

SKRIPSI

**STUDI KURVA P-Y PADA TIANG TUNGGAL DI
TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA, LPILE, DAN
METODE REESE & MATLOCK (1956)**



**ALEXANDER TOMMY
NPM: 6101901006**

**PEMBIMBING: Budijanto Widjaja, Ph.D.
KO-PEMBIMBING: Ir. Ignatius Tommy Pratama, S.T., M.S.**

**UNIVERITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
Januari 2023**

SKRIPSI

**STUDI KURVA P-Y PADA TIANG TUNGGAL DI
TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA, LPILE, DAN
METODE REESE & MATLOCK (1956)**



**ALEXANDER TOMMY
NPM: 6101901006**

BANDUNG, JANUARI 2023

PEMBIMBING

Budijanto Widjaja, Ph.D.

KO-PEMBIMBING

**Ir. Ignatius Tommy Pratama,
S.T., M.S.**

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARI 2023**

SKRIPSI

**STUDI KURVA P-Y PADA TIANG TUNGGAL DI
TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA, LPILE, DAN
METODE REESE & MATLOCK (1956)**



**ALEXANDER TOMMY
NPM: 6101901006**

PEMBIMBING : Budijanto Widjaja, Ph.D.

**KO-
PEMBIMBING : Ir. Ignatius Tommy Pratama S.T.,
M.S.**

PENGUJI 1 : Siska Rustiani, Ir., M.T.

PENGUJI 2 : Aswin Lim, Ph.D.

Four handwritten signatures on horizontal lines, corresponding to the supervisors and examiners listed on the left.

**UNIVERITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARI 2023**

PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut:

Nama : Alexander Tommy
NPM : 6101901006
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Perguruan Tinggi : Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa skripsi dengan judul:

“STUDI KURVA P-Y PADA TIANG TUNGGAL DI TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA, LPILE, DAN METODE REESE & MATLOCK (1956)”

Adalah benar karya saya sendiri di bawah bimbingan dosen pembimbing. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika terdapat tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala risiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan: di Bandung

Tanggal: 11 Januari 2023



Alexander Tommy

NPM: 6101901006

STUDI KURVA P-Y PADA TIANG TUNGGAL DI TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA, LPILE, DAN METODE REESE & MATLOCK (1956)

Alexander Tommy
NPM: 6101901006

Pembimbing: Budijanto Widjaja, Ph.D.
Ko-Pembimbing: Ir. Ignatius Tommy Pratama, S.T., M.S.

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARI 2023

ABSTRAK

Fondasi tiang bor merupakan opsi yang paling sering digunakan pada konstruksi tiang tunggal karena dapat merekayasa diameter dan kedalaman tiang agar mencapai daya dukung yang diinginkan. Selain mempertimbangkan daya dukung aksial yang tinggi, desain fondasi tiang harus memperhatikan pengaruh beban lateral karena memengaruhi tahanan tanah dan defleksi.

Pada skripsi ini, dilakukan penelitian terkait hubungan kurva tahanan tanah dan defleksi arah horizontal (kurva p-y) terhadap variasi diameter dan kedalaman tiang pada tanah lempung lunak homogen. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga tiga dimensi (MEH 3D), metode beda hingga dengan aplikasi LPile dan perhitungan manual menggunakan Metode Reese & Matlock (1956).

Pendekatan yang dilakukan dalam penentuan kurva p-y adalah dengan memasukan besaran defleksi. Analisis menggunakan MEH 3D (*Derivation Method*) menghasilkan kurva p-y yang berada pada di antara LPile dan Metode Reese & Matlock (1956), sedangkan yang dikerjakan dengan formula yang diusulkan Vethanayagam & Ibsen (2017) menghasilkan kurva p-y berfluktuaktif terhadap kedalaman.

Dari hasil analisis, variasi diameter dan kedalaman tiang memengaruhi kurva y-z dan p-z, namun untuk kurva p-y hanya dipengaruhi variasi diameter. Pada kurva p-y, panjang tiang hanya memengaruhi zona pengaruh. Semakin panjang tiang perilaku tiang semakin elastis dan peningkatan ukuran diameter berbanding lurus terhadap peningkatan nilai tahanan tanah. Khusus pada formulasi Vethanayagam & Ibsen (2017), variasi panjang memengaruhi kurva p-y karena hasilnya berfluktuaktif. Pada defleksi 0.012 m hingga 0.05 m, hasil kurva p-y dari Metode Reese & Matlock (1956) menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan MEH 3D dan LPile karena hubungan tegangan-regangan bersifat *linear elastic*.

Kata Kunci: tiang tunggal, beban lateral, tahanan tanah, defleksi, metode elemen hingga tiga dimensi, diameter tiang, kedalaman tiang.

STUDY ON DETERMINING THE P-Y CURVE OF MONOPILE IN SOFT CLAY WITH FINITE ELEMENT METHOD, LPILE, AND REESE & MATLOCK METHOD (1956)

**Alexander Tommy
NPM: 6101901006**

**Advisor: Budijanto Widjaja, Ph.D.
Co-Advisor: Ir. Ignatius Tommy Pratama, S.T., M.S.**

**PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BACHELOR PROGRAM
(Accredited by SK BAN-PT Number: 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)
BANDUNG
JANUARY 2023**

ABSTRACT

Bored pile is the most frequently used option in single pile construction because it can adjust the diameter and depth of the pile to achieve the desired bearing capacity. In addition to considering the high axial bearing capacity, the pile foundation design must consider the influence of lateral loads because they affect soil resistance and deflection.

In this undergraduate thesis, research is conducted regarding the relationship between the soil resistance and the horizontal deflection curve (p-y curve) on variations in pile diameter and depth in homogeneous soft clay soils. This research was conducted using a numerical approach using the three-dimensional finite element method (FEM 3D), the finite difference method using LPile and manual calculation using the Reese & Matlock Method (1956).

The approach taken in determining the p-y curve is to input the deflection. In the results of the FEM 3D which is done by *Derivation Method* produces a p-y curve that is between the LPile and Reese & Matlock Method (1956), while p-y curve is done with the formula proposed by Vethanayagam & Ibsen (2017) produces a p-y curve fluctuate with depth.

From the analysis result, variations in pile diameter and depth affect the y-z and p-z curves, but the p-y curve is only affected by diameter variations. In the p-y curve, the length of the pile only affects the zone of influence. The longer the pile the more elastic behaviour of the pile and the larger diameter, the greater the value of soil resistance. Especially for the Vethanayagam, & Ibsen (2017), variation of length affect the p-y curve because the result fluctuate with depth. At a deflection of 0.012 m to 0.050 m, the p-y curve result from the Reese & Matlock Method (1956) show a significant difference compared to FEM 3D and LPile because the stress-strain relationship is linear elastic.

Key Words: single pile, lateral loading, soil resistance, deflection, three-dimensional finite element method, pile diameter, pile depth.

PRAKATA

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkatnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Studi Kurva p-y pada Tiang Tunggal di Tanah Lempung Lunak Homogen dengan Metode Elemen Hingga, LPile, dan Metode Reese & Matlock (1956)” sebagai syarat kelulusan dan mencapai gelar Sarjana (S1) pada Program Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan

Penulis bersyukur dan mengucapkan terima kasih atas semua bantuan, motivasi, dan dukungan yang telah diberikan baik secara langsung maupun tidak langsung selama penyelesaian skripsi ini. Secara khusus penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih tersebut kepada:

1. Bapak Budijanto Widjaja, Ph.D. selaku dosen pembimbing dan Bapak Ir. Ignatius Tommy Pratama, S.T., M.S. selaku ko-pembimbing atas segala bantuan pengarahan, kritik, saran, ilmu, dan waktu yang telah diberikan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
2. Bapak Ir. Stefanus Diaz Alvi, S.T., M.T., selaku dosen KBI Geoteknik Universitas Katolik Parahyangan yang telah bersedia memberikan waktunya untuk berdiskusi dan memberikan masukan selama proses penulisan skripsi.
3. Papa, Mama, adik dan segenap keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan mendoakan penulis dalam mengerjakan skripsi.
4. Seluruh dosen dan staf pengajar KBI Geoteknik Universitas Katolik Parahyangan atas segala saran dan masukan yang telah diberikan selama proses perkuliahan dan pengerjaan skripsi.
5. Samuel Jemmy Setiadjie, Ian Hartono, Livia Florencia, Andre Budiarto, Richie, Bobby Limowa dan Annisa Nabilla atas kebersamaan dalam proses bimbingan skripsi.
6. Seluruh pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan kontribusi dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan ketidaksempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat untuk khalangan orang banyak khususnya pada Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan.

Bandung. 11 Januari 2023



Alexander Tommy
NPM: 6101901006



DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR NOTASI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1-1
1.1. Latar Belakang	1-1
1.2. Inti Permasalahan	1-2
1.3. Tujuan Penelitian	1-2
1.4. Lingkup Penelitian	1-3
1.5. Sistematika Penulisan	1-4
1.6. Metode Penelitian	1-4
1.7. Diagram Alir	1-5
BAB 2 STUDI PUSTAKA	2-1
2.1. Fondasi Tiang Bor	2-1
2.2. Interaksi Tanah-Tiang akibat Beban Lateral	2-1
2.3. Persyaratan Kelangsingan Tiang Bor & Efek <i>Buckling</i>	2-4
2.4. Beban Lateral	2-4
2.5. Penentuan Beban Lateral Maksimum	2-5
2.6. Metode Reese & Matlock (1956)	2-5
2.7. Metode <i>Subgrade Non-Linear</i> (Kurva p-y)	2-7

2.8.	Metode Reese (2011).....	2-8
2.9.	Persyaratan Kurva p-y Menurut <i>API Code</i> (2014).....	2-8
2.10.	Metode Beda Hingga	2-9
2.11.	Metode Elemen Hingga Tiga Dimensi	2-9
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		3-1
3.1.	Korelasi Parameter Tanah	3-1
3.1.1.	Berat Isi Tanah (γ).....	3-1
3.1.2.	Kuat Geser Tanah Tak Teralir (c_u).....	3-1
3.1.3.	Kuat Geser Tanah pada Kondisi Efektif (c').....	3-2
3.1.4.	Sudut Geser Dalam Efektif (ϕ')	3-2
3.1.5.	Angka Poisson (ν)	3-2
3.1.6.	Modulus Elastisitas Tanah (E_s).....	3-3
3.1.7.	Modulus Oedometer (E_{oed}^{ref}).....	3-4
3.1.8.	Modulus Tanah pada saat 50% (E_{50}^{ref}).....	3-4
3.1.9.	Modulus <i>Unloading/Loading</i> (E_{ur}^{ref}).....	3-4
3.1.10.	<i>Strength Reduction Factor for Interfaces</i> (R_{inter})	3-4
3.1.11.	Koefisien Tekanan Tanah <i>at Rest</i> (K_0).....	3-4
3.2.	Parameter Tiang	3-5
3.3.	Prosedur Metode Reese & Matlock (1956).....	3-5
3.4.	Prosedur Metode Reese (2011)	3-6
3.5.	Pemodelan Tiang Tunggal pada LPile	3-7
3.6.	Penentuan Kurva p-y pada LPile.....	3-8
3.7.	Pemodelan Tiang Tunggal pada MEH 3D	3-9
3.8.	Penentuan Kurva p-y pada MEH 3D.....	3-13
3.8.1.	Ekstraksi Tahanan Tanah (p) dengan Metode Penurunan	3-13

3.8.2.	Ekstraksi Tahanan Tanah (p) Usulan Vethanayagam & Ibsen (2017)	3-15
3.8.3.	Ekstraksi Defleksi (y) pada MEH 3D	3-18
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		4-1
4.1.	Data Parameter Tanah	4-1
4.2.	Data Parameter Tiang	4-2
4.3.	Data Beban Lateral	4-3
4.4.	Klasifikasi Perilaku Tiang	4-3
4.5.	Analisis Kurva M-z	4-3
4.6.	Analisis Kurva y-z	4-4
4.6.1.	Kurva y-z dengan Variasi Metode Analisis	4-5
4.6.2.	Kurva y-z dengan Variasi Diameter Tiang	4-7
4.6.3.	Kurva y-z dengan Variasi Panjang Tiang	4-8
4.7.	Analisis Kurva p-z	4-8
4.7.1.	Kurva p-z dengan Variasi Metode Analisis	4-8
4.7.2.	Kurva p-z dengan Variasi Diameter Tiang	4-10
4.7.3.	Kurva p-z dengan Variasi Panjang Tiang	4-12
4.8.	Analisis Kurva p-y	4-13
4.8.1.	Kurva p-y dengan Variasi Metode	4-13
4.8.2.	Kurva p-y dengan Variasi Diameter	4-14
4.8.3.	Kurva p-y dengan Variasi Panjang	4-15
4.9.	Analisis Kurva p-y MEH 3D pada Kondisi Ultimit	4-16
4.10.	Normalisasi Kurva p-y MEH 3D (<i>Derivation Method</i>)	4-18
4.11.	Diskusi Hasil	4-19
BAB 5 KESIMPULAN		5-1
5.1.	Kesimpulan	5-1

5.2. Saran.....	5-2
DAFTAR PUSTAKA	xvii
LAMPIRAN 1: KURVA M-Z BERDASARKAN VARIASI METODE ANALISIS	L1-1
LAMPIRAN 2: KURVA Y-Z BERDASARKAN VARIASI METODE ANALISIS	L2-1
LAMPIRAN 3: KURVA Y-Z BERDASARKAN VARIASI DIAMETER TIANG	L3-1
LAMPIRAN 4: KURVA Y-Z BERDASARKAN VARIASI PANJANG TIANG	L4-1
LAMPIRAN 5: KURVA P-Z BERDASARKAN VARIASI METODE ANALISIS	L5-1
LAMPIRAN 6: KURVA P-Z BERDASARKAN VARIASI DIAMETER TIANG	L6-1
LAMPIRAN 7: KURVA P-Z BERDASARKAN VARIASI PANJANG TIANG	L7-1
LAMPIRAN 8: KURVA P-Y BERDASARKAN VARIASI METODE ANALISIS	L8-1
LAMPIRAN 9: KURVA P-Y BERDASARKAN VARIASI DIAMETER TIANG	L9-1
LAMPIRAN 10: KURVA P-Y BERDASARKAN VARIASI PANJANG TIANG	L10-1
LAMPIRAN 11: <i>MOBILIZED UNDRAINED SHEAR STRENGTH</i>	L11-1
LAMPIRAN 12: KURVA P-Y PADA KONDISI ULTIMIT	L12-1
LAMPIRAN 13: NORMALISASI KURVA P-Y	L13-1
LAMPIRAN 14: PERBANDINGAN PENGAMBILAN FUNGSI POLINOMIAL DARI KURVA M-Z TERHADAP PENENTUAN KURVA P-Z.....	L14-1

DAFTAR NOTASI

Daftar Notasi

A	: Luas elemen segitiga (m^2)
A_M	: Koefisien momen lentur suku pertama
A_p	: Koefisien tahanan tanah/ <i>soil resistance/soil reaction</i> suku pertama
A_y	: Koefisien defleksi tiang suku pertama
B	: Diameter/sisi/lebar tiang (m)
b	: Diameter tiang (m)
B_M	: Koefisien momen lentur suku kedua
B_p	: Koefisien tahanan tanah/ <i>soil resistance/soil reaction</i> suku kedua
B_y	: Koefisien defleksi tiang suku kedua
c_u	: Kuat geser tanah tak teralir (kN/m^2)
c'	: Kuat geser tanah pada kondisi efektif (kN/m^2)
D	: Diameter tiang (m)
D_{ref}	: Diameter referensi tiang (m)
E'	: Modulus elastisitas tanah pada kondisi efektif (kN/m^2)
E_{50}^{ref}	: Modulus tanah saat 50% beban pada tekanan $100 kN/m^2$ (kN/m^2)
E_{def}	: Modulus elastisitas deformasi tanah (kN/m^2)
E_{oed}^{ref}	: Modulus tanah dari uji oedometer pada tekanan $100 kN/m^2$ (kN/m^2)
EI	: Kekakuan lentur
E_p	: Modulus elastisitas tiang (kN/m^2)
E_u	: Modulus elastisitas tanah pada kondisi <i>undrained</i> (kN/m^2)
E_{ur}^{ref}	: Modulus tanah dari <i>unloading/reloading</i> pada tekanan $100 kN/m^2$ (kN/m^2)
f_c'	: Mutu Beton (N/mm^2)
f_y	: Tegangan leleh / <i>yield stress</i> baja (kN/m^2)
H	: Kapasitas lateral tiang (kN/m^2)
IP	: Indeks Plastisitas
I_p	: Momen inersia tiang (m^4)
k	: Koefisien kelangsingan kolom
K_0	: Koefisien tekanan tanah <i>at rest</i>

L	: Panjang tiang (m)
M	: Momen lentur sepanjang tiang
M_{\max}	: Momen lentur maksimum
M_x	: Momen lentur metode Reese & Matlock (1956) (kNm)
p	: Tahanan tanah per satuan panjang (kN/m)
p_{ult}	: Tahanan tanah ultimit per satuan panjang (kN/m)
p_x	: Tahanan tanah per satuan panjang metode Reese & Matlock (1956) (kN/m)
R_p	: <i>Rigidity factor of pile</i> / Faktor kekakuan tiang
r	: Radius girasi (m)
R_{inter}	: <i>Strength reduction factor for interfaces</i>
S_x	: <i>Section Modulus</i> tiang (m^3)
T	: Faktor kekakuan perilaku tiang (m)
u	: Tekanan air pori (kN/m^2)
U_x	: <i>Horizontal Displacement</i> searah sumbu x (m)
q_u	: <i>Unconfined compressive strength</i> (kN/m^2)
x_i	: koordinat titik nodal terhadap sumbu-x (m)
x_p	: koordinat titik pusat tiang terhadap sumbu-x (m)
y	: Defleksi lateral tiang (m)
y_i	: koordinat titik nodal terhadap sumbu-y (m)
y_{izin}	: Defleksi izin lateral atau <i>Forced horizontal displacement</i> (m)
y_p	: koordinat titik pusat tiang terhadap sumbu-y (m)
y_x	: Defleksi lateral tiang metode Reese & Matlock (1956) (m)
y_{50}	: Defleksi saat 50% dari tahanan ultimit tiang (m)
Z	: Koefisien panjang tiang pada kondisi <i>free head</i>
z	: Kedalaman tinjauan (m)
γ	: Berat isi tanah (kN/m^3)
γ'	: Berat isi tanah efektif (kN/m^3)
γ_{sat}	: Berat isi tanah <i>saturated</i> (kN/m^3)
γ_{unsat}	: Berat isi tanah <i>unsaturated</i> (kN/m^3)
ϕ'	: Sudut geser dalam efektif ($^\circ$)
η_H	: Konstanta modulus <i>subgrade</i> tanah (kN/m^3)
ν	: Angka poisson tanah

- ν_p : Angka poisson tiang
- ν_{ur} : Angka poisson tanah *unloading/reloading*
- ϵ_{50} : Regangan tanah 50%
- σ_{all} : *Allowable flexural stress* / tegangan lentur izin (kN/m^3)
- σ'_N : Tegangan normal efektif (kN/m^2)
- $\sigma'_{N_{avg}}$: Tegangan normal efektif rata-rata (kN/m^2)
- τ_1 : Tegangan geser yang bekerja di sekeliling tiang (kN/m^2)
- $\tau_{1_{avg}}$: Tegangan geser rata-rata yang bekerja di sekeliling tiang (kN/m^2)
- θ : Sudut acuan ($^\circ$)



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian.....	1-5
Gambar 1.2 Diagram Alir Penelitian Lanjutan.....	1-5
Gambar 1.3 Diagram Alir Penelitian Lanjutan.....	1-6
Gambar 1.4 Diagram Alir Penelitian Lanjutan.....	1-6
Gambar 1.5 Diagram Alir Penelitian Lanjutan.....	1-7
Gambar 2.1 Ilustrasi Kondisi Kepala Tiang: (a) Tiang Kepala Bebas dan (b) Tiang Kepala Terjepit (Aljanabi, 2020)	2-1
Gambar 2.2 Mekanisme Kegagalan Tiang akibat Beban Lateral: (a) Tiang Pendek dan (b) Tiang Panjang (Rad, 2015).....	2-2
Gambar 2.3 Hubungan Konstanta Modulus <i>Subgrade</i> Tanah dan Konsistensi Tanah (NAVFAC DM-7.2, 1982).....	2-3
Gambar 2.4 Tiang pada Beban Lateral yang Memperlihatkan Konsep Respon Tanah Menggunakan Kurva p-y (Bucknell <i>et al.</i> , 2016)	2-7
Gambar 2.5 Tipikal Kurva p-y pada Tanah <i>Ductile</i> (Tanah Lempung Lunak pada Beban Statik) dan <i>Brittle</i> (Tanah Lempung Teguh pada Beban Dinamik) (Coduto,1994)	2-7
Gambar 2.6 Karakteristik Kurva p-y pada Tanah Lempung Lunak pada Pembebanan Statik (Matlock, 1970) (Reese & Van Impe, 2011).....	2-8
Gambar 3.1 Korelasi c_u dengan N_{SPT} (Terzaghi & Peck, 1967).....	3-1
Gambar 3.2 ϕ' vs IP untuk Tanah Terkonsolidasi Normal (Sorensen & Okkels, 2013)	3-2
Gambar 3.3 Korelasi Modulus Elastisitas Tanah (Duncan & Buchignani, 1976)	3-3
Gambar 3.4 <i>Section Type</i> pada LPile.....	3-7
Gambar 3.5 Pemodelan <i>Soil Layer</i> pada LPile pada Tiang Diameter 1 m dan Panjang 30 m.....	3-8
Gambar 3.6 Contoh Diameter Tiang dengan Diameter 1.5 m.....	3-10

Gambar 3.7 Contoh Tiang Tunggal yang Telah Termodel Seluruhnya	3-11
Gambar 3.8 Pemodelan <i>Interface</i> pada Tiang Tunggal	3-11
Gambar 3.9 Pemodelan Beban Lateral Menggunakan <i>Surface Prescribed Displacement</i>	3-12
Gambar 3.10 <i>Structural Forces in Volume Piles</i>	3-13
Gambar 3.11 Pemilihan <i>Cluster</i>	3-14
Gambar 3.12 Profil Momen dari MEH 3D	3-14
Gambar 3.13 Sketsa Irisan Tiang pada Kedalaman Tertentu yang Dievaluasi terhadap Sudut (Wolf <i>et al.</i> , 2013)	3-15
Gambar 3.14 Perpindahan Tiang dalam Arah Y (Vethanayagam & Ibsen, 2017)	3-16
Gambar 3.15 <i>Meshing</i> Elemen pada MEH 3D dengan Tingkat Kekasaran <i>Medium</i>	3-16
Gambar 3.16 Ilustrasi Luas Segitiga	3-17
Gambar 3.17 <i>Menu Line Cross Section</i>	3-18
Gambar 4.1 Kurva M-z Berdasarkan Variasi Metode dengan Tiang Diameter 1.5 m Panjang 30 m pada Defleksi: (a) 0.012 m, (b) 0.025 m, (c) 0.040 m dan (d) 0.050 m	4-4
Gambar 4.2 Kurva y-z Berdasarkan Variasi Metode Analisis dengan Tiang Diameter 1.5 m dan Panjang 30 m pada Defleksi: (a) 0.012 m, (b) 0.025 m, (c) 0.040 m dan (d) 0.050 m	4-5
Gambar 4.3 Kurva y-z Berdasarkan Variasi Metode Analisis dengan Tiang Diameter 1.5 m dan Panjang 18 m pada Defleksi: (a) 0.012 m, (b) 0.025 m, (c) 0.040 m dan (d) 0.050 m	4-6
Gambar 4.4 Kurva y-z dengan Variasi Diameter pada Panjang 30 m dengan Defleksi di Kepala Tiang Sebesar 0.025 m pada: (a) MEH 3D, (b) LPile dan (c) Metode Reese & Matlock (1956)	4-7
Gambar 4.5 Kurva y-z dengan Variasi Panjang pada Diameter 1.5 m dengan Defleksi di Kepala Tiang Sebesar 0.025 m pada: (a) MEH 3D, (b) LPile dan (c) Metode Reese & Matlock (1956)	4-8

Gambar 4.6 Kurva p-z dengan Variasi Metode Analisis pada Tiang Diameter 1.5 m dengan Panjang 30 m untuk Defleksi di Kepala Tiang Sebesar: (a) 0.012 m, (b) 0.025 m, (c) 0.040 m dan (d) 0.050 m.....	4-9
Gambar 4.7 Kurva p-z dengan Variasi Diameter pada Panjang 12 m dengan Defleksi di Kepala Tiang Sebesar 0.025 m pada: (a) MEH 3D (<i>Derivatiionn Method</i>), (b) Vethanayagam & Ibsen (2017), (c) LPile dan (d) Metode Reese & Matlock (1956).....	4-11
Gambar 4.8 Kurva p-z dengan Variasi Panjang pada Diameter 1.5 m dengan Defleksi di Kepala Tiang Sebesar 0.025 m pada: (a) MEH 3D (<i>Derivatiionn Method</i>), (b) Vethanayagam & Ibsen (2017), (c) LPile dan (d) Metode Reese & Matlock (1956).....	4-12
Gambar 4.9 Kurva p-y dengan Variasi Metode Analisis pada Tiang Panjang 24 m untuk Kedalaman Tinjauan 3.5 m dari Kepala Tiang pada: (a) Diameter 1.0 m, (b) Diameter 1.5 m dan (c) Diameter 3.0 m.....	4-13
Gambar 4.10 Kurva p-y dengan Variasi Diameter pada Kedalaman 30 m dengan Kedalaman Kepala Tiang 3.5 m Menggunakan: (a) MEH 3D (<i>Derivation Method</i>), (b) Vethanayagam & Ibsen (2017), (c) LPile, dan (d) Metode Reese & Matlock (1956).....	4-14
Gambar 4.11 Kurva p-y dengan Variasi Panjang pada Diameter 1.5 m dengan Kedalaman Kepala Tiang 3.5 m Menggunakan: (a) MEH 3D (<i>Derivation Method</i>), (b) Vethanayagam & Ibsen (2017), (c) LPile, dan (d) Metode Reese & Matlock (1956).....	4-15
Gambar 4.12 Kurva p-y pada Diameter 1.0 m di Tanah Lempung Lunak.....	4-16
Gambar 4.13 Kurva p-y pada Diameter 1.5 m di Tanah Lempung Lunak.....	4-17
Gambar 4.14 Kurva p-y pada Diameter 3.0 m di Tanah Lempung Lunak.....	4-17
Gambar 4.15 Normalisasi Kurva p-y (<i>Trimed Data</i>)	4-18
Gambar 4.16 Persamaan Normalisasi Kurva p-y	4-19

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Variasi Diameter, Panjang Tiang dan <i>Forced Horizontal Displacement</i>	1-3
Tabel 2.1 Kriteria Penentuan Perilaku Tiang	2-3
Tabel 2.2 Perilaku Tiang Menurut Poulos & Hull (1989) (Setelah Hong <i>et al.</i> , 2017)	2-3
Tabel 2.3 Koefisien Reese & Matlock untuk Kondisi <i>Free-Head</i> (1956)	2-6
Tabel 2.4 Koordinat Kurva p-y Menurut API (2014)	2-8
Tabel 3.1 Nilai Tipikal Angka Poisson (Budhu, 2012 dan Bowles, 1986)	3-3
Tabel 3.2. Nilai Tipikal Modulus Elastisitas (Briaud, 2013)	3-3
Tabel 3.3 Korelasi Nilai ϵ_{50} pada Tanah Lempung Tekonsolidasi Normal (Peck <i>et al.</i> , 1974)	3-6
Tabel 3.4 <i>Input Project Properties</i>	3-9
Tabel 3.5 <i>Input Polycurve</i>	3-10
Tabel 3.6 <i>Input Extrude Object</i>	3-10
Tabel 3.7 <i>Input Create Array</i>	3-11
Tabel 3.8 <i>Input Cross Section</i>	3-18
Tabel 4.1 <i>Input</i> Parameter Tanah pada MEH 3D	4-1
Tabel 4.2 <i>Input</i> Parameter Tanah pada LPile	4-1
Tabel 4.3 <i>Input</i> Parameter Tanah pada Metode Reese & Matlock (1956)	4-2
Tabel 4.4 <i>Input</i> Parameter Tiang pada MEH 3D	4-2
Tabel 4.5. <i>Input</i> Parameter Tiang pada LPile	4-2
Tabel 4.6 <i>Input</i> Parameter Tiang Metode Reese & Matlock (1956)	4-2
Tabel 4.7 Variasi Diameter dan Kedalaman Tiang terhadap Defleksi Izin	4-3
Tabel 4.8 Klasifikasi Perilaku Tiang	4-3
Tabel 4.9 Perbedaan Tahanan Tanah Ultimit dari MEH 3D (<i>Derivation Method</i>) dan Reese (2011)	4-18

Tabel 4.10 Rekapitulasi Perilaku Tiang4-21



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Fondasi tiang tunggal umumnya digunakan sebagai fondasi menara dan fondasi turbin angin lepas pantai. Disebabkan fondasi hanya terdiri dari 1 (satu) buah tiang, maka desain fondasi harus memiliki kapasitas daya dukung yang tinggi. Fondasi tiang bor menjadi opsi yang paling sering digunakan karena dapat merekayasa diameter dan kedalaman tiang agar mencapai daya dukung yang diinginkan. Selain mempertimbangkan daya dukung aksial yang tinggi, desain fondasi tiang harus memperhatikan pengaruh beban-beban lateral seperti beban angin, pergerakan tanah di sekitar pondasi, gaya gempa dan tekanan ombak yang dapat memengaruhi defleksi dan tahanan tanah.

Secara umum, faktor yang menentukan defleksi dan tahanan tanah adalah interaksi tanah dengan tiang yang dipengaruhi oleh parameter tanah dan fondasi tiang. Metode yang umum digunakan untuk menentukan defleksi dan tahanan tanah adalah metode *subgrade linear* dan *subgrade non-linear*. Metode *subgrade linear* adalah metode yang dikembangkan oleh Reese & Matlock (1956). Metode ini mengabaikan kontinuitas modulus reaksi tanah dasar sehingga reaksi tanah dasar dianggap sama pada sepanjang kedalaman tinjauan. Modulus reaksi tanah dasar/*subgrade* sendiri adalah besarnya perbandingan antara perlawanan tanah dengan defleksi. Hubungan tegangan regangan metode ini bersifat *linear elastic*.

Metode *subgrade non-linear* atau yang lebih dikenal dengan nama kurva p - y adalah metode yang diusulkan Reese & Van Impe (2011) yang memberikan tahanan tanah (p) per satuan panjang dan defleksi tiang (y) dalam satuan panjang. Metode ini merupakan metode yang paling baik digunakan untuk desain fondasi tiang dalam menahan beban lateral karena dikembangkan dengan mengasumsikan pegas-pegas independen di mana konstanta pegas digunakan untuk menganalisis reaksi tanah. Disebabkan studi penelitian berada pada tanah lempung lunak, maka menurut Reese dan Van Impe (2011) kurva p - y merujuk pada usulan Matlock (1970). Pada perkembangannya, analisis kurva p - y dapat dilakukan dengan metode beda hingga dengan bantuan aplikasi LPile dan metode elemen hingga (MEH).

Keunggulan metode *subgrade non-linear* dibandingkan metode *subgrade linear* adalah lebih cocok digunakan pada tanah yang berlapis dan asumsi hubungan regangan yang bersifat *non-linear*. Namun, metode *subgrade non-linear* hanya meninjau reaksi *subgrade* pada titik tinjauan tertentu di mana metode tersebut tidak merepresentasikan keadaan tanah yang kontinu serta kurva p-y usulan Matlock (1970) dikembangkan pada studi kasus tiang langsing dengan diameter ± 0.3 m dengan panjang ± 13 m. Analisis kurva p-y dengan metode elemen hingga (MEH) menjadi pilihan terbaik karena reaksi tanah yang dihasilkan dengan MEH termodelkan secara kontinu sepanjang kedalaman tinjauan.

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian yang dilakukan oleh Sundara (2022) namun difokuskan untuk mengetahui dan membandingkan kurva p-y pada tanah lempung lunak homogen jenuh yang terkonsolidasi normal. Wolf *et al.* (2013) merekomendasikan penentuan kurva p-y dengan menetapkan *forced horizontal displacement* sebagai *input* parameter beban lateral karena menetapkan beban lateral dinilai tidak dapat menghasilkan data yang cukup di sekitar titik rotasi tiang dan menyulitkan untuk melakukan ekstraksi kurva p-y di lokasi tersebut. Analisis yang digunakan merujuk pada penelitian Sundara (2022), yaitu dengan menggunakan MEH 3D, LPile dan metode Reese (2011). Pada MEH 3D, fondasi tiang dimodelkan sebagai *soil volume* dan model material menggunakan *Linear Elastic Model*, sedangkan model material tanah akan dimodelkan *Hardening Soil Model*.

1.2. Inti Permasalahan

Inti permasalahan yaitu mengetahui pengaruh diameter dan kedalaman tiang terhadap kurva p-y di tanah lempung lunak jenuh dengan analisis metode elemen hingga tiga dimensi (MEH 3D), aplikasi LPile dan Metode Reese & Matlock (1956)

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Melakukan simulasi uji beban lateral tiang tunggal secara numerik dengan MEH 3D dan aplikasi LPile.

- b) Melakukan analisis mengenai perilaku pembebanan lateral pada tiang tunggal di tanah lempung lunak jenuh homogen yang terkonsolidasi normal.
- c) Menganalisis pengaruh diameter dan kedalaman tiang terhadap kurva p-y.
- d) Membandingkan hasil simulasi numerik kurva p-y yang dilakukan dengan MEH 3D dan aplikasi LPile dengan Metode Reese & Matlock (1956).
- e) Membandingkan hasil kurva y-z dan kurva p-z dari perhitungan manual dengan metode Reese dan Matlock (1956), MEH 3D, dan aplikasi LPile.
- f) Membandingkan perilaku kekakuan tiang (fleksibel atau kaku) dari metode NAVFAC (1982) dan Poulos & Hull (1989) dengan hasil analisis kurva y-z.

1.4. Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian ini sebagai berikut:

- a) Tiang tunggal menggunakan fondasi bor.
- b) Kondisi kepala tiang diasumsikan *free head*.
- c) Kondisi tanah merupakan lempung lunak jenuh homogen yang terkonsolidasi normal.
- d) Diameter tiang, panjang tiang dan *forced horizontal displacement* mengacu

Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Variasi Diameter, Panjang Tiang dan *Forced Horizontal Displacement*

Diameter Tiang (m)	Panjang Tiang (m)	<i>Forced Horizontal Displacement (m)</i>
1.0	12, 18, 24, 30	0.012, 0.025, 0.04, 0.05
1.5	12, 18, 24, 30	0.012, 0.025, 0.04, 0.05
3.0	12, 18, 24, 30	0.012, 0.025, 0.04, 0.05

- e) Analisis kurva p-y dengan MEH 3D, LPile dan metode Reese (2011).
- f) Analisis kurva p-z dan y-z dengan MEH 3D, LPile dan metode Reese & Matlock (1956).
- g) Beban lateral dimodelkan dengan *forced horizontal displacement*. Pada MEH 3D beban lateral dimodelkan sebagai *surface prescribed displacement*.
- h) Pemodelan perilaku tanah dengan MEH 3D menggunakan *Hardening Soil Model*, sedangkan perilaku tiang menggunakan *Linear Elastic*.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

Dalam bab ini membahas latar belakang, inti permasalahan, tujuan penelitian, lingkup penelitian, sistematika penulisan, dan diagram alir.

BAB 2: STUDI PUSTAKA

Dalam bab ini membahas teori dasar yang digunakan sebagai acuan penelitian seperti: teori fondasi dalam, interaksi tanah-tiang, persyaratan tiang, persyaratan beban lateral, metode *subgrade linear* dan *subgrade non-linear*.

BAB 3: METODE PENELITIAN

Dalam bab ini membahas penentuan parameter tanah, prosedur Metode Reese & Matlock (1956), Metode Reese (2011), LPile dan MEH 3D.

BAB 4: ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini membahas hasil simulasi numerik pembebanan lateral tiang tunggal yang dilakukan dengan MEH 3D dan aplikasi LPile. Kemudian hasil analisis pemodelan numerik akan dibandingkan dengan perhitungan Metode Reese & Matlock (1956).

BAB 5: KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini membahas kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis pada BAB 4 dan saran untuk penelitian selanjutnya.

1.6. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a) Studi Literatur

Dilakukan dengan mencari informasi dari buku, jurnal, dan skripsi terdahulu.

b) Penentuan Parameter

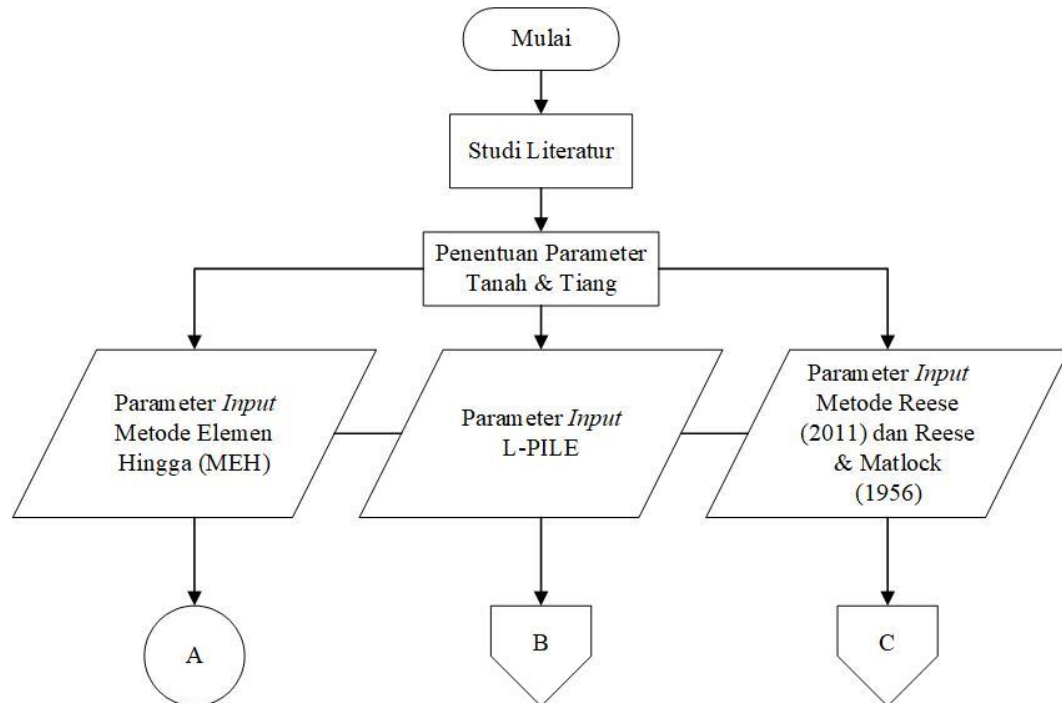
Penentuan data diperoleh dari studi literatur untuk memperoleh korelasi parameter tanah yang dapat merepresentasikan kondisi yang sebenarnya.

c) Pengolahan dan Analisis Data

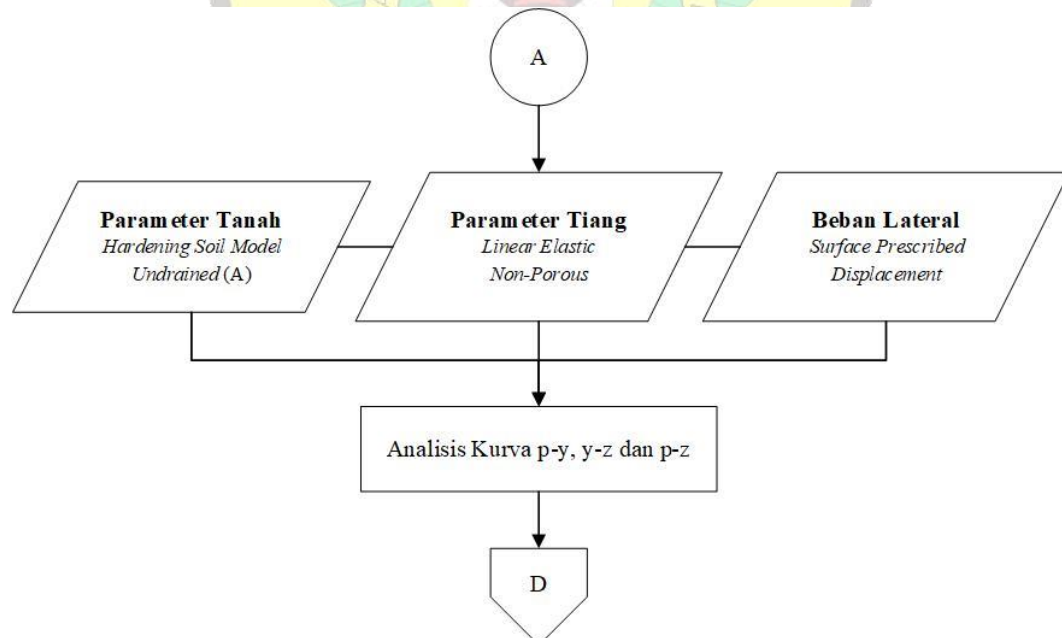
Melakukan analisis numerik terkait penentuan kurva p-y dengan MEH 3D, aplikasi LPile dan metode Reese (2011). Kemudian data hasil analisis dikelompokkan berdasarkan variasi diameter dan panjang.

1.7. Diagram Alir

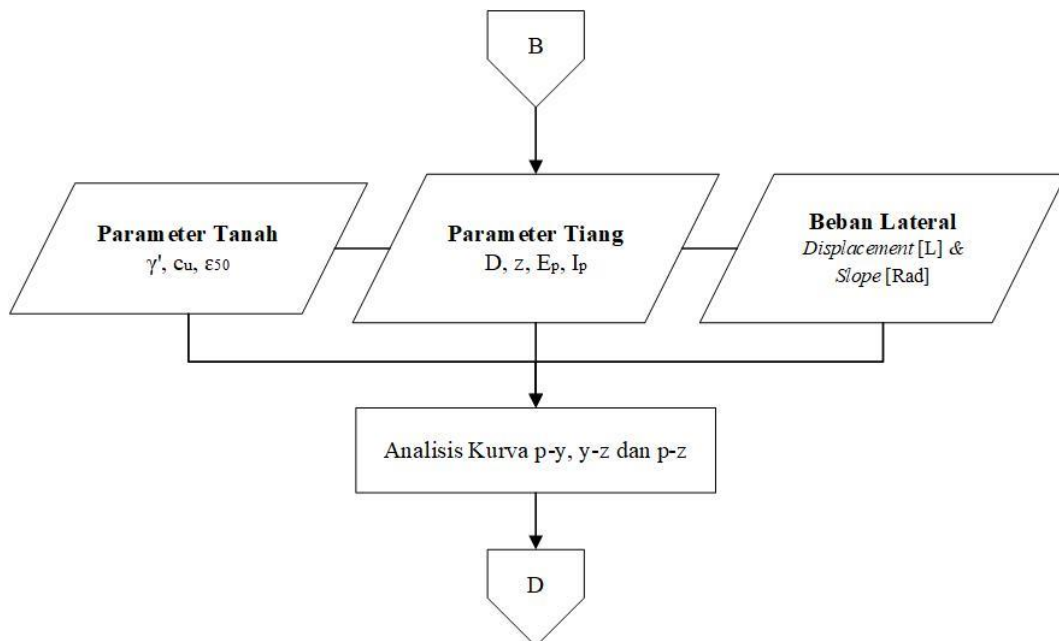
Diagram alir penelitian merujuk pada **Gambar 1.1** hingga **Gambar 1.5**.



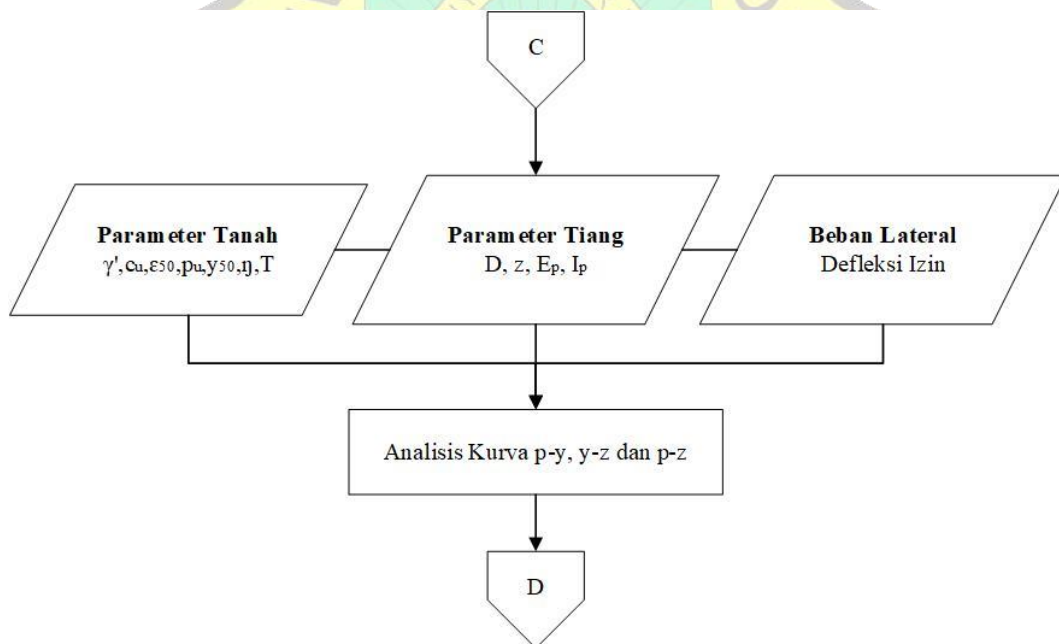
Gambar 1.1 Diagram Alir Penelitian



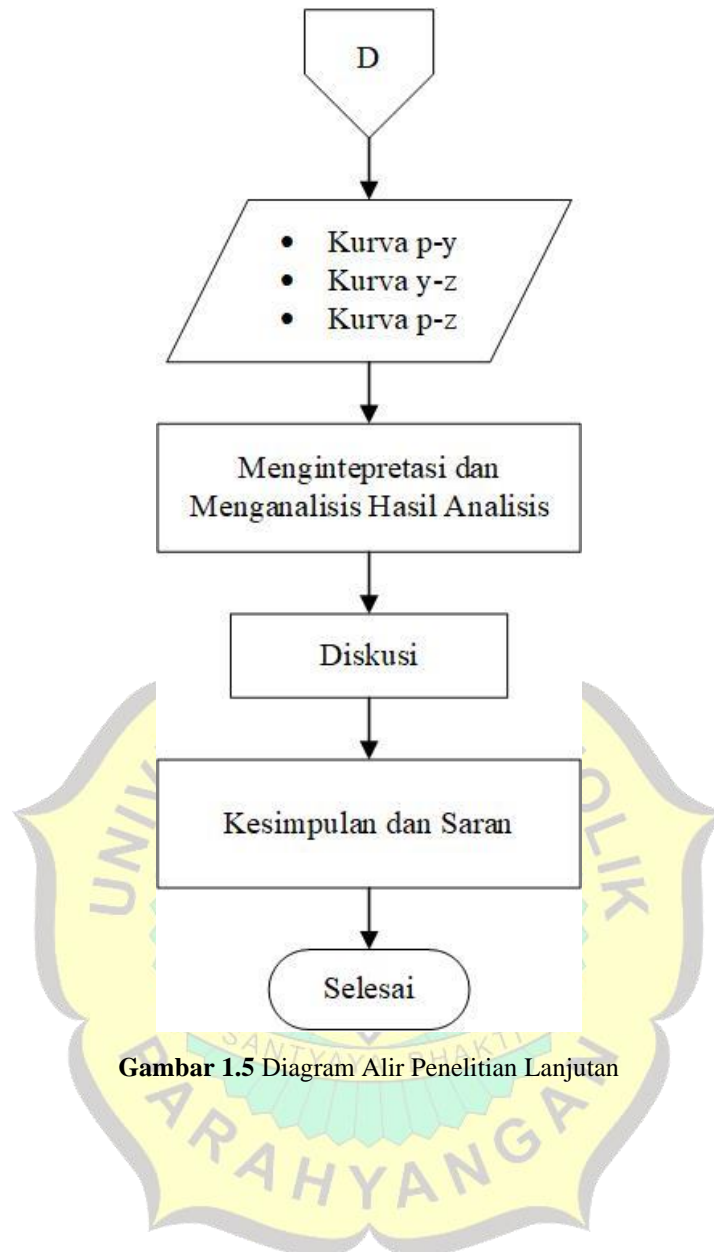
Gambar 1.2 Diagram Alir Penelitian Lanjutan



Gambar 1.3 Diagram Alir Penelitian Lanjutan



Gambar 1.4 Diagram Alir Penelitian Lanjutan



Gambar 1.5 Diagram Alir Penelitian Lanjutan