

SKRIPSI

**ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG DENGAN
METODE ANALITIS DAN METODE ELEMEN HINGGA
(STUDI KASUS: PROYEK PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR *GREEN
HOUSE BIODIVERSITAS* LIPI CIBINONG – BOGOR)**

Diajukan Sebagai Syarat Menyelesaikan Studi
Pada Program Studi Teknik Sipil Jenjang Strata 1
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Mataram



Disusun Oleh:

AYU NURJANAH
2019D1B030

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM
2023**

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

SKRIPSI

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Dengan Metode Statis dan Metode Elemen Hingga

Studi Kasus: Proyek Pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas* LIPI Cibonong-Bogor

Disusun Oleh:

AYU NURJANAH

2019D1B030

Mataram, 17 JUNI 2023

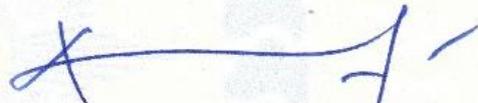
Pembimbing I,



Dr. Heni Pujiastuti, ST., MT

NIDN. 0828087201

Pembimbing II,



M. Khalis Ilmi, ST., M. Eng

NIDN. 0831089401

Mengetahui,

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM

Dekan,



Dr. H. Aji Syailendra Ubaidillah, ST., M. Sc

NIDN. 0806027101

HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI

SKRIPSI

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Dengan Metode Analitis dan Metode Elemen Hingga

Studi Kasus: Proyek Pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas LIPI* Cibinong-Bogor

Disusun Oleh:

AYU NURJANAH
2019D1B030

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji

Pada hari rabu, 21 Juni 2023

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Susunan Tim Penguji

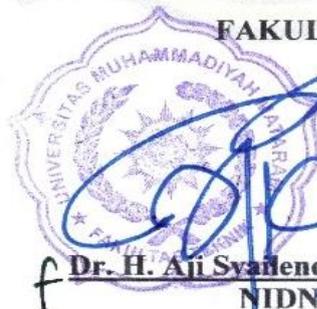
- | | |
|----------------|--------------------------------|
| 1. Penguji I | : Dr. Heni Pujiastuti, ST., MT |
| 2. Penguji II | : M. Khalis Ilmi, ST., M. Eng |
| 3. Penguji III | : Hafiz Hamdani, ST., MT |



Mengetahui,

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM
FAKULTAS TEKNIK

Dekan,



Dr. H. Aji Syarifendra Ubaidillah, ST., M. Sc
NIDN. 0806027101

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir/Skripsi dengan judul:

“ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG DENGAN METODE ANALITIS DAN METODE ELEMEN HINGGA STUDI KASUS: PROYEK PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR GREEN HOUSE BIODIVERSITAS LIPI CIBINONG-BOGOR”

Benar – benar merupakan karya sendiri dan bukan hasil plagiasi dari karya orang lain. Hasil penelitian maupun kutipan secara langsung maupun tidak langsung yang bersumber dari tulisan orang lain dinyatakan secara tertulis dalam Tugas Akhir/Skripsi ini dalam daftar Pustaka. Apabila terbukti dikemudian hari bahwa Tugas Akhir/Skripsi ini merupakan hasil plagiasi, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan dan saya sanggup dituntut sesuai hukum yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat tanpa tekanan dari pihak manapun dan dengan kesadaran penuh terhadap tanggungjawab dan konsekuensi.

Mataram, 21 Juni 2023
Yang Membuat Pernyataan



Ayu Nurjanah

NIM: 2019D1B030



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN DAN
PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM
UPT. PERPUSTAKAAN H. LALU MUDJITAHID UMMAT

Jl. K.H.A. Dahlan No.1 Telp.(0370)633723 Fax. (0370) 641906 Kotak Pos No. 108 Mataram
Website : <http://www.lib.ummat.ac.id> E-mail : perpustakaan@ummat.ac.id

SURAT PERNYATAAN BEBAS
PLAGIARISME

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Mataram, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : AYU NURJANAH
NIM : 2019D1B030
Tempat/Tgl Lahir : Muar, 01 September 2001
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
No. Hp : 081 353 635 504
Email : ayunurjanah289@gmail.com

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi/KTI/Tesis* saya yang berjudul :

ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG DENGAN METODE
ANALITIS DAN METODE ELEMEN HINGGA
(STUDI KASUS : PROYEK PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR GREEN HOUSE BIDDIUNIVERSITAS
LIPi CIBINONG - BOGOR)

Bebas dari Plagiarisme dan bukan hasil karya orang lain. 47%

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian dari Skripsi/KTI/Tesis* tersebut terdapat indikasi plagiarisme atau bagian dari karya ilmiah milih orang lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dan disebutkan sumber secara lengkap dalam daftar pustaka, saya **bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum** sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Muhammadiyah Mataram.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya tanpa ada paksaan dari siapapun dan untuk dipergunakan sebagai mana mestinya.

Mataram, 04 JULI 2023
Penulis


AYU NURJANAH
NIM. 2019D1B030

Mengetahui,
Kepala UPT/ Perpustakaan UMMAT


Iskandar, S.Sos., M.A.
NIDN. 0802048904

salah satu yang sesuai



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN DAN
PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM
UPT. PERPUSTAKAAN H. LALU MUDJITAHID UMMAT

Jl. K.H.A. Dahlan No.1 Telp.(0370)633723 Fax. (0370) 641906 Kotak Pos No. 108 Mataram
Website : <http://www.lib.ummat.ac.id> E-mail : perpustakaan@ummat.ac.id

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN
PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Mataram, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : AYU NURJANAH
NIM : 2019018030
Tempat/Tgl Lahir : Muar, 04 September 2001
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
No. Hp/Email : 081353 635 504
Jenis Penelitian : Skripsi KTI Tesis

Menyatakan bahwa demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada UPT Perpustakaan Universitas Muhammadiyah Mataram hak menyimpan, mengalih-media/format, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Repository atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama *tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta* atas karya ilmiah saya berjudul:

ANALISIS DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG DENGAN METODE ANALITIS
DAN METODE ELEMEN HINGGA
(STUDI KASUS : PROYEK PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR GREEN HOUSE BIODIVERSITAS LIPI - BGGOR)

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah ini menjadi tanggungjawab saya pribadi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya tanpa ada unsur paksaan dari pihak manapun.

Mataram, 04 JULI2023
Penulis



AYU NURJANAH
NIM. 2019018030

Mengetahui,
Kepala UPT. Perpustakaan UMMAT

Iskandar, S.Sos., M.A.
NIDN. 0802048904

HALAMAN MOTTO

Perjalanan hidup adalah bagaimana cara memilih dan berjuang, memilih apa yang harus didengarkan dan apa yang harus diabaikan. Tebalkan hati dan tetap pada jalan yang sudah diperjuangkan, jangan biarkan cara pandang orang lain menjadi penghambat tujuan.

“Sesungguhnya Allah SWT tidak akan mengubah keadaan suatu kaum, sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri.”

(QS Ar Rad Ayat 11)

“Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya.”

(Ali bin Abi Thalib)



PRAKATA

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat serta karunia-Nya sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya dengan judul “Analisi Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Dengan Metode Analitis Dan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus: Pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas LIPI Cibinong-Bogor*)” walaupun sebenarnya skripsi ini masih jauh dari kata sempurna.

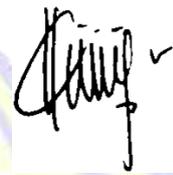
Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan jenjang pendidikan Program Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Mataram. Penyusunan skripsi ini berdasarkan data yang diperoleh dari lapangan yang *valid* sesuai dengan landasan teori dari berbagai sumber.

Penyusunan skripsi ini tidak akan mampu diselesaikan tanpa adanya dukungan fisik dan moral dari pihak-pihak yang ikut serta membantu. Oleh karena itu penyusun ingin menghaturkan ucapan dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Abdul Wahab selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Mataram.
2. Dr. Aji Syailendara Ubaidillah, M. Sc selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Mataram.
3. Adryan Fitrayuda, ST., MT selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Mataram.
4. Dr. Heni Pujiastuti, ST., MT selaku Dosen Pembimbing I.
5. M. Khalis Ilmi, ST., M. Eng selaku Dosen Pembimbing II.
6. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Mataram.

Demikian ucapan terimakasih yang sebsar-besarnya dari penyusun semoga kebaikan semua pihak yang telah membantu diberikan balasan oleh Allah SWT, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak dalam mengembangkan ilmu dibidang teknik sipil.

Mataram. 21 Juni 2023



Penyusun



HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan segala puji syukur kehadiran Allah SWT serta dukungan dan doa dari orang – orang tercinta, akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu, dengan rasa bangga saya ucapkan rasa syukur dan terimakasih kepada:

1. Allah SWT, karena atas izin dan karunianyalah maka skripsi ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.
2. Ayahanda A. Karim. HK dan ibunda Irawati yang senantiasa memberikan dukungan moral maupun material serta do'a dan limpahan kasih sayang yang selalu tcurahkan untuk kesuksesan saya.
3. Kedua kakak saya tercinta Ilham Akbar dan Kurniyanti, S. AB yang senantiasa memastikan saya selalu dalam keadaan baik.
4. Kepada diri saya sendiri terimakasih sudah selalu bersabar dan tetap berjuang sampai terselesaikannya skripsi ini, semoga menjadi awal perjalanan yang baik untuk masa depan yang kamu semogakan.
5. Kepada M. Doni Khoudori, Muhammad Za'irurrahman, Iis Indayanti, Ahmad Adriansyah, dan M. Ardy Suryadinata terimakasih sudah berkenan direpotkan selama pengerjaan skripsi ini.
6. Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang ikut serta membantu dan memberikan bimbingan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.

ABSTRAK

Pondasi merupakan bagian struktur bawah yang digunakan sebagai konstruksi penyalur beban yang dihasilkan struktur atas kemudian disalurkan kedalam lapisan tanah keras. Penentuan jenis pondasi dalam suatu konstruksi bangunan harus memperhatikan jenis dan karakteristik tanah dilokasi pembangunan agar kegagalan konstruksi dapat dihindari, analisis ini dilakukan untuk mengetahui daya dukung pondasi tiang pancang dengan menggunakan metode analitis dan metode elemen hingga.

Jenis pondasi yang digunakan pada analisis ini adalah pondasi tiang pancang dengan panjang tiang 8 m dan diameter tiang 0,4 m. Untuk perhitungan analitis menggunakan data SPT yang diperoleh dari PT. Adhi Karya (persero) proyek pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas* LIPI Cibinong-Bogor dengan menggunakan metode analitis (Metode Alpha) dan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Plaxis 2D V.8.

Hasil dari analisis diperoleh nilai kapasitas dukung pondasi kelompok tiang kelompok (Q_g) untuk diameter tiang 0,4 m dengan panjang tiang 8 m pada tanah lempung berdasarkan data SPT menggunakan metode analitis (metode Alpha) diperoleh nilai sebesar 60,432 ton. Sedangkan kapasitas dukung pondasi tiang horizontal menggunakan metode Broms diperoleh nilai 6,03 ton. Kapasitas dukung dengan menggunakan metode Elemen Hingga diperoleh nilai beban ultimit tiang kelompok (Q_q) sebesar 57,89 ton, hasil kapasitas dukung pondasi kelompok tiang (Q_g) dari kedua data dengan perbandingan selisih 2,5 % memenuhi syarat yaitu lebih besar dari beban yang harus didukung (aksial) P sebesar 42,6 ton.

Kata kunci: tiang pancang, kapasitas dukung, metode alpha, broms, elemen hingga

ABSTRACT

The foundation is a lower structure component that distributes the superstructure's burden, which is then channeled into the hard soil layer. To prevent construction disasters, the type of foundation chosen for building construction must consider the soil type and characteristics at the construction site. This analysis determines the bearing capacity of pile foundations using analytical and finite element methods.

This analysis employs a pile foundation with a pile length of 8 meters and a pile diameter of 0.4 meters. For analytical calculations utilizing SPT data obtained from PT. Adhi Karya (Persero) using the analytical method (Alpha Method) and the finite element method with Plaxis 2D V.8 software.

Based on SPT data and the analytical technique (Alpha method), the bearing capacity of the group pile group foundation (Q_g) for a pile diameter of 0.4 m and pile length of 8 m on clay soil was determined to be 60,432 tons. Using the Broms method, the bearing capacity of the horizontal pile foundation was determined to be 6.03 tons. Using the Finite Element method, the group pile ultimate load (Q_q) was calculated to be 57.89 tons. The results of the pile group foundation bearing capacity (Q_g) from the two data with a distinct ratio of 2.5% satisfy the requirements, which is greater than the required load (axial) P of 42.6 tonnes.

Keywords: piling, bearing capacity, alpha method, brooms, finite elements

MENGESAHKAN
BALINAN FOTO COPY SESUAI ASLINYA
MATARAM 10 JULI 2023

KEPALA
UPT P3B

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MATARAM



DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING	i
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASRISME.....	iv
SURAT PERNYATAAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
HALAMAN MOTTO	ivi
PRAKATA	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	ix
ABSTRAK	x
ABSTRACK	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR PERSAMAAN	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.1.1 Pondasi.....	5
2.1.2 Tanah	9
2.1.3 Pengujian Tanah (<i>Soil Investigation</i>).....	10
2.1.4 Pengujian <i>Standard Penetration Test</i> (SPT)	16

2.1.6 Tiang Pancang	20
2.1.7 Jenis Alat Pancang	22
2.1.8 Pemancangan Tiang Pancang	25
2.1.8 Penelitian Terdahulu	28
2.1.9 Perbandingan Penelitian Sebelumnya dengan Penelitian Penulis	29
2.2 Landasan Teori	30
2.2.1 Kapasitas Daya Dukung Tiang Pancang.....	30
2.2.2 Kapasitas Daya Dukung Lateral Tiang Pancang	35
2.2.3 Pengecekan Kapasitas Dukung Terhadap Beban Eksternal	43
2.2.4 Faktor Keamanan.....	45
2.2.5 Metode Elemen Hingga	46
2.2.6 Plaxis	47
BAB III METODOLOGI PENELETIAN	58
3.1 Lokasi Penelitian	58
3.2 Ketersediaan Data.....	59
3.3 Diagram Alir.....	59
3.4 Langkah – Langkah Perencanaan Metode Analitis	63
3.5 Langkah – Langkah Perencanaan Metode Elemen Hingga.....	63
BAB IV PEMBAHASAN.....	69
4.1 Lokasi Penelitian	69
4.2 Data Teknis Tiang Pancang.....	71
4.3 Menghitung Kapasitas Daya Dukung Pondasi.....	72
4.4 Kapasitas Dukung Tiang Pancang Secara Horizontal.....	90
4.5 Pengecekan Kapasitas Dukung Terhadap Beban Eksternal	96
4.6 Menghitung Kapasitas Daya Dukung Dengan Elemen Hingga	98
4.7 Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang Metode Analitis dan Metode Elemen Hingga	112
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	113
5.1 Kesimpulan.....	113
5.2 Saran.....	113

DAFTAR PUSTAKA.....114

LAMPIRAN.....116



DAFTAR TABEL

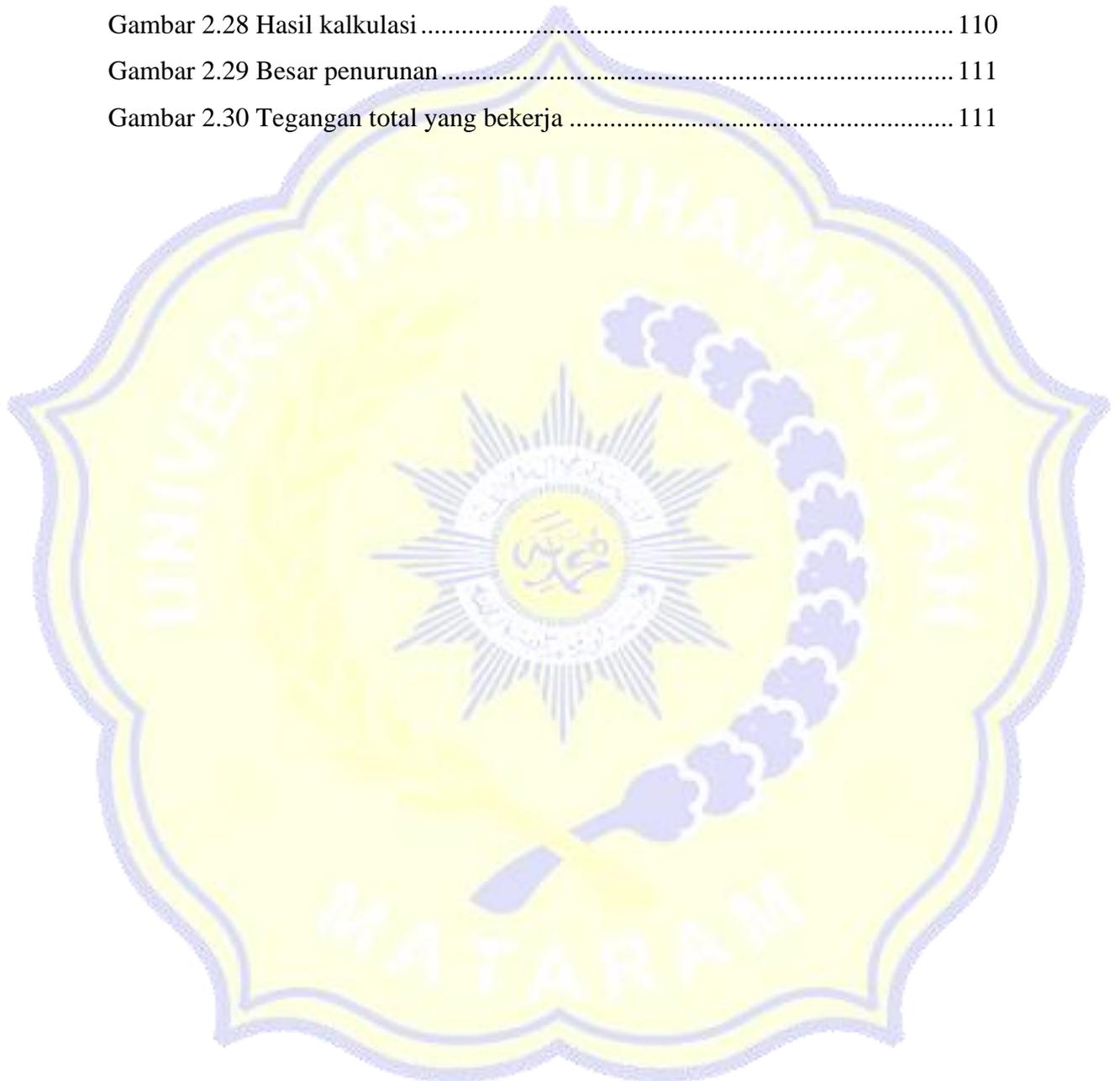
Tabel 2.1 Harga empiris ϕ dan D_r pasir dan lumpur kasar berdasarkan soil.....	5
Tabel 2.2 Hubungan D_r , ϕ , dan nilai N dari pasir (peck, mayerhoff).....	17
Tabel 2.3 Hubungan D_r , ϕ , dan N dari pasir (Terzaghi).....	18
Tabel 2.4 Hal-hal yang perlu diperhatikan untuk menentukan harga N	30
Tabel 2.5 Faktor keamanan yang disarankan.....	44
Tabel 2.6 Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah.....	51
Tabel 2.7 Korelasi N -SPT dengan modulus elastisitas pada tanah lempung.....	52
Tabel 2.8 Hubungan jenis tanah, konsistensi dan poisson rasio	53
Tabel 3.1 Jenis data dan sumber data yang digunakan	58
Tabel 4.1 Hasil analisa jenis tanah dilapangan	71
Tabel 4.2 Nilai N -SPT.....	73
Tabel 4.3 Rekapitulasi kapasitas dukung analitis	90
Tabel 4.4 Parameter elemen hingga.....	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pondasi sumuran	6
Gambar 2.2 Pondasi tiang bor	7
Gambar 2.3 Pondasi tiang pancang.....	8
Gambar 2.4 Pondasi tiang franki.....	8
Gambar 2.5 Diagram fase tanah.....	10
Gambar 2.6 Konus keadaan tertekan dan terbentang.....	12
Gambar 2.7 Kurva pengujian soil test.....	14
Gambar 2.8 Alat soil dengan konus biasa.....	15
Gambar 2.9 Alat pengujian penetrasi standar tes.....	16
Gambar 2.10 Alat <i>single-acting hammer</i>	22
Gambar 2.11 Alat <i>double-acting hammer</i>	22
Gambar 2.12 Alat <i>diesel hammer</i>	23
Gambar 2.13 Alat pancang HSPD.....	24
Gambar 2.14 Cara penyimpanan tiang.....	25
Gambar 2.15 Visualisasi pemancangan tiang	26
Gambar 2.16 Grafik faktor adhesi tiang untuk tanah lempung.....	31
Gambar 2.17 Tiang pendek saat diberi beban lateral.....	35
Gambar 2.18 Tiang panjang saat diberi beban lateral.....	35
Gambar 2.19 Defleksi dan mekanisme keruntuhan pondasi tiang dengan kepala tiang terjepit	37
Gambar 2.20 Kapasitas beban lateral pada tanah kohesif.....	39
Gambar 2.21 Defleksi dan mekanisme keruntuhan pondasi tiang dengan kepala tiang beban.....	40
Gambar 2.22 Jenis elemen	46
Gambar 2.23 Titik nodal dan integrasi.....	46
Gambar 2.24 Model pondasi tiang pada program plaxis	47
Gambar 3.1 Lokasi penelitiaang	57
Gambar 3.2 Kotak dialog pengaturan global pada plaxis	62
Gambar 3.3 Update mesh generation sebelum melakukan kalkulasi perhitungan	63

Gambar 3.4 Initial water pressure pada program plaxis	64
Gambar 3.5 Kondisi active porce pressure	64
Gambar 3.6 Kondisi effective stresses	65
Gambar 3.7 Pemilihan titik nodal	65
Gambar 3.8 Phase program plaxis	66
Gambar 3.9 Proses kalkulasi	67
Gambar 3.10 Hasil kalkulasi	67
Gambar 3.11 Output hasil perhitungan	68
Gambar 4.1 Lokasi penelitian	69
Gambar 4.2 Lokasi yang ditinjau	70
Gambar 4.3 lokasi titik DB-02 zona 4	70
Gambar 4.4 Pondasi tiang kelompok	73
Gambar 4.5 Grafik nilai α tanah lempung 8 m	74
Gambar 4.6 Grafik nilai α tanah lempung 10 m	79
Gambar 4.7 Grafik nilai α tanah lempung 12 m	85
Gambar 4.8 Pemilihan model analisis plaxis	100
Gambar 4.9 Dimensi permodelan	100
Gambar 4.10 Lapisan tanah pada plaxis	101
Gambar 4.11 Material set tanah	101
Gambar 4.12 Input parameter tanah	102
Gambar 4.13 Input hasil parameter tanah	102
Gambar 4.14 Model tiang dan <i>pile cap</i>	103
Gambar 4.15 Material set tiang dan <i>pile cap</i>	103
Gambar 4.16 Input parameter tiang dan <i>pile cap</i>	104
Gambar 4.17 Input hasil parameter ke tiang dan <i>pile cap</i>	104
Gambar 4.18 Interface pada tiang	105
Gambar 4.19 Standar <i>fixities</i>	105
Gambar 4.20 Input nilai beban	106
Gambar 4.21 Model jaring elemen	107
Gambar 4.22 Muka air tanah	107
Gambar 4.23 Tekanan pori aktif	108

Gambar 4.24 Tegangan efektif utama.....	108
Gambar 4.25 Input tiang pada proses kalkulasi	109
Gambar 4.26 Pemilihan struktur tiang untuk dianalisa.....	109
Gambar 2.27 Proses kalkulasi	110
Gambar 2.28 Hasil kalkulasi	110
Gambar 2.29 Besar penurunan.....	111
Gambar 2.30 Tegangan total yang bekerja	111



DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1 Hambatan lekat	14
Persamaan 2.2 Jumlah hambatan lekat.....	14
Persamaan 2.3 Kuat geser tanah.....	29
Persamaan 2.4 Tahanan ujung ultimit.....	30
Persamaan 2.5 Luas selimut ujung tiang.....	30
Persamaan 2.6 Tahanan gesek ultimit.....	31
Persamaan 2.7 Luas selimut tiang.....	31
Persamaan 2.8 Keliling tiang	31
Persamaan 2.9 Faktor tahanan ujung maksimum.....	32
Persamaan 2.10 Faktor tahanan gesek maksimum.....	32
Persamaan 2.11 Kapasitas dukung ultimit	32
Persamaan 2.12 Kapasitas dukung ijin.....	32
Persamaan 2.13 Jarak antar tiang	33
Persamaan 2.14 Efisiensi tiang	33
Persamaan 2.15 Nilai θ efisiensi	33
Persamaan 2.16 Kapasitas dukung tiang kelompok.....	33
Persamaan 2.17 Letak momen maksimum	36
Persamaan 2.18 Momen maksimum	37
Persamaan 2.19 Momen maksimum	37
Persamaan 2.20 Panjang tiang.....	37
Persamaan 2.21 Jarak lokasi momen maksimum sampai dasar tiang.....	38
Persamaan 2.22 Beban Lateral	38
Persamaan 2.23 Momen leleh	38
Persamaan 2.24 Beban lateral	38
Persamaan 2.25 Beban lateral tiang pendek.....	40
Persamaan 2.26 Momen maksimum	41
Persamaan 2.27 Hubungan beban lateral dengan panjang dan diameter tiang ...	41
Persamaan 2.28 Momen leleh	41
Persamaan 2.29 Defleksi horizontal.....	41

Persamaan 2.30 Defleksi tiang.....	42
Persamaan 2.31 Gaya horizontal.....	42
Persamaan 2.32 Gaya horizontal ijin	42
Persamaan 2.33 Beban aksial tiang.....	43
Persamaan 2.34 Kuadrat jarak tiang arah x.....	43
Persamaan 2.35 Kuadrat jarak tiang arah y.....	43
Persamaan 2.36 Beban horizontal masing-masing tiang	43
Persamaan 2.37 Modulus elastis	49
Persamaan 2.38 Modulus elastisitas <i>undrained</i>	50
Persamaan 2.39 Modulus elastisitas efektif	50
Persamaan 2.40 Hubungan sudut geser dalam (ϕ) dengan nilai SPT.....	53
Persamaan 2.41 Modulus elastis tiang	54
Persamaan 2.42 Momen inersia tiang	54
Persamaan 2.43 Luas penampang tiang	55
Persamaan 2.44 Modulus elastisitas <i>pile cap</i>	55
Persamaan 2.45 Momen inersia <i>pile cap</i>	55
Persamaan 2.46 Luas penampang <i>pile cap</i>	55
Persamaan 2.47 Kapasitas ultimit kelompok tiang pada plaxis	56

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi menjadi salah satu faktor pendukung dari berkembangnya infrastruktur, mulai dari infrastruktur dibidang Kesehatan, Pendidikan, maupun hunian pribadi. Suatu infrastruktur atau konstruksi tentunya selalu terkait dengan daya dukung pondasi yang kuat, hal ini menyebabkan faktor daya dukung pondasi menjadi hal penting dalam suatu konstruksi bangunan. Namun kenyataannya dilapangan masih ditemukan kekeliruan atau kesalahan pada pelaksanaan pekerjaan pondasi yang tentunya akibat dari kesalahan perencanaan, sehingga mengancam keamanan konstruksi.

Sampai saat ini, keberadaan konstruksi gedung bertingkat semakin meningkat seiring kebutuhan untuk pemenuhan fasilitas-fasilitas umum penunjang keberlangsungan kegiatan sehari-hari. Sehingga perencanaan daya dukung pondasi harus direncanakan sebaik mungkin agar dapat menahan beban konstruksi bangunan di atasnya sampai batas keamanan yang telah ditentukan.

Pondasi merupakan bagian struktur bawah yang digunakan sebagai konstruksi penyalur beban yang dihasilkan struktur atas kemudian disalurkan kedalam lapisan tanah keras. Penentuan jenis pondasi dalam suatu konstruksi bangunan harus memperhatikan jenis dan karakteristik tanah dilokasi pembangunan agar kegagalan konstruksi dapat dihindari.

Ada dua jenis pondasi yang biasanya diaplikasikan pada konstruksi bangunan gedung, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal merupakan jenis pondasi yang digunakan untuk gedung dengan lokasi konstruksi yang kedalaman tanah kerasnya tidak berada jauh dari permukaan, sedangkan pondasi dalam adalah jenis pondasi yang digunakan untuk konstruksi gedung dengan lokasi konstruksi yang kedalaman tanah kerasnya berada jauh dari permukaan.

Pondasi tiang pancang (*pile foundation*) merupakan jenis pondasi dalam yang dipancang atau ditanam sampai kedalaman tertentu agar dapat meneruskan beban dari struktur atas bangunan ke dalam tanah. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan jenis pondasi agar sesuai dengan bangunan yang

dibangun yaitu fungsi bangunan, besar beban yang bekerja, kondisi permukaan tanah, daya dukung, penurunan (*settlement*), dan biaya.

Analisa daya dukung pondasi dilakukan agar dapat menahan beban konstruksi di atasnya, pada proyek pembangunan infrastruktur *Green House biodiversitas* telah dilakukan perhitungan daya dukung pondasi jenis pondasi dalam yaitu tiang pancang dengan menggunakan formula konservatif (FK) dan menggunakan bantuan software ETABS.

Daya dukung pondasi tiang pancang ini dapat dihitung dengan menggunakan beberapa metode seperti metode Alpha, metode λ , metode US Army Corps, metode Tomlinson, metode Paulos dan Davis, metode Coyle dan Castello, metode Kulhawy, metode Broms dan metode Brinch Hansen. Penggunaan metode metode tersebut tergantung pada jenis tanah, karena jenis tanah yang terdapat pada lokasi merupakan jenis tanah kohesif dan dilakukan pengujian yang memperoleh nilai sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi (c) sehingga digunakan metode yang sesuai parameter yaitu metode alpha dan metode broms.

Maka dari itu muncul keinginan untuk menganalisa ulang daya dukung dari pondasi tiang pancang dengan menggunakan metode analitis (Metode Alpha dan Metode Broms) dan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Plaxis 2D V.8. Sebagai dasar untuk melakukan Analisa ini guna mengetahui nilai daya dukung dengan membandingkan beberapa metode berbeda serta penggunaan metode numerik untuk mempermudah perencanaan daya dukung pondasi.

Berdasarkan pertimbangan di atas muncul ketertarikan untuk melakukan penelitian tentang “Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Metode Analitis dan Metode Elemen Hingga”.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan latar belakang permasalahan yang telah di uraikan, maka di dapatkan rumusan masalah yang akan di bahas, yaitu:

- 1) Bagaimana hasil analisa daya dukung pondasi dengan metode analitis dan elemen hingga?

- 2) Bagaimana perbedaan hasil analisis daya dukung pondasi dengan metode analitis dan elemen hingga?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui hasil analisis daya dukung pondasi dengan metode analitis dan elemen hingga.
2. Untuk mengetahui perbedaan hasil analisis daya dukung pondasi dengan metode analitis dan elemen hingga.

1.4 Batasan Masalah

Pondasi di bagi menjadi beberapa jenis dan kriteria yang berbeda beda, untuk mencapai tujuan yang dimaksudkan dari tulisan ini perlu adanya batasan masalah yang akan di uraikan, pembahasan yang ditinjau di batasi meliputi:

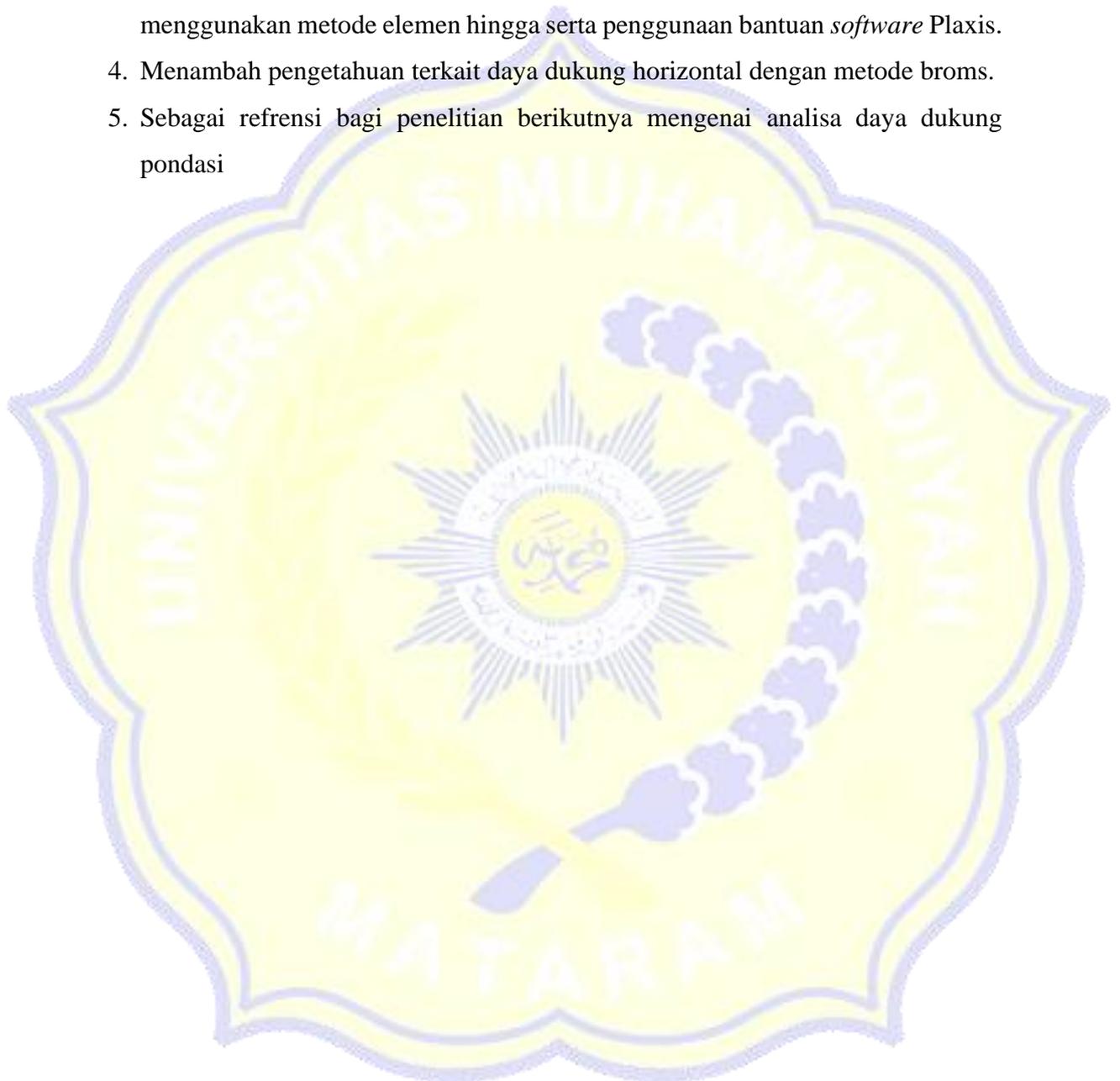
- 1) Tiang yang ditinjau yaitu tiang pondasi pada titik *deep booring* 2 (DB-2) pada zona 4.
- 2) Jenis pondasi yang digunakan adalah jenis pondasi tiang pancang kelompok.
- 3) Perhitungan daya dukung pondasi menggunakan metode analitis yaitu Metode Alpha dan Metode Broms.
- 4) Perhitungan daya dukung pondasi menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Plaxis.
- 5) Data yang akan digunakan dalam menganalisis adalah data SPT dan data laboratorium yang diperoleh dari PT. ADHI KARYA (persero) Proyek *Green House Biodiversitas* LIPI Cibinong-Bogor.
- 6) Tidak menghitung kekuatan bahan.

1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dari penelitian Analisa kapasitas daya dukung pondasi tiang pancang pada proyek pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas* LIPI Cibinong-Bogor sebagai berikut:

1. Menambah pengetahuan terkait daya dukung pondasi tiang pancang dengan Metode Alpha.

2. Sebagai referensi untuk proyek *Green House Biodiversitas* LIPI Cibinong-Bogor terkait perhitungan daya dukung dengan metode lain dan *software* lainnya selain yang telah digunakan.
3. Menambah pengetahuan terkait daya dukung pondasi tiang dengan menggunakan metode elemen hingga serta penggunaan bantuan *software* Plaxis.
4. Menambah pengetahuan terkait daya dukung horizontal dengan metode broms.
5. Sebagai refrensi bagi penelitian berikutnya mengenai analisa daya dukung pondasi



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan Pustaka adalah kerangka teoritis yang digunakan sebagai acuan atau landasan pemikiran untuk mempertajam konsep yang digunakan, berisi penelitian sebelumnya untuk menghindari duplikasi. Pada penelitian yang akan dilakukan yakni mengenai analisis kapasitas dukung pondasi tiang pancang, sehingga penelitian sebelumnya digunakan sebagai perbandingan dengan perbedaan metode dan data yang digunakan.

2.1.1 Pondasi

Pondasi merupakan tahapan pertama yang dikerjakan dalam pembangunan suatu konstruksi baik pekerjaan konstruksi apapun. Pondasi berfungsi sebagai struktur yang meneruskan beban akibat struktur atas yang kemudian disalurkan ke lapisan tanah tanpa mengakibatkan penurunan dan keruntuhan tanah pondasi yang berlebihan. Untuk mengantisipasi terjadinya penurunan atau keruntuhan maka terlebih dahulu harus diperhitungkan semua beban yang dapat bekerja pada bangunan, agar dapat menjamin kestabilan struktur.

A. Pondasi Dalam (*Deep Foundation*)

Merupakan tipe pondasi yang dibangun di dalam tanah pada kedalaman lebih dari 3 m, dimana daya dukung dasar pondasi dipengaruhi oleh beban struktural. Pondasi dalam berfungsi sama seperti pondasi pada umumnya yaitu digunakan untuk mentransfer beban ke lapisan tanah dengan kedalaman tertentu untuk mendapatkan jenis tanah yang mampu mendukung beban struktur bangunan.

Daya dukung pondasi dalam mengandalkan gesekan (*friction*), ujung (*point bearing*), lekatan (*adhesion*) dan gabungan. Pondasi dalam dapat dibedakan menjadi beberapa jenis pondasi, yaitu:

1. Pondasi sumuran.

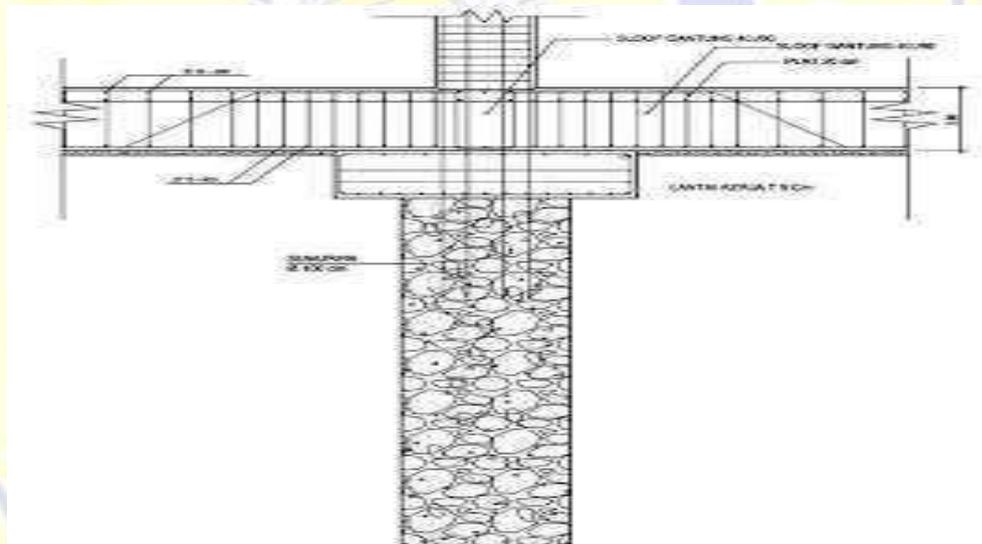
Pondasi sumuran merupakan pondasi yang berbentuk seperti pondasi dangkal yang digabungkan dengan pondasi tiang. Pondasi ini sangat tepat

digunakan pada tanah yang kurang baik yang kedalaman tanah kerasnya lebih dari 3 m.

Pondasi ini biasanya memiliki diameter antara 0.80 – 1.00 m dan ada kemungkinan memiliki diameter berbeda dalam satu bangunan yang dipengaruhi perbedaan beban yang ditanggung dari kolom.

Langkah pengerjaan pondasi sumuran:

- a. Tanah digali berbentuk lubang sesuai diameter pondasi sampai mencapai kedalaman yang telah ditentukan.
- b. Lubang pondasi kemudian diberikan buis beton dengan ketebalan kurang lebih 10 cm dengan pembesian.
- c. Dasar dari lubang pondasi dicor dengan ketebalan 40 cm – 1 m.
- d. Kemudian di atas coran disusun batu kali sampai dibawah 1m buis beton paling atas.
- e. Ruang kosong paling atas di cor kembali dan diberi angker besi untuk mengikat plat beton di atasnya.



Gambar 2.1 Pondasi Sumuran

(sumber: Atadroe, 2011)

2. Pondasi *bored pile*

Pondasi *bored pile* merupakan jenis pondasi dalam yang pengerjaannya sama seperti pondasi dalam pada umumnya yaitu dibangun dalam permukaan tanah dengan kedalaman lebih dari 3m. Tetapi pengerjaannya lebih

sederhana, yaitu dengan menggali lubang pondasi dengan kedalaman tertentu kemudian memasukkan rangka besi pondasi yang telah di rakit menggunakan alat khusus lalu dapat dilakukan pengecoran.

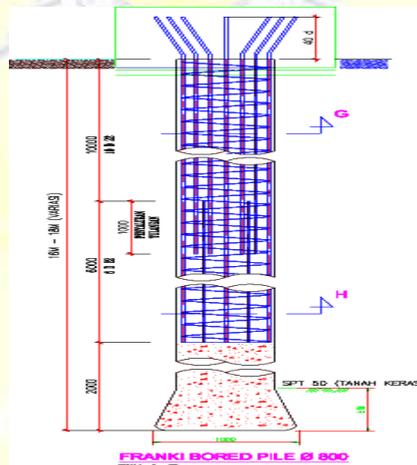
Jenis pondasi ini cocok digunakan pada bangunan yang memiliki beban bangunan besar dan rapat dengan bangunan sekitar karena pengerjaan pondasi ini tidak menimbulkan efek getar. Pondasi ini memiliki kelebihan dan kekurangan diantaranya sebagai berikut:

Kelebihan pondasi *bored pile*, yaitu:

- a. Penggunaan beton sedikit.
- b. Biaya relatif murah.
- c. Ujung pondasi dapat bertumpu pada tanah keras.

Kekurangan pondasi *bored pile*, yaitu:

- a. Diperlukan alat khusus untuk pengeboran karena kedalaman yang dalam.
- b. Pelaksanaan pengeboran relatif susah
- c. Pelaksaaan yang kurang bagik dapat mengakibatkan pondasi kropos karena semen larut oleh air tanah.

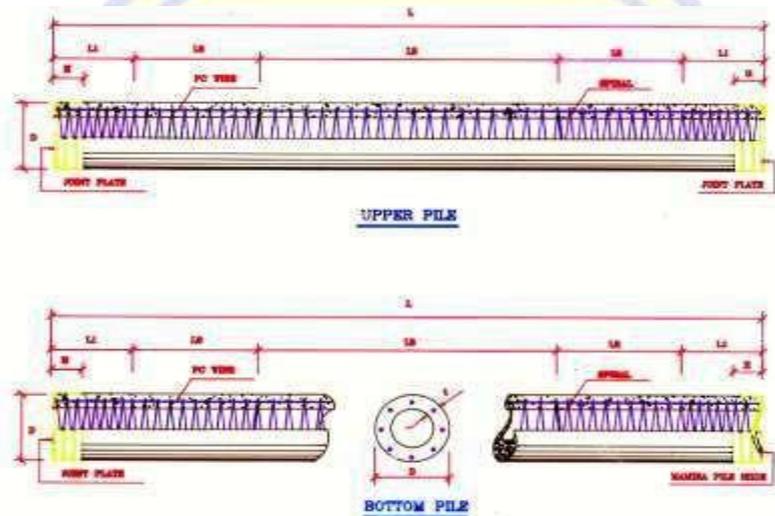


Gambar 2.2 Pondasi Tiang Bor (*Bored Pile*)

(sumber: Atadroe, 2011)

3. Pondasi tiang pancang (*driven pile*)

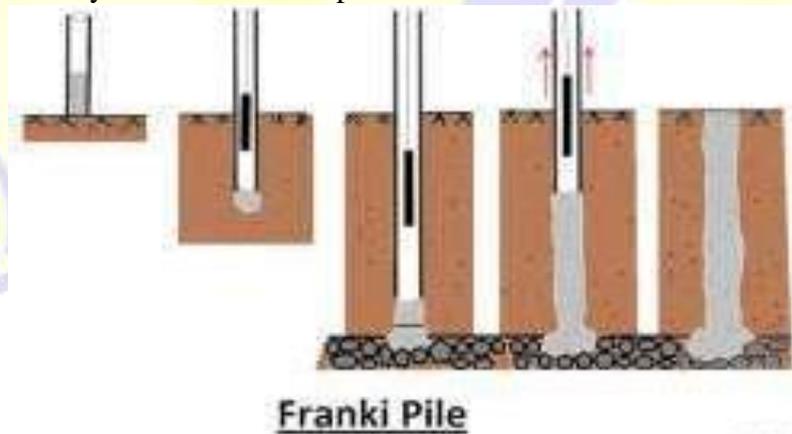
Pondasi tiang pancang ini hampir sama dengan pondasi *bored pile* namun kekuatan tiang pancang lebih besar. Tiang pancang berbentuk panjang dan langsing untuk menyalurkan beban ke tanah yang lebih dalam. Bahan utama tiang pancang biasanya terbuat dari beton, baja dan kayu diaplikasikan dengan cara dibor, dipukul atau didongkrak kemudian dihubungkan dengan *pile cap* (*pier*).



Gambar 2.3 Pondasi Tiang Pancang Bulat Berongga
(sumber: PT. Wijaya Karya Beton,2008)

4. Pondasi tiang franki (*franki pile*)

Tiang franki merupakan salah satu dari tiang beton yang pengecorannya dilakukan ditempat.



Gambar 2.4 Pondasi Tiang Franki (*Franki Pile*)
(sumber: Bowles, 1991)

Keterangan gambar:

1. Pipa baja dengan ujung yang sudah disumbat dengan beton hingga mengering.
2. Dengan palu penumbuk (*drop hammer*) sumbatan beton ditumbuk sehingga pipa beton dan sumbatannya masuk ke dalam tanah.
3. Pipa terus ditumbuk sampai mencapai tanah keras.
4. Setelahnya dilakukan pengecoran sambil pipa ditarik ke atas.
5. Pada akhirnya ujung bawah tiang akan berbentuk seperti jamur (*the mushroom base*) sehingga tahanan ujung menjadi lebih besar. Untuk permukaan tiang tidak lagi rata atau kasar sehingga lekatan dengan tanah menjadi kasar.

2.1.2 Tanah

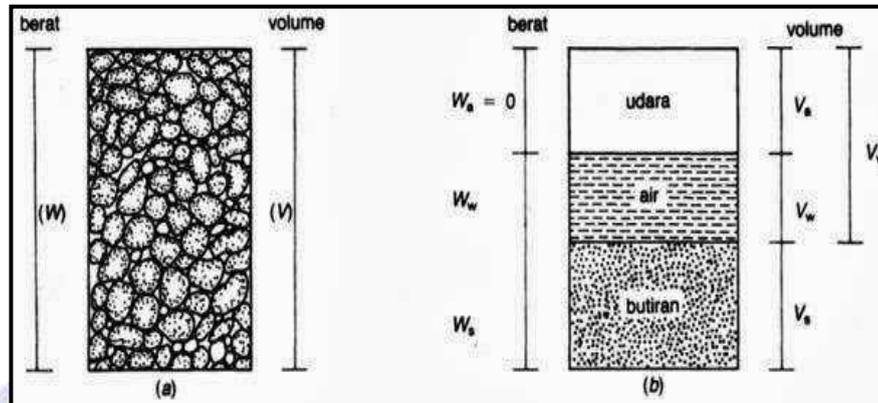
Tanah merupakan material utama yang dapat menerima kemudian menyalurkan beban akibat struktur atas (*upper structure*), oleh sebab itu keadaan dan kondisi tanah sangat penting agar struktur pondasi aman.

Secara umum tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral padat yang tidak terikat (tersementasi) secara kimia, bahan organik yang telah lapuk disertai zat cair dan gas yang mengisi ruang kosong antar partikel padat tersebut (Braja M Das, 1995).

Tanah sendiri terdiri dari 3 komponen yaitu bahan padat, udara, dan air. Secara teknis udara dianggap tidak mempunyai pengaruh terhadap sifat teknis tanah sedangkan air sangat berpengaruh, ruang di antara butiran dapat terisi air baik seluruh maupun sebagian. Apabila rongga terisi dengan air dan udara secara keseluruhan maka tanah dikatakan dalam kondisi jenuh, sedangkan apabila terisi sebagian maka tanah dikatakan pada kondisi jenuh sebagian (*partially Saturated*).

Karena tanah merupakan gabungan dari beberapa partikel menyebabkan tanah mempunyai dua atau tiga fase yang berbeda. Fase pertama, ketika tanah dalam kondisi kering maka tanah tersebut akan terdiri dari dua komponen yaitu butiran padat dan partikel udara. Fase kedua, ketika tanah dalam kondisi jenuh seluruhnya maka tanah tersebut terdiri dari dua komponen yaitu butiran padat dan air. Fase ke

tiga, ketika tanah dalam kondisi jenuh sebagian maka tanah tersebut terdiri dari tiga komponen yaitu butiran padat, udara dan air.



Gambar 2.5 Diagram Fase Tanah

(sumber: Das, 1995)

2.1.3 Pengujian Tanah (*Soil Investigation*)

Sebelum pelaksanaan konstruksi pembangunan dengan beban berat yang bekerja, terlebih dahulu harus dilakukan penyelidikan tanah (*soil investigation*) atau proses pengambilan contoh (*sample*) tanah yang bertujuan agar sifat fisik, karakteristik dan daya dukung tanah dapat diketahui untuk keperluan pemilihan desain dan tipe pondasi yang digunakan.

Penyelidikan tanah (*soil investigation*) ini dilakukan agar:

1. Mengetahui sifat-sifat tanah yang terkait dengan perencanaan struktur dapat diketahui.
2. Mengetahui kapasitas daya dukung tanah apakah sesuai dengan tipe pondasi yang dipilih.
3. Mengetahui tipe dan kedalaman yang sesuai untuk pondasi.
4. Mengetahui posisi muka air tanah.
5. Dapat memprediksi besarnya penurunan yang terjadi.
6. Mengetahui besarnya tekanan tanah.

Penyelidikan tanah (*soil investigation*) terdiri dari dua jenis, yaitu:

1. *In Situ Test*

Jenis penyelidikan ini dilakukan di lapangan secara langsung seperti pengeboran (*hand boring* ataupun *machine boring*), tes sondir CPT (*Cone Penetrometer Test*), tes SPT (*Standard Penetration Test*), *Sand Cone Test* dan *Dynamic Cone Penetrometer*.

2. *Laboratory Test*

Penyelidikan ini dilakukan di laboratorium yang terdiri dari beberapa jenis pengujian seperti uji indeks properti tanah (*atterberg limit, water content, specific gravity, sieve analysis*) dan uji *engineering* properti tanah (*direct shear test, triaxial test, consolidation test, permeability test, compaction test, dan CBR*).

Dalam pengujian tanah terdapat beberapa contoh tanah yang dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

a. Contoh tanah tidak terganggu (*Undisturbed Soil*)

Tanah dapat dikatakan tidak terganggu ketika contoh tanah masih atau tetap menunjukkan sifat aslinya. Sifat asli yang dimaksud adalah tanah tersebut tidak mengalami perubahan baik dari struktur, susunan kimia, atau kadar airnya. Biasanya digunakan untuk percobaan *engineering properties*.

b. Contoh tanah terganggu (*Disturbed Soil*)

Tanah dapat dikatakan sebagai tanah terganggu ketika ketika contoh tanah sudah tidak menunjukkan sifat asli tanah. Karena proses pengambilan tanah dilakukan tanpa disertai dengan usaha tertentu untuk melindungi struktur asli tanah. Biasanya digunakan untuk percobaan uji index properti tanah.

Pengujian soil test merupakan proses pemasukan suatu batang kerucut dengan sudut 60° dan luasan ujung 1,54 inch² ke dalam tanah dengan kecepatan stabil 2 cm/detik. Dilengkapi dengan alat pembacaan manometer yang dapat mengukur besar kekuatan tanah pada kedalaman tertentu dari berbagai lapisan tanah dengan kekuatan yang berbeda.

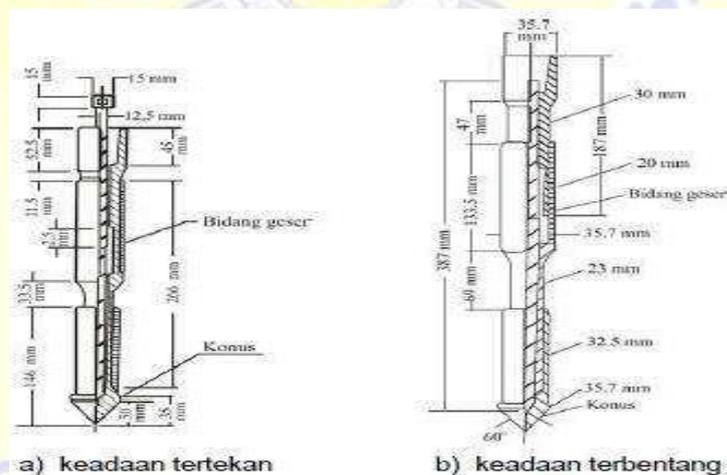
Alat soil dibagi menjadi dua jenis sesuai kapasitasnya, yaitu:

- a. Soil ringan, kapasitas 2 ton. Digunakan untuk mengukur tekanan konus sampai 150 kg/cm^2 atau setara dengan kedalaman mencapai 30 m.
- b. Soil berat, kapasitas 10 ton. Digunakan untuk mengukur tekanan konus sampai 500 kg/cm^2 atau setara dengan kedalaman mencapai 50 m.

Sedangkan untuk ujung konus pada soil terdapat dua jenis, yaitu:

- a. Konus biasa, yang diukur merupakan perlawanan ujung konus dan biasanya digunakan pada jenis tanah berbutir kasar dengan beban perlawanan lekatnya kecil.
- b. Bikonus, yang diukur merupakan perlawanan ujung konus dan digunakan pada jenis tanah berbutir halus. Tahanan ujung konus dan hambatan lekat dibaca setiap kedalaman 20 cm.

Untuk pembacaan alat soil dilakukan secara manual dan bertahap, dengan mengurangi hasil pengukuran (hasil pembacaan manometer) kedua dengan hasil pengukuran (hasil pembacaan manometer) pertama. Apabila pembacaan manometer $> 150 \text{ kg/cm}^2$ (soil ringan) sebanyak tiga kali berturut-turut akan dihentikan.



Gambar 2.6 Konus Keadaan Tertekan dan Terbentang

(sumber: Sosrodarsono & Nakazawa, 2000)

Langkah – langkah pelaksanaan uji soil, yaitu:

1. Membersihkan area sekitar pengujian dari rerumputan dan bebatuan agar terdapat permukaan yang rata.
2. Memasang angker dan mengatur mesin sondir agar berdiri vertikal pada lokasi yang akan diuji lalu memasang manometer.
3. Mengisi mesin sondir dengan oli sampai bebas udara.
4. Memasang batang konus pada ujung pipa sondir pertama.
5. Pasang rangka pertama beserta konus pada mesin sondir.
6. Menyiapkan alat pembaca manometer dan kran-kran harus berada tepat pada posisi nol.
7. Langkah selanjutnya kran pada manometer 0-60 kg/cm² dan 0-250 kg/cm² dibuka dan mulai penekanan. Pada umumnya batang konus mencapai kedalaman 20 cm, lalu manometer dibaca sehingga di dapat pembacaan tahanan (JP) yaitu perlawanan penetrasi konus (PK) dan hambatan lekat (HL). Pembacaan manometer saat terjadi loncatan pada jarum manometer.
8. Kemudian dilanjutkan dengan penekanan untuk kedalaman 20 cm berikutnya, lalu pembacaan dapat dilakukan seperti kedalaman 20 pertama.
9. Jika tanah semakin keras serta PK + JP mendekati 90 kg/cm² agar dilakukan pergantian manometer dengan cara menutup kran manometer 0-60 kg/cm² kemudian di pindahkan ke manometer 0-250 kg/cm².
10. Pembacaan PK dan JP dilakukan setiap 20 cm kemudian akan dihentikan ketika didapat nilai PK tiga kali b
11. Berturut-turut melebihi 200 kg/cm² atau sampai kedalaman 30 m.
12. Apabila hanya menggunakan konis maka pembacaan manometer hanya dilakukan pada penekanan pertama (PK).
13. Untuk soilr berat pada waktu tekanan manometer tiga kali berturut-turut lebih dari 500 kg/cm² atau kedalaman maksimal 30 m.

Dari hasil pengujian soil yang dilakukan maka didapatkan nilai jumlah perlawanan (*JP*) dan nilai perlawanan konus (*PK*) sehingga didapatkan nilai hambatan lekat (*HL*) didapatkan dengan rumus:

1. Hambatan Lekat (*HL*)

$$HK = (JP - PK) \times \frac{A}{B} \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Jumlah Hambatan Lekat (*JHL*)

$$JHL_i = \sum_0^i HL \dots\dots\dots (2.2)$$

dengan,

PK= Perlawanan penetrasi konus (*q_c*)

JP = Jumlah perlawanan (perlawanan ujung + selimut)

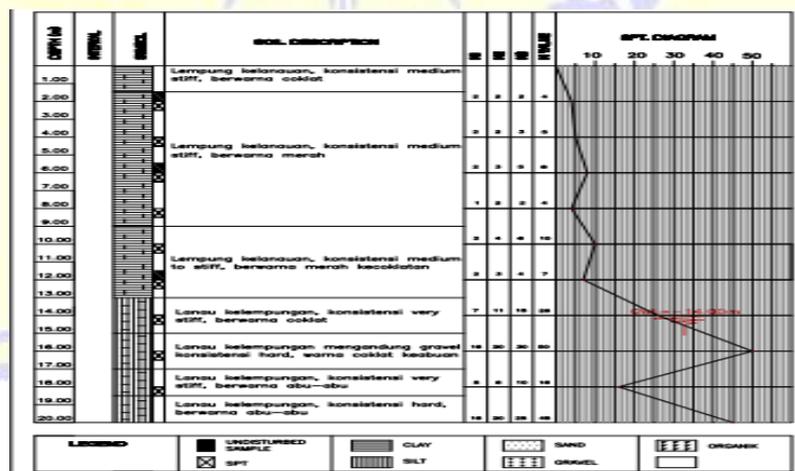
A = Interval pembacaan (setiap 20 cm)

B = Faktor alat = luas konus / luas torak = 10 cm

i = Kedalaman lapisan tanah yang ditinjau (m)

JHL= Jumlah Hambatan Lekat

Hasil pengujian dengan soil ini dapat diilustrasikan dalam bentuk grafik yang menyatakan hubungan antara kedalaman setiap lapisan dengan perlawanan penetrasi tanah terhadap konus dan dinyatakan dalam gaya per satuan luas. Hambatan lekat merupakan perlawanan geser tanah terhadap selubung bikonus yang dinyatakan dalam gaya per satuan panjang.



Gambar 2.7 Kurva Pengujian Soil Tes
(sumber: Surya Jenar-Gedung LIPI, 2021)



Gambar 2.8 Alat Soil Dengan Konus Biasa
(sumber: Surya Jenar-Gedung LIPI, 2021)

Tabel 2.1 Harga-harga Empiris ϕ dan Dr Pasir dan Lumpur Kasar
Berdasarkan Soil

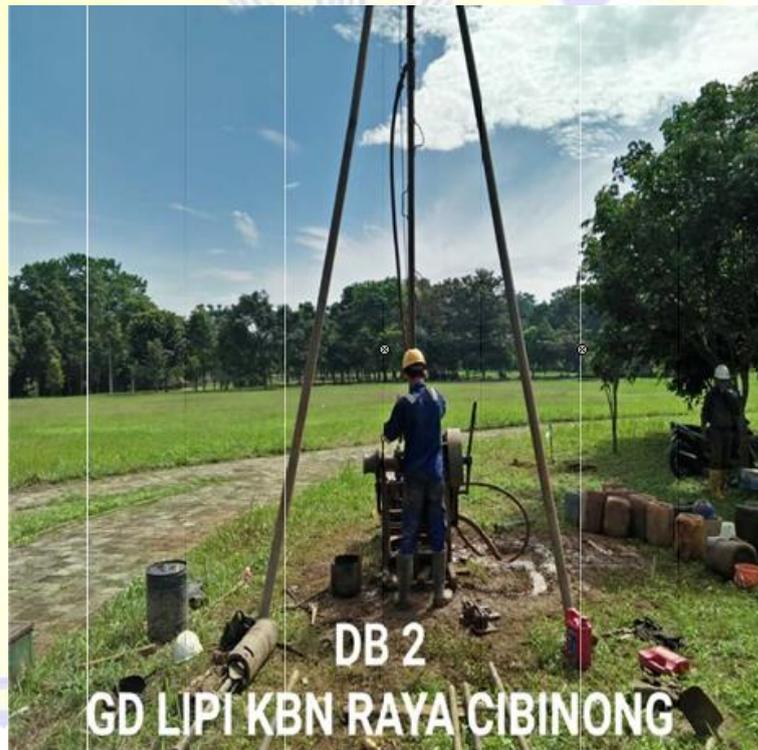
Penetrasi konus (PK) = q_c (kg/cm ²)	Densitas relatif (Dr) (%)	Sudut geser dalam (°)
20	-	25 – 30
20 – 40	20 – 40	30 – 35
40 – 120	40 – 60	35 – 40
120 – 200	60 – 80	40 – 45
>200	>80	>45

Sumber: (Soedarmo, 1993)

2.1.4 Pengujian *Standard Penetration Test* (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) digunakan untuk mendapatkan daya dukung tanah secara langsung, pengujian ini berasal dari Amerika Serikat yang dilakukan pada satu lubang bor dengan cara memasukkan tabung sampel dengan diameter 35 mm dan kedalam 305 mm. pada dasar lubang bor dilakukan tumbukan dengan suatu beban penumbuk dengan berat 140 lb setara dengan 63 kg dengan jumlah pukulan/kaki (*blows per foot*) biasa disebut dengan nilai N (*Na Value*) atau *Number of blows*.

Pengujian SPT ini dilakukan dengan interval kedalaman 2 meter, menariknya pengujian ini relatif lebih sederhana dengan keuntungan dapat diperolehnya contoh tanah terganggu untuk identifikasi jenis tanah, sehingga interpretasi kuat geser dan deformasi tanah dapat diperkirakan dengan baik.



Gambar 2.9 Alat pengujian penetrasi standar tes
(sumber: Surya Jenar-Gedung LIPI, 2021)

Langkah langkah pengujian dan perhitungan SPT, yaitu:

1. Pertama-tama siapkan tabung SPT
2. Kemudian dilakukan pukulan agar *split spoon* dapat masuk kedalam tanah 15 cm.
3. Kemudian dicatat jumlah pukulan yang didapatkan untuk memasukkan *split spoon* kedalam 15 cm pertama sebagai N_1 dan seterusnya sampai mencapai kedalaman 45 cm.
4. Angka SPT ditemukan dengan cara menjumlahkan 2 angka pukulan terakhir yaitu N_2 dan N_3 pada setiap interval pengujian yang dicatat di *Drilling Log*.
5. Setelah pengujian selesai, tabung SPT diangkat kemudian tanah nya di ambil untuk diamati di laboratorium.
6. Apabila saat pengujian SPT jika jumlah pukulan melebihi 50 kali sebelum penetrasi 30 cm tercapai maka pengujian dapat dihentikan.

Tujuan pengujian SPT, yaitu:

1. Menentukan kepadatan tanah relatif dan sudut geser lapisan tanah.
2. Menentukan jenis tanah dan ketebalan setiap lapisan tanag.
3. Memperoleh data komulatif pada perlawananan penetrasi tanah dan kepadatan tanah yang tidak berkohesi.

Tabel 2.2 Hubungan Dr , ϕ dan nilai N dari pasir (Peck, Mayerhoff)

Nilai N	Kepadatan relatif (Dr)		Sudut Geser Dalam (ϕ)	
			Menurut Peck	Menurut Mayerhoff
0 – 4	0,0 – 0,2	Sangat lepas	<28,5	<30
4 – 10	0,2 – 0,4	Lepas	28,5 – 30	30 – 35
10 – 30	0,4 – 0,6	Sedang	30 – 36	35 – 40
30 – 50	0,6 – 0,8	Padat	36 – 41	40 – 45
>50	0,8 – 1,0	Sangat padat	>41	>45

Sumber: (Sosrodarsono, 2000)

Tabel 2.3 Hubungan Dr , ϕ dan nilai N dari pasir (Terzaghi)

Kepadatan relatif (Dr)	N
Very Soft / sangat lunak	<2
Soft / lunak	2 – 4
Medium / kenyal	4 – 8
Stiff / sangat kenyal	8 – 15
Hard / keras	15 – 30
Padat	>30

Sumber: (Sosrodarsono, 2000)

Sama seperti pengujian pada umumnya, pengujian SPT juga memiliki kelebihan dan kekurangan diantaranya sebagai berikut:

Kelebihan pengujian SPT

- a. Dapat memperoleh nilai N dan sampel tanah terganggu.
- b. Prosedur yang sederhana sehingga dapat memungkinkan dilakukan dengan manual.
- c. Dapat dilaksanakan pada jenis tanah apapun dan batuan lunak.
- d. Pada tanah berpasir, pengujian SPT ini langsung dapat memprediksi kapasitas daya dukung dan kerapatan relatif tanah.

Kekurangan pengujian SPT

- a. Sampel yang di peroleh hanya sampel tanah terganggu
- b. Nilai N yang di peroleh masih berbentuk data sangat kasar (untuk tanah lempung).
- c. Derajat ketidakpastian hasil pengujian tergantung pada kondisi alat dan operator.
- d. Untuk tanah yang mengandung banyak kerikil, hasil pengujian tidak dapat di percaya.



2.1.6 Tiang Pancang

Pondasi tiang (*pile foundation*) merupakan salah satu konstruksi pondasi yang mampu menahan gaya tegak lurus (*orthogonal*) ke sumbu tiang dengan cara menyerap lenturan. Hal ini dilakukann dengan cara pondasi tiang dibuat menjadi satu kesatuan dengan menyatukan pangkal tiang pancang dibawah konstruksi dengan tumpuan pondasi. (Sosrodarsono dan Nakazawa, 2000).

Pondasi tiang pancang (*pile cap foundation*) adalah struktur bawah bangunan yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas ke dalam lapisan tanah dengan kedalaman tertentu.

Dalam merencanakan konstruksi pondasi dapat digunakan beberapa jenis pondasi, pemilihan jenis pondasi didasarkan pada:

1. Fungsi bangunan atas (*upper structure*) yang akan dipikul oleh pondasi itu sendiri.
2. Besarnya beban dari struktur bangunan atas.
3. Kondisi tanah pada lokasi pembangunan konstruksi.
4. Biaya pondasi (harus lebih kecil dari pada biaya struktur bangunan atas).

Kegunaan pondasi tiang pancang meliputi beberapa hal, yaitu:

1. Untuk membawa beban konstruksi bangunan atas yang kemudian disalurkan kedalam tanah melalui lapisan tanah. Beban yang dimaksud tidak hanya berupa beban gaya vertikal tetapi meliputi gaya lateral.
2. Pondasi dapat digunakan untuk menopang terhadap kegagalan guling, gaya momen yang dihasilkan dari beban horizontal yaitu beban angin dapat ditahan oleh gaya friksi terhadap permukaan pondasi.
3. Dapat memadatkan endapan tak berkohesi yang bebas lepas didalam tanah melalui perpindahan pondasi tiang dan dorongan saat pemancangan.
4. Mengontrol penurunan yang tersebar pada tanah tepi yang didasari oleh sebuah lapisan dengan kepadatan tinggi.
5. Dapat membuat transfer beban dinamis akibat getaran (*vibrasi*) dapat dilaksanakan dengan baik tanpa mengubah struktur tanah.

6. Sebagai faktor keamanan tambahan jika erosi merupakan persoalan yang potensial sehingga dapat mengatasi kegagalan gelincir yang disebabkan oleh erosi dan beban horizontal.
7. Pada konstruksi yang dibangun dilepas pantai, tiang pancang digunakan untuk meneruskan beban dari atas permukaan air kemudian diteruskan kedalam lapisan tanah yang berada didasar air, sehingga dipengaruhi oleh beban vertikal dan tekuk serta beban lateral.

Ditinjau dari proses pembuatan pondasi tiang pancang, berikut beberapa kelebihan dan kelemahan menggunakan jenis pondasi ini:

Kelebihan:

1. Waktu pelaksanaan yang relatif lebih cepat.
2. Prosedur pelaksanaan pondasi ini tidak dipengaruhi oleh air tanah.
3. Kekuatan tiang dapat diandalkan karena dibuat dengan kualitas ketat di pabrik pembuatan.
4. Pelaksanaanya lebih mudah dilakukan.

Kelemahan:

1. Apabila diameter tiang terlalu besar proses pemancangan sulit dilakukan.
2. Harga pondasi yang tergolong mahal.
3. Saat proses pemancangan dilakukan efek yang ditimbulkan berupa getaran dan suara yang dapat mengganggu pada daerah padat penduduk.
4. Bila panjang tiang yang digunakan kurang, maka harus dilakukan proses penyambungan, proses penyambungan ini sulit dilakukan dan memerlukan alat khusus.

2.1.7 Jenis Alat Pancang

Dalam pamancangan tiang pancang digunakan beberapa alat pendukung seperti pemukul (*hammer*), pemukul yang dijatuhkan atau pemukul getar kemudian dilengkapi dengan penutup yang digunakan untuk menutup kepala tiang pancang menggunakan *pile cap*.

Ada beberapa jenis alat yang digunakan untuk membantu proses pemancangan, yaitu:

1. Pemukul jatuh (*Drop Hammer*)

Terdiri dari blok pemberat seperti palu yang dijatuhkan dari atas, dilakukan dengan cara pemberat ditarik dengan ketinggian tertentu kemudian dilepas agar terjatuh dan menumbuk kepala tiang. Jumlah tumbukan dibatasi permenit pada rentang 4-8 kali tumbukan, karena proses yang pemancangan yang berjalan lebih lama maka alat ini biasanya digunakan pada pekerjaan pemancangan yang kecil.

Keuntungan menggunakan alat ini adalah:

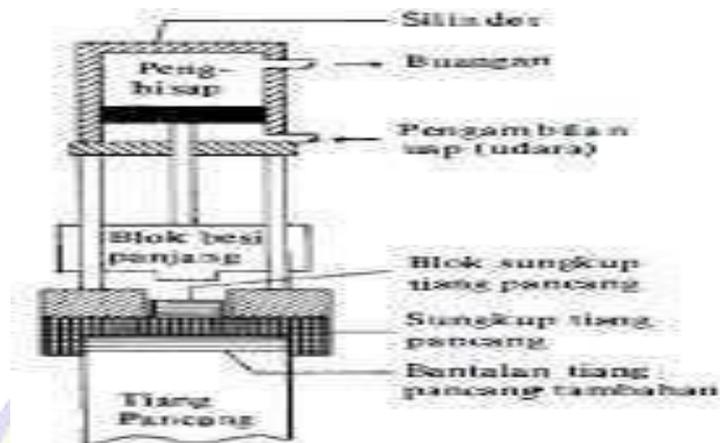
- a. Peralatan yang digunakan sederhana
- b. Tinggi pemberat dapat diperiksa dengan mudah
- c. Proses pelaksanaan tidak sulit dan biaya operasi murah

Kelemahan menggunakan alat ini adalah:

- a. Kepala tiang mudah rusak karena mendapat tumbukan.
- b. Jumlah pemancangan yang didapatkan per harii terbatas
- c. Kecepatan pemancangan lambat.

2. Pemukul aksi tunggal (*Single-Acting Hammer*)

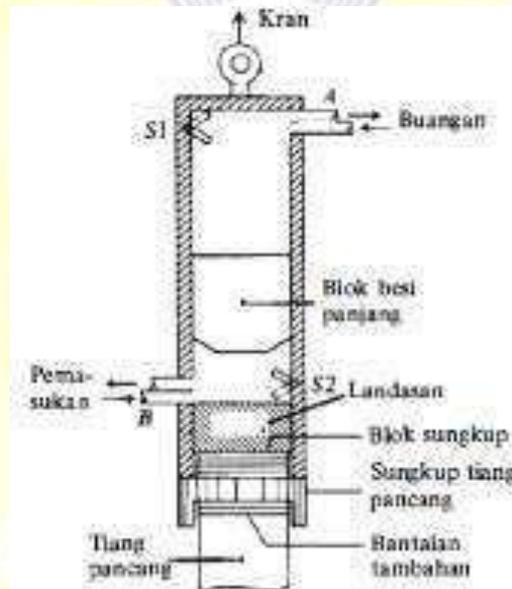
Berbentuk memanjang dengan ram yang bergerak naik turun, bergerak naik disebabkan oleh udara atau uap yang terkompresi sedangkan Gerakan turun disebabkan oleh berat sendiri. Energi pemukul aksial tunggal ini dapat dihitung dengan cara berat ram dikalikan dengan tinggi jatuh.



Gambar 2.10 *Single-Acting Hammer*
(sumber: Bowles,1991)

3. Pemukul aksi double (*Double-Acting Hammer*)

Alat ini menggunakan uap atau udara yang digunakan untuk mengangkat ram untuk mempercepat gerakan naik turunnya.



Gambar 2.11 *Double-Acting Hammer*
(sumber: Bowles,1991)

4. Pemukul diesel (*Diesel Hammer*)

Alat pemancangan ini lebih sederhana dibandingkan dengan pemukul lainnya, terdiri dari beberapa alat yaitu silinder, ram, balok anvil dan sistem injeksi bahan bakar. Digerakkan dengan bahan bakar minyak, energi yang

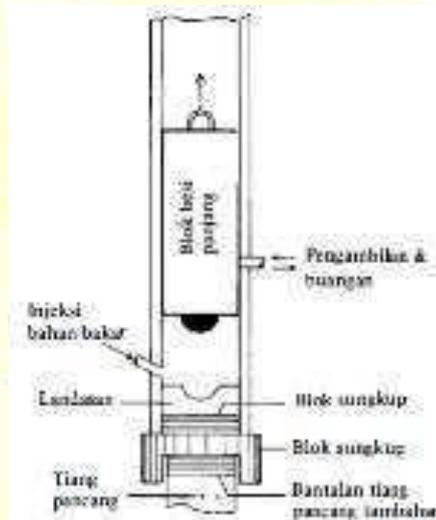
dihasilkan dapat dihitung dengan menjumlahkan benturan ram dengan energi hasil ledakan. Cocok digunakan pada tanah pondasi yang keras.

Keuntungan menggunakan pemukul tenaga diesel, yaitu:

- a. Daya tumbuk yang dihasilkan lebih besar.
- b. Pemindahan mudah dilakukan.
- c. Penggunaan bahan bakar lebih sedikit.

Kelemahan menggunakan pemukul tenaga diesel, yaitu:

- a. Pengerjaan menjadi lambat ketika berada pada lapisan tanah lunak.
- b. Menimbulkan efek kebisingan dan dapat terjadi percikan minyak pelumas.



Gambar 2.12 *Diesel Hammer*
(sumber: Bowles,1991)

5. Pemukul getar (*Vibrator Hammer*)

Pemukul ini mampu bergetar pada frekuensi tinggi, menggunakan pembangkit tenaga berupa beban statis dan sepasang beban yang berputar secara eksentrik. Getaran yang dihasilkan akan menembus tanah karena pengaruh beton.

2.1.8 Pemancangan Tiang Pancang

Pemancangan tiang pancang merupakan usaha yang dilakukan agar tiang pancang berada didalam tanah agar sesuai dengan fungsinya. Pelaksanaan pemancangan terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

1. Persiapan lokasi

Lokasi yang dimaksud disini adalah lokasi dimana alat pancang diletakkan karena alat pancang yang berat maka lokasi diwajibkan mampu menompang berat alat. Beberapa keadaan mendapatkan perhatian khusus, misalnya ketika elewasi akhir kepala tiang terletak dibawah permukaan tanah asli pekerjaan galian perlu dilakukan.

2. Persiapan alat

Persiapan alat ini sangat diperlukan, jenis alat yang digunakan harus sesuai dengan tipe pondasi dan jenis tanah dilokasi agar ketika pemancangan dilakukan kerusakan tiang dapat dihindari. Ada beberapa jenis alat pancang seperti jenis *drop hammer*, *diesel* dan *hidraulik*.



Gambar 2.13 Alat Pancang *Hydraulic Static Pile Driver* (HSPD)

(sumber: PT. Bina Karya, 2021)

3. Penyimpanan tiang

Agar lebih memudahkan tiang pancang disimpan disekitar lokasi pemancangan, cara penyimpanan tiang pancang agar menghindari kerusakan adalah dengan Menyusun tiang pancang seperti piramida dan dialasi dengan kayu secara melintang tergantung pancang tiang pancang sesuai dimensi tiang.



Gambar 2.14 Cara Penyimpanan Tiang

(Sumber: Metode Pelaksanaan Pekerjaan PT. ADHI KARYA, 2021)

4. Pemancangan

Proses pemancangan dilakukan dengan beberapa langkah-langkah sesuai dengan perencanaan:

- a. Koordinasi perlu dilakukan terkait prioritas kerja agar tercapai produktivitas yang terbaik.
- b. Penggunaan tanda hasil pengukuran seperti pematokan (*uitzet*) agar menghindari terjadinya kesalahpahaman terkait tanda.
- c. Menentukan titik pemancangan sesuai gambar kerja (*shop drawing*).
- d. Marking posisi titik-titik pancang.
- e. Pengambilan tiang pancang yang akan dipancang dengan mpvil *crane* dengan posisi titik angkat $1/3L$ agar menghindari patah tiang, kemudian tiang dimasukkan kedalam lubang caping alat pancang dan diposisikan pada titik pemancangan.

- f. Pemancangan dilakukan dengan alat pancang jenis HSPD (*Hydraulic Static Pile Driver*).
- g. Pemancangan dilakukan dan dimonitoring secara hati-hati agar menghindari terjadinya kesalahan
- h. Pemancangan dihentikan setelah ujung tiang mencapai kedalaman yang diinginkan.



Gambar 2.15 Visualisai Pemancangan Tiang GH Display
(Sumber: Metode Pelaksanaan Pekerjaan PT. ADHI KARYA, 2021)

5. *Quality control*

a. Kondisi fisik tiang

Kondisi fisik tiang masuk kedalam list yang harus diperhatikan, dimana kondisi seeluruh permukaan tiang harus dalam keadaan baik, umur beton tiang sudah memenuhi syarat, serta kepala tiang tidak boleh terdapat keretakan.

b. Toleransi

Pada proses pemancangan harus diawasi secara ketat terlebih arah tiang yang dipancang agar sesuai dengan titik perenanaan, penyimpangan arah vertikal yang diijinkan 1:75 dan penyimpangan arah horizontal dibatasi pada angka max 75 mm.

c. Penetrasi

Penetrasi ini merupakan Batasan tanda yang dibuat pada tiang sebelum pemancangan per setengah meter, agar ketika sampai pada Batasan penetrasi yang dibuat dapat dihitung jumlah pukulan.

d. Final set

Final set ini artinya pemancangan dapat dihentikan ketika sudah mencapai target sesuai perhitungan.

2.1.8 Penelitian Terdahulu

Dwi Prahastini (2010), melakukan analisa daya dukung pondasi tiang pancang kelompok pada proyek Gedung DPRD Sumatera Utara, Medan. Kapasitas daya dukung ini dihitung menggunakan nilai efisiensi dengan data lapangan dan uji laboratorium seperti data sondir, SPT dan bacaan manometer pada alat *hydraulic jack system*. Untuk hasil dari data sondir daya dukung ultimit kedalaman 21 m menggunakan metode Aoki dan De Alencar hasilnya adalah titik 1 nilai *Qult* sebesar 260,62 ton. Sedangkan untuk titik ke 2 nilai *Qult* sebesar 251,31 ton. Kemudian perhitungan dengan menggunakan metode Mayerhoff, untuk titik ke 1 nilai *Qult* sebesar 455,30 Ton dan titik ke 2 nilai *Qult* sebesar 494,55 ton. Dari data SPT dengan menggunakan metode Mayerhoff, hasil dari titik 1 nilai *Qult* sebesar 230,65 ton, sedangkan untuk titik 2 nilai *Qult* sebesar 228,54 ton. Dan dari data *Daily Piling Record* untuk pembacaan manometer saat pemancangan diperoleh *Qult* sebesar 327,87 ton.

Andi Yusti (2014), melakukan analisis daya dukung pondasi tiang pancang diverifikasi dari hasil uji *pile driving analyzer test* dan *capwap*. Analisis tersebut menggunakan metode Bageman, DeRuijter dan Berigen, Mayerhoff (1976), Mayerhoff (1956), α , Tomlinson (1977). Dari metode tersebut digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data pengujian CPT dan SPT, dan untuk numeris yaitu analisis dengan elemen hingga menggunakan program *plaxis 2D V.8*. Hasil diperoleh untuk BH-1 *Qult* sebesar 128,298 ton dengan berbanding 118 ton berbanding 102 ton. Untuk BH-2 diperoleh *Qult* sebesar 118,879 ton dengan berbanding 165 ton.

Achmad Naufal Kadarusman (2021), melakukan analisis daya dukung dan penurunan tiang pancang terhadap variabel dimensi berdasarkan data sondir dan SPT, analisis tersebut menggunakan metode mayerhoff. Hasil berdasarkan data sondir dan SPT didapatkan nilai kapasitas dukung ultimit pondasi tiang tunggal (Q_u) pada diameter tiang 0,4 m, 0,6 m, dan 0,8 m, dan kondisi *existing* 0,8 m diperoleh nilai berturut-turut sebesar 260, 081ton, 474, 500ton, 924,395 ton, dan 924,395 ton, kemudian dari data SPT diperoleh nilai sebesar 484,191 ton, 953, 350 ton, 1573, 293 ton, dan 1573, 293 ton. Nilai kapasitas daya dukung pondasi kelompok tiang (Q_g) dari data sondir diameter 0,4 m diperoleh sebesar 1431, 86 ton, sedangkan untuk hasil dari SPT diperoleh nilai dari diameter 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m, dan 0,8 m kondisi *existing* masing-masing nilainya sebesar 1420,002 ton, 1548,200 ton, 1529,865 ton, dan 1844,523 ton. Hasil kapasitas daya dukung pondasi kelompok tiang (Q_g) dari kedua data tersebut memenuhi syarat yaitu lebih dari beban aksial (P) sebesar 1412,566 ton, nilai penurunan kelompok tiang berdasarkan data sondir untuk diameter 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m, dan 0,8 m kondisi *existing* masing-masing penurunannya sebesar 0,243 m, 0,123 m, 0,051 m, dan 0,036 m. Sedangkan dari data SPT masing-masing sebesar 0,178 m, 0,069 m, 0,047 m, dan 0,047 m, maka yang paling aman digunakan yaitu tiang dengan diameter 0,8 m dari data SPT dengan nilai kapasitas dukung 1529,865 ton dengan penurunan pondasi sebesar 0,047 m yang merupakan penurunan paling kecil dengan 3 buah tiang

2.1.9 Perbandingan Penelitian Sebelumnya dengan Penelitian Penulis

Penelitian yang akan dilakukan oleh penulis sekarang adalah tentang analisa kapasitas daya dukung pondasi tiang pancang dengan metode analitis dan numerik pada proyek pembangunan *Infrastruktur Green House Biodiversitas LIPI Cibinong-Bogor*. Sampai data ini belum ada yang melakukan atau menganalisis kapasitas dukung pondasi pada bangunan tersebut. Kapasitas dukung dengan metode analitisnya dilakukan berdasarkan data SPT menggunakan metode α sedangkan untuk numeriknya menggunakan metode elemen hingga dengan plaxis 2D V.8

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Kapasitas Daya Dukung Tiang Pancang

Kapasitas dukung tiang pancang merupakan kemampuan tiang atau kapasitas tiang dalam mendukung atau menahan beban, hal ini selain dipengaruhi oleh jenis tiang dan dimensi tetapi juga dipengaruhi oleh jenis tanah. Variasi kondisi tanah serta tipe atau cara pelaksanaan pemancangan juga mempengaruhi besar kapasitas dukung ultimit tiang dalam satu lokasi pembangunan. Kapasitas dukung ultimit tiang dapat diperoleh dengan cara menganalisa hasil pengujian yang dilakukan pada tanah lokasi yang akan dilakukan pembangunan, salah satunya adalah hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT).

Standard Test Penetration (SPT) merupakan metode uji yang dilakukan bersamaan dengan pengeboran agar dapat diketahui perlawanan dinamik tanah atau dengan cara mengambil sampel tanah terganggu dengan Teknik pembukaan. Pengujian SPT ini dilakukan untuk menentukan kepadatan relatif dari lapisan tanah sehingga diketahui jenis dan ketebalan setiap lapisan kedalaman tanah.

Uji SPT ini dapat dikatakan sebagai uji penetrasi dinamis yang digunakan untuk mendapatkan daya dukung tanah secara langsung serta menetapkan kepadatan dari tanah yang tidak berkohesi, harga N yang diperoleh digunakan untuk menghitung daya dukung tanah yang tergantung dari kuat geser tanah. Anggapan dasar mengenai kuat geser tanah dijelaskan oleh Coulomb yang dinyatakan dalam sebuah persamaan yaitu:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

τ = kekuatan geser tanah (kg/cm^2)

c = kohesi tanah (kg/cm^2)

σ = tegangan normal yang terjadi pada tanah (kg/cm^2)

ϕ = sudut geser tanah ($^\circ$)

Tabel 2.4 Hal-Hal yang perlu diperhatikan untuk menentukan harga N

Klasifikasi	Hal-hal yang perlu diperhatikan	
Hal yang perlu diperhatikan dari hasil survei sebelumnya	Unsur tanah, variasi daya dukung vertikal, adanya lapisan lunak (ketebalan konsolidasi), kondisi drainase dan lain-lain.	
Hal yang perlu diperhatikan secara langsung.	Tanah pasir (tidak kohesif)	Berat isi, sudut geser dalam, ketahanan terhadap penurunan dan daya dukung tanah.
Tanah lempung (kohesif)	Keteguhan, kohesi, daya dukung dan ketahanan terhadap hancur.	

Sumber: (Sosrodarsono, 2000)

Kapasitas dukung tiang pancang menggunakan data SPT dihitung menggunakan metode Alpha (α) yang dikumpulkan McClelland (1974).

a. Tahanan ujung ultimit (Q_b)

$$Q_b = A_b \cdot c_u \cdot N_c \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan,

Q_b = Tahanan ujung bawah ultimit (kN)

A_b = Luas selimut tiang (m^2)

c_u = Kohesi tak terdrainase (kN/m^2)

N_c = Faktor kapasitas dukung (9)

$$A_b = 1/4\pi d^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan,

A_b = Luas selimut tiang (m^2)

π = 3,14

d = Diameter tiang (m)

b. Tahanan gesek ultimit (Q_s)

Tahanan gesek ultimit untuk tanah kohesif memerlukan nilai alpha (α) yang dituangkan dalam bentuk persamaan oleh McClelland (1974), yaitu:

$$Q_s = \sum \alpha c_u A_s \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan,

Q_s = Tahanan gesek ultimit (kN)

c_u = Kohesi tak terdrainase rata rata disepanjang tiang (kN/m²)

A_s = Luas selimut tiang (m²)

$$A_s = K \times \text{rentang kedalaman} \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan,

A_s = Luas selimut tiang (m²)

K = Keliling tiang (m)

$$K = \pi d \dots \dots \dots (2.8)$$

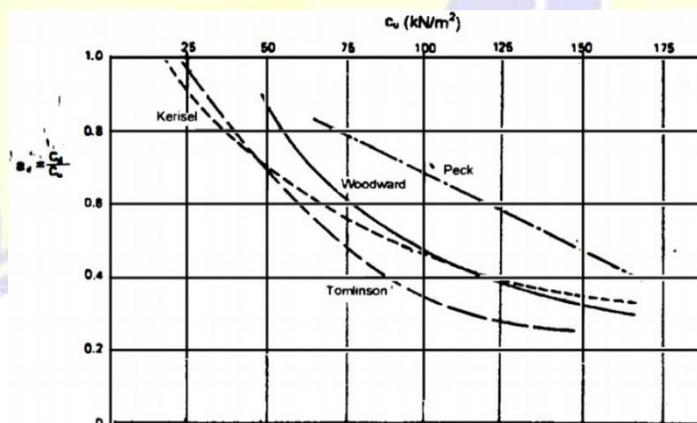
dengan,

K = Keliling tiang (m)

π = konstanta lingkaran (3,14)

d = diameter tiang (m)

Nilai α didapatkan dari grafik hubungan dengan nilai c_u (kohesi tak terdrainase rata disepanjang tiang)



Gambar 2.16 Faktor adhesi α untuk tiang pancang dalam tanah lempung (sumber: McClelland, 1974 dalam Hardiyatmo, 2015)

c. Faktor tahanan ujung maksimum (f_b)

Tahanan ujung satuan maksimum ini digunakan sebagai pengecekan kapasitas tahanan ujung ultimit, yang dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$f_b = Q_b / A_b \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan,

f_b = faktor tahanan ujung maksimum (<15000 kN/m²)

Q_b = tahanan ujung ultimit (kN)

A_b = luas selimut tiang (m²)

d. Faktor tahanan gesek maksimum (f_s)

Tahanan gesek satuan maksimum ini digunakan sebagai pengecekan kapasitas gesek ultimit yang dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$f_s = Q_s / A_s \dots \dots \dots (2.10)$$

dengan,

f_s = faktor tahanan ujung maksimum (<107 kN/m²)

Q_s = tahanan gesek ultimit (kN)

A_s = luas selimut tiang (m²)

e. Kapasitas dukung ultimit netto (Q_u)

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p \dots \dots \dots (2.11)$$

dengan,

Q_{ult} = Kapasitas dukung ultimit netto (kN)

Q_s = kapasitas gesek ultimit (kN)

Q_b = Kapasitas ujung ultimit (kN)

f. Kapasitas dukung ijin (Q_{ijin})

Kapasitas dukung ijin dinyatakan dalam bentuk persamaan, yaitu:

$$Q_{ijin} = Q_u / F \dots \dots \dots (2.12)$$

dengan,

Q_{ijin} = Kapasitas dukung ijin tiang (Ton)

Q_u = Kapasitas dukung ultimit netto (kN)

F = Faktor kapasitas ijin tiang (3)

g. Jarak antar tiang (s)

Jarak antar tiang diperlukan agar tiang dapat lebih maksimal menahan beban, jarak antar tiang dapat diperoleh melalui persamaan:

$$s = 3 \times d \dots \dots \dots (2.13)$$

dengan,

s = jarak antar tiang (m)

d = diameter tiang (m)

h. Efisiensi tiang (Eg)

Efisiensi tiang diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \dots \dots \dots (2.14)$$

dengan,

Eg = Efisiensi kelompok tiang

m = jumlah baris tiang

n' = jumlah tiang dalam 1 baris

Untuk nilai θ didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$\theta = \text{arc tg } d/s \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan,

d = diameter tiang (m)

s = jarak antar tiang (m)

i. Kapasitas dukung tiang kelompok (Qg)

Kapasitas dukung ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan, yaitu:

$$Qg = Eg \times n \times Qu \dots \dots \dots (2.16)$$

dengan,

Qg = Kapasitas dukung kelompok tiang (ton)

n = Jumlah tiang dalam kelompok

Qu = Kapasitas dukung ultimit netto tiang tunggal (ton)

2.2.2 Kapasitas Daya Dukung Lateral Tiang Pancang

Gaya tahanan maksimum dari beban lateral yang bekerja pada tiang kelompok adalah merupakan permasalahan interaksi antara elemen bangunan agak kaku dengan tanah, yang mana dapat diperlakukan berdeformasi sebagai elastis ataupun plastis.

Pondasi tiang harus dirancang dengan memperhitungkan beban-beban aksial dan beban lateral. Pondasi tiang dapat menahan beban lateral yang bekerja pada dinding penahan tanah, dimana beban lateral berasal dari tekanan tanah lateral yang mendorongnya. Pondasi tiang juga dapat menahan beban lateral seperti beban angin yang bekerja pada struktur bangunan tingkat tinggi seperti struktur rangka baja atau gedung pencakar langit, sehingga pondasi tiang mengalami gaya tarik dan gaya tekan. Pondasi tiang juga dapat menahan dinding turap yang menyangga pada pondasi tiang, Pondasi tiang juga menanggung beban lateral yang disebabkan gaya eksternal seperti hempasan gelombang air laut, angin, dan benturan kapal pada konstruksi lepas pantai.

Beban lateral yang diijinkan pada pondasi tiang diperoleh berdasarkan salah satu dari dua kriteria berikut :

1. Beban lateral ijin ditentukan dengan membagi beban ultimit dengan suatu faktor keamanan.
2. Beban lateral ditentukan berdasarkan defleksi maksimum yang diijinkan.

Metode analisis yang digunakan adalah metode Broms (1964):

Metode perhitungan ini menggunakan teori tekanan tanah yang disederhanakan dengan menganggap bahwa sepanjang kedalaman tiang, tanah mencapai nilai ultimit.

Keuntungan metode Broms :

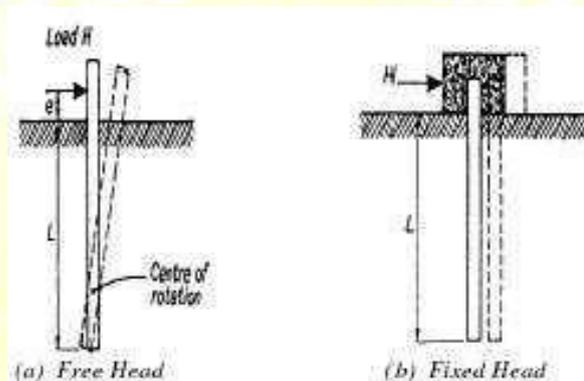
1. Dapat digunakan pada tiang panjang maupun tiang pendek.
2. Dapat digunakan pada kondisi kepala tiang terjepit maupun bebas.

Kerugian metode Broms :

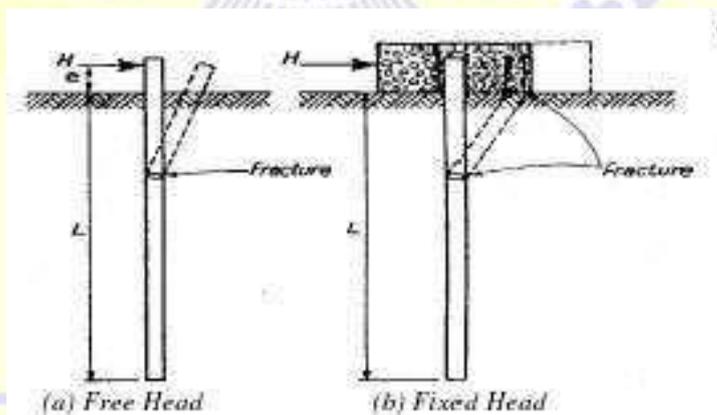
1. Hanya berlaku untuk lapisan tanah yang homogen, yaitu tanah lempung saja atau tanah pasir saja.

2. Tidak dapat digunakan pada tanah berlapis. Broms membedakan antara tiang pendek dan panjang serta membedakan posisi kepala tiang bebas dan terjepit.

Broms, 1964, mengemukakan beberapa anggapan dalam metode ini bahwa tanah adalah salah satu dari non-kohefif saja ($c = 0$) atau kohefif saja ($f = 0$), oleh karena itu, tiang pada setiap tipe tanah dianalisis secara terpisah. Broms juga menyatakan bahwa tiang pendek kaku (*short rigid pile*) dan tiang panjang lentur (*long flexible pile*) dianggap terpisah. Tiang dianggap tiang pendek kaku (*short rigid pile*) jika $L/T \leq 2$ atau $L/R \leq 2$ dan dianggap tiang panjang lentur (*long flexible pile*) jika $L/T \geq 4$ atau $L/R \geq 3,5$.



Gambar 2.17 Tiang Pendek Saat Diberikan Beban Lateral
(sumber: Hardiyatmo, 2002)



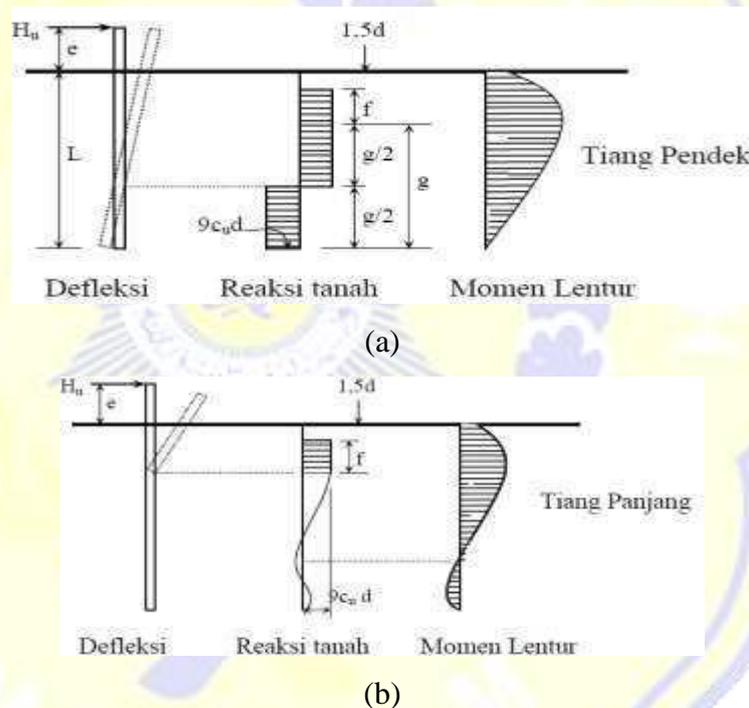
Gambar 2.18 Tiang Panjang Saat Diberikan Beban Lateral
(sumber: Hardiyatmo, 2002)

Tiang pendek ujung bebas diharapkan berotasi di sekitar pusat rotasi, sedangkan untuk tiang ujung jepit bergerak secara lateral dalam bentuk translasi.

a. Tiang Ujung Bebas (*Free-end Piles*)

Beban lateral yang bekerja pada kedua jenis tiang tersebut akan menghasilkan pergerakan yang berbeda dari segi defleksi dan mekanisme keruntuhan tiang. Bentuk keruntuhan dan distribusi reaksi tanah ultimit serta momen pada tiang ujung bebas untuk tiang pendek (kaku) ($L/R \leq 2$), ditunjukkan pada Gambar (2.30a). Pada tiang pendek, tahanan tiang terhadap gaya lateral akan ditentukan oleh tahanan tanah disekitar tiang.

Sedangkan bentuk keruntuhan dan distribusi reaksi tanah ultimit serta momen pada tiang ujung bebas untuk tiang panjang (elastis) ($L/R \geq 3,5$), ditunjukkan pada Gambar (2.30b). Pada tiang panjang tahanan terhadap gaya lateral akan ditentukan oleh momen maksimum yang dapat ditahan tiangnya sendiri (M_y).



Gambar 2.19 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang dengan Kondisi Kepala Tiang Bebas Akibat Beban Lateral pada Tanah Kohesif (a) Pondasi Tiang Pendek, (b) Pondasi Tiang Panjang (sumber : Hardiyatmo, 2002)

Pada gambar di atas, f mendefinisikan letak momen maksimum, sehingga dapat diperoleh:

$$f = H_u / (9c_u d) \dots \dots \dots (2.17)$$

dengan,

d = diameter tiang (m)

H_u = beban lateral (kN)

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m²)

f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)

Dengan mengambil momen terhadap titik dimana momen pada tiang maksimum, diperoleh:

$$\begin{aligned} M_{maks} &= H_u (e + 3D/2 + f) - 1/2 f (9c_u \times D \times f) \\ &= H_u (e + 3D/2 + f) - 1/2 f \times H_u \\ &= H_u (e + 3D/2 + 1/2 f) \\ M_{maks} &= H_u (e + 1,5D + 0,5f) \dots \dots \dots (2.18) \end{aligned}$$

Sumber : Hardiyatmo, 2015

dengan,

d = diameter tiang (m)

H_u = beban lateral (kN)

f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)

e = jarak beban lateral dari permukaan tanah (m)

Momen maksimum dapat pula dinyatakan oleh persamaan:

$$M_{maks} = (9/4) D \times g^2 \times c_u \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan,

M_{max} = momen maksimum (kN/m)

D = diameter tiang (m)

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m²)

g = jarak dari lokasi momen maksimum sampai dasar tiang (m)

$$\text{Dan } L = 3D/2 + f + g \dots \dots \dots (2.20)$$

dengan,

L = Panjang tiang (m)

D = diameter tiang (m)

f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)

g = jarak dari lokasi momen maksimum sampai dasar tiang (m)

$$\text{Maka } g = L - (f + 1,5 d) \dots \dots \dots (2.21)$$

dengan,

L = panjang tiang (m)

d = diameter tiang (m)

f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)

g = jarak dari lokasi momen maksimum sampai dasar tiang (m)

Karena $L = 3D/2 + f + g$, maka H_u dapat dihitung dari persamaan di atas, diperoleh:

$$H_u = 9c_u \times D (L - 1,5D) \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan,

L = panjang tiang (m)

D = diameter tiang (m)

H_u = beban lateral (kN)

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m^2)

Dimana Nilai-nilai H_u yang diplot dalam grafik hubungan L/D dan $H_u/c_u d^2$ ditunjukkan pada Gambar (2.20a) yang berlaku untuk tiang pendek. Hitungan Broms untuk tiang pendek di atas didasarkan pada penyelesaian statika, yaitu dengan menganggap bahwa panjang tiang ekuivalen dengan $(L - 3d/2)$, dengan *eksentrisitas* beban ekuivalen $(e + 3d/2)$.

Sedangkan untuk tiang panjang Gambar (2.36b) tahanan terhadap gaya lateral akan ditentukan oleh momen maksimum yang dapat ditahan tiangnya sendiri (M_y) dengan menganggap $M_{maks} = M_y$ (Momen leleh), penyelesaian persamaan diplot ke dalam grafik hubungan antara

$$M_y/c_u d^3 \dots \dots \dots (2.23)$$

dengan,

d = diameter tiang (m)

M_y = momen leleh kN/m

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m^2)

$$H_u/c_u d^2 = 28 \dots \dots \dots (2.24)$$

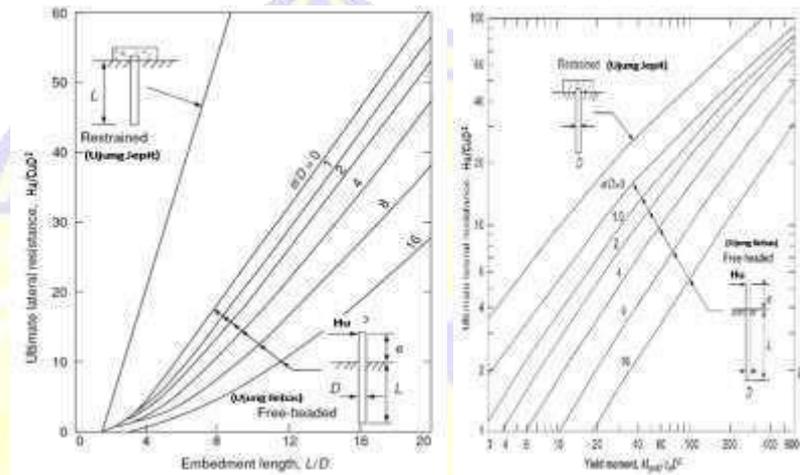
dengan,

d = diameter tiang (m)

H_u = beban lateral (kN)

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m²)

Nilai beban lateral H_u dapat ditentukan secara langsung melalui grafik pada Gambar (2.20).

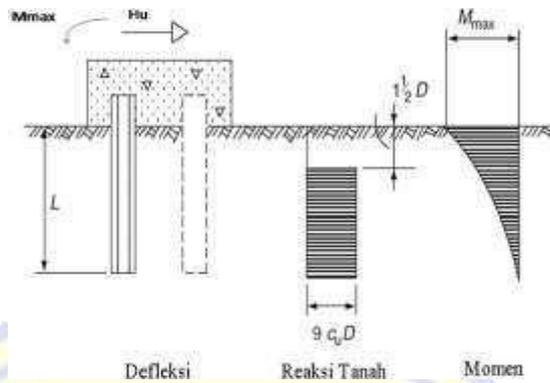


Gambar 2.20 Kapasitas Beban Lateral pada Tanah Kohesif; (a) untuk Pondasi Tiang Pendek, (b) untuk Pondasi Tiang Panjang (Sumber : Hardiyatmo, 2002)

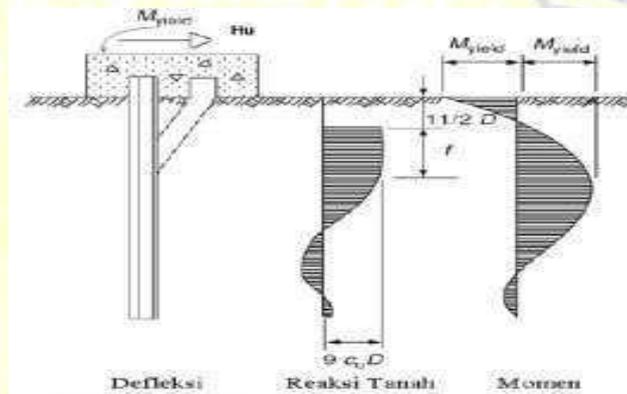
b. Tiang Ujung Jepit (*Fixed-end Pile*)

Pada Tiang ujung jepit, Broms menganggap bahwa momen yang terjadi pada tubuh tiang yang tertanam di dalam tanah sama dengan momen yang terjadi di ujung atas tiang yang terjepit oleh *pile cap*.

Mekanisme keruntuhan akibat beban lateral yang terjadi pada pondasi tiang dengan kondisi kepala tiang terjepit dapat dilihat pada Gambar (2.21).



(a)



(b)

Gambar 2.21. Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang dengan Kondisi Kepala Tiang Terjepit Akibat Beban Lateral pada Tanah Kohesif; (a)Pondasi Tiang Pendek, (b)Pondasi Tiang Panjang

Sumber : Hardiyatmo, 2002

Untuk tiang pendek, dapat dihitung tahanan ultimit tiang terhadap beban lateral dengan persamaan:

$$H_u = 9C_u D (L - g - 1,5D) \dots \dots \dots (2.25)$$

dengan,

D = diameter tiang (m)

L = panjang tiang (m)

H_u = beban lateral (kN)

c_u = kohesi tanah undrained (kN/m²)

g = jarak dari lokasi momen maksimum sampai dasar tiang (m)

$$M_{maks} = H_u(0,5L + 0,75D) \dots \dots \dots (2.26)$$

dengan,

H_u = beban lateral (kN)

D = diameter tiang (m)

L = panjang tiang (m)

Nilai-nilai H_u dapat diplot dalam grafik hubungan L/D dan $H_u/c_u D^2$ ditunjukkan pada Gambar (2.20a).

Sedangkan untuk tiang panjang, H_u dapat dicari dengan persamaan:

$$H_u = \frac{2M_y}{(e+1,5d+0,5f)} \dots \dots \dots (2.27)$$

maka

$$M_y = H_u(e + 1,5d + 0,5f) \dots \dots \dots (2.28)$$

dengan,

H_u = beban lateral (kN)

D = diameter tiang (m)

M_y = momen leleh (kN/m)

f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah(m)

Nilai-nilai H_u yang diplot dalam grafik hubungan $M_y/c_u d^3$ dan $H_u/c_u d^2$ ditunjukkan pada Gambar (2.20b).

c. Horizontal Defleksi

Gaya horizontal didasarkan pada defleksi toleransi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan, yaitu:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kh*d}{4EpIp}} \dots \dots \dots (2.29)$$

dengan,

β = Faktor tak berdimensi

kh = koefisien reaksi subgrade horizontal (kN/m³)

d = diameter tiang (m)

Ep = modulus elastisitas tiang (kN/m²)

Ip = momen inersia tiang (m⁴)

$$y_o = \frac{2H\beta*(e\beta+1)}{kh*d} \dots\dots\dots (2.30)$$

dengan,

y_o = defleksi tiang dipermukaan tanah

H = gaya horizontal (kN)

β = Faktor tak berdimensi

kh = koefisien reaksi subgrade horizontal (kN/m³)

d = diameter tiang (m)

$$H = \frac{y_o*kh*d}{2\beta*(e\beta+1)} \dots\dots\dots (2.31)$$

dengan,

y_o = defleksi tiang dipermukaan tanah

H = gaya horizontal (kN)

β = Faktor tak berdimensi

kh = koefisien reaksi subgrade horizontal (kN/m³)

d = diameter tiang (m)

e = ujung bebas tiang (m)

d. Horizontal Ijin

$$H_s = H_u / F \dots\dots\dots (2.32)$$

dengan,

H_s = gaya horizontal ijin (kN)

H_u = gaya horizontal maksimum (kN)

F = faktor tiang (3)

2.2.3 Pengecekan Kapasitas Dukung Terhadap Beban Eksternal

Beban yang bekerja pada pondasi umumnya adalah beban yang didapatkan dari struktur atas dan tekanan tanah dari arah samping pondasi tiang, beban ini biasanya dikenal dengan beban vertikal dan beban horizontal. Beban ini dipikul oleh beberapa tiang yang disatukan oleh pelat penutu tiang atau *pilecap* yang berfungsi untuk menyebarkan beban dari struktur atas ke tiang yang kemudian disalurkan ke lapisan tanah.

Reaksi total atau beban aksial pada masing-masing tiang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Q_v = \left(\frac{V}{n} + \frac{X \cdot e_x \cdot V}{\sum X^2} + \frac{Y \cdot e_y \cdot V}{\sum Y^2} \right) \dots \dots \dots (2.33)$$

dengan,

Q_v = beban aksial tiang (kN)

V = gaya vertikal (kN)

X = jarak tiang arah x (m)

Y = jarak tiang arah y (m)

e_x = eksentrisitas arah x (m)

e_y = eksentrisitas arah y (m)

$\sum X^2$ = kuadrat jarak tiang ke pusat tiang arah x (m^2)

$\sum Y^2$ = kuadrat jarak tiang ke pusat tiang arah y (m^2)

n = jumlah tiang dalam satu kelompok

sedangkan untuk nilai $\sum X^2$ dan $\sum Y^2$ dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$(\sum X^2) = 3 \cdot X^2 + 3 \cdot (-X)^2 \dots \dots \dots (2.34)$$

dengan,

$\sum X^2$ = kuadrat jarak tiang ke pusat tiang arah x (m^2)

X = jarak tiang arah x (m)

$$(\sum Y^2) = 3 \cdot Y^2 + 3 \cdot (-Y)^2 \dots \dots \dots (2.35)$$

dengan,

$\sum Y^2$ = kuadrat jarak tiang ke pusat tiang arah y (m^2)

Y = jarak tiang arah y (m)

Beban horizontal masing-masing tiang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_h = H/n \dots \dots \dots (2.36)$$

dengan,

Q_h = beban horizontal masing-masing tiang (kN)

H = beban horizontal (kN)

n = jumlah tiang

2.2.4 Faktor Keamanan

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka diperlukan untuk membagi kapasitas ultimit dengan faktor keamanan. Faktor keaman ini perlu diberikan dengan tujuan :

1. Untuk memberikan keamanan terhadap ketidak pastian metode hitungan yang digunakan.
2. Untuk memberikan keamanan terhadap variasi kuat geser dankompresibilitas tanah. Untuk meyakinkan bahwa bahan tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja.
3. Untuk meyakinkan bahwa penurunan total yang terjadi pada tiang tunggal atau kelompok masih tetap dalam batas-batas toleransi.
4. Untuk meyakinkan bahwa penurunan tidak seragam diantara tiang-tiang masih dalam batas toleransi.

Dari hasil banyak pengujian-pengujian beban tiang, baik tiang pancang maupun tiang bor yang berdiameter kecil sampai sedang (600 mm), penurunan akibat beban bekerja (*working load*) yang terjadi lebih kecil dari 10 mm untuk faktor keaman yang tidak kurang dari 2,5 (Tomlinson, 1977).

Besarnya beban bekerja (*working load*) atau kapasitas tiang ijin (Q_a) dengan memperhatikan keamanan terhadap keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit (Q_u) dibagi dengan faktor keaman (SF) yang sesuai.

Tabel 2.5 Faktor Keamanan yang Disarankan

Klasifikasi Struktur	Faktor keamanan (SF)			
	Kontrol baik	Kontrol Normal	Kontrol Jelek	Kontrol sangat jelek
Monumental	2,3	3	3,5	4
Permanaen	2	2,5	2,8	3,4
Sementara	1,4	2	2,4	2,8

Sumber: (Hardiyatmo,2002)

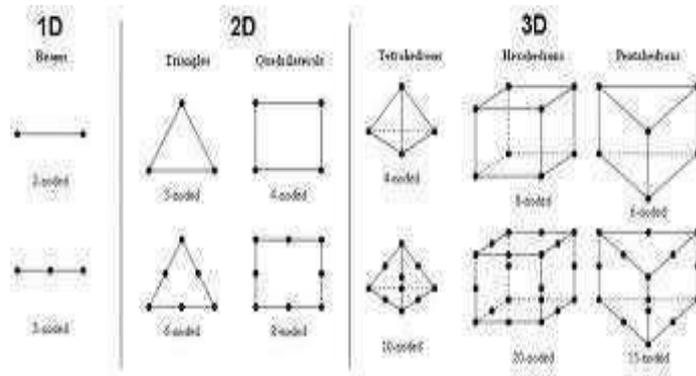
2.2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga dalam rekayasa geoteknik adalah metode yang membagi-bagi daerah yang akan dianalisis menjadi bagian-bagian yang kecil yang disebut dengan elemen. Semakin banyak pembagian elemen maka hasil perhitungan numeriknya akan semakin mendekati kondisi asli. Metode elemen hingga pada rekayasa geoteknik memiliki sedikit perbedaan dengan metode elemen hingga pada rekayasa struktur, sebab dalam rekayasa geoteknik terjadi interaksi elemen yang memiliki kekakuan yang berbeda. Seperti halnya dalam menganalisis pondasi dengan metode elemen hingga terdapat perbedaan kekakuan antara dua elemen, yaitu elemen tanah dan elemen struktur atau pondasi itu sendiri.

Pada dasarnya, elemen-elemen dalam Metode Elemen Hingga (MEH) dibedakan menjadi 3, yaitu 1D (disebut juga line elements), 2D (disebut juga plane elements), dan 3D. Untuk alasan biaya, sebisa mungkin pemodelan MEH dilakukan dengan elemen yang paling sederhana.

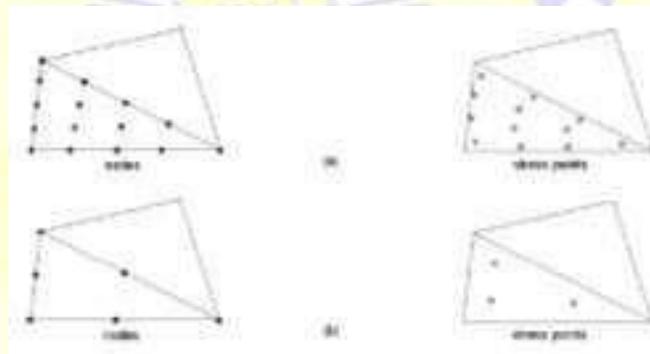
Di tahun 1998, Plaxis 2D pertama untuk *Windows* dirilis. Pada waktu yang sama, pengembangan untuk perhitungan elemen hingga 3 dimensi dilakukan sehingga program 3D *Tunnel* dapat dirilis tahun 2001. 3D *Foundation* adalah program tiga dimensi kedua yang dirilis tahun 2004. Kedua program tersebut tidak mampu untuk mendefinisikan bentuk geometri 3 dimensi yang lebih kompleks karena keterbatasan geometris. Tahun 2010 program Plaxis 3D dirilis. Plaxis 3D adalah program *Finite Element* tiga dimensi yang dikembangkan untuk analisa deformasi, stabilitas, dan aliran air tanah dalam ilmu geoteknik. Pengembangan Plaxis dimulai tahun 1987 di *Delft University of Technology*.

Sebagai inisiatif dari *Dutch Ministry of Public Works and Water Management (Rijkswaterstaat)*. Tujuan awal pengembangan adalah untuk menciptakan program elemen hingga 2 dimensi untuk analisis bantaran sungai yang terdiri dari tanah lunak pada dataran rendah di Belanda. Dalam beberapa tahun, Plaxis dikembangkan untuk mengatasi sebagian besar area geoteknik. Karena pertumbuhan yang sangat pesat dan berkelanjutan, perusahaan Plaxis dibentuk tahun 1993.



Gambar 2.22 Jenis Elemen
(sumber: PT. Geociptaeka Setia, 2020)

Di dalam elemen terdapat dua jenis titik, yaitu titik nodal dan juga titik integrasi. Titik nodal adalah titik yang menghubungkan elemen satu dengan elemen lainnya. Pada titik nodal terjadi perpindahan. Sementara titik integrasi adalah titik yang berada di dalam elemen. Dari titik integrasi dapat diperoleh tegangan dan juga regangan di elemen. Titik integrasi juga dikenal sebagai stress point.



Gambar 2.23 Titik Nodal dan Integrasi
(sumber: PT. Geociptaeka Setia, 2020)

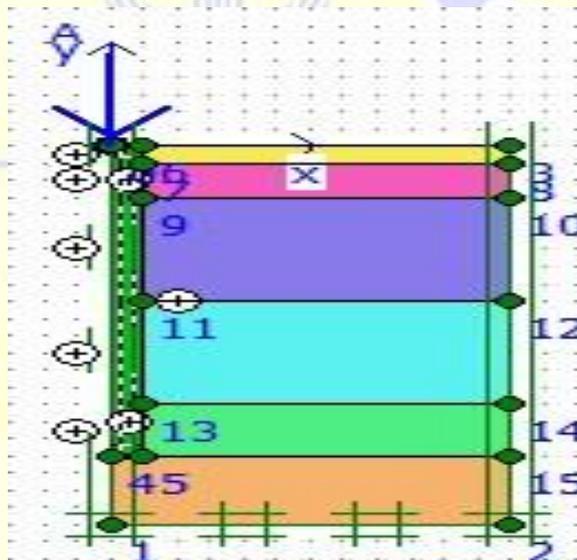
2.2.6 Plaxis

Plaxis (*Finite Element Code For Soil and Rock Analyses*) merupakan suatu rangkuman program elemen hingga yang telah dikembangkan untuk menganalisa deformasi dan stabilitas geoteknik dalam perencanaan-perencanaan sipil. Plaxis dapat digunakan untuk melakukan pemodelan dan analisis semua permasalahan geoteknik seperti *slope stability*, *seepage*, dan konsolidasi. Selain itu Plaxis juga

dapat memodelkan dan menganalisis struktur geoteknik dan interaksi tanah dengan struktur seperti pondasi dangkal, pondasi dalam, dinding penahan tanah, angkur (anchor), dan sebagainya.

Secara garis besar tahapan pemodelan dan analisis menggunakan Plaxis terdiri dari :1. *General Setting*, 2. *Geometry*, 3. *Material Properties*, 4. *Initial Condition*, 5. *Calculation*.

Sebelum melakukan perhitungan secara numerik, maka harus terlebih dahulu dirancang pemodelan dari pondasi tiang pancang yang akan dianalisis seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.24 Model Pondasi Tiang Pancang
(sumber: plaxis 2D V.8, 2010)

Material yang dipergunakan dalam pemodelan tersebut meliputi material tanah dan pondasi yang mempunyai sifat-sifat teknis dari masing-masing material yang mempengaruhi perilakunya. Dalam program Plaxis, sifat-sifat tersebut diwakili oleh parameter dan pemodelan yang spesifik. Tanah dan batuan mempunyai kecenderungan perilaku yang non-linier dalam kondisi pembebanan.

Pemodelan dalam program ini sangat terbatas dalam memodelkan perilaku tanah, sehingga lebih umum digunakan untuk struktur yang padat dan kaku di dalam tanah. Input parameter berupa Modulus Young E dan rasio Poisson ν dari material yang bersangkutan.

Di dalam program Plaxis ada beberapa jenis pemodelan tanah beberapa diantaranya adalah model soft soil, dan Mohr – Coulomb.

A. Model Tanah Mohr – Coulomb

Pemodelan Mohr – Coulomb mengasumsikan bahwa perilaku tanah bersifat plastis sempurna (*linear elastic perfect plastic model*), dengan menetapkan suatu nilai tegangan batas dimana pada titik tersebut tegangan tidak lagi dipengaruhi oleh regangan. Input parameter meliputi lima buah parameter yaitu:

- a. *Modulus Young* (E), *rasio poisson* (ν) yang memodelkan keelastisitasan tanah
- b. kohesi (c), sudut geser (ϕ) memodelkan perilaku plastis daritanah.
- c. dan sudut dilantasi (ψ) memodelkan perilaku dilantasi tanah

Pada pemodelan Mohr – Coulomb umumnya dianggap bahwa nilai E konstan untuk suatu kedalaman pada suatu jenis tanah, namun jika diinginkan adanya peningkatan nilai E per kedalaman tertentu disediakan input tambahan dalam program Plaxis. Untuk setiap lapisan yang diperkirakan rata – rata kekakuan yang konstan sehingga perhitungan relatif lebih cepat dan dapat diperoleh kesan pertama deformasi. Selain lima parameter di atas, kondisi tanah awal memiliki peran penting dalam masalah deformasi tanah.

Nilai rasio Poisson ν dalam pemodelan Mohr – Coulomb didapat dari hubungannya dengan koefisien tekanan. Secara umum nilai ν bervariasi dari 0,3 sampai 0,4 namun untuk kasus–kasus penggalian (*unloading*) nilai ν yang lebih kecil masih realistis. Nilai kohesi c dan sudut geser ϕ diperoleh dari uji geser triaxial, atau diperoleh dari hubungan empiris berdasarkan data uji lapangan. Sementara sudut dilantasi ψ digunakan untuk memodelkan regangan volumetrik plastik yang bernilai positif. Pada tanah lempung NC, pada umumnya tidak terjadi dilantasi ($\psi = 0$), sementara pada tanah pasir dilantasi tergantung dari

kerapatan dan sudut geser φ dimana $\psi = \varphi - 30^\circ$. Jika $\varphi < 30^\circ$ maka $\psi = 0$. Sudut dilatasi ψ bernilai negatif hanya bersifat realistis jika diaplikasikan pada pasir lepas.

B. Model Tanah Lunak (*Soft Soil*)

Seperti pada pemodelan Mohr – Coulomb, batas kekuatan tanah dimodelkan dengan parameter kohesi (c), sudut geser dalam tanah (φ), dan sudut dilatasi (ψ). Sedangkan untuk kekakuan tanah dimodelkan menggunakan parameter λ^* dan k^* , yang merupakan parameter kekakuan yang didapatkan dari uji triaksial maupun oedometer.

Model *soft soil* ini dapat memodelkan hal – hal sebagai berikut:

- a. Kekakuan yang berubah bersama dengan tegangan (*stress dependent stiffness*)
- b. Membedakan pembebanan primer (*primary loading*) terhadap *unloading-reloading*
- c. Mengingat tegangan pra – konsolidasi

Pada program plaxis terdapat parameter-parameter yang digunakan, yaitu:

1. Tanah

Model tanah yang dipilih yaitu model Mohr – Coulomb, dimanaperilaku tanah dianggap elastis dengan parameter yang dibutuhkan yaitu:

- a. Modulus elastisitas, E (*stiffness modulus*).

Karena sulitnya pengambilan contoh asli di lapangan untuk tanah granuler maka beberapa pengujian lapangan (*in-situ-test*) telah dikerjakan untuk mengestimasi nilai modulus elastisitas tanah. Terdapat beberapa usulan nilai E yang diberikan oleh peneliti.

Bowles memberikan persamaan yang dihasilkan dari pengumpulandata pengumpulan data sondir, sebaai berikut:

$$E = 4700\sqrt{f'c} \dots\dots\dots (2.37)$$

dengan,

E = modulus elastisitas (kN/m³)

$f'c$ = muutu beton (Mpa)

Nilai perkiraan modulus elastisitas dapat diperoleh dari pengujian SPT

(Standart Penetration Test). Nilai modulus elastis yang dihubungkan dengan nilai SPT, sebagai berikut:

$$E_s = 6 (N + 5) \text{ k/ft}^2 \dots\dots\dots (2.38)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas *undrained* (kN/m³)

N = nilai NSPT

Hasil hubungan yang diperoleh adalah modulus elastisitas *undrained* (E_s) sedangkan input yang dibutuhkan adalah modulus elastisitas efektif (E_s'). Dengan menggunakan rumusan yang menggabungkan kedua modulus elastisitas tersebut, maka diperoleh yaitu:

$$E_s' = 0,8 E_s \dots\dots\dots (2.39)$$

dengan,

E_s = modulus elastisitas *undrained* (kN/m³)

E_s' = modulus elastisitas efektif (kN/m³)

Menurut Bowles, 1997, nilai modulus elastisitas tanah juga dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah per lapisan (Tabel 2.15).



Tabel 2.6 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Macam Tanah	E_s (Kg/cm ²)
LEMPUNG	
1. sangat lunak	3.0 – 30
2. lunak	20 – 40
3. sedang	45 – 90
4. berpasir	300 – 425
PASIR	
1. berlanau	50 – 200
2. tidak padat	100 – 250
3. padat	500 – 1000
PASIR DAN KERIKIL	
1. padat	800 – 2000
2. tidak padat	500 – 1400
LANAU	20 – 200
LOSES	150 – 600
CADAS	1400 – 14000

Sumber : (Bowles, 1997)

Selain itu modulus elastisitas tanah dapat juga dicari dengan pendekatan terhadap jenis dan konsistensi tanah dengan N-SPT, seperti pada tabel berikut.

Tabel 2.7 Korelasi N-SPT dengan Modulus Elastisitas pada Tanah Lempung

<i>Subsurface condition</i>	<i>Penetration resistance range N (bpf)</i>	ξ_{50} (%)	<i>Poisson's Ratio (v)</i>	<i>Shear strength Su (psf)</i>	<i>Young's Modulus Range E_s (psi)</i>	<i>Shear Modulus Range G (psi)</i>
Very soft	2	0,020	0,5	250	170-340	60-110
Soft	2-4	0,020	0,5	375	260-520	80-170
Medium	4-8	0,020	0,5	750	520-1040	170-340
Stiff	8-15	0,010	0,45	1500	1040-2080	340-690
Very stiff	15-30	0,005	0,40	3000	2080-4160	690-1390
Hard	30	0,004	0,35	4000	2890-5780	960-1930
	40	0,004	0,35	5000	3470-6940	1150-2310
	60	0,0035	0,30	7000	4860-9720	1620-3420
	80	0,0035	0,30	9000	6250-12500	2080-4160
	100	0,003	0,25	11000	7640-15270	2540-5090
	120	0,003	0,25	13000	9020-18050	3010-6020

Sumber : (Randolph, 1978)

b. *Poisson's ratio* (μ) diambil 0,2 – 0,4.

Rasio poisson sering dianggap sebesar 0,2 – 0,4 dalam pekerjaan-pekerjaan mekanika tanah. Nilai sebesar 0,5 biasanya dipakai untuk tanah jenuh dan nilai 0 sering dipakai untuk tanah kering dan tanah lainnya untuk kemudahan dalam perhitungan. Ini disebabkan nilai dari rasio poisson sukar untuk diperoleh untuk tanah.

Untuk nilai poisson ratio efektif (μ') diperoleh dari hubungan jenis tanah, konsistensi tanah dengan poisson ratio seperti terlihat pada Tabel (2.8). Sementara pada program Plaxis khususnya model tanah *undrained* $\mu' < 0,5$.

Tabel 2.8 Hubungan Jenis Tanah, Konsistensi dan *Poisson's Ratio* (μ)

<i>Soil type</i>	<i>Description</i>	(μ')
<i>Clay</i>	Soft	0,35 - 0,40
	Medium	0,30 - 0,35
	Stiff	0,20 - 0,30
<i>Sand</i>	Loose	0,15 - 0,25
	Medium	0,25 - 0,30
	Dense	0,25 - 0,35

(Sumber : Hardiyatmo, 1994)

c. Berat volume tanah kering (γ_{dry})

Berat volume tanah kering adalah perbandingan antara berat tanah kering dengan satuan volume tanah. Berat jenis tanah kering dapat diperoleh dari data *soil test* dan *direct shear*.

d. Berat volume tanah basah (γ_{wet})

Berat volume tanah basah adalah berat volume tanah asli sebelum dipengaruhi oleh faktor lain. Berat volume tanah basah dapat diperoleh data *Soil Test* dan *Direct Shear*.

e. Sudut geser dalam (ϕ)

Sudut geser dalam bersama dengan kohesi merupakan faktor dari kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Nilai dari sudut geser dalam didapat dari *engineering properties* tanah, yaitu dengan *triaxial test* dan *direct shear test*.

Hubungan antara sudut geser dalam (ϕ) dengan nilai SPT setelah dikoreksi menurut Peck, Hanson dan Thornburn, 1974 adalah:

$$\phi = 27,1 + 0,3 N_{cor} - 0,00054 N^2_{cor} \dots \dots \dots (2.40)$$

dengan,

N_{cor} = nilai N-SPT setelah dikoreksi

ϕ = sudut geser dalam

f. Kohesi (c)

Yaitu gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser tanah, kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Deformasi dapat terjadi akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan geser. Nilai dari kohesi didapat dari *engineering properties*, yaitu dengan *triaxial test* dan *direct shear test*.

2. Tiang

Pada program plaxis ini juga dibutuhkan parameter tiang yang digunakan untuk perhitungan kapasitas dukung.

a. Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas tiang digunakan pada parameter yang diinput pada bagian tiang, digunakan untuk analisa kuat dukung tiang yang digunakan, modulus elastisitas tiang dapat diperoleh dari persamaan:

$$E = 4700\sqrt{f'c} \dots \dots \dots (2.41)$$

dengan,

E = modulus elastisitas tiang (kN/m²)

$f'c$ = mutu beton tiang (Mpa)

b. Momen Inersia (I)

Momen inersia tiang digunakan pada parameter yang diinput pada bagian tiang, digunakan untuk analisa kuat dukung tiang yang digunakan, momen inersia tiang dapat diperoleh dari persamaan:

$$I = 1/48\pi d^4 \dots \dots \dots (2.42)$$

dengan,

I = momen inersia tiang (m⁴)

π = 3,14

d = diameter tiang (m)

c. Luas penampang (A_s)

Luas penampang tiang digunakan untuk menghitung kapasitas dari tiang yang digunakan sesuai dengan ukuran dan jenis tiang, luas penampang tiang dapat diperoleh dari persamaan:

$$A_s = \frac{1}{4} \pi d^2 \dots\dots\dots (2.43)$$

dengan,

A_s = Luas penampang tiang (m^2)

π = 3,14

d = diameter tiang (m)

3. *Pilecap*

Untuk perhitungan daya dukung tiang kelompok, maka parameter pile cap perlu digunakan sesuai dengan jumlah tiang pada 1 kelompok.

a. Modulus elastisitas *pilecap* (E)

$$E = 4700 \sqrt{f'c} \dots\dots\dots (2.44)$$

dengan,

E = modulus elastisitas *pilecap* (kN/m^2)

$f'c$ = mutu beton *pilecap* (Mpa)

b. Momen Inersia (I)

$$I = 1/12 bh^3 \dots\dots\dots (2.45)$$

dengan,

I = momen inersia *pilecap* (m^4)

b = panjang *pilecap* (m)

h = lebar *pilecap* (m)

c. Luas Penampang (A_s)

$$A_s = \frac{1}{2} at \dots\dots\dots (2.46)$$

dengan,

A_s = luas penampang *pilecap* (m^2)

a = alas *pilecap* (m)

t = tingi *pilecap* (m)

4. Kapasitas Ultimit

$$Q_u = \sum M_{sf} \times P \dots \dots \dots (2.47)$$

dengan,

Q_u = Kapasitas dukung ultimit (ton)

$\sum M_{sf}$ = Faktor kemanan

P = Beban vertikal pada struktur atas



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Proyek pembangunan Infrastruktur *Green House Biodiversitas* merupakan proyek pembangunan *Green House* bertingkat terdiri dari 4 lantai diatas permukaan tanah dengan jenis tanah lempung. Proyek ini berlokasi di tengah Kawasan Kebun Raya Cibinong LIPI yang terletak di jalan Raya Jakarta-Bogor Km 46.

Berdasarkan titik yang ditinjau pada wilayah zona 4 dengan 1 titik SPT (DB2), pondasi gedung ini menggunakan jenis pondasi tiang pancang kelompok.



Gambar 3.1. Lokasi Penelitian

(Sumber: Metode Pelaksanaan Pekerjaan PT. ADHI KARYA, 2021)

3.2 Ketersediaan Data

Pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan pengumpulan data secara sekunder yang diperoleh dari beberapa sumber yaitu:

Tabel 3.1 Jenis data dan sumber data yang digunakan

No.	Jenis Data	Sumber
1	Data Geoteknik (2021) - Data sondir - Data boring Nspt - Data klasifikasi tanah - Data laboratorium	Surya Jenar Mandhiri Laboratorium
2	Data Gambar Struktur Proyek (2021)	PT. Adhi Karya
3	Data Analisa Perencanaan Struktur (2021)	PT.Gitarencana Multiplan

Data sekunder yang didapatkan akan digunakan untuk keperluan analisis berikut:

1. Data Geoteknik (2021), digunakan untuk perhitungan daya dukung pondasi baik aksial maupun horizontal berdasarkan beberapa metode yang digunakan. Nilai NSPT yang hanya dapat diperoleh dari hasil pengujian SPT.
2. Data Gambar Struktur proyek (2021), digunakan untuk mengetahui diameter pondasi serta lokasi titik pengujian yang dilakukan.
3. Data Analisa Perencanaan Struktur (2021), digunakan data perhitungan beban struktur atas yang akan digunakan pada permodelan analisa daya dukung pondasi dengan bantuan *software* Plaxis 2D.

3.3 Diagram Alir

1. Pengumpulan Data

Data menjadi salah satu faktor paling penting dalam proses analisis yang dilakukan, data ini diperoleh dari berbagai sumber data yang didapatkan dilapangan oleh PT. Adhi Karya (persero) pada pada Proyek Pembangunan *Infrastruktur Green House Biodiversitas LIPI-Cibinong*. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data SPT, gambar struktur, laboratorium, dan analisa

struktur.

2. Studi Literatur

Studi literatur diperlukan sebagai acuan analisis setelah subjek ditentukan, studi literatur ini digunakan pada landasan teori bagi analisis yang mengacu pada buku, pendapat, dan teori yang berhubungan dengan penelitian.

3. Pengolahan Data

Pengolahan data ini dilakukan pada data-data yang didapatkan untuk menghitung kapasitas dukung tiang pancang kelompok dengan menggunakan metode analitis dan metode elemen hingga menggunakan aplikasi Plaxis 2D.

4. Desain Pondasi

Pada bagian ini dilakukan desain pondasi, mulai dari diameter serta Panjang pondasi yang digunakan.

5. Analisa Dengan Metode Analitis

Analisa dengan metode analitis ini menggunakan data SPT, kapasitas dukung pondasi dihitung menggunakan metode alpha (α)

6. Analisa Dengan Metode Elemen Hingga

Analisa dengan metode elemen hingga ini dilakukan dengan plaxis 2D V.8, dengan menginput parameter-parameter tanah dan tiang pancang pada permodelan program ini untuk mengetahui kapasitas dukung pondasi tiang pancang.

7. Kontrol Analisa

Kontrol Analisa dilakukan untuk mengetahui apakah hasil yang dihitung menggunakan data yang tersedia sudah memenuhi syarat dengan cara dikontrol menggunakan faktor aman kapasitas dukung pondasi.

8. Analisis Perbandingan Data

Setelah didapatkan hasil perhitungan kapasitas dukung dengan metode analitis dan metode elemen hingga, kedua hasil kemudian dibandingkan untuk melihat perbedaan hasil yang didapatkan

9. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini hasil yang sudah didapatkan dari kedua metode baik analitis

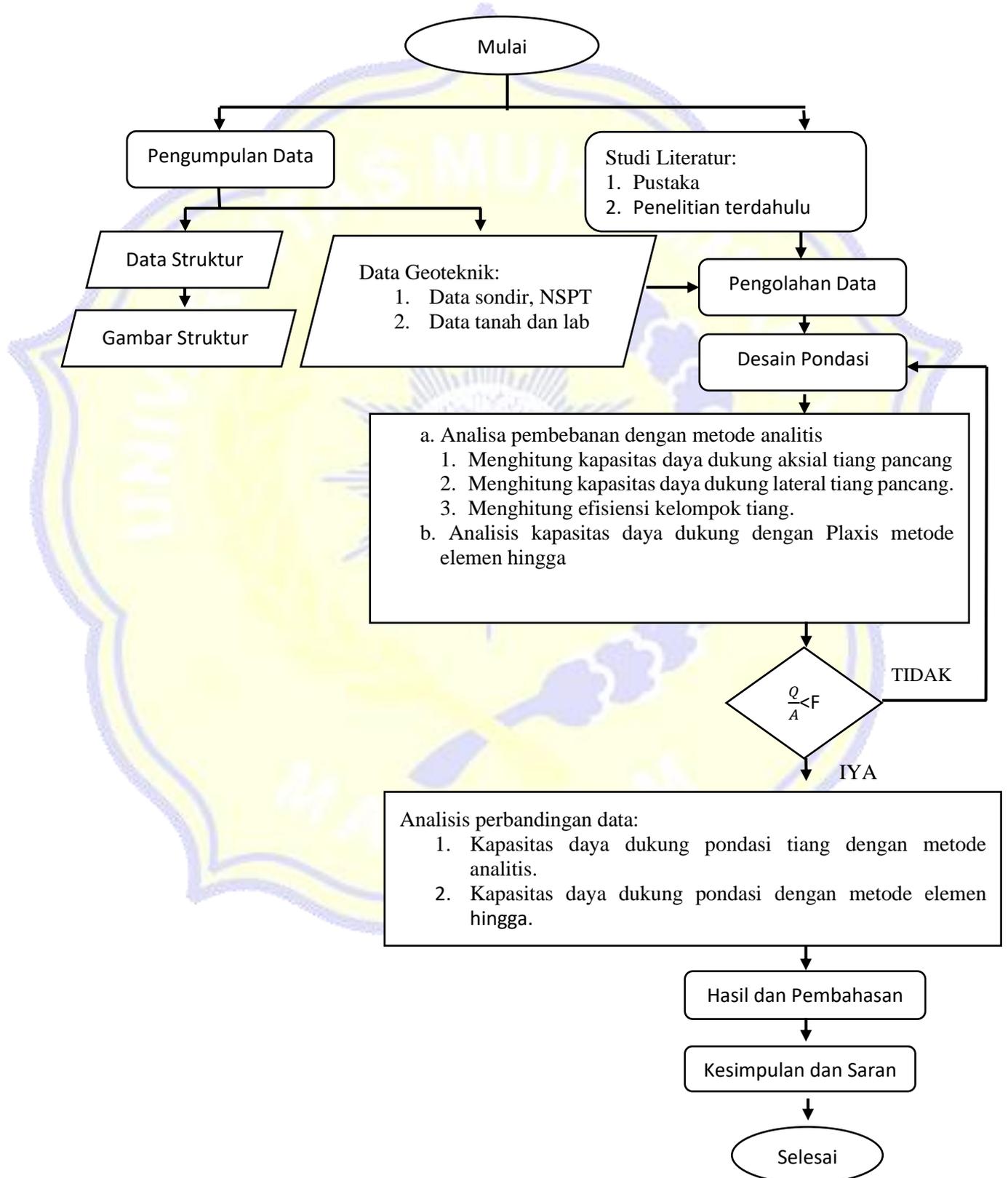
maupun elemen hingga diuraikan langkah demi langkah hingga mendapatkan hasil.

10. Kesimpulan

Kesimpulan ini memuat hasil penelitian secara singkat dan tepat yang dijabarkan dari hasil penelitian.



Skema pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

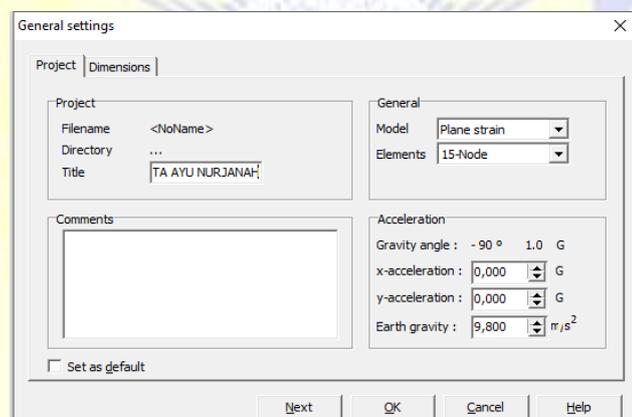


3.4 Langkah – Langkah Perencanaan Metode Analitis

1. Lakukan penyelidikan tanah dilokasi rencanan bangunan untuk mengetahui jenis tanah pada lokasi tersebut.
2. Menghitung kapasitas dukung ultimit tiang serta dilakukan pengecekan terhadap faktor aman.
3. Menghitung besar beban yang bekerja secara horizontal pada tiang.
4. Periksa apakah beban yang bekerja pada tiang yang disalurkan oleh struktur atas lebih kecil dari kekuatan tiang yang telah dihitung dengan faktor aman yang sesuai.

3.5 Langkah – Langkah Perencanaan Metode Elemen Hingga

1. Langkah pertama dalam analisis ini yaitu pengaturan parameter dasar dari metode elemen hingga di jendela pengaturan global dengan menggunakan model *Mohr – Coulomb* yaitu analisis *plane strain*.

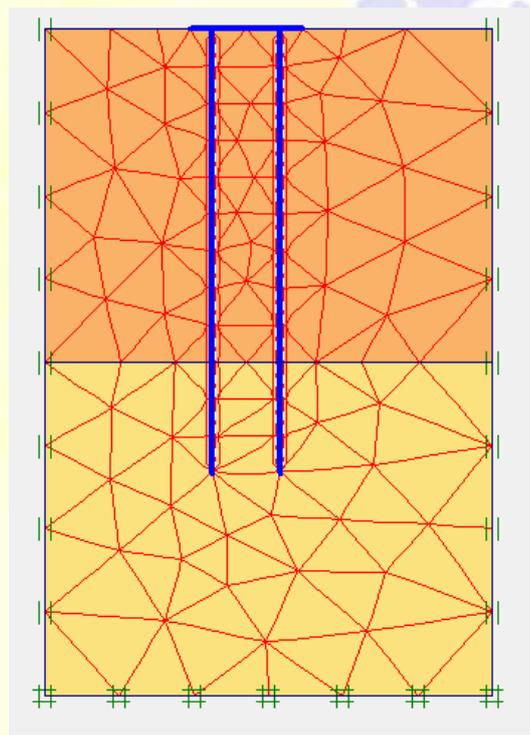


Gambar 3.2 Kotak Dialog Pengaturan Global Pada Plaxis

(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

2. Permodelan lapisan tanah dapat Digambar menggunakan garis geometri , setelah setiap lapisan tanah dibuat sesuai kedalaman masing-masing selanjutnya diinput data material tanah dengan menggunakan tombol material set  untuk setiap lapisan tanah. Setelah selesai menginput data material tanah, data setiap lapisan kemudian dimasukkan ke lapisan tanah masing-masing dengan cara seret data yang telah diinput ke permodelan geometri awal.

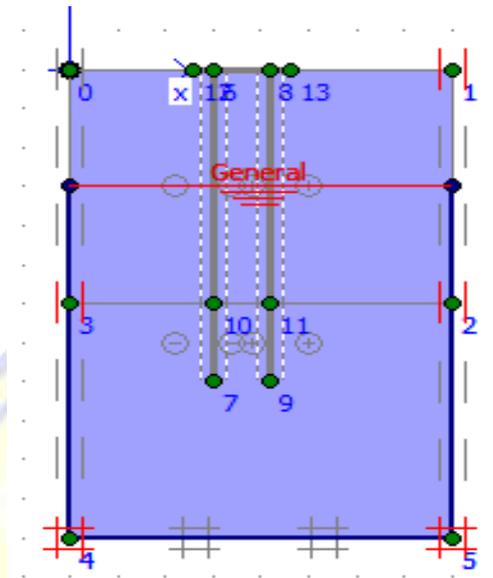
3. Selanjutnya menggambar pondasi tiang menggunakan tombol pelat , setelah selesai menggambar tiang kemudian bentuk kondisi batas setiap lapisan dengan menggunakan tombol jepit *standard fixities*  maka akan terbentuk jepit penuh pada bagian dasar dan jepit rol pada sisi vertikal.
4. Setelah Langkah-langkah diatas selesai dilakukan maka kemudian proses penginputan nilai beban dapat dilakukan dengan tombol , setelah digambarkan makan pada bagian ujung beban di klik 2 kali untuk menginput nilai beban.
5. Langkah selanjutnya adalah membagi elemen menjadi beberapa bagian yang beraturan sehingga mempermudah perhitungan dengan tombol *Mesh Generation* .



Gambar 3.3 *update Mesh Generation* sebelum melakukan kalkulasi perhitungan.

(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

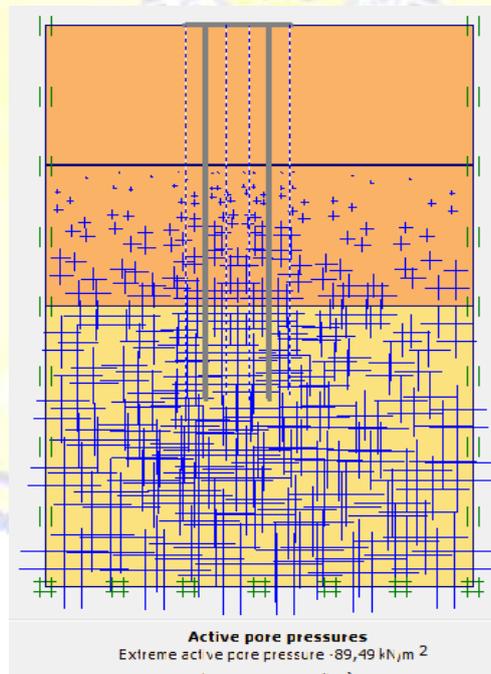
Kemudian klik tombol *initial conditiona* untuk melakukan permodelan muka air tanah dengan menggunakan tombol *phreatic level* untuk menggambar kedalaman muka air tanah.



Gambar 3.4 *Initial water pressure* pada program plaxis

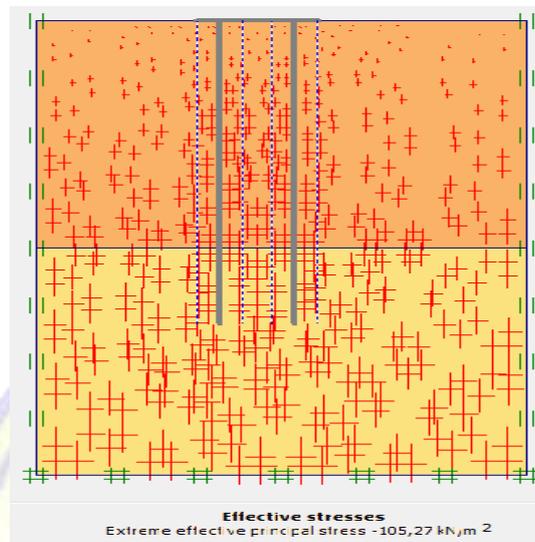
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

Kemudian klik tombol *generate water pressure* untuk mendefinikan tekanan air tanah, lalu akan muncul diagram *active pore pressure*, klik update maka akan Kembali ke tampilan awal. Bar selanjutnya klik *initial pore pressure* dan *generate pore pressure* maka akan muncul diagram untuk *effective stresses*



Gambar 3.5 Kondisi *Active Pore Pressure*

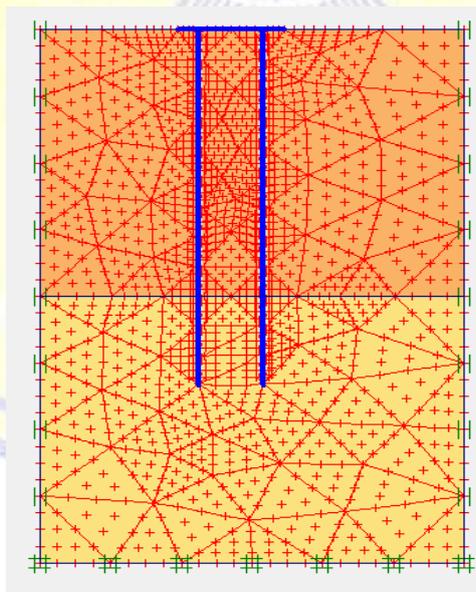
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)



Gambar 3.6 kondisi *Effective Stresses*
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

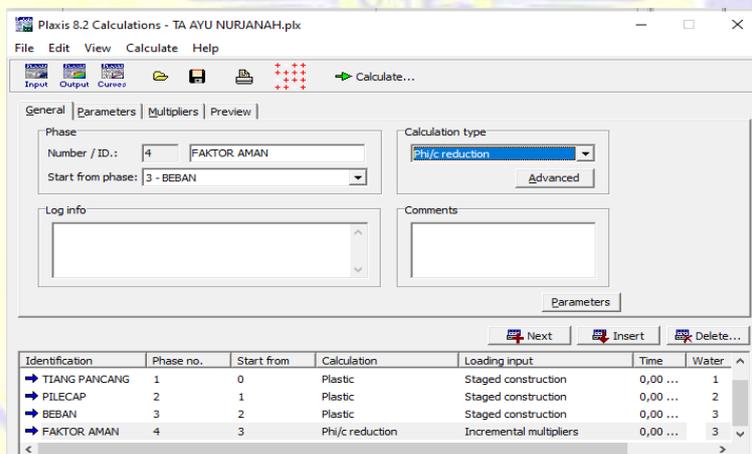
Setelah muncul initial stresses kemudian klik ok lalu diupdate, akhirnya tekan *calculate yes* dan akan muncul kotak dialog perhitungan.

6. Kemudian lakukan pemilihan titik node sebagai titik yang ditinjau, yang terletak diujung atas tiang kemudian diupdate, kemudian klik *parameters*, lalu *define*, dan aktifkan beban dengan cara mengklik ujung beban yang telah digambar dan klik update.



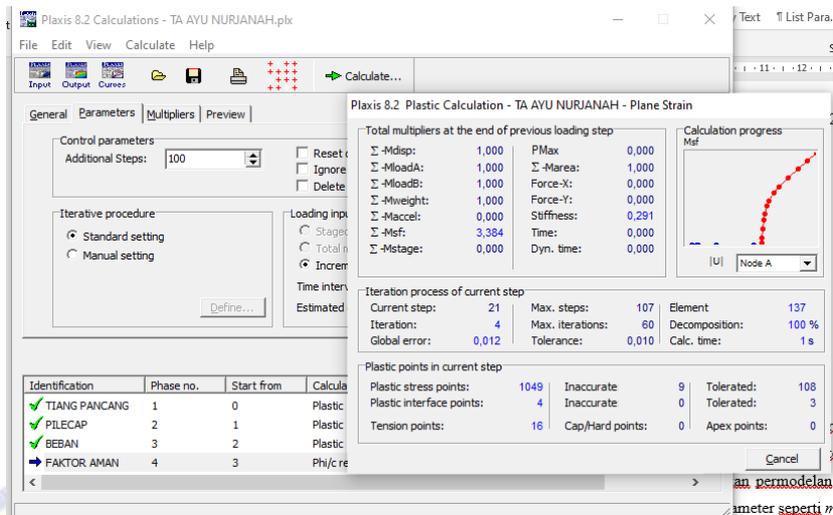
Gambar 3.7 pemilihan titik nodal
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

7. Dalam tampilan *window calculation* terdapat beberapa *phase* yang akan dikerjakan dari awal hingga akhirnya diperoleh nilai ΣMsf
- Phase 1*: pada *phase* ini merupakan kondisi tanah awal, karena merupakan *phase* yang digunakan untuk *stage construction* yang memodelkan konstruksi. Pada *phase* ini menggunakan nama pemancangan tiang, karena penginputan nilai struktur tiang pancang.
 - Phase 2*: pada *phase* ini merupakan kondisi tanah awal, karena merupakan *phase* yang digunakan untuk *stage construction* yang memodelkan konstruksi. Pada *phase* ini menggunakan nama *pilecap*, karena penginputan nilai struktur *pilecap*.
 - Phase 3*: pada *phase* ini merupakan *phase* yang digunakan untuk menginput nilai beban serta lanjutan model konstruksi pada *phase 1*, oleh sebab itu dinamakan *phase* beban.
 - Phase 4*: merupakan *phi/c reduction* yang digunakan untuk mensimulasikan kondisi dimana berkurangnya nilai *phi* sebelum konsolidasi sehingga didapatkan angka aman, oleh sebab itu *phase* ini diberi nama faktor aman.



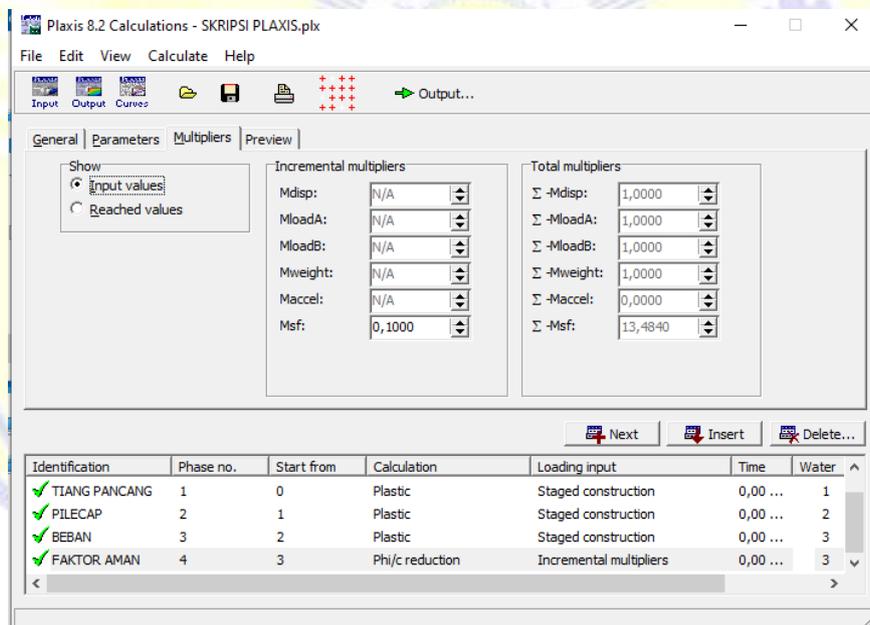
Gambar 3.8 *Phase – Phase dan Kegunaan Pada Program Plaxis*
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

8. Kemudian proses *calculation* akan berlangsung, tunggu beberapa saat kemudian tekan *yes* untuk menyelesaikan proses *calculation*, setelah perhitungan berlangsung maka akan diperoleh nilai MSF dan besar penurunannya seperti gambar dibawah ini:



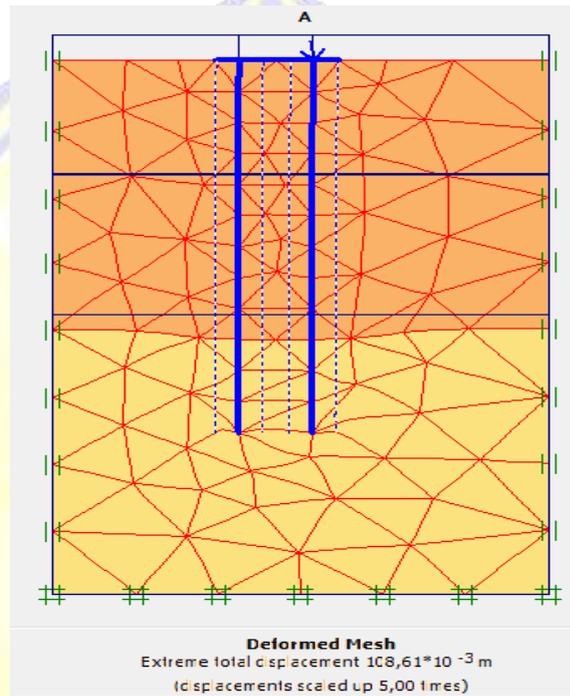
Gambar 3.9 Proses Kalkulasi
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

9. Dari hasil perhitungan dengan menggunakan program elemen hingga didapatkan nilai $\sum Msf$. $\sum Msf$ kemudian dikalikan dengan besar beban P yang diperoleh dari hasil analisa struktur



Gambar 3.10 Hasil Kalkulasi dan Nilai MSF
(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)

10. Lalu klik output pada bagian tengah atas untuk mengetahui besar penurunan yang terjadi.



Gambar 3.11 Output Hasil Perhitungan Berupa Besar Penurunan Yang Terjadi

(sumber: Plaxis 2D V.8, 2010)