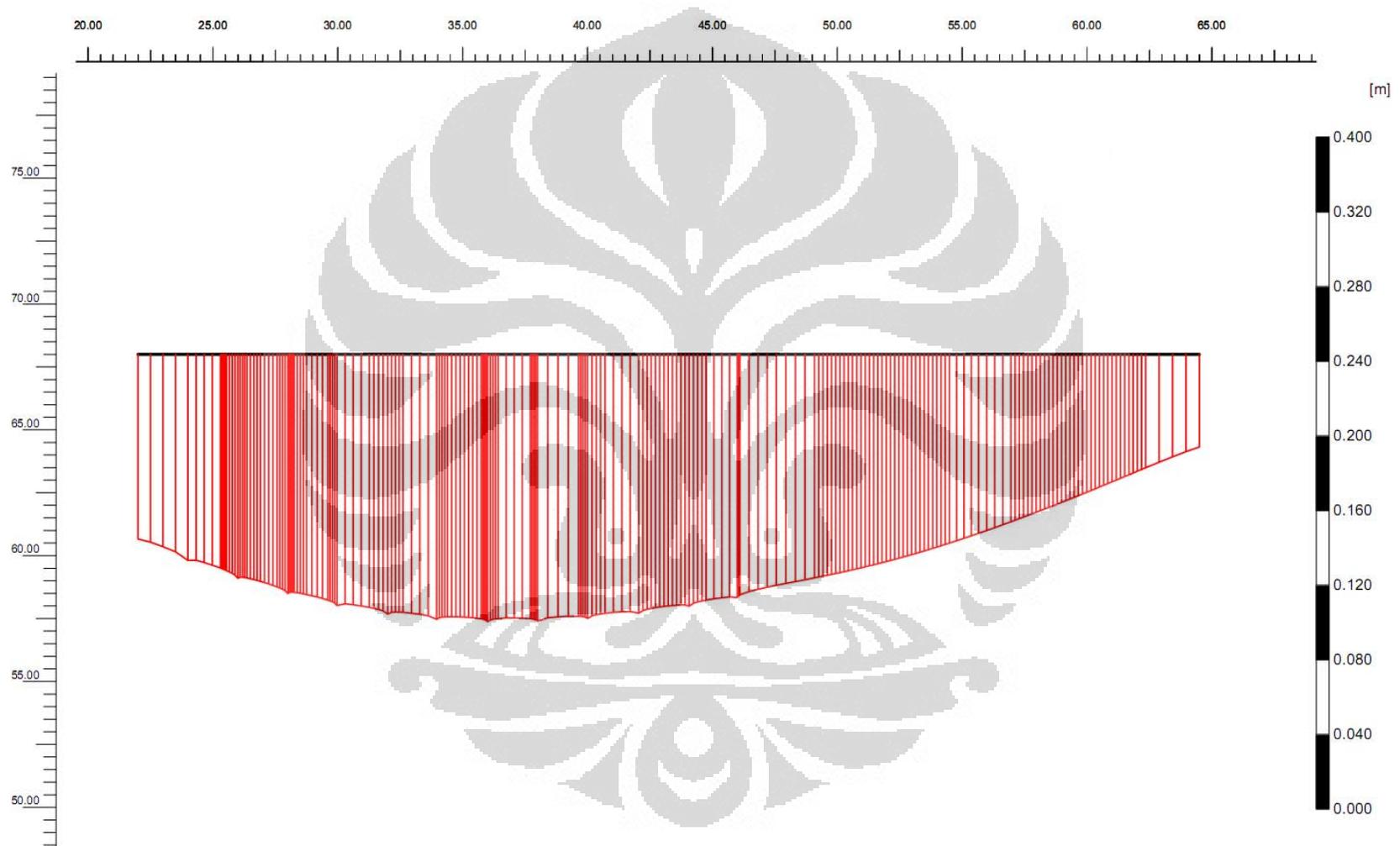
Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen tiang dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model C.

Tabel 4.12 Kinerja Aksial Tiang pada Model C

No.	Tiang Baris ke-	Kinerja Aksial (MN/m)				
		Kapasitas Tiang	Aksial Maks.	Ket.	% Mobilisasi Kapasitas	Beban Per Baris
1	1	1,44	1,05	√	72,73%	65,63
2	2	1,44	0,72	√	50,19%	45,29
3	3	1,44	0,74	√	50,94%	45,97
4	4	1,44	0,68	√	46,96%	42,38
5	5	1,44	0,92	√	64,00%	57,75
6	6	1,44	0,81	√	55,88%	50,43
7	7	1,44	0,90	√	62,26%	56,18
8	8	1,44	0,77	√	53,26%	48,06
9	9	1,44	0,75	√	51,74%	46,69
10	10	1,44	0,70	√	48,73%	43,98
11	11	1,44	0,89	√	61,92%	55,88
12	12	1,44	1,16	√	80,35%	72,50
<b>Total Beban yang ditanggung Sistem Tiang (MN)</b>						630,71
<b>% Beban yang ditanggung Sistem Tiang</b>						69,87%



Gambar 4.14 Model C pada PLAXIS Versi 8.2



Gambar 4.15 Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model C

Tabel 4.13 Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model C

No.	Tiang Baris ke-	Deformasi Lateral (cm)		
		Batas	Deformasi Maks.	Ket.
1	1	10	7,35	√
2	2	10	5,37	√
3	3	10	4,97	√
4	4	10	3,95	√
5	5	10	3,99	√
6	6	10	4,02	√
7	7	10	4,08	√
8	8	10	4,16	√
9	9	10	4,29	√
10	10	10	4,44	√
11	11	10	4,62	√
12	12	10	4,80	√

Pada model C ini, besar perbedaan penurunan sudah berada dalam batas yang diizinkan. Dengan demikian, tiang pada baris ke-12 sudah cukup tepat dilokasikan pada  $x = 46$  meter. Seperti terlihat pada Tabel 4.12, tiang pada baris ke-12 memiliki persentase mobilisasi kapasitas yang tertinggi di antara yang lain. Akan tetapi, persentase beban yang ditanggung oleh sistem tiang menjadi lebih kecil dari dua model lainnya.

#### 4. Model D

Model D ini merupakan model yang merepresentasikan konfigurasi tiang sesuai dengan Lampiran 1.19. Adapun tiang baris ke-1 berada pada  $x = 24,5$  meter, sementara tiang baris ke-12 berada pada  $x = 46,5$  meter (Gambar 4.16). Spasi antar barisan tiang adalah 2 meter. Sementara itu, rasio Bg/Br berubah menjadi 0,53.

##### c. Hasil analisis untuk komponen rakit

Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen rakit dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model D. Adapun profil penurunan di bawah rakit dapat dilihat pada Gambar 4.17, sementara *mesh* terdeformasi, distribusi gaya geser, dan momen lentur rakit dapat dilihat pada bagian Lampiran 1.21, 1.22, dan 1.23.

Tabel 4.14 Hasil Penurunan di Bawah Rakit pada Model D

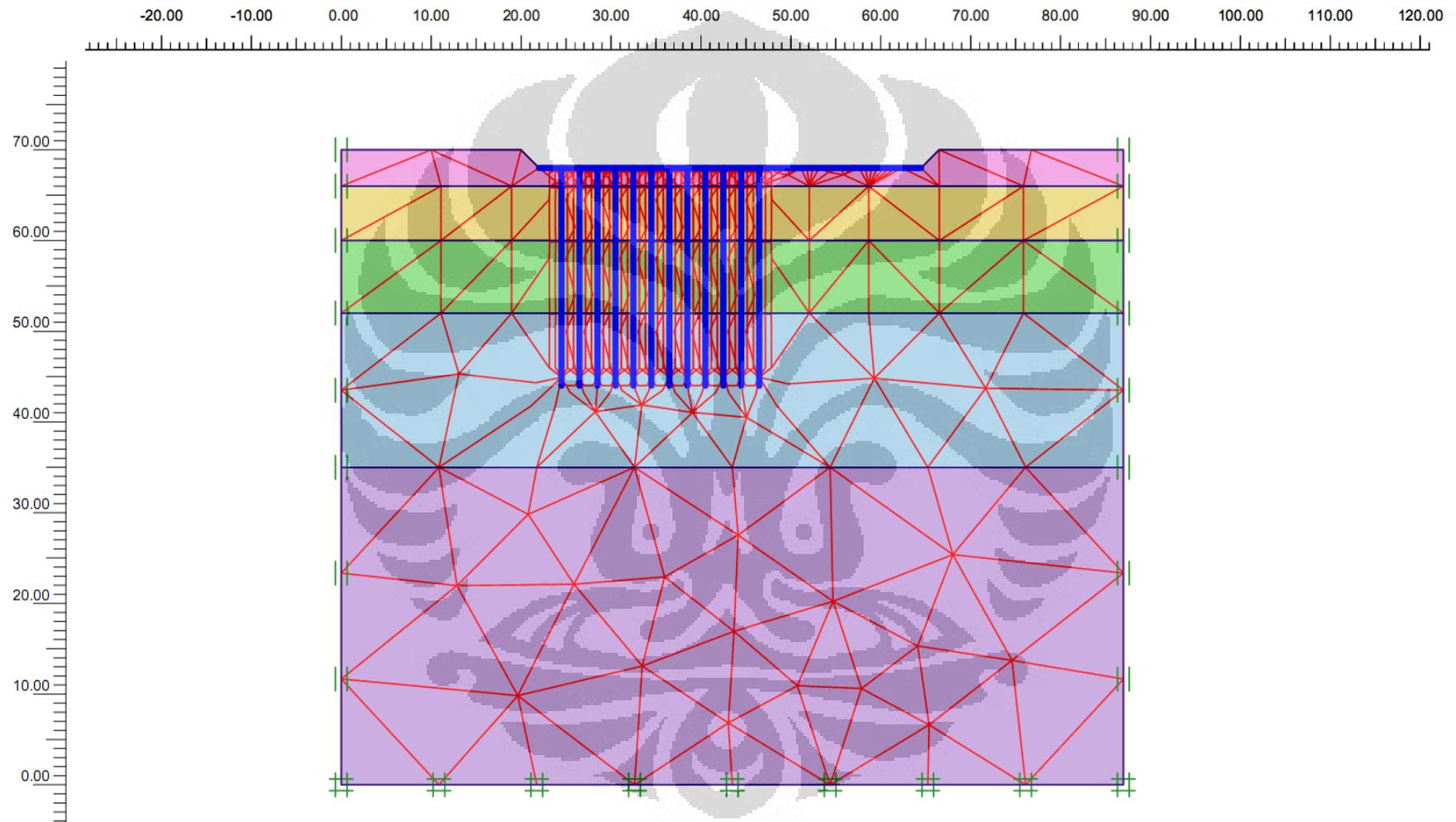
Penurunan Rata-Rata (cm)			Perbedaan Penurunan (cm)			
Batas	Deformasi Maks.	Ket.	Batas	Deformasi Min.	$\Delta$ Penurunan	Ket.
15	14,34	√	10	4,96	9,38	√

## d. Hasil analisis untuk komponen tiang

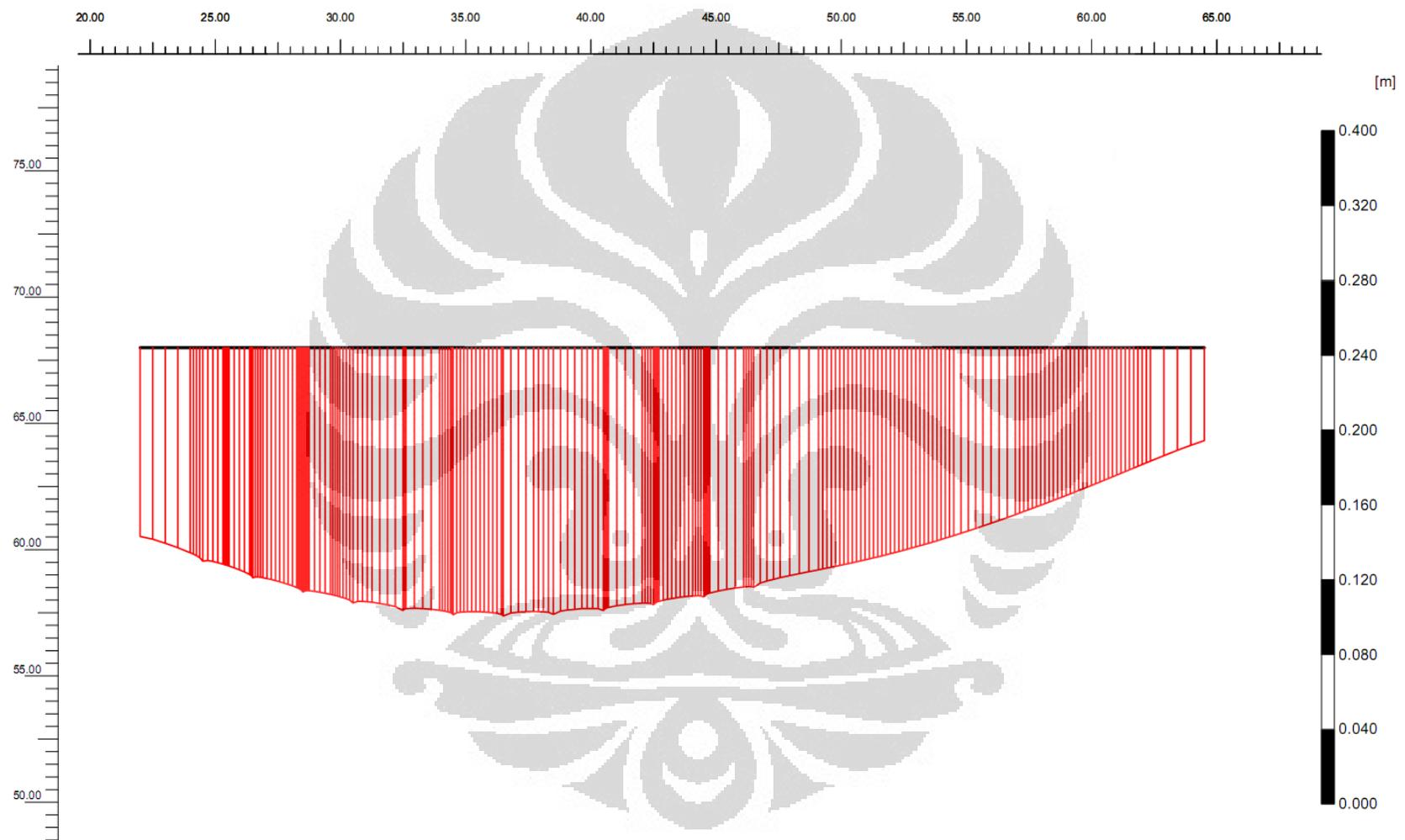
Berikut ini merupakan hasil analisis untuk komponen tiang dari perangkat lunak PLAXIS Versi 8.2 untuk model D.

Tabel 4.15 Kinerja Aksial Tiang pada Model D

No.	Tiang Baris ke-	Kinerja Aksial (MN/m)				Beban Per Baris
		Kapasitas Tiang	Aksial Maks.	Ket.	% Mobilisasi Kapasitas	
1	1	1,44	1,12	√	77,58%	70,00
2	2	1,44	0,86	√	59,57%	53,75
3	3	1,44	0,72	√	49,73%	44,88
4	4	1,44	0,72	√	49,80%	44,94
5	5	1,44	0,80	√	55,48%	50,06
6	6	1,44	0,85	√	59,15%	53,38
7	7	1,44	0,76	√	52,36%	47,25
8	8	1,44	0,82	√	56,71%	51,17
9	9	1,44	0,82	√	56,79%	51,24
10	10	1,44	0,74	√	50,91%	45,94
11	11	1,44	0,70	√	48,82%	44,05
12	12	1,44	1,26	√	87,27%	78,75
<b>Total Beban yang ditanggung Sistem Tiang (MN)</b>						635,40
<b>% Beban yang ditanggung Sistem Tiang</b>						70,39%



Gambar 4.16 Model D pada PLAXIS Versi 8.2



Gambar 4.17 Hasil Analisis PLAXIS Versi 8.2 untuk Profil Penurunan di Bawah Rakit pada Model D

Tabel 4.16 Hasil Deformasi Lateral Tiang pada Model D

No.	Tiang Baris ke-	Deformasi Lateral (cm)		
		Batas	Deformasi Maks.	Ket.
1	1	10	8,15	√
2	2	10	5,70	√
3	3	10	5,40	√
4	4	10	4,38	√
5	5	10	3,86	√
6	6	10	3,89	√
7	7	10	3,94	√
8	8	10	4,02	√
9	9	10	4,14	√
10	10	10	4,28	√
11	11	10	4,46	√
12	12	10	4,64	√

Pada model D ini, besar perbedaan penurunan sudah berada dalam batas yang diizinkan. Dengan demikian, tiang pada baris ke-12 sudah cukup tepat dilokasikan pada  $x = 46,5$  meter. Hasil analisis antara model D dan model C memang tidak berbeda jauh.

#### 4.4 DISKUSI

Pada dasarnya, pendekatan yang dilakukan pada saat pembuatan desain pondasi tiang-rakit akan sangat mempengaruhi desain akhir yang akan diperoleh. Pada kasus ini, fokus utama memang terletak pada kontrol penurunan rata-rata dan perbedaan penurunan yang terjadi akibat beban yang bekerja. Dalam proses desain pada penelitian ini, terdapat dua tahap desain di mana masing-masing tahap menggunakan metode yang berbeda. Akan tetapi, kedua tahap tersebut saling berkesinambungan. Hasil yang diperoleh dari tahap desain preliminari harus dapat diterapkan ke dalam tahap desain detail. Dengan demikian, dasar asumsi dari kedua tahap tersebut harus dibuat sedemikian sehingga dapat saling merepresentasikan dan tidak bertolak belakang.

Apabila dilihat, pada tahap desain preliminari yang menggunakan metode konvensional Poulos, parameter tanah yang digunakan adalah modulus elastisitas dan nilai daya dukung dari komponen tiang dan rakit. Untuk memperoleh

parameter tanah tersebut, dimanfaatkan korelasi yang dibuat oleh Decourt (1989) di mana basis korelasi tersebut didasarkan pada nilai  $N_{SPT}$ . Sementara itu, pada tahap desain detail dengan menggunakan PLAXIS Versi 8.2, input parameter yang diperlukan adalah kuat geser dari tanah. Nilai  $N_{SPT}$  pun kembali digunakan untuk mencari nilai kuat geser dari tanah tersebut. Seharusnya, dengan memanfaatkan nilai  $N_{SPT}$  yang sama, meskipun input kedua metode merupakan parameter yang berbeda, akan tetap diperoleh hasil yang sama untuk kedua metode tersebut.

Namun demikian, terlihat bahwa terdapat sedikit perbedaan antara hasil penurunan maksimum yang diperoleh pada tahap desain preliminari dengan penurunan maksimum yang diperoleh pada tahap desain detail. Adanya *gap* ini kemungkinan besar disebabkan oleh kelemahan justifikasi dari besarnya nilai parameter yang harus digunakan. Seluruh korelasi yang dimanfaatkan umumnya ditemui dalam bentuk rentang nilai untuk satu lapisan tanah dengan konsistensi tertentu. Justifikasi terkait dengan nilai mana di dalam rentang tersebut yang paling merepresentasikan kondisi tanah dan konsistensi antara tahap desain preliminari dan desain detail inilah yang dapat membuat hasil dari kedua metode tersebut sama atau justru berbeda.

Dari analisis yang telah dilakukan, dapat terlihat bahwa penurunan maksimum yang diperoleh dari desain detail memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan penurunan maksimum yang diperoleh dari desain preliminari. Hal ini terkait dengan representasi dari pemodelan *plane-strain* itu sendiri. Pada pemodelan *plane-strain*, tidak diperhitungkan interaksi antar-potongan. Padahal, keberadaan potongan lain tentu dapat membantu mengekang penurunan yang terjadi akibat kekakuan yang bertambah.

Di samping itu, simplifikasi yang harus dibuat pada desain detail akibat konversi ke dalam bentuk dua dimensi juga sedikit banyak akan berpengaruh kepada hasil akhir yang diperoleh. Pada tahap desain preliminari, lokasi detail dari beban yang bekerja memang tidak terlalu dikaji mengingat yang diperlukan hanyalah total beban vertikal saja. Selain itu, asumsi dasar yang digunakan dalam pembuatan metode konvensional Poulos lebih dititikberatkan pada bentuk beban yang terdistribusi merata. Akan tetapi, pada bentuk aslinya, beban merupakan

beban terpusat dengan lokasi yang cukup acak. Padahal, posisi beban dan bagaimana distribusi beban tersebut sepanjang rakit akan sangat mempengaruhi profil penurunan yang terjadi. Oleh karena itu, simplifikasi yang dibuat harus sanggup merepresentasikan beban asli yang diderita rakit pada bentuk tiga dimensi.

Apabila dibandingkan antara hasil penurunan pada tahap desain preliminari dengan model B pada tahap desain detail di mana pada model B tiang relatif didistribusikan pada bagian tengah rakit, maka perbedaannya hanya berada dalam rentang 0,5 cm. Oleh karena itu, mungkin dapat dikatakan bahwa pemodelan yang dibuat dalam PLAXIS Versi 8.2 secara umum telah merepresentasikan konfigurasi dan parameter tanah yang menjadi dasar asumsi pada tahap desain preliminari. Adanya perbedaan profil penurunan pada model A, C, dan D pada tahap desain detail adalah karena pengaruh konfigurasi beban dan tiang pada sistem. Inilah perbedaan mendasar antara metode konvensional Poulos dan FEM yang digunakan dalam PLAXIS Versi 8.2.

Pada semua profil penurunan hasil analisis dengan PLAXIS Versi 8.2, terlihat bahwa penurunan paling besar justru tidak terjadi di daerah tengah rakit. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi beban yang memang tidak terdistribusi merata. Beban pada daerah kiri rakit memiliki nilai yang jauh lebih besar relatif terhadap beban pada daerah kanan rakit. Oleh karena prinsip utama pondasi tiang-rakit adalah untuk menempatkan tiang secara strategis pada posisi di mana terjadi penurunan maksimum, maka seperti terlihat pada model C dan D, barisan tiang pun diletakkan relatif di daerah kiri rakit.

Pada penelitian ini, rasio  $B_g/B_r$  tidak terdapat pada rentang 0,4-0,6 seperti yang ditemukan pada penelitian Prakoso dan Kulhawy (2001). Rasio  $B_g/B_r$  yang dibuat berada dalam rentang 0,53-0,79. Memang perbedaan penurunan menjadi semakin besar ketika rasio  $B_g/B_r$  juga meningkat. Akan tetapi, rasio  $B_g/B_r$  ini terlihat tidak dapat dijadikan sebagai variabel yang tertentu dalam melihat bagaimana pengaruhnya terhadap perbedaan penurunan dalam penelitian ini. Hal ini disebabkan fokus utama peletakkan tiang adalah pada lokasi-lokasi yang memiliki penurunan terbesar atau justru menghindari lokasi-lokasi yang dapat menghasilkan perbedaan penurunan menjadi semakin besar.

Dari tahap desain preliminari, juga diperoleh pengaruh antara bagaimana dimensi dan jumlah tiang mempengaruhi kinerja pondasi. Pada dasarnya, dimensi dan jumlah tiang sangat terkait dengan besarnya kekakuan sistem tiang tersebut. Seperti telah dikatakan sebelumnya, proporsi kemampuan komponen pondasi dalam menahan beban digambarkan melalui proporsi kekakuan komponen pondasi tersebut. Semakin besar dan banyak tiang yang digunakan, maka semakin besar pula proporsi beban yang akan ditanggung oleh tiang. Akan tetapi, perlu dipikirkan dengan baik berapa jumlah tiang dengan dimensi tertentu harus digunakan.

Penggunaan tiang yang semakin banyak memang meningkatkan kemampuan pondasi, tetapi desain akan tidak ekonomis. Hal ini dikarenakan pada pondasi tiang-rakit, daya dukung rakit pun perlu diperhitungkan. Untuk itu, penggunaan pondasi tiang-rakit lebih cocok diimplementasikan pada tanah yang relatif kaku karena rakit diharapkan dapat membantu menahan beban sehingga jumlah tiang dapat direduksi. Oleh karena itu, ketika jumlah tiang telah dianggap cukup untuk menyediakan kekuatan dalam batas yang diharuskan, maka perubahan dimensi tiang dapat dilakukan untuk memperbesar kemampuan friksi tiang dalam menanggulangi penurunan.

Seperti telah dipaparkan sebelumnya pada Subbab 2.1.3, Poulos (2000) berdasarkan Horikoshi dan Randolph (1996) mengajukan sebuah usulan desain yang ekonomis di mana tiang harus didistribusikan pada daerah tengah rakit dengan persentase area sebesar 16-25% dari luas permukaan rakit. Di samping itu, tiang harus didesain agar dapat menahan 40-70% dari beban rencana. Akan tetapi, dengan bentuk pembebanan yang tidak terdistribusi merata, usulan mengenai persentase area grup tiang sebesar 16-25% tidak dapat diaplikasikan pada penelitian ini. Tiang justru lebih fokus didistribusikan relatif di daerah kiri dari komponen rakit. Akan tetapi, merujuk kepada model C dan D, maka usulan mengenai desain tiang yang dapat menahan 40-70% beban rencana dapat diaplikasikan.

Di samping itu, Peraturan Kepala Dinas P2B Provinsi DKI Jakarta Nomor 50 Tahun 2007 mengatakan bahwa 75% beban yang bekerja pada pondasi harus bisa ditahan oleh daya dukung izin salah satu sistem dari sistem gabungan pondasi

tiang-rakit tersebut, baik oleh pondasi tiang atau oleh pondasi rakit. Daya dukung komponen rakit yang besar sanggup menahan 75% beban yang bekerja. Dengan demikian, model C dan D dapat dijadikan sebagai desain akhir.

Dalam proyek aslinya, apartemen ini disokong oleh pondasi grup tiang di mana tiang sejumlah 820 buah, berukuran  $45 \times 45 \text{ cm}^2$  dan panjang 18 meter. Komponen rakit hanya berperan sebagai *pile cap* saja dan daya dukungnya tidak diperhitungkan. Apabila dikaji berdasarkan jumlah, memang jumlah tiang yang dibutuhkan dalam desain pada penelitian ini jauh lebih sedikit. Akan tetapi, ukuran dan panjang tiang dalam desain pada penelitian ini jauh lebih besar. Apabila volume beton dari grup tiang dibandingkan, maka volume beton dari grup tiang pada desain akhir yang diperoleh pada penelitian ini hanyalah sekitar 75% dari volume beton grup tiang pada proyek aslinya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa desain grup tiang tanpa memperhitungkan kontribusi rakit dalam menahan beban dapat dikatakan merupakan desain yang terlalu konservatif.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 KESIMPULAN**

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian mengenai studi pemakaian pondasi tiang-rakit ini adalah:

1. Filosofi desain pondasi tiang-rakit membantu dalam menetapkan tujuan-tujuan desain dan bagaimana langkah-langkah yang perlu diambil selama proses desain berlangsung.
2. Pondasi tiang-rakit sangat sesuai diaplikasikan pada jenis tanah yang relatif kaku karena kontribusi rakit dalam menahan beban turut diperhitungkan.
3. Pendekatan desain pondasi tiang-rakit yang turut memperhitungkan daya dukung rakit dalam menahan beban menempatkan peran terbesar tiang sebagai pereduksi penurunan.
4. Perbandingan kekakuan komponen pondasi pada pondasi tiang-rakit menggambarkan proporsi beban yang ditanggung oleh masing-masing komponen.
5. Justifikasi yang baik terhadap parameter geoteknik diperlukan untuk menghasilkan desain yang dapat dipercaya.
6. Ukuran dan panjang tiang yang semakin besar akan membuat tahanan friksi tiang membesar sehingga penurunan yang terjadi pun akan menjadi lebih kecil.
7. Jumlah tiang yang semakin banyak akan membantu mereduksi penurunan dan menambah daya dukung keseluruhan, namun pada titik tertentu besarnya reduksi penurunan tidak akan terlalu signifikan.
8. Saat ukuran dan panjang tiang diperbesar, persentase beban yang ditahan oleh sistem tiang pun menjadi semakin besar.
9. Dengan meningkatnya beban, maka sistem tiang di bawah rakit akan mulai memasuki kondisi plastis dan sebagian beban yang ditahan sistem tiang akan ditransfer ke komponen rakit.
10. Untuk membuat desain yang optimum, perlu juga melihat bagaimana persentase mobilisasi kapasitas tiang.

11. Tiang harus ditempatkan sedemikian sehingga penurunan dan perbedaan penurunan yang terjadi berada pada batas yang ditetapkan.

## 5.2 SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan sebagai bentuk pengembangan pengetahuan mengenai pondasi tiang-rakit selanjutnya.

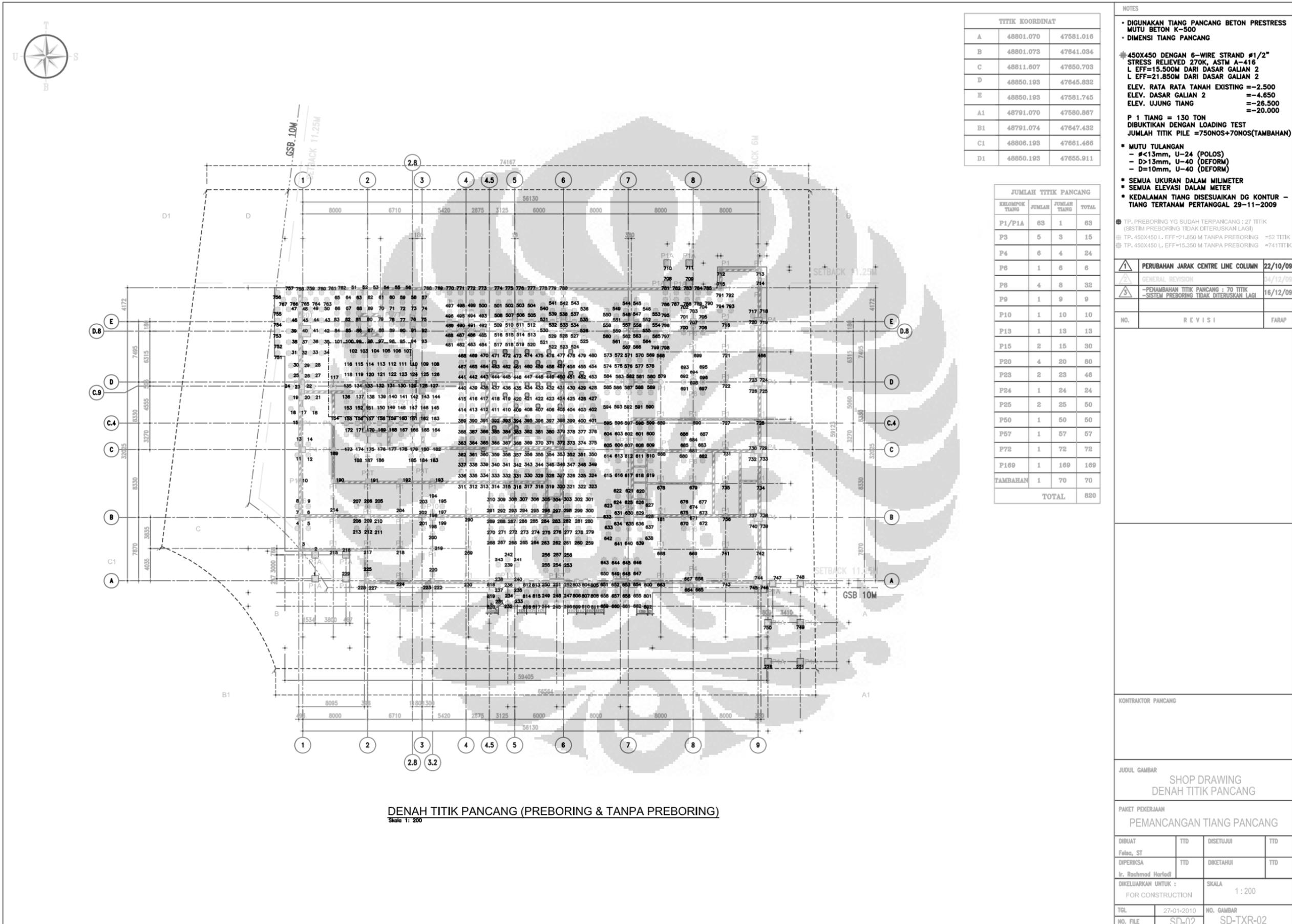
1. Kepekaan yang baik, kehati-hatian, dan pengalaman dalam menentukan parameter tanah sangat diperlukan dalam membuat desain pondasi tiang-rakit. Sementara itu, telah banyak korelasi yang disediakan untuk mempermudah justifikasi terhadap parameter tanah tersebut. Namun demikian, pemilihan korelasi yang akan digunakan harus benar dan sesuai dengan kondisi dan permasalahan yang dihadapi.
2. Beban terpusat yang bersifat acak atau tidak terdistribusi merata perlu mendapat perhatian khusus ketika dimodelkan secara dua dimensi. Analisis terbaik yang dapat dilakukan adalah analisis tiga dimensi sehingga hasil yang diperoleh pun akurat dan presisi. Dengan demikian, perlu dilakukan analisis lanjutan terkait konversi beban semacam ini ke dalam bentuk dua dimensi.

## DAFTAR REFERENSI

- Brinkgreve, R. B. J., et al. (ed.). (2002). *PLAXIS 2D – Version 8 Manual*. Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Chow, H. (2007). *Analysis of piled-raft foundations with piles of different lengths and diameters: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy*. Sydney: University of Sydney.
- Chow, H., & Small, J. C. (2005). *Behaviour of piled rafts with piles of different lengths and diameters under vertical loading*. Geotechnical Special Publication No. 130-142, Geo-Frontiers, Austin, USA, pp. 841-855.
- Clancy, P., & Randolph, M. F. (1992). *Research report No. G:1062: Analysis and design of piled raft foundations*. Nedlands: Department of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia.
- Concrete Institute. (1999). *Industrial floors and pavements guidelines*.
- Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Stamford: Cengage Learning.
- Decourt, L. (1989). *The standard penetration test: State-of-the-art report*. Proc. 12th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, pp. 2405-2416.
- Der-Guey, L., & Zheng-Yi, F. (2006). *A numerical study of piled raft foundations*. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 1091-1097.
- De Sanctis, L., Mandolini, A., Russo, G. and Viggiani, C. (2001). *Some remarks on the optimum design of piled rafts*. personal communication of paper submitted for publication.
- Franke, E., El-Mossallamy, Y., & Wittmann, P. (2000). Calculation methods for raft foundations in Germany. In J. A. Hamsley (Ed.). *Design applications of raft foundations* (pp. 283-322). London: Thomas Telford Publishing.
- Griffiths, D.V., Clancy, P., & Randolph, M. F. (1991). *Research report No. G:1034: Piled raft foundation analysis by finite elements*. Nedlands: Department of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia.

- Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1996). *Research report No. G:1179: A contribution to optimum design of piled rafts*. Nedlands: Department of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia.
- Katzenbach, R., Arslan, U., & Moormann, C. (1998, October). *Design and safety concept for piled raft foundations*. Proceeding 3<sup>rd</sup> International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent.
- Katzenbach, R., Arslan, U., & Moormann, C. (2000). Piled raft foundation projects in Germany. In J. A. Hamsley (Ed.). *Design applications of raft foundations* (pp. 323-391). London: Thomas Telford Publishing.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Mekbib, M. (2004). *Performance of piled raft foundations for Addis Ababa soils*. Addis Ababa: Addis Ababa University, School of Graduate Studies, Department of Civil Engineering.
- Poulos, H. G. (2000). *Practical design procedures for piled raft foundations*. Ed. J. A. Hamsley. London: Thomas Telford Publishing.
- Poulos, H. G. (2000). *Pile-raft interaction – Alternative methods of analysis. Developments in theory*. Geomechanics, Ed. D. W. Smith, & J. P. Carter, Balkema, Rotterdam, 445-468.
- Poulos, H. G. (2001). *Methods of analysis of piled raft foundations*. A report prepared on behalf of technical committee, TC18 on piled foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H. (2000). *Contribution to piled raft foundation design*. Jnl. Geot. and Geoenv. Eng., ASCE, 127(1): 17-24.
- Randolph, M. F., & Wroth, C.P. (1978). *Analysis of deformation of vertically loaded piles*. *Journal Geotechnical Engineering Div, ASCE* 104(12): 1465-1488.
- Randolph, M. F., & Clancy P. (1993). *Research report No. G:1069: Efficient design of piled rafts*. Nedlands: Department of Civil and Resource Engineering, University of Western Australia.

- Randolph, M. F. (1994). *Design methods for piled groups and piled rafts. State-of-the-art report*. Paper presented at the 13<sup>th</sup> International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, 61-82.
- Richart, Jr., F.R., Hall, Jr., J.R., & Woods, R.D. (1970). *Vibrations of soils and foundations*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Ta, L. D. & Small, J. C. (1997). *An approximation for analysis of raft and piled raft foundations*. *Computers and Geotechnics*, 20(2): 105-123.
- Tan, Y.C., & Chow, C.M. (2004). *Design of piled raft foundation on soft ground*.
- Thaher, M., & Jessberger, H. L. (1991). *The behaviour of pile-raft foundations, investigated in centrifuge model tests*. Centrifuge 91, Boulder, Colorado, pp. 101-106.
- Thaher, M., & Jessberger, H. L. (1991). *Investigation of the behaviour of pile-raft foundations by centrifuge modelling*. Proc. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 597-603.
- Viggiani, C. (2001). *Analysis and design of piled foundations*. 1<sup>st</sup> Arrigo Croce Lecture, *Rivista Italiana de Geot.*, 1/2001: 47-75.
- Wesley, L. D. (1977). *Mekanika tanah*. Jakarta: Badan Penerbit Pekerjaan Umum.



TITIK KOORDINAT		
A	48801.070	47581.016
B	48801.073	47641.034
C	48811.807	47650.703
D	48850.193	47645.832
E	48850.193	47581.745
A1	48791.070	47580.867
B1	48791.074	47647.432
C1	48806.193	47661.486
D1	48850.193	47655.911

JUMLAH TITIK PANCANG			
KELompok Tiang	Jumlah	Jumlah Tiang	TOTAL
P1/PIA	63	1	63
P3	5	3	15
P4	6	4	24
P6	1	6	6
P8	4	8	32
P9	1	9	9
P10	1	10	10
P13	1	13	13
P15	2	15	30
P20	4	20	80
P23	2	23	46
P24	1	24	24
P25	2	25	50
P50	1	50	50
P57	1	57	57
P72	1	72	72
P169	1	169	169
TAMBAHAN	1	70	70
TOTAL			820

**NOTES**

- DIGUNAKAN TIANG PANCANG BETON PRESTRESS MUTU BETON K-500
- DIMENSI TIANG PANCANG
- 450X450 DENGAN 6-WIRE STRAND #1/2" STRESS RELIEVED 270K, ASTM A-416 L EFF=15.500M DARI DASAR GALIAN 2 L EFF=21.850M DARI DASAR GALIAN 2
- ELEV. RATA RATA TANAH EXISTING = -2.500
- ELEV. DASAR GALIAN 2 = -4.650
- ELEV. UJUNG TIANG = -26.500
- P 1 TIANG = 130 TON
- DIBUKTIKAN DENGAN LOADING TEST
- JUMLAH TITIK PILE = 750NOS+70NOS(TAMBAHAN)
- MUTU TULANGAN
  - # < 13mm, U-24 (POLOS)
  - D > 13mm, U-40 (DEFORM)
  - D = 10mm, U-40 (DEFORM)
- SEMUA UKURAN DALAM MILIMETER
- SEMUA ELEVASI DALAM METER
- KEDALAMAN TIANG DISESUAIKAN DG KONTUR - TIANG TERTANAM PERTANGGAL 29-11-2009

TP. PREBORING YG SUDAH TERPANCANG : 27 TITIK (SISTEM PREBORING TIDAK DITERUSKAN LAGI)  
 TP. 450X450 L. EFF=21.850 M TANPA PREBORING = 52 TITIK  
 TP. 450X450 L. EFF=15.350 M TANPA PREBORING = 741 TITIK

1	PERUBAHAN JARAK CENTRE LINE COLUMN	22/10/09
2	GENERAL REVISION	14/12/09
3	-PENAMBAHAN TITIK PANCANG : 70 TITIK -SISTEM PREBORING TIDAK DITERUSKAN LAGI	16/12/09

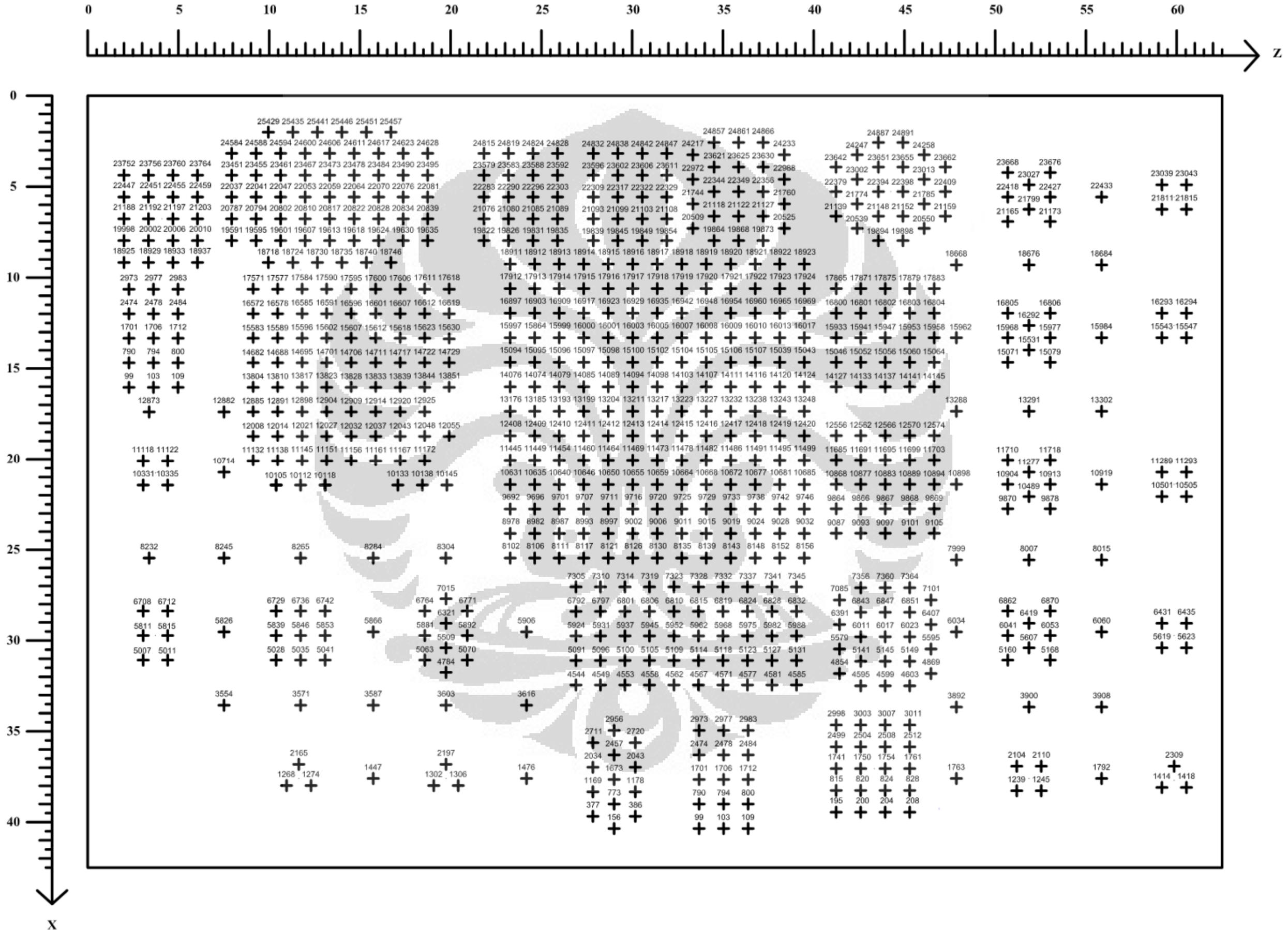
NO.	REVISI	FARAP

KONTRAKTOR PANCANG

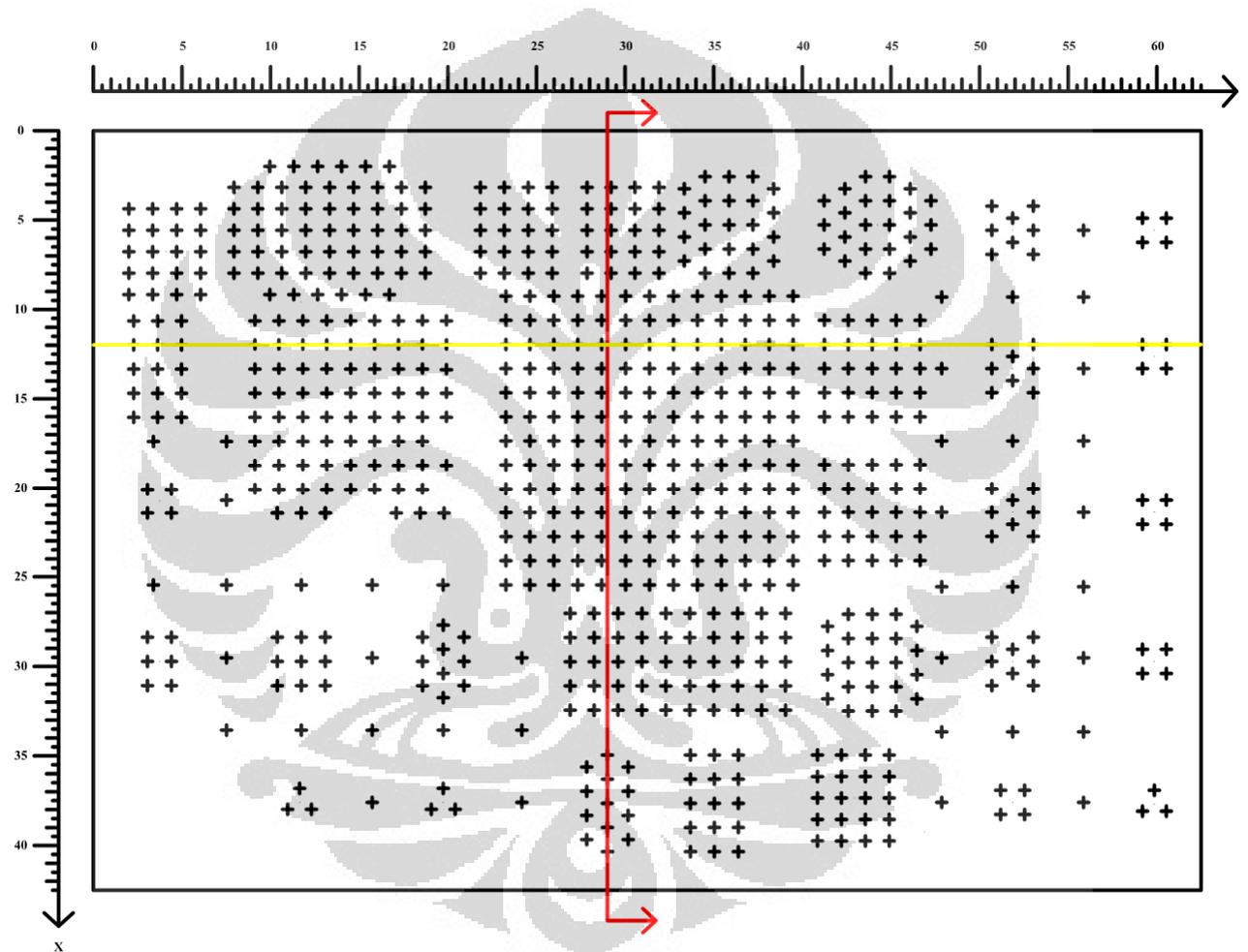
JUDUL GAMBAR  
SHOP DRAWING  
DENAH TITIK PANCANG

PAKET PEKERJAAN  
PEMANGCANGAN TIANG PANCANG

DIBUAT	TTD	DISETUIJI	TTD
Felisa, ST			
DIPERIKSA	TTD	DIKETAHUI	TTD
Ir. Rachmad Harjadi			
DIKELUARKAN UNTUK :	SKALA	1 : 200	
FOR CONSTRUCTION			
TGL.	27-01-2010	NO. GAMBAR	
NO. FILE	SD-02	SD-TXR-02	

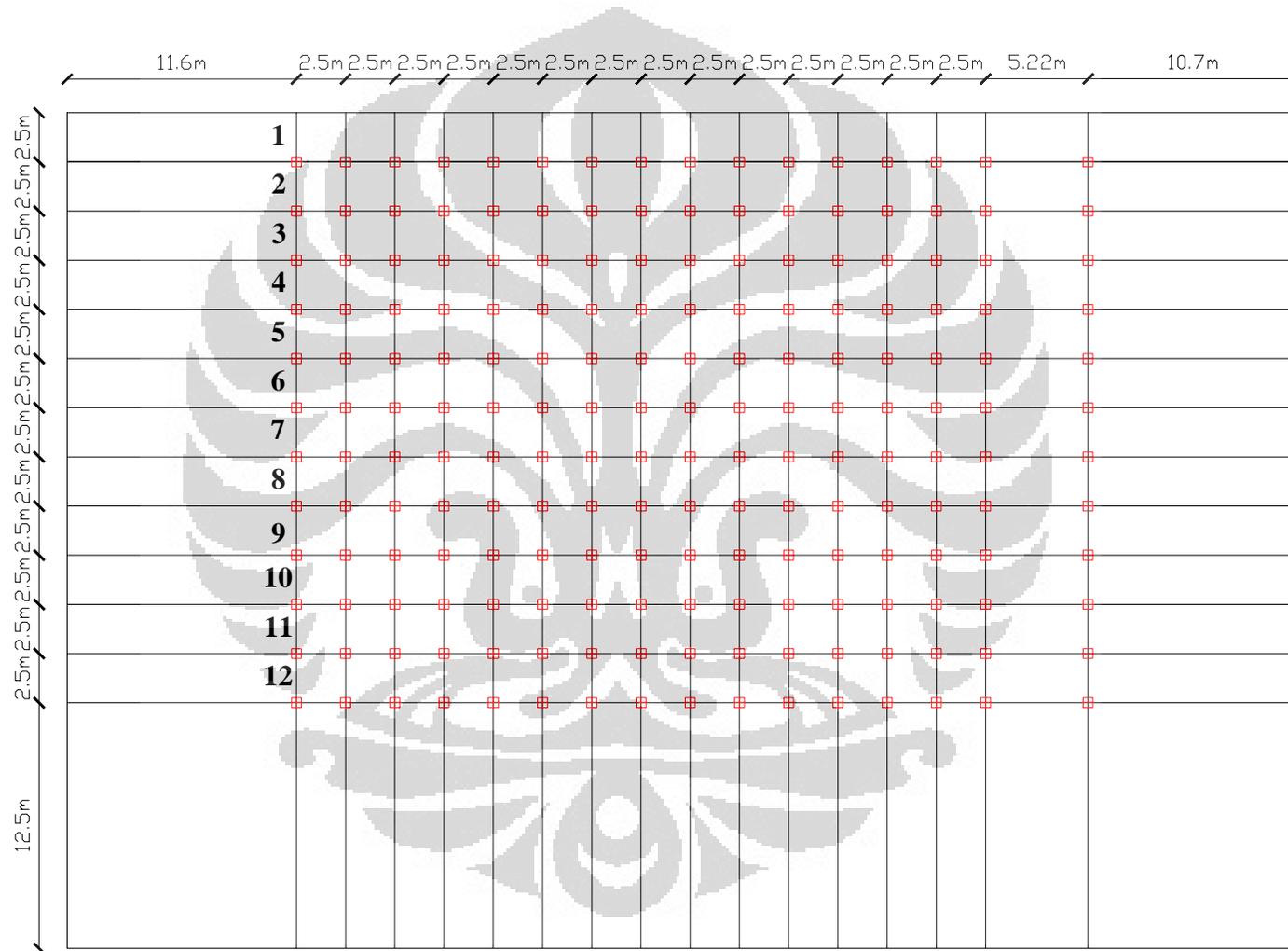


Lampiran 1.3 Ilustrasi Potongan pada Pemodelan PLAXIS Versi 8.2

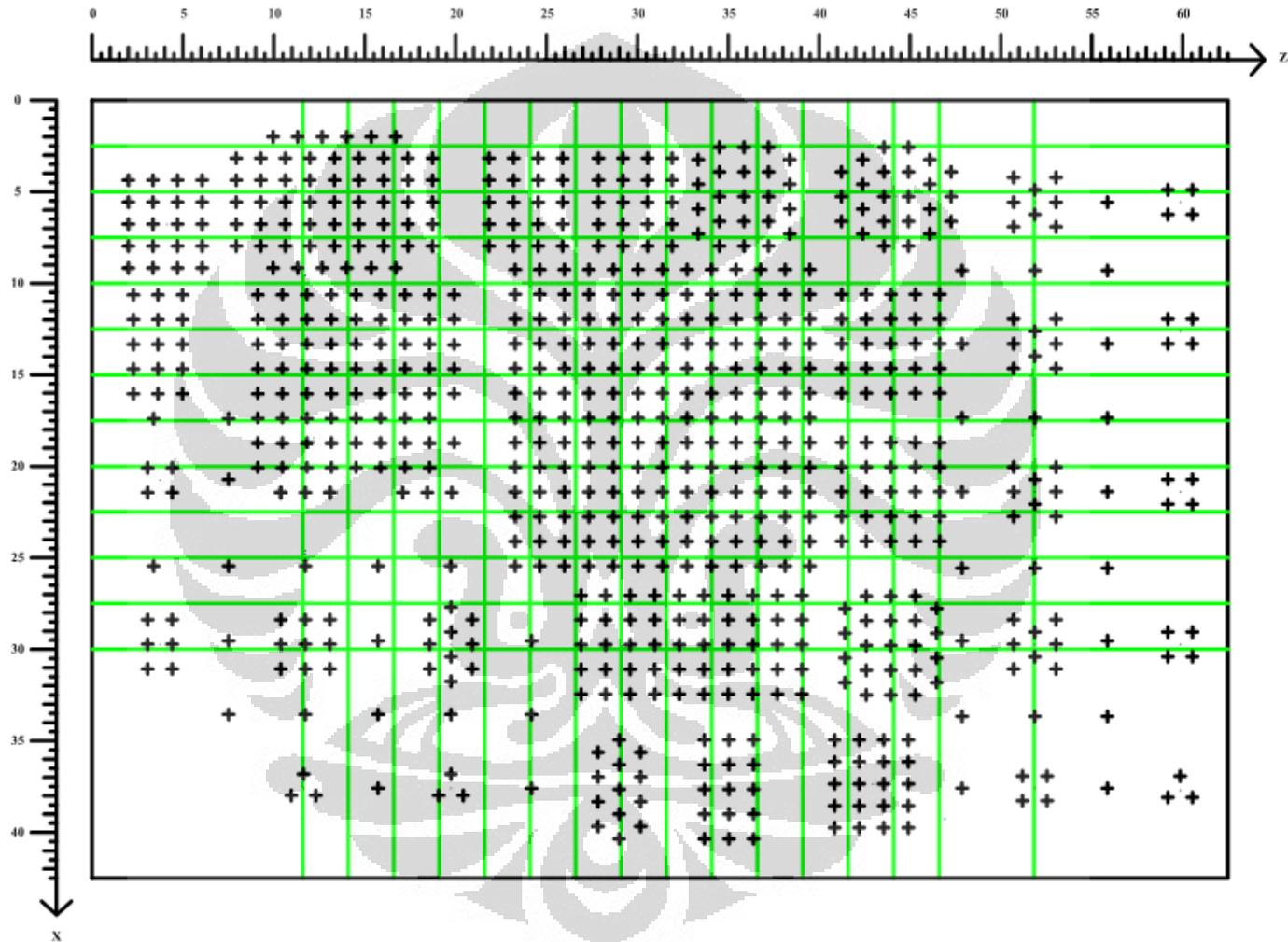


Keterangan: Garis merah menggambarkan potongan yang dimodelkan dalam PLAXIS Versi 8.2

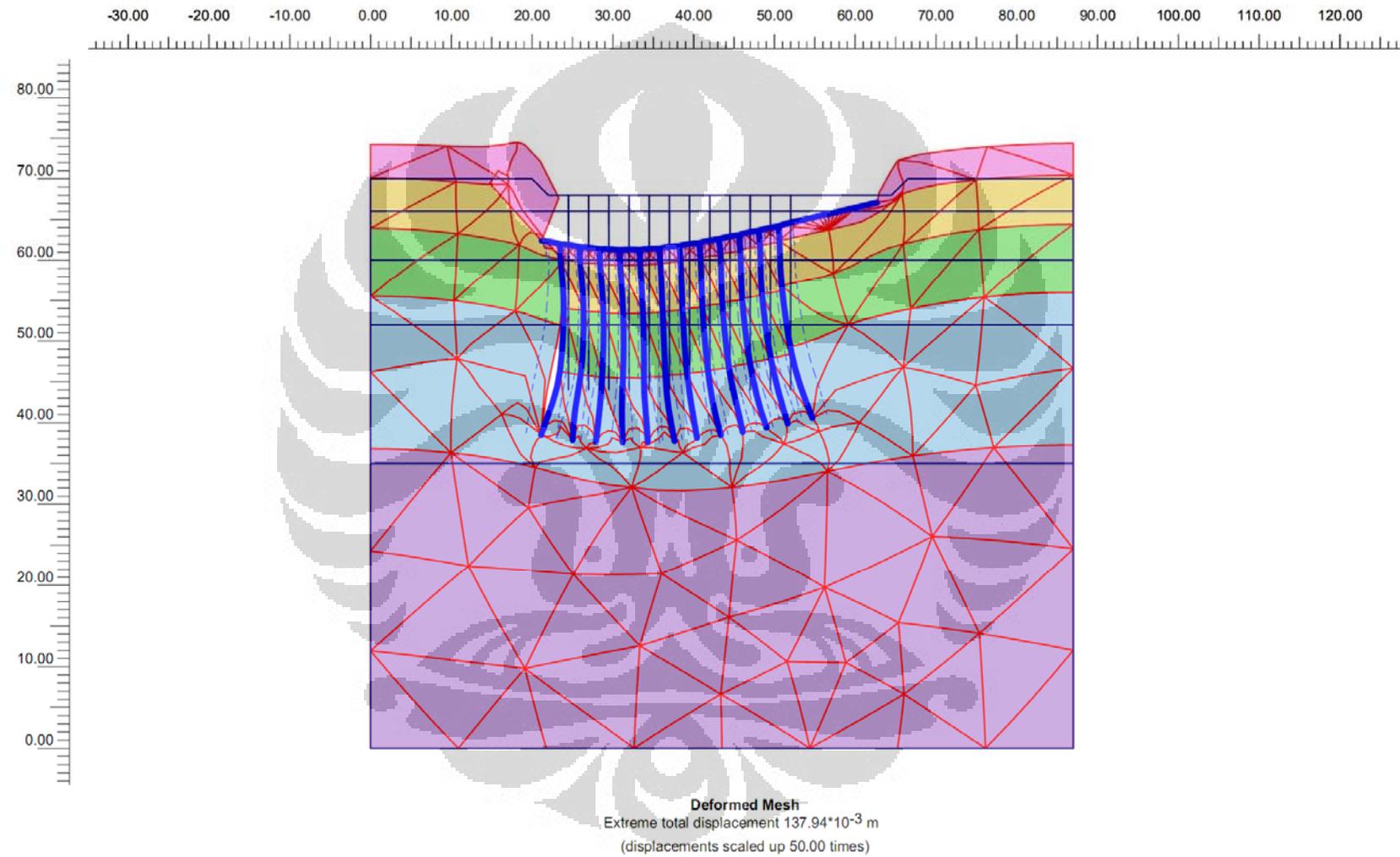
Lampiran 1.4 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model A



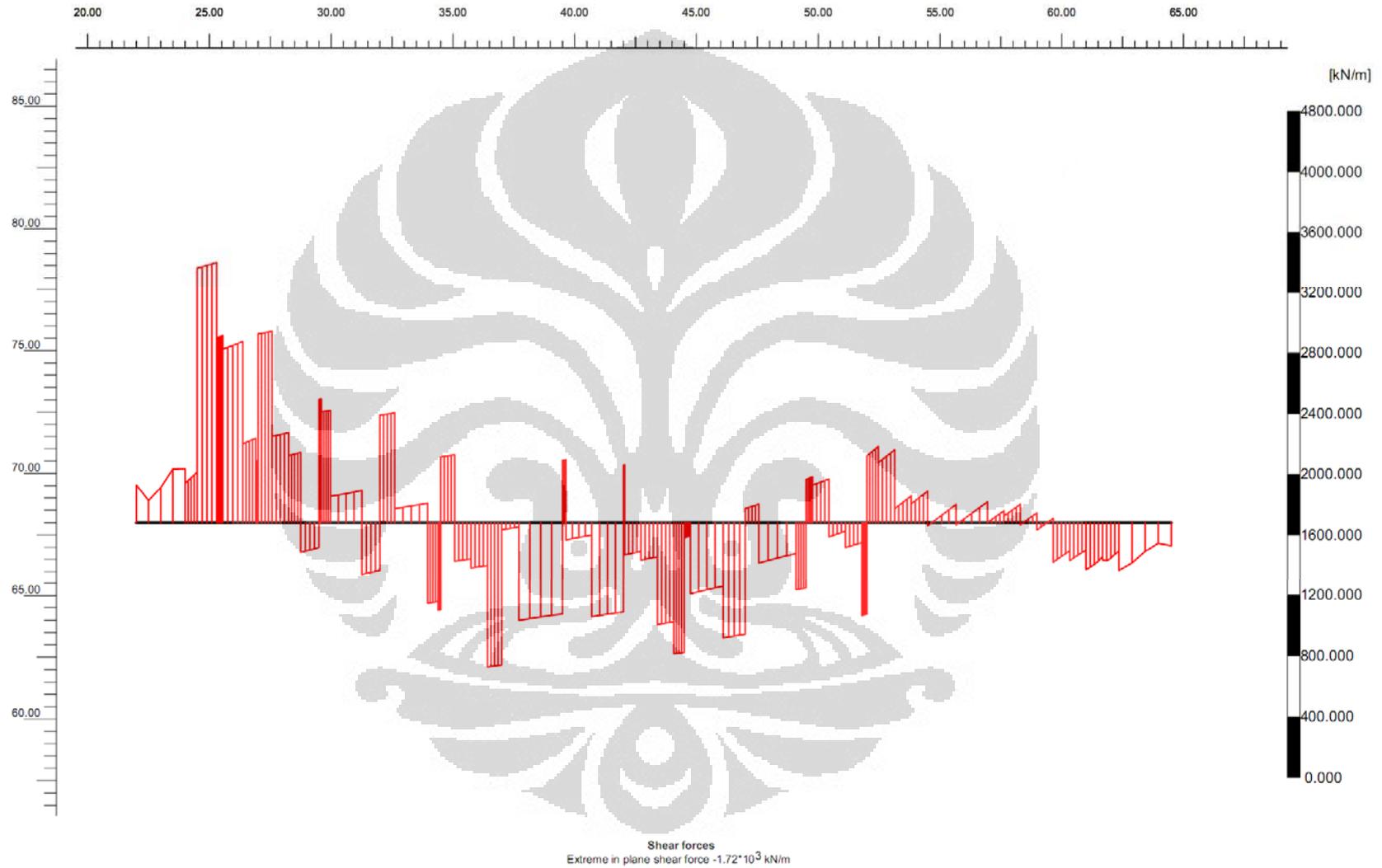
Lampiran 1.5 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model A terhadap Lokasi Beban



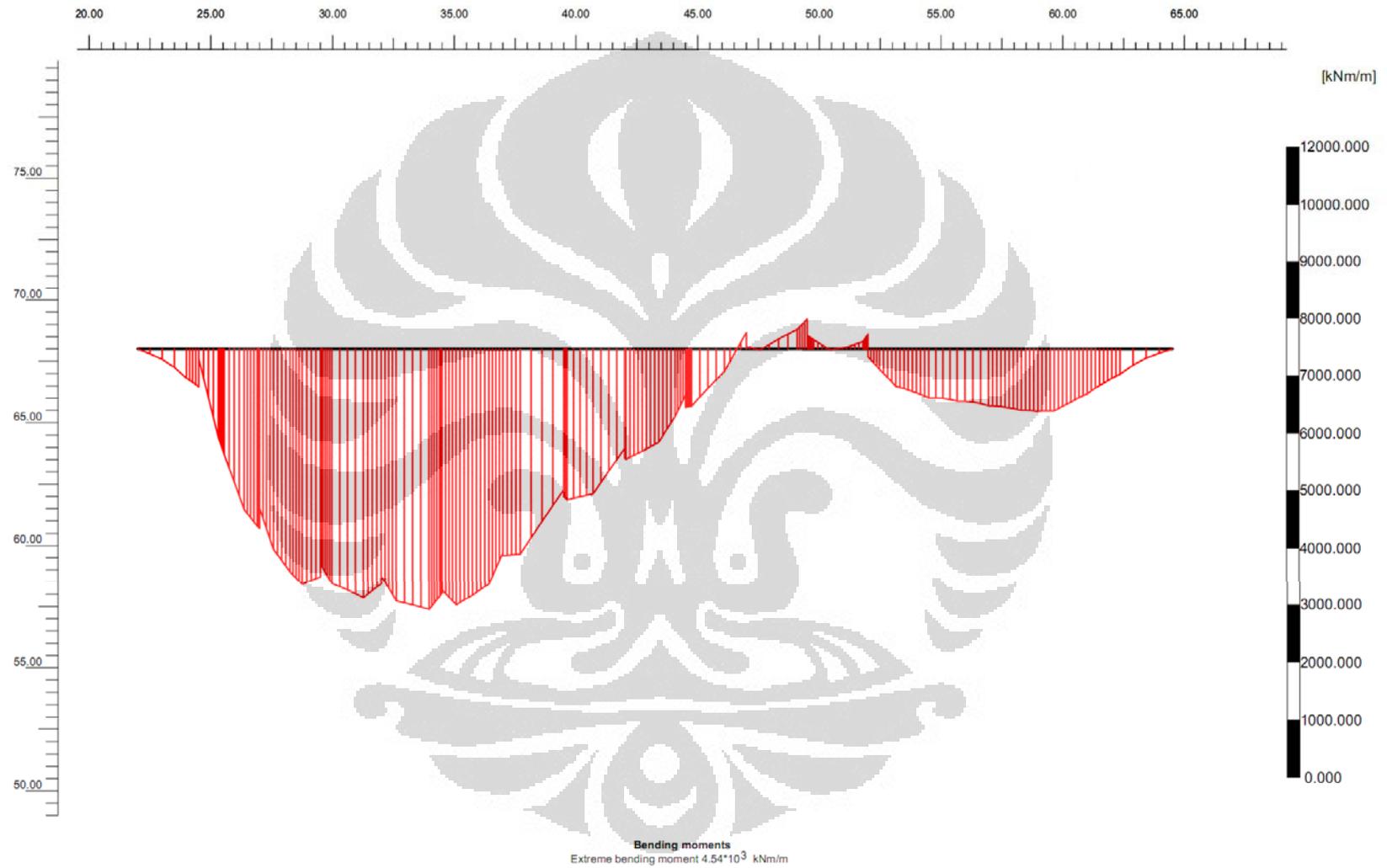
Keterangan: Titik pertemuan antara dua buah garis hijau merupakan letak tiang

Lampiran 1.6 Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – *Mesh* Terdeformasi

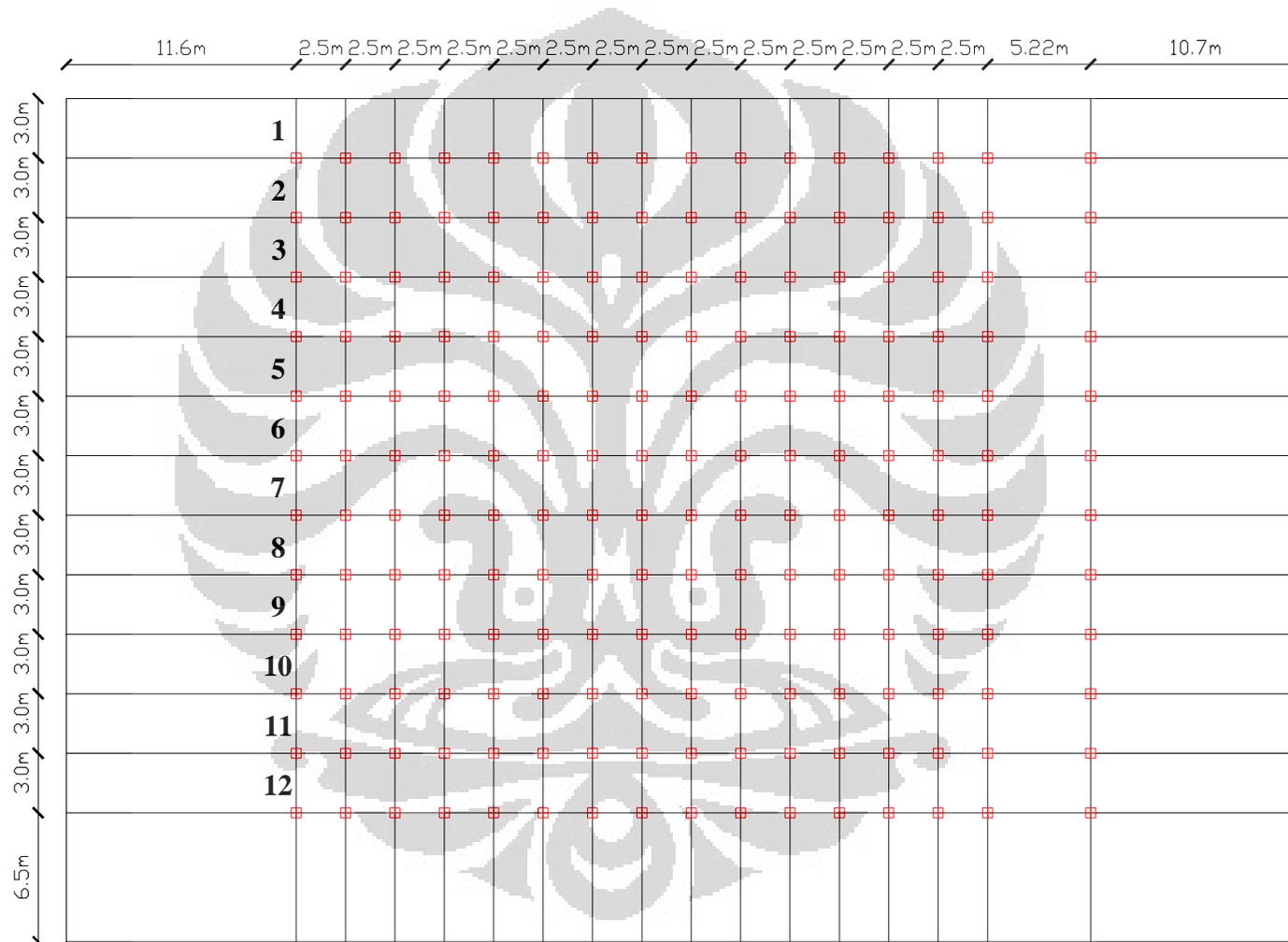
## Lampiran 1.7 Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – Distribusi Gaya Geser Rakit



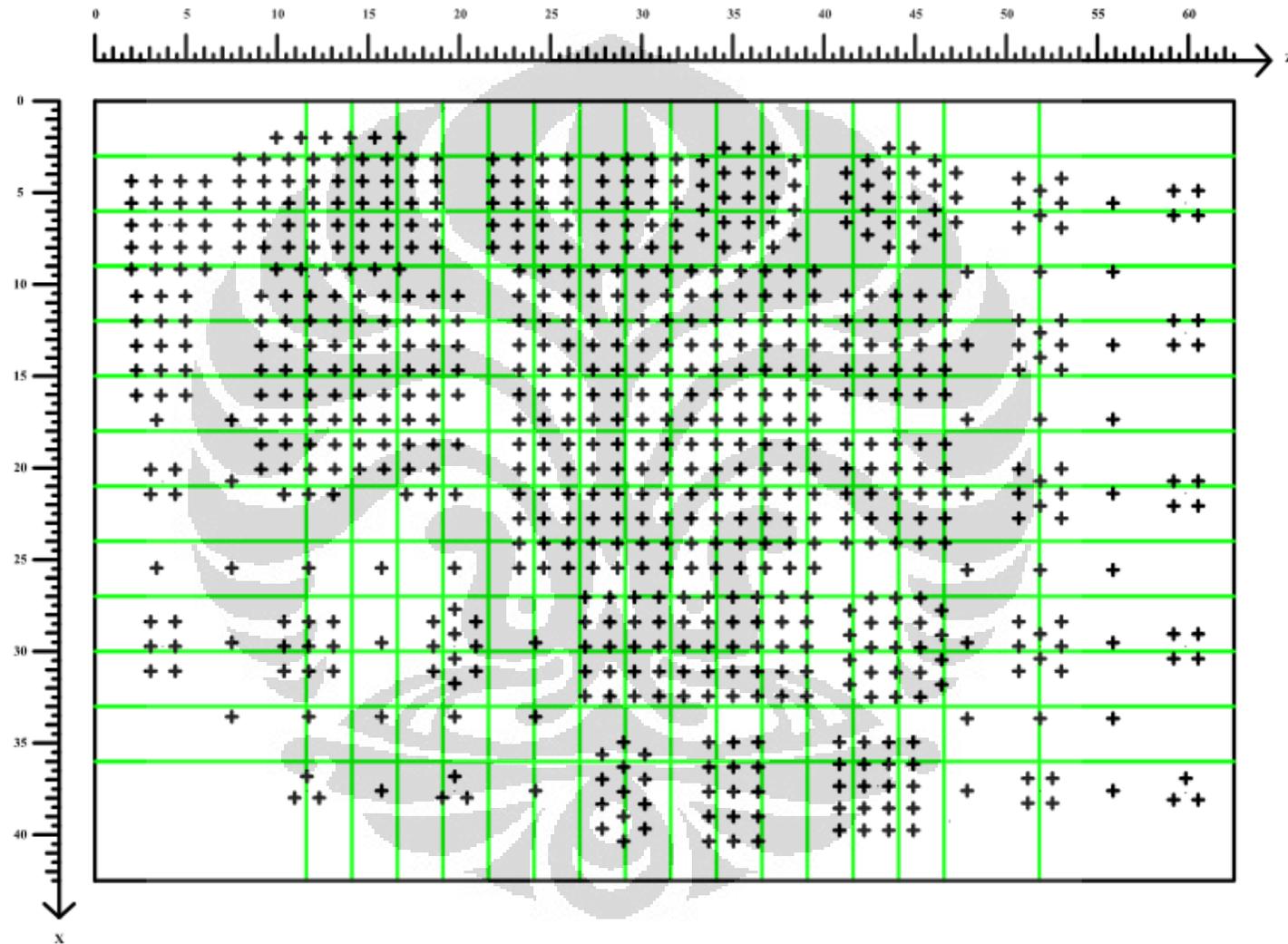
## Lampiran 1.8 Output PLAXIS Versi 8.2: Model A – Distribusi Momen Lentur Rakit



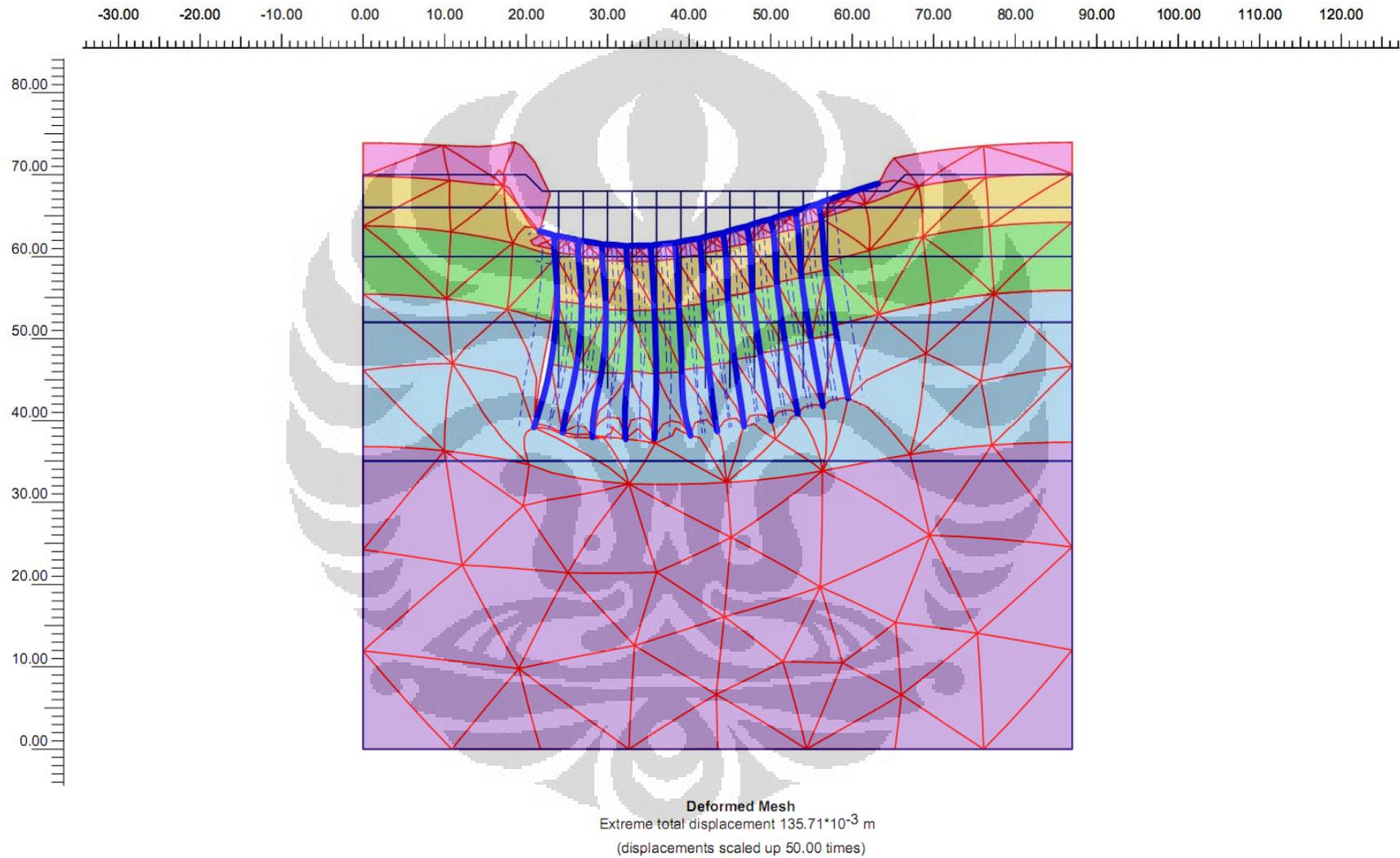
Lampiran 1.9 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model B



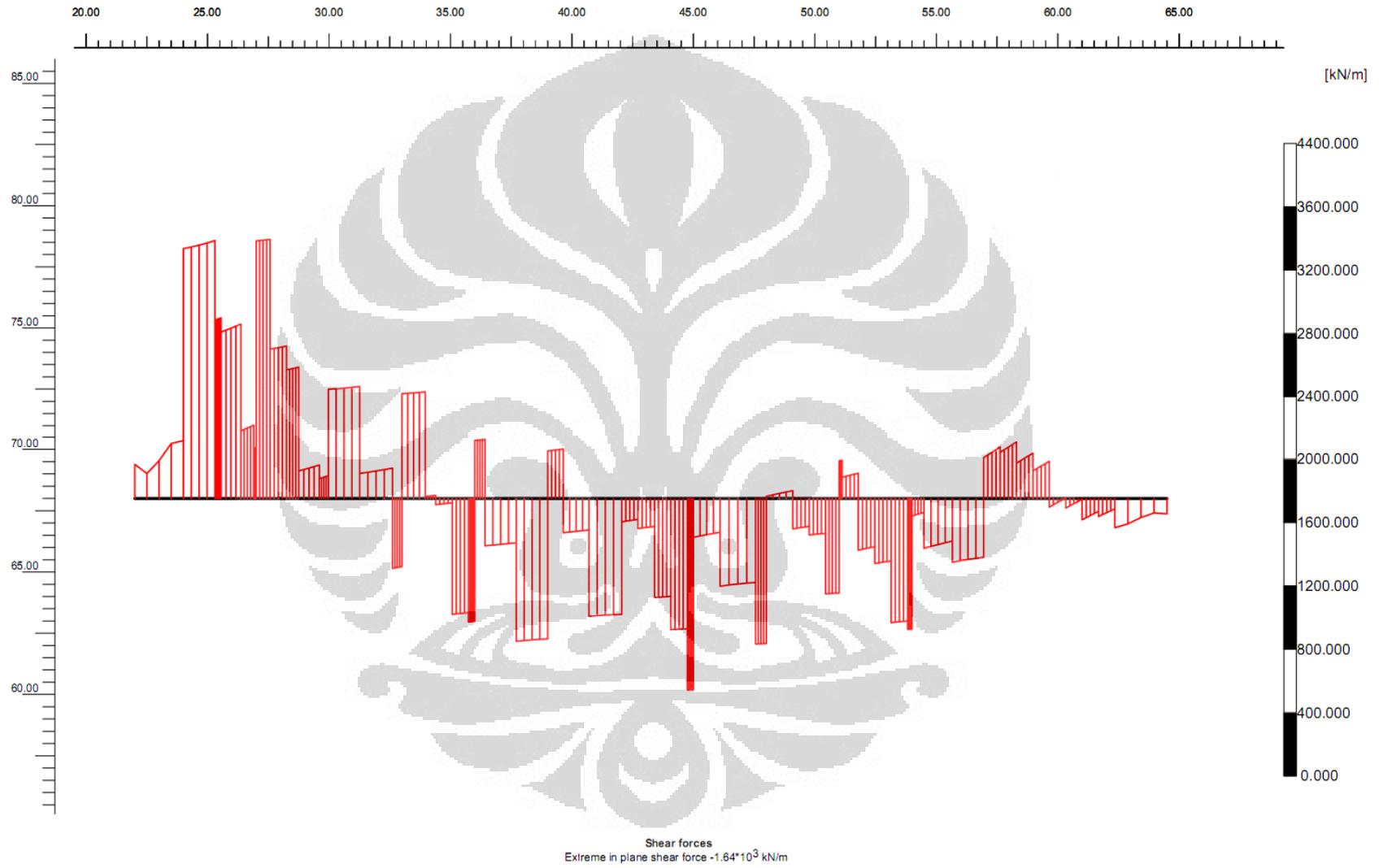
Lampiran 1.10 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model B terhadap Lokasi Beban



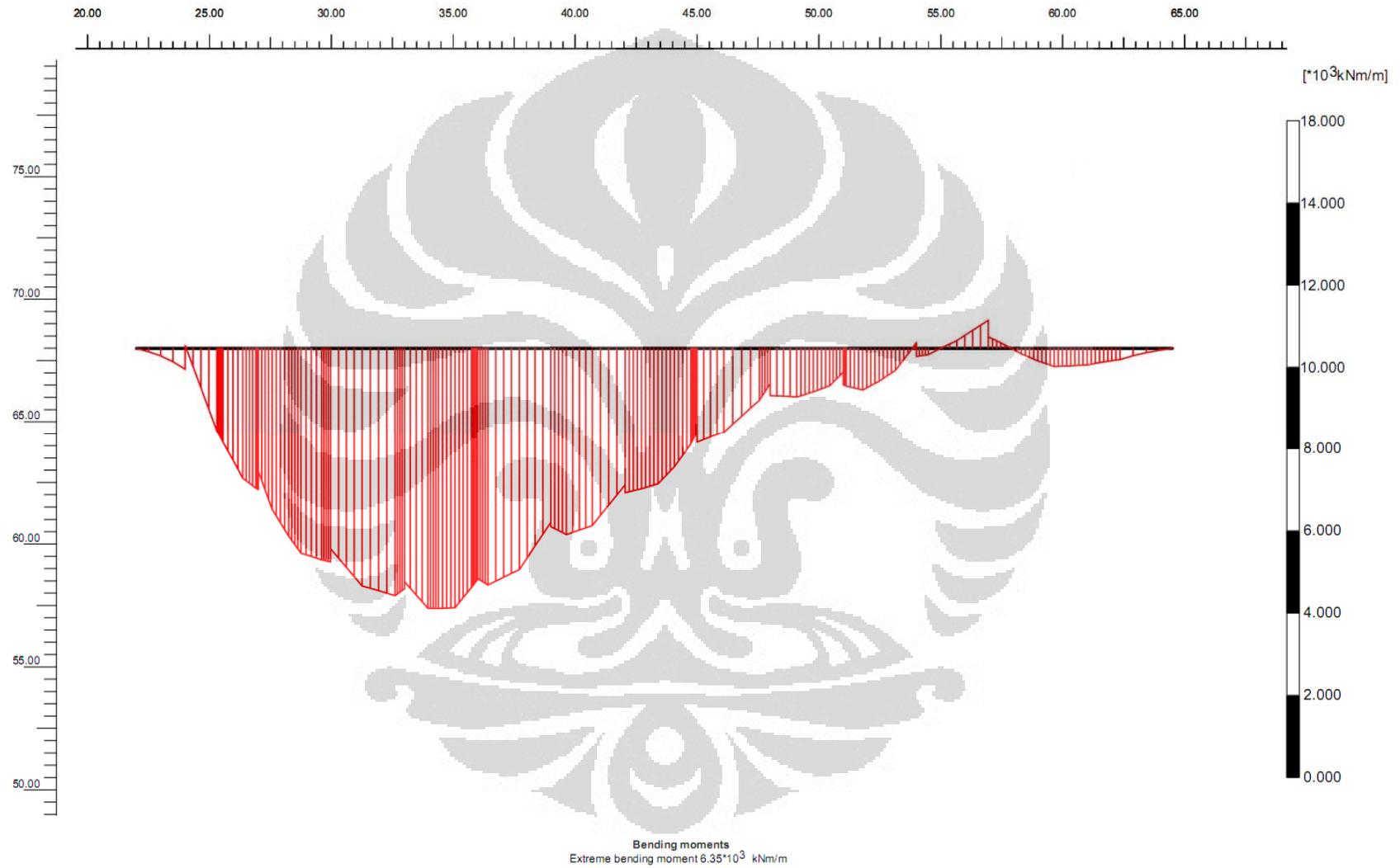
Keterangan: Titik pertemuan antara dua buah garis hijau merupakan letak tiang

Lampiran 1.11 Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – *Mesh* Terdeformasi

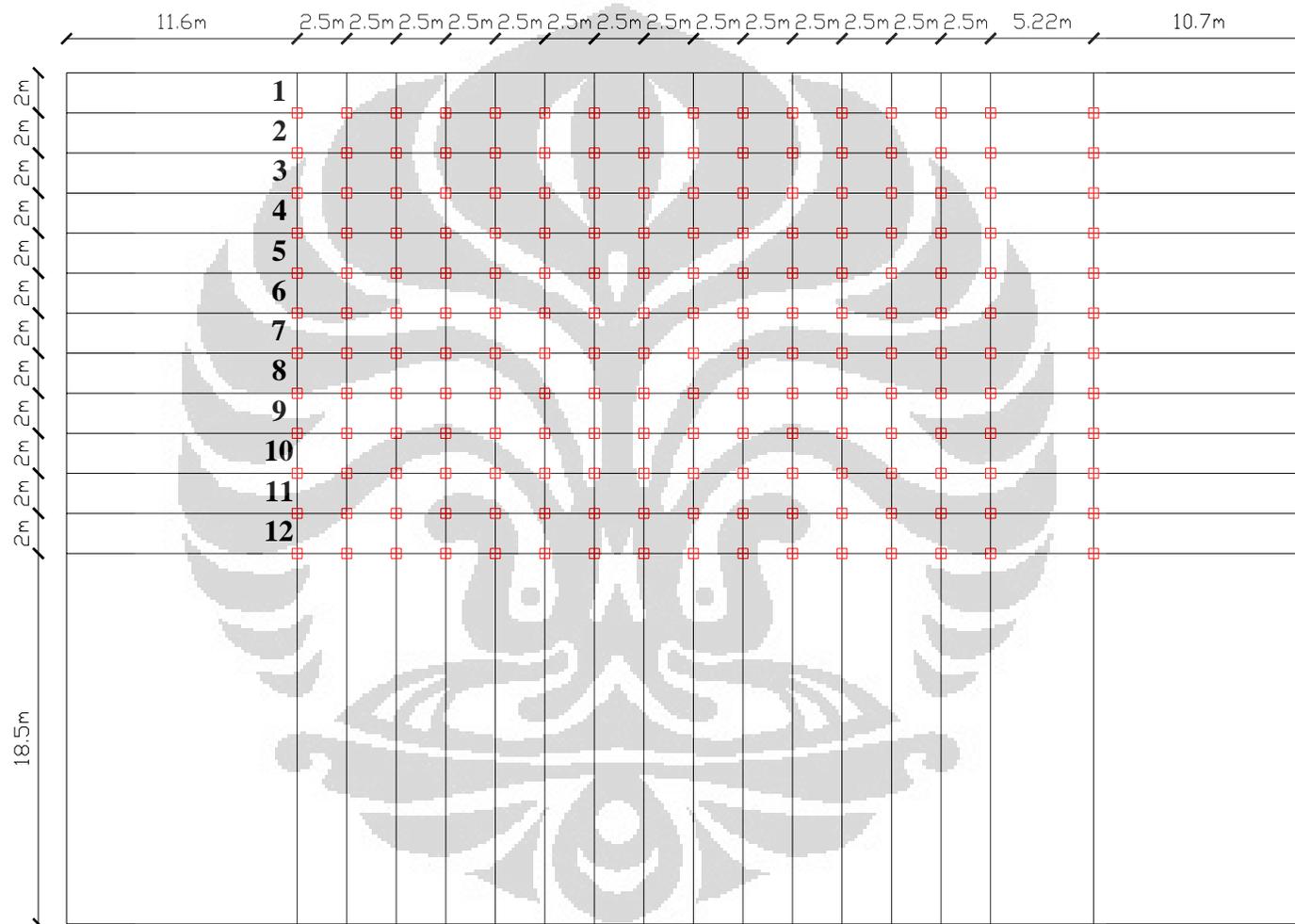
Lampiran 1.12 Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – Distribusi Gaya Geser Rakit



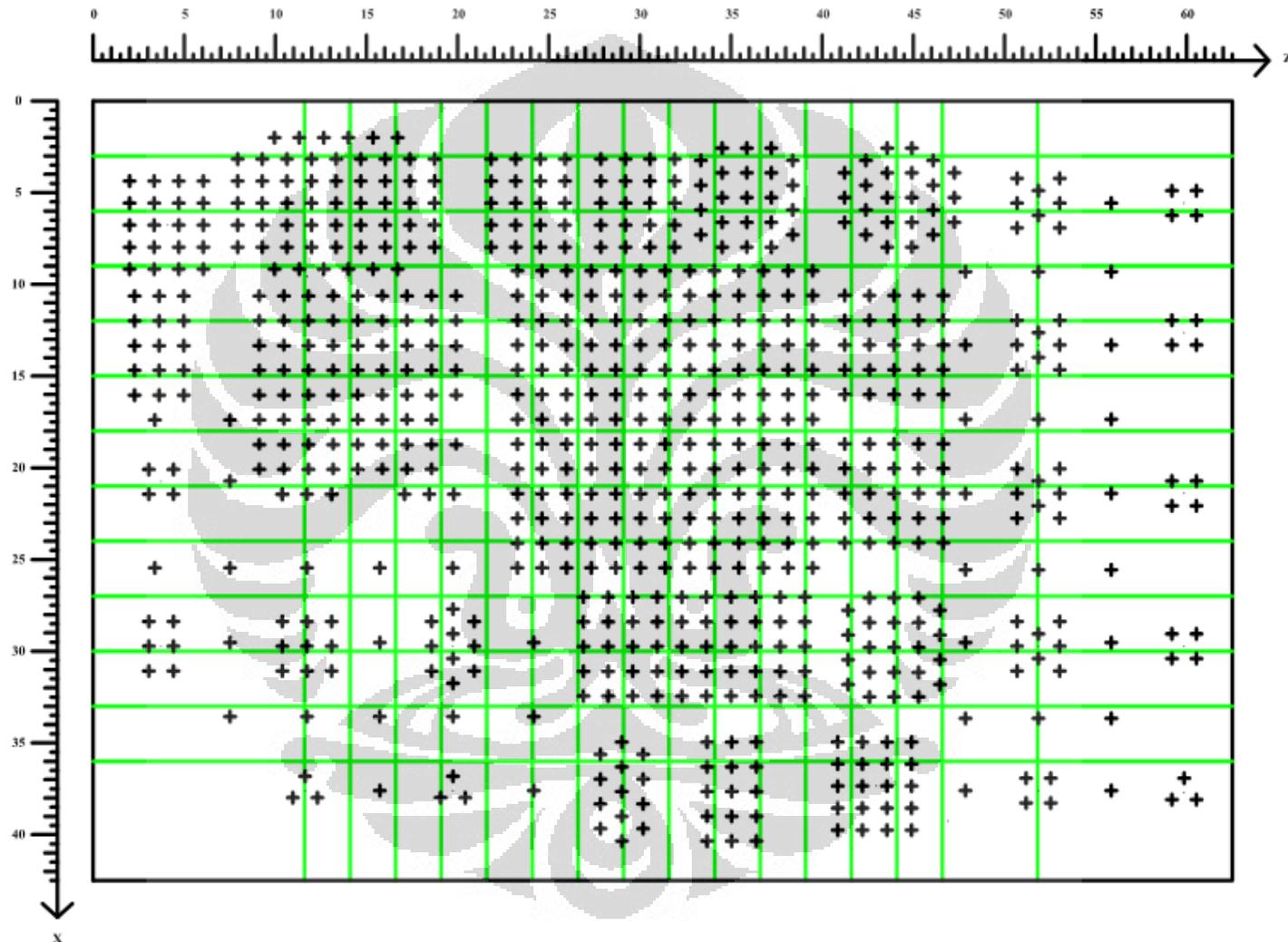
Lampiran 1.13 Output PLAXIS Versi 8.2: Model B – Distribusi Momen Lentur Rakit



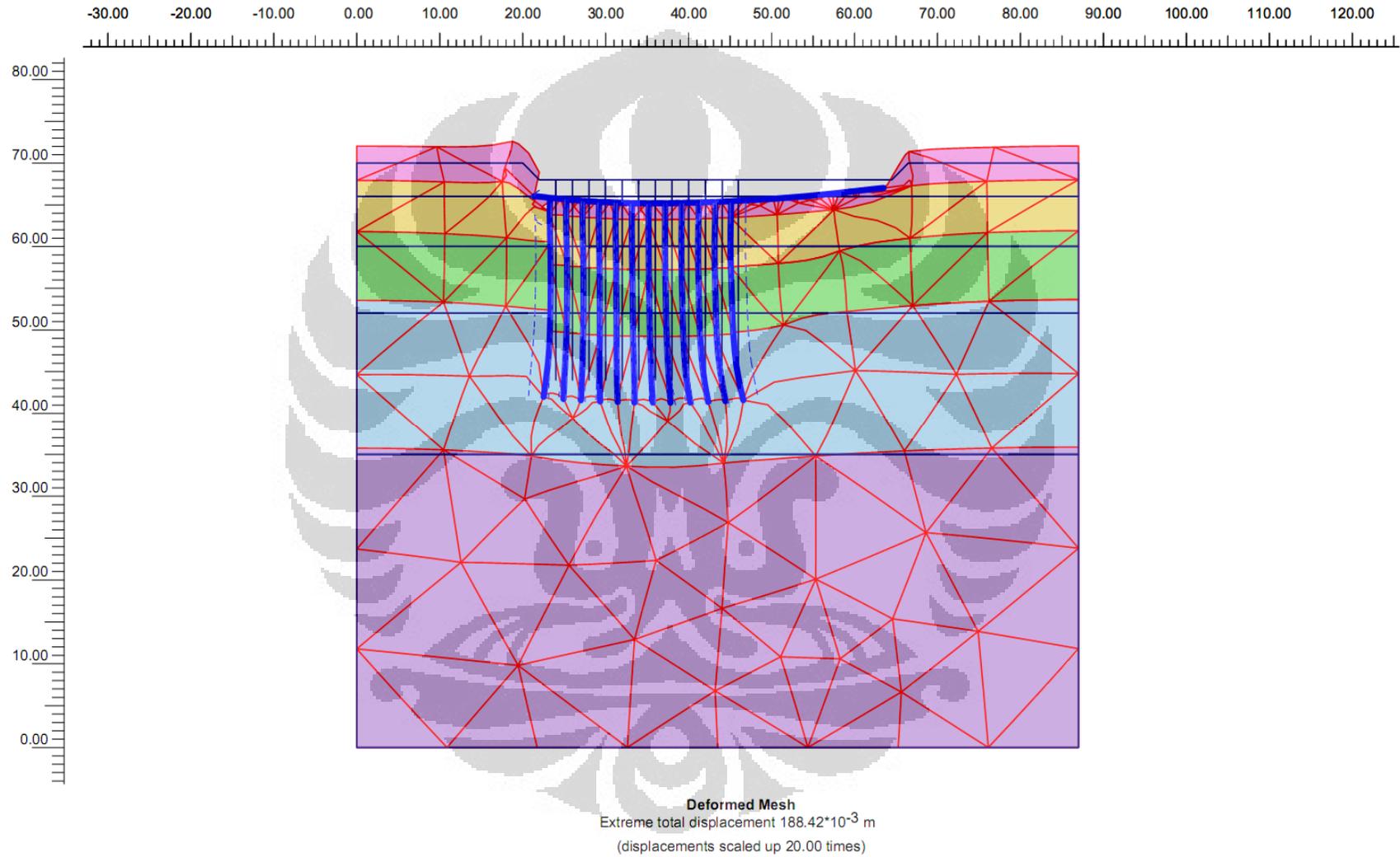
Lampiran 1.14 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model C



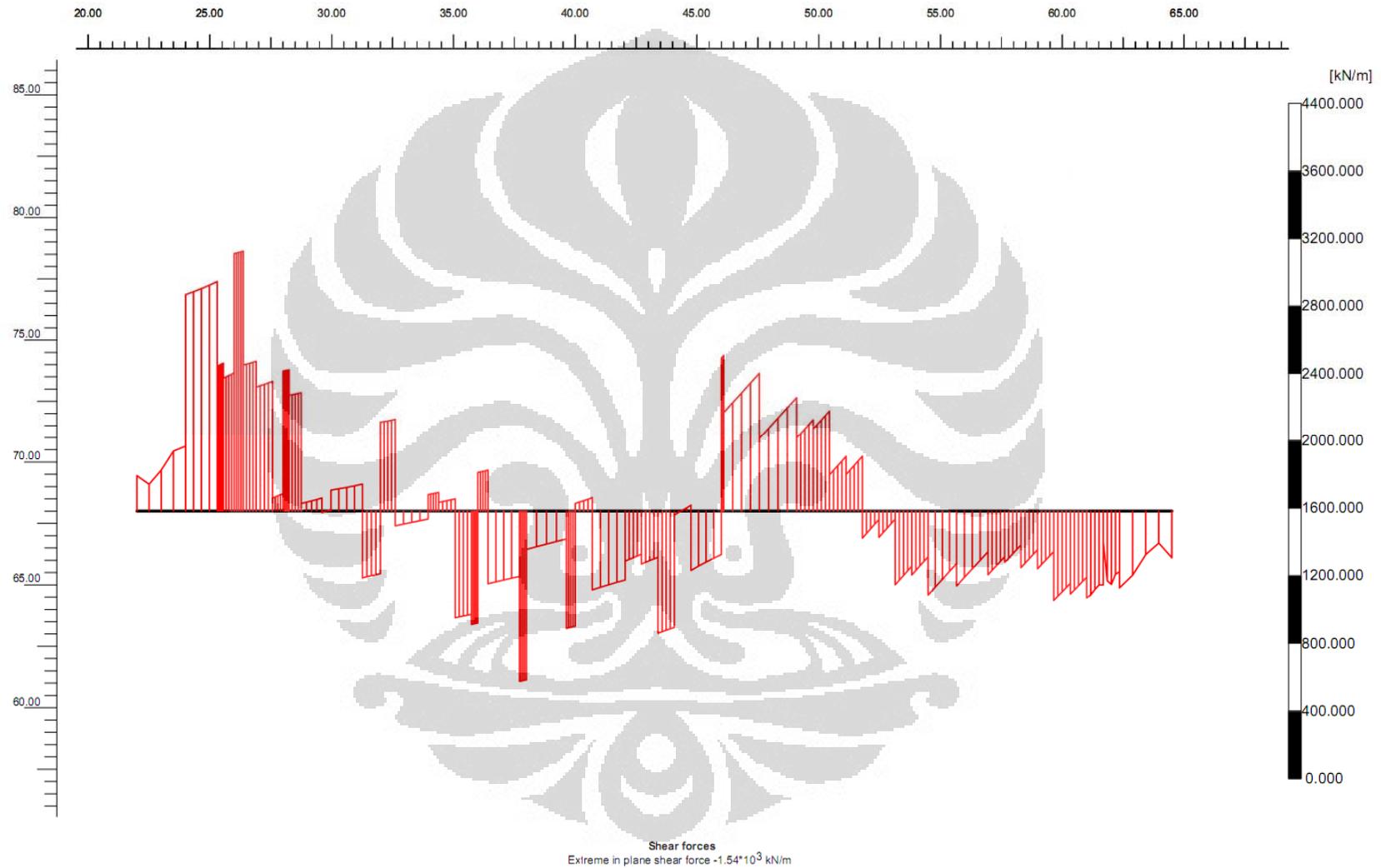
Lampiran 1.15 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model C terhadap Lokasi Beban



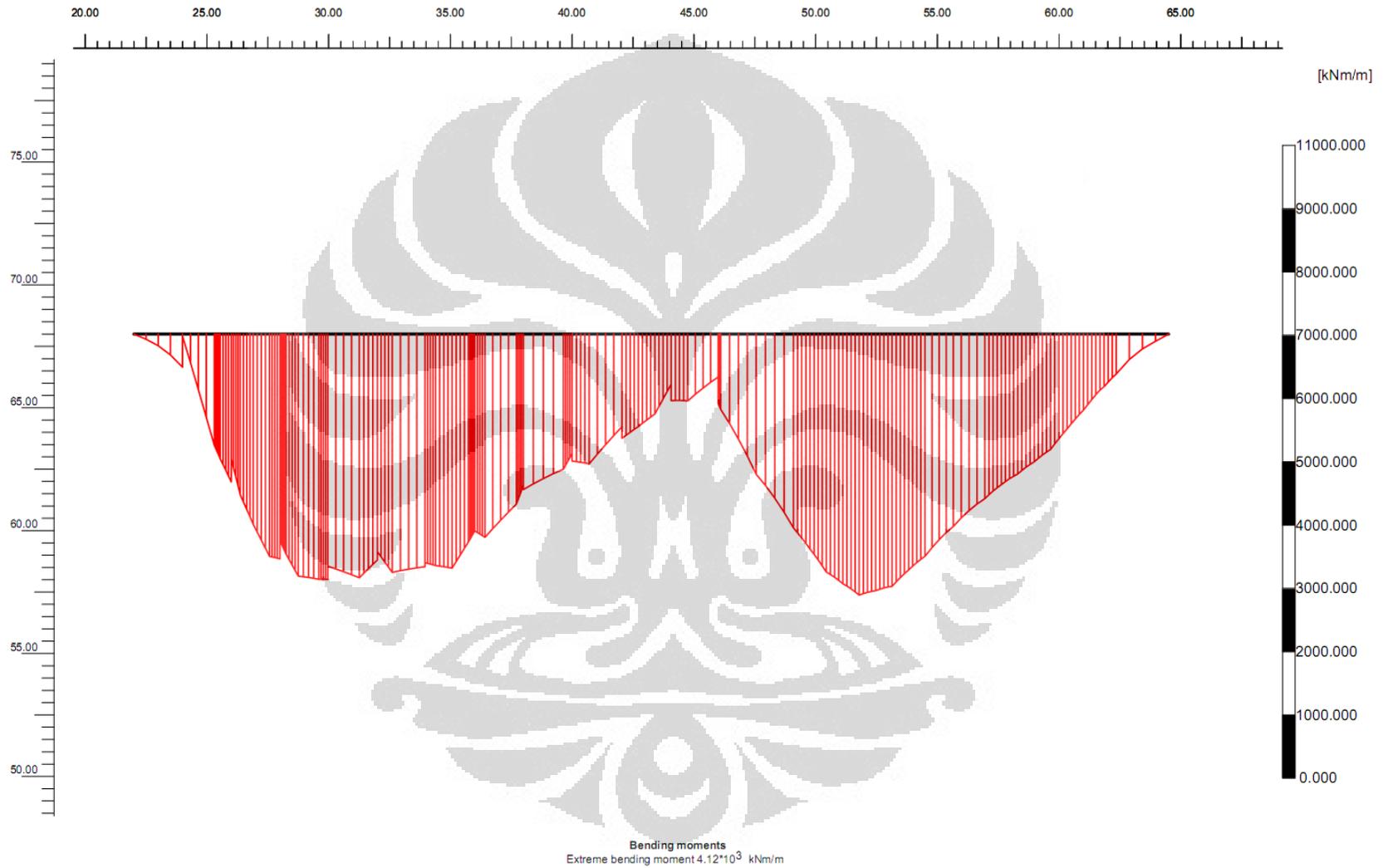
Keterangan: Titik pertemuan antara dua buah garis hijau merupakan letak tiang

Lampiran 1.16 Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – *Mesh* Terdeformasi

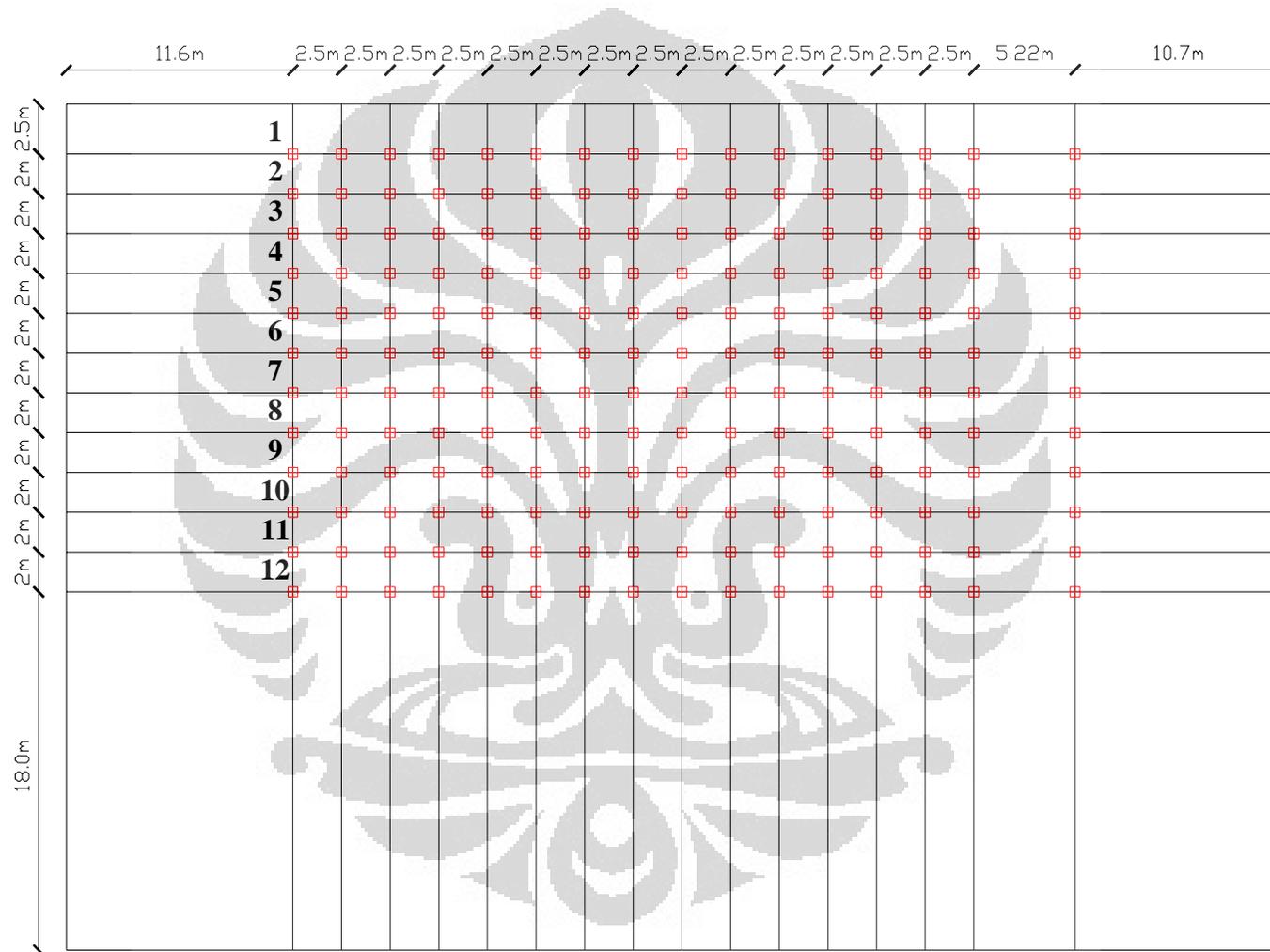
Lampiran 1.17 Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – Distribusi Gaya Geser Rakit



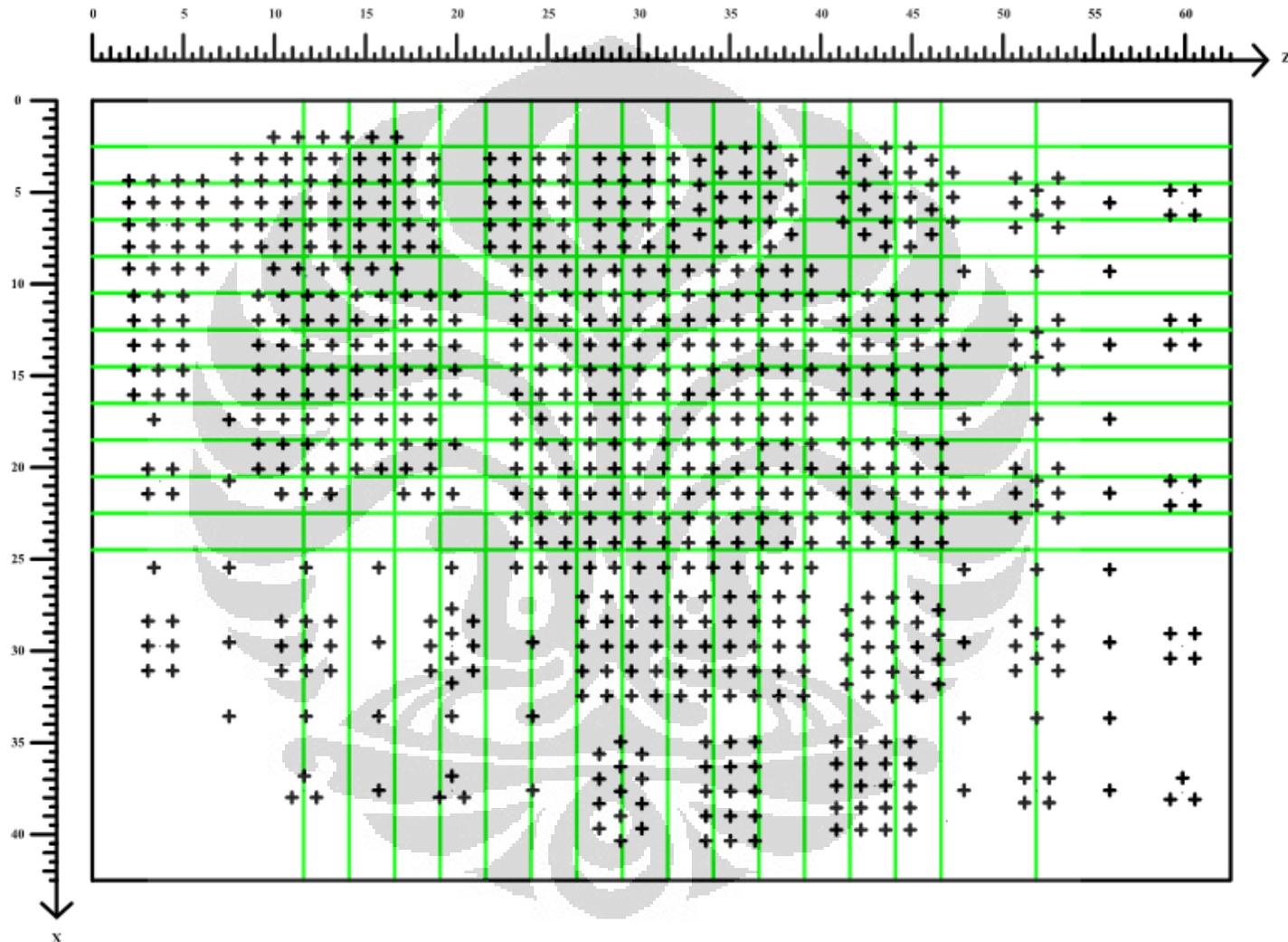
Lampiran 1.18 Output PLAXIS Versi 8.2: Model C – Distribusi Momen Lentur Rakit



Lampiran 1.19 Output PLAXIS Versi 8.2: Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model D

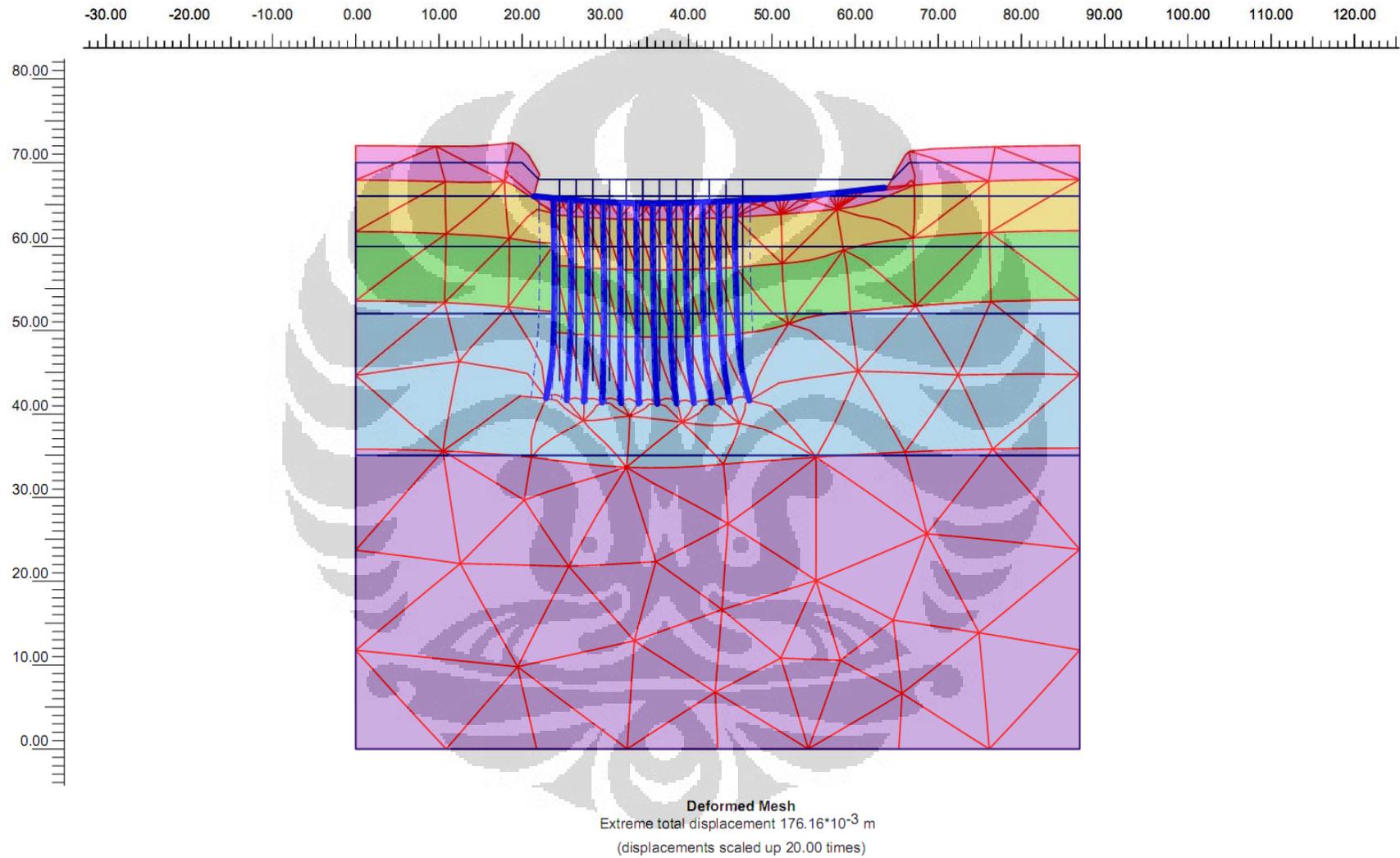


Lampiran 1.20 Tata Letak Konfigurasi Tiang pada Model D terhadap Lokasi Beban

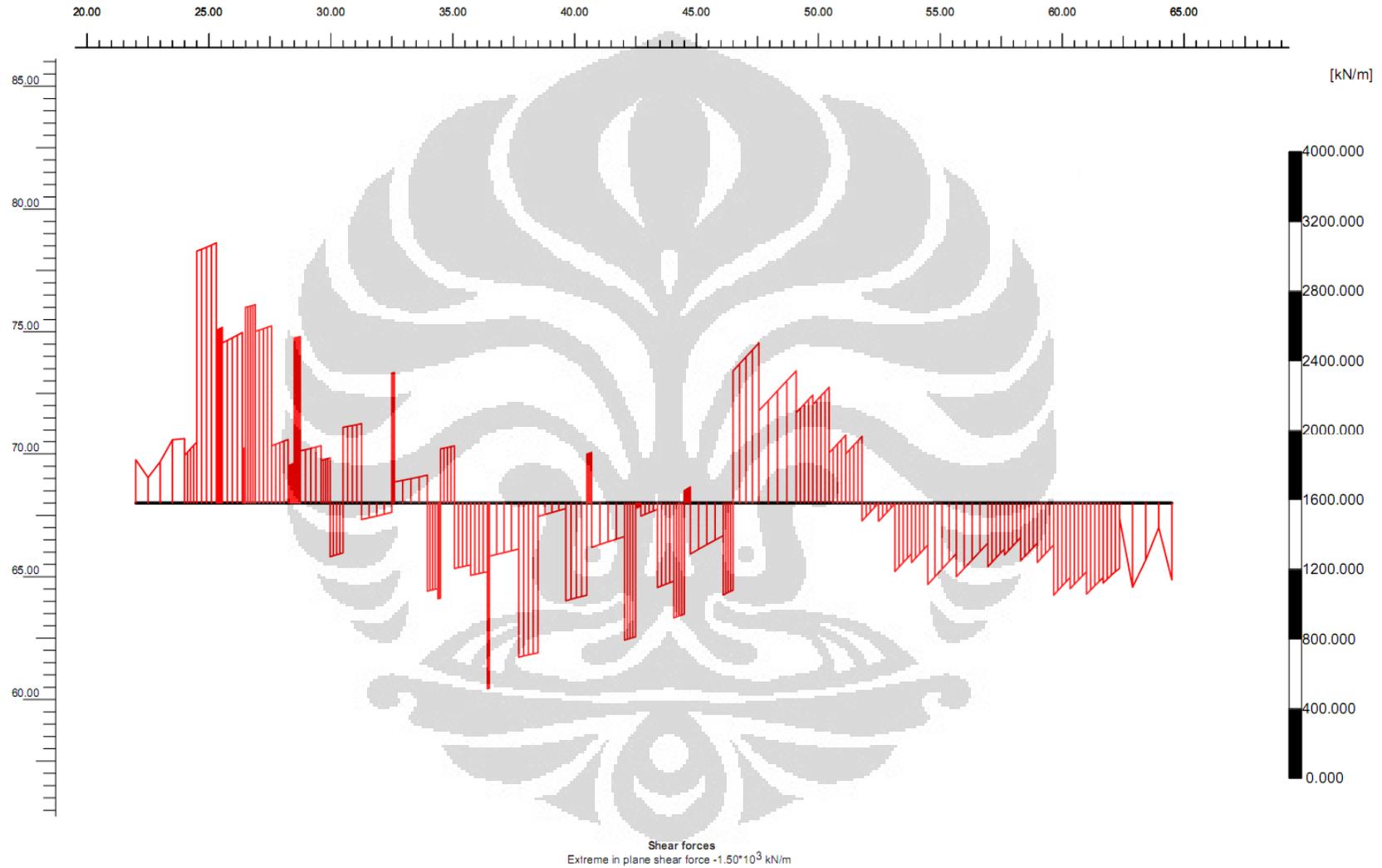


Keterangan: Titik pertemuan antara dua buah garis hijau merupakan letak tiang

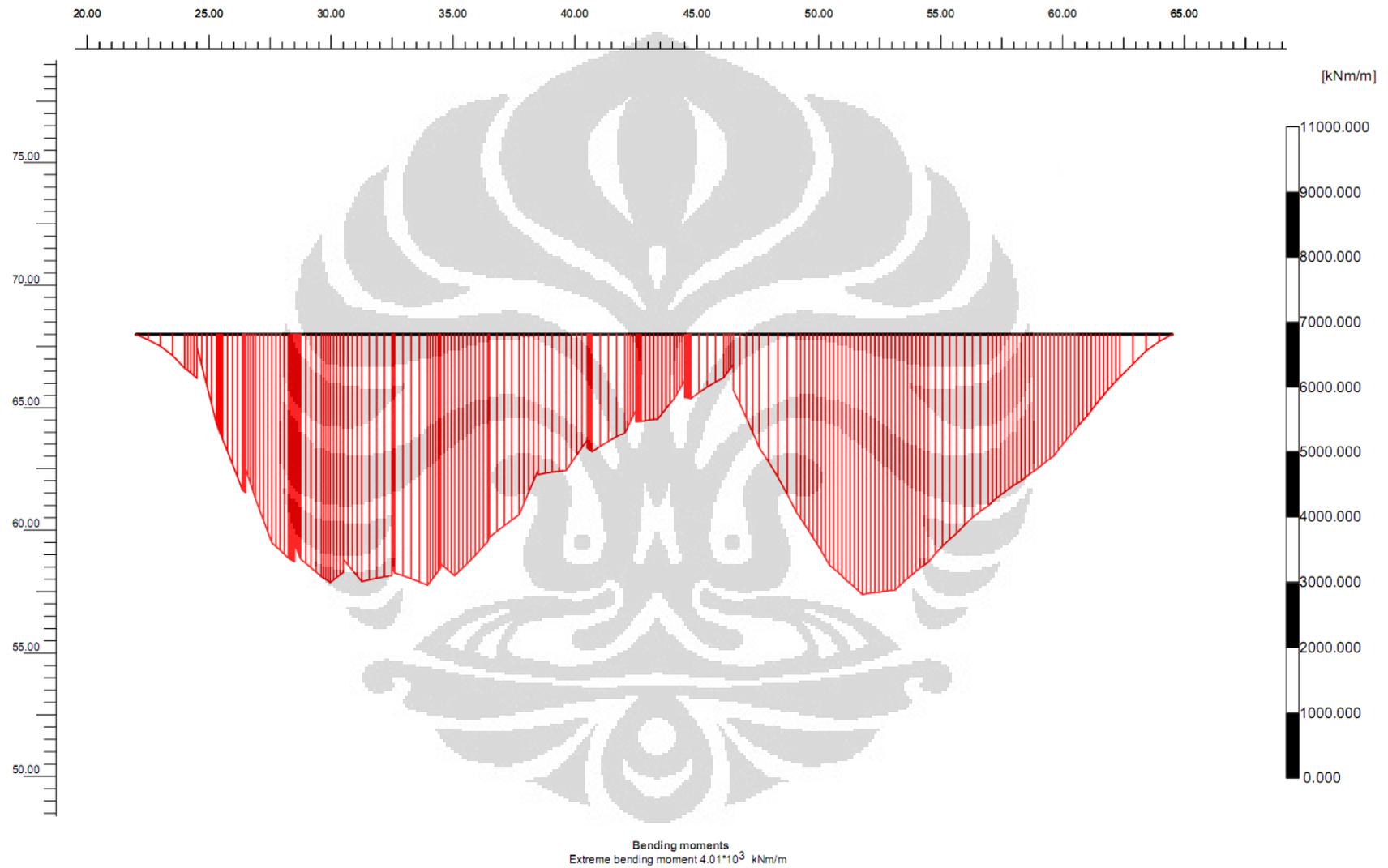
Lampiran 1.21 Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – Mesh Terdeformasi



Lampiran 1.22 Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – Distribusi Gaya Geser Rakit



Lampiran 1.23 Output PLAXIS Versi 8.2: Model D – Distribusi Momen Lentur Rakit



Lampiran 2.1 Detail Besar Beban pada Setiap Nodal

No. Nodal	N (kN)						
99	1004	1792	966	4567	1100	5811	1086
103	1004	2034	1047	4571	1098	5815	1088
109	1001	2043	1052	4577	1096	5826	1095
153	1000	2104	992	4581	1093	5839	1097
195	973	2110	989	4585	1090	5846	1098
200	971	2165	983	4595	1091	5853	1102
204	969	2197	996	4599	1089	5866	1106
208	966	2309	971	4603	1073	5881	1106
377	1008	2457	1055	4784	1104	5892	1118
386	1013	2474	1064	4854	1100	5906	1133
773	1023	2478	1068	4869	1070	5924	1138
790	1031	2484	1064	5007	1069	5931	1139
794	1033	2499	1034	5011	1074	5937	1142
800	1029	2504	1036	5028	1075	5945	1147
815	997	2508	1034	5035	1076	5952	1151
820	996	2512	1027	5041	1084	5962	1152
824	995	2711	1057	5063	1085	5968	1149
828	989	2720	1061	5070	1111	5975	1143
1169	1030	2956	1064	5091	1113	5982	1140
1178	1035	2973	1072	5096	1115	5988	1145
1239	972	2977	1074	5100	1117	6011	1148
1245	969	2983	1072	5105	1121	6017	1147
1268	969	2998	1050	5109	1124	6023	1130
1274	969	3003	1049	5114	1127	6034	1112
1302	979	3007	1048	5118	1124	6041	1109
1306	982	3011	1044	5123	1120	6053	1099
1414	953	3554	1027	5127	1118	6060	1113
1418	953	3571	1029	5131	1119	6321	1148
1447	974	3587	1034	5141	1120	6391	1147
1476	1007	3603	1041	5145	1118	6407	1118
1673	1049	3616	1057	5149	1089	6419	1103
1701	1054	3892	1057	5160	1086	6431	1104
1706	1064	3900	1042	5168	1095	6435	1102
1712	1053	3908	1032	5509	1132	6708	1102
1741	1020	4544	1090	5579	1128	6712	1110
1750	1025	4549	1091	5595	1100	6729	1111
1754	1022	4553	1093	5607	1085	6736	1112
1761	1011	4558	1096	5619	1085	6742	1119
1768	999	4562	1099	5623	1087	6764	1119

## Lampiran 2.1 Detail Besar Beban pada Setiap Nodal (lanjutan)

No. Nodal	N (kN)						
6771	1139	8121	1159	9725	1203	10877	1236
6792	1142	8126	1163	9729	1204	10883	1253
6797	1144	8130	1169	9733	1204	10889	1239
6801	1147	8135	1174	9738	1195	10894	1224
6806	1151	8139	1174	9742	1187	10898	1213
6810	1157	8143	1163	9746	1187	10904	1187
6815	1163	8148	1158	9864	1201	10913	1177
6819	1156	8152	1159	9866	1216	10919	1163
6824	1149	8156	1138	9867	1229	11118	1198
6828	1146	8232	1142	9868	1218	11122	1199
6832	1157	8245	1150	9869	1207	11132	1210
6843	1162	8265	1155	9870	1169	11138	1220
6847	1158	8284	1151	9878	1160	11145	1230
6851	1126	8304	1161	10105	1200	11151	1235
6862	1122	8978	1163	10112	1208	11156	1239
6870	1125	8982	1167	10118	1212	11161	1238
7015	1156	8987	1171	10133	1216	11167	1239
7085	1158	8993	1171	10138	1215	11172	1240
7101	1140	8997	1176	10145	1212	11277	1192
7305	1144	9002	1178	10331	1183	11289	1170
7310	1147	9006	1179	10335	1184	11293	1171
7314	1150	9011	1183	10489	1175	11445	1237
7319	1156	9015	1186	10501	1153	11449	1242
7323	1162	9019	1186	10505	1152	11454	1254
7328	1168	9024	1176	10631	1213	11460	1263
7332	1161	9028	1171	10635	1218	11464	1269
7337	1153	9032	1171	10640	1228	11469	1261
7341	1150	9087	1184	10646	1241	11473	1252
7345	1167	9093	1196	10650	1249	11478	1246
7356	1174	9097	1208	10655	1241	11482	1247
7360	1170	9101	1199	10659	1233	11486	1249
7364	1164	9105	1189	10664	1229	11491	1234
7999	1139	9692	1185	10668	1229	11495	1222
8007	1128	9696	1188	10672	1230	11499	1221
8015	1144	9701	1194	10677	1216	11685	1236
8102	1145	9707	1203	10681	1205	11691	1254
8106	1148	9711	1208	10685	1205	11695	1269
8111	1151	9716	1207	10714	1197	11699	1255
8117	1155	9720	1204	10868	1219	11703	1243

## Lampiran 2.1 Detail Besar Beban pada Setiap Nodal (lanjutan)

No. Nodal	N (kN)						
11710	1206	13176	1279	14120	1265	15531	1307
11718	1194	13185	1289	14124	1272	15543	1235
12008	1226	13193	1307	14127	1296	15547	1236
12014	1238	13199	1310	14133	1322	15583	1290
12021	1249	13204	1307	14137	1340	15589	1297
12027	1255	13211	1299	14141	1331	15596	1304
12032	1258	13217	1283	14145	1317	15602	1309
12037	1257	13223	1274	14682	1272	15607	1317
12043	1259	13227	1273	14688	1279	15612	1325
12048	1264	13232	1273	14695	1286	15618	1342
12055	1262	13238	1260	14701	1290	15623	1364
12408	1258	13243	1249	14706	1298	15630	1354
12409	1265	13248	1253	14711	1305	15752	1288
12410	1279	13280	1274	14717	1318	15757	1295
12411	1286	13291	1238	14722	1333	15763	1293
12412	1287	13302	1209	14729	1329	15864	1334
12413	1280	13804	1255	14915	1271	15933	1362
12414	1267	13810	1262	14919	1276	15941	1419
12415	1260	13817	1270	14923	1274	15947	1483
12416	1259	13823	1276	15039	1277	15953	1431
12417	1260	13828	1284	15043	1292	15958	1391
12418	1247	13833	1287	15046	1327	15962	1366
12419	1236	13839	1298	15052	1364	15968	1326
12420	1236	13844	1311	15056	1398	15977	1305
12556	1252	13851	1309	15060	1376	15984	1261
12562	1270	13996	1253	15064	1353	15997	1328
12566	1282	14000	1257	15071	1300	15999	1347
12570	1273	14004	1255	15079	1280	16000	1347
12574	1263	14070	1296	15094	1312	16001	1343
12873	1233	14074	1303	15095	1318	16003	1339
12882	1237	14079	1317	15096	1330	16005	1333
12885	1240	14085	1317	15097	1329	16007	1327
12891	1249	14089	1315	15098	1324	16008	1324
12898	1258	14094	1307	15100	1319	16009	1322
12904	1264	14098	1295	15102	1310	16010	1302
12909	1271	14103	1288	15104	1306	16013	1284
12914	1273	14107	1287	15105	1304	16017	1246
12920	1280	14111	1287	15106	1304	16292	1150
12925	1293	14116	1274	15107	1288	16293	1246

## Lampiran 2.1 Detail Besar Beban pada Setiap Nodal (lanjutan)

No. Nodal	N (kN)						
16294	1250	17606	1350	18917	1359	20539	1304
16572	1305	17611	1360	18918	1353	20550	1287
16578	1311	17618	1361	18919	1348	20787	1364
16585	1319	17736	1311	18920	1338	20794	1373
16591	1323	17740	1313	18921	1322	20802	1384
16596	1334	17744	1314	18922	1303	20810	1389
16601	1338	17865	1241	18923	1284	20817	1393
16607	1350	17871	1225	18925	1328	20822	1391
16612	1366	17875	1212	18929	1334	20828	1396
16619	1361	17879	1201	18933	1335	20834	1404
16797	1297	17883	1195	18937	1332	20839	1400
16798	1302	17912	1352	19591	1346	21076	1407
16799	1302	17913	1356	19595	1354	21080	1415
16800	1225	17914	1365	19601	1363	21085	1413
16801	1204	17915	1367	19607	1364	21089	1404
16802	1189	17916	1365	19613	1366	21093	1401
16803	1178	17917	1362	19618	1366	21099	1407
16804	1171	17918	1357	19624	1370	21103	1404
16805	1161	17919	1351	19630	1376	21108	1392
16806	1166	17920	1343	19635	1378	21118	1387
16897	1341	17921	1334	19822	1383	21122	1391
16903	1349	17922	1313	19826	1385	21127	1373
16909	1367	17923	1290	19831	1383	21139	1320
16917	1367	17924	1265	19835	1380	21148	1322
16923	1365	18668	1214	19839	1381	21152	1317
16929	1362	18676	1215	19845	1382	21159	1295
16935	1357	18684	1244	19849	1380	21165	1290
16942	1350	18718	1342	19854	1373	21173	1291
16948	1342	18724	1347	19864	1364	21188	1382
16954	1338	18730	1347	19868	1361	21192	1397
16960	1311	18735	1348	19873	1348	21197	1396
16965	1285	18740	1351	19894	1285	21203	1377
16969	1254	18746	1357	19898	1280	21744	1396
17571	1318	18911	1366	19998	1356	21760	1370
17577	1324	18912	1366	20002	1365	21774	1334
17584	1329	18913	1369	20006	1364	21785	1320
17590	1332	18914	1370	20010	1354	21799	1308
17595	1337	18915	1369	20509	1375	21811	1343
17600	1341	18916	1365	20525	1345	21815	1347

## Lampiran 2.1 Detail Besar Beban pada Setiap Nodal (lanjutan)

No. Nodal	N (kN)	No. Nodal	N (kN)	No. Nodal	N (kN)
22037	1378	23013	1343	24217	1421
22041	1388	23027	1331	24233	1401
22047	1402	23039	1364	24247	1368
22053	1407	23043	1368	24258	1358
22059	1411	23451	1389	24584	1401
22064	1412	23455	1400	24588	1407
22070	1425	23461	1414	24594	1417
22076	1438	23467	1420	24600	1425
22081	1426	23473	1425	24606	1431
22283	1431	23478	1425	24611	1431
22290	1446	23484	1432	24617	1433
22296	1445	23490	1440	24623	1438
22303	1427	23495	1435	24628	1438
22309	1425	23579	1438	24815	1445
22317	1434	23583	1446	24819	1449
22322	1431	23588	1445	24824	1448
22329	1414	23592	1434	24828	1442
22344	1412	23596	1432	24832	1439
22349	1428	23602	1435	24838	1439
22356	1399	23606	1432	24842	1436
22379	1343	23611	1421	24847	1430
22394	1360	23621	1418	24857	1426
22398	1355	23625	1423	24861	1425
22409	1322	23630	1407	24866	1416
22418	1317	23642	1361	24887	1377
22427	1318	23651	1367	24891	1374
22433	1326	23655	1363	25429	1420
22447	1388	23662	1343	25435	1428
22451	1398	23668	1338	25441	1437
22455	1397	23676	1339	25446	1439
22459	1386	23752	1395	25451	1440
22972	1411	23756	1400	25457	1442
22988	1388	23760	1400		
23002	1355	23764	1395		

## Lampiran 2.2 Besar Beban dalam Pemodelan PLAXIS Versi 8.2

<b>Koordinat x (m)*</b>	<b>Beban Vertikal (kN/m)</b>
24.00	138
25.17	502
25.55	89
26.37	675
26.90	153
27.57	693
28.25	151
28.75	660
29.60	85
29.97	567
31.26	554
32.61	632
33.96	665
34.39	58
35.07	703
35.74	60
36.42	671
37.71	620
39.64	528
40.70	544
42.05	594
42.72	57
43.40	449
44.07	210
44.75	384
46.10	340
47.56	388
49.09	241
49.77	55
50.44	382
51.12	108
51.79	485
52.47	106
53.14	389
53.82	52
54.49	227
55.66	133
56.95	136
57.63	34
58.30	134
58.98	112
59.65	289
60.33	64
61.00	129
61.68	32
62.35	126

\*Koordinat x pada pemodelan PLAXIS Versi 8.2 (Referensi Gambar 4.9)

## Lampiran 3.1 Contoh Detail Perhitungan Desain Preliminari

- Parameter yang digunakan dalam perhitungan desain preliminari dapat dilihat pada Tabel A.3.1 di bawah ini. Adapun Konfigurasi pondasi terdiri dari komponen rakit setebal 1,6 meter dan tiang sejumlah 192 buah berukuran  $70 \times 70 \text{ cm}^2$  sepanjang 24 meter.

Tabel A.3.1

Parameter	Satuan	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5
Kedalaman	m	0-4	4-10	10-18	18-35	35-70
Modulus Young ( $E_u$ )	kN/m <sup>2</sup>	7000	30000	80000	52500	1,00E+05
Rasio Poisson ( $\nu_u$ )	-	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Modulus geser (G)	kN/m <sup>2</sup>	2500	10710	28570	18750	35700

- Perhitungan Daya Dukung Ultimat Komponen Rakit

$$L_r = 62,5 \text{ meter}$$

$$B_r = 42,5 \text{ meter}$$

$$\text{Kedalaman terpengaruh} = 1,5 B_r = 1,5 (42,5) = 63,75 \text{ meter}$$

$N_{\text{SPT}}$  rata-rata hingga kedalaman 63,75 meter adalah 19

$K_1$  diperoleh dari Tabel 3.8 sebesar 80 karena jenis tanah lanau berlempung

$$p_{ur} = 80(19) = 1520 \text{ kPa} = 1,52 \text{ MPa}$$

$$P_{ur} = p_{ur} L_r B_r = 1,52(62,5)(42,5) = 4037,5 \text{ MN}$$

- Perhitungan Daya Dukung Ultimat Komponen Tiang

- Tahanan friksi ultimat tiang

$$L_p = 24 \text{ meter}$$

$$d_p = 0,7 \text{ meter}$$

Karena tanah berlapis, maka tahanan friksi harus dicari pada setiap lapisan terlebih dahulu, baru kemudian diakumulasikan.

$$f_s = 2,8N_s + 10 \text{ (kPa)}$$

$$A_s = 4d_p \text{ (tebal lapisan)}$$

$$P_s = \sum_{i=1}^n f_{s-i} A_{s-i}$$

Tabel A.3.2 Perhitungan Friksi pada Tiang

Tebal Lapisan (m)	N <sub>s</sub>	f <sub>s</sub> (kPa)	P <sub>s</sub> (MN)
2	4	21,2	0,12
6	16	54,8	0,92
8	24	77,2	1,73
8	19	63,2	1,42
ΣP <sub>s</sub>			4,18

## 2. Tahanan ujung ultimat tiang

N<sub>SPT</sub> pada kedalaman ujung tiang adalah 19

K<sub>2</sub> diperoleh dari Tabel 3.8 sebesar 165 karena jenis tanah lanau berlempung dan tiang merupakan Displacement Piles

$$f_b = K_2 N_b = 165(19) = 3135 \text{ kPa} = 3,135 \text{ MPa}$$

$$P_b = f_b A_p = 3,135(0,7)^2 = 1,54 \text{ MN}$$

## 4. Perhitungan Daya Dukung Ultimat Pondasi dan Faktor Keamanan

$$P_u = P_{ur} + n_p (P_s + P_b) = 4037,5 + 192(4,18 + 1,54) = 5135,83 \text{ MN}$$

$$FS = \frac{5135,83}{902,66} = 5,69$$

## 5. Perhitungan Kekakuan Pondasi

Nilai modulus geser dirata-rata hingga kedalaman 24 meter.

Nilai β<sub>z</sub> diperoleh dari Gambar 3.6.

$$c = \frac{L_r}{2} = \frac{62,5}{2} = 31,25$$

$$d = \frac{B_r}{2} = \frac{42,5}{2} = 21,25$$

$$K_r = \frac{G_s}{(1 - v_s)} \beta_z \sqrt{(4cd)} = \frac{18,66}{(1 - 0,4)} 2,2 \sqrt{4(31,25)(21,25)} = 3255,16 \text{ MN/m}$$

$$\eta = \frac{r_b}{r_o} = \frac{0,4}{0,4} = 1$$

$$\xi = \frac{18,75}{18,75} = 1$$

$$\rho = \frac{18,66}{18,75} = 1$$

$$\lambda = \frac{E_p}{G_L} = \frac{30000}{18,75} = 1600$$

$$\mu L = \frac{L}{r_o} \sqrt{\frac{2}{\zeta \lambda}} = \frac{24}{0,4} \sqrt{\frac{2}{1600}} = 1$$

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_o}\right) = \ln\left(\frac{2,5\rho(1-\nu)L}{r_o}\right) = \ln\left(\frac{2,5(1-0,4)24}{0,4}\right) = 4,59$$

$$\begin{aligned} K_p &= G_L r_o \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \tanh(\mu L) L}{\zeta \mu L r_o}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda} \frac{4\eta \tanh(\mu L) L}{(1-\nu)\xi \mu L r_o}} \\ &= 18,75(0,4) \frac{\frac{4}{(1-0,4)} + \frac{2\pi \tanh(1) 24}{4,59 \cdot 1 \cdot 0,4}}{1 + \frac{1}{\pi 1600} \frac{4 \tanh(1) 24}{(1-0,4) \cdot 1 \cdot 0,4}} \\ &= 486 \text{ MN/m} \end{aligned}$$

$$K_{p-\text{sys}} = K_p \sqrt{n_p} = 486 \sqrt{192} = 6737 \text{ MN/m}$$

$$K_{pr} = \frac{1 - 0,6 \left(\frac{K_r}{K_p}\right)}{1 - 0,64 \left(\frac{K_r}{K_p}\right)} K_p = \frac{1 - 0,6 \left(\frac{3255,16}{6737}\right)}{1 - 0,64 \left(\frac{3255,16}{6737}\right)} 6737 = 6926 \text{ MN/m}$$

## 6. Pembentukan Kurva Tri-Linear

$$a = \frac{0,2}{1 - 0,8 \left(\frac{K_r}{K_p}\right)} \left(\frac{K_r}{K_p}\right) = \frac{0,2}{1 - 0,8 \left(\frac{3255,16}{6737}\right)} \left(\frac{3255,16}{6737}\right) = 0,158$$

$$\beta_p = \frac{1}{1+a} = \frac{1}{1+0,158} = 0,86$$

$$P_1 = \frac{P_{up}}{\beta_p} = \frac{n_p(P_s + P_b)}{\beta_p} = \frac{192(4,18 + 1,54)}{0,86} = 1271,33 \text{ MN}$$

$$\text{Apabila } P \leq P_1 \rightarrow S = \frac{P}{K_{pr}}$$

$$\text{Apabila } P > P_1 \rightarrow S = \frac{P_1}{K_{pr}} + \frac{P - P_1}{K_r}$$

Tabel A.3.3 Detail Beban vs. Penurunan

s (cm)	P (MN)
0	0
1.4	100
2.8	200
4.3	300
5.7	400
7.2	500
8.6	600
10.1	700
11.5	800
12.9	900
13.0	902.66
14.4	1000
18.3	1271.33
40.7	2000
71.5	3000
102.1	4000
137.1	5135.83
140.	5135.83
200	5135.83

#### 7. Perhitungan Proporsi Beban

$$P_p = \beta_p P = 0,86(902,66) = 779,83 \text{ MN} \leq P_{up} \rightarrow \text{OK}$$

$$P_r = P - P_p = 902,66 - 779,83 = 122,83 \text{ MN}$$

Persentase Mobilisasi Kapasitas Tiang saat Beban Bekerja :

$$\% = \frac{779,83}{1098,33} = 71\%$$