

**STUDI NUMERIK PERILAKU TANAH LEMPUNG  
AKIBAT PENETRASI KONUS**

**TESIS**



**Oleh:**

**Aflizal Arafianto**

**2016831032**

**Pembimbing:**

**Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.**

**Ko-Pembimbing:**

**Aswin Lim, ST., M.Sc.Eng, Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
JANUARI 2019**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**STUDI NUMERIK PERILAKU TANAH LEMPUNG AKIBAT  
PENETRASI KONUS**



**Oleh:**

**Aflizal Arafianto**

**2016831032**

**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal:**

**Jumat, 18 Januari 2019**

**Pembimbing:**

**Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.**

**Ko-Pembimbing:**

**Aswin Lim, ST., M.Sc.Eng, Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
JANUARI 2019**

## Pernyataan

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

Nama : Aflizal Arafianto  
Nomor Pokok Mahasiswa : 2016831032  
Program Studi : Teknik Sipil  
Fakultas Teknik  
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

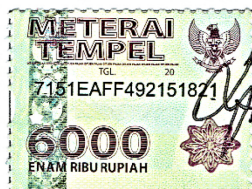
Studi Numerik Perilaku Tanah Lempung Akibat Penetrasi Konus

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Pembimbing, dan 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 ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan di : Bandung

Tanggal : 23 Januari 2019



Aflizal Arafianto

# STUDI NUMERIK PERILAKU TANAH LEMPUNG AKIBAT PENETRASI KONUS

**Aflizal Arafianto (NPM: 2016831032)**

**Pembimbing: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.**

**Ko-Pembimbing: Aswin Lim, ST., M.Sc.Eng, Ph.D.**

**Magister Teknik Sipil**

**Bandung**

**Januari 2019**

## ABSTRAK

Salah satu metode numerik yang terbaru untuk menyimulasikan penetrasi konus ke dalam massa tanah adalah Metode *Press-Replace* (PRM). Perilaku tanah lempung tak teralir akibat penetrasi konus berupa *stress path* pada lokasi muka ( $u_1$ ) dan bahu ( $u_2$ ) konus diinvestigasi. Simulasi penetrasi konus telah dilakukan dengan menggunakan *software* berbasis elemen hingga, PLAXIS 2D. Hasil perhitungan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan data hasil uji CPTu riil di lapangan. Untuk 13 simulasi penetrasi yang dilakukan, hasil komparasi menunjukkan bahwa tahanan konus dari hasil perhitungan numerik adalah 59% lebih rendah dibandingkan data terukur. Adapun perbandingan parameter tekanan air pori ( $u_2$ ) dan kuat geser tak teralir ( $s_u$ ) dengan data terukur memberikan hasil yang cukup baik, dimana diferensial yang dihasilkan adalah berturut-turut berkisar 7.5% dan 3%. Selain itu, dilakukan pula perbandingan kurva disipasi dari perhitungan numerik terhadap kurva disipasi terukur. Hasil simulasi uji disipasi menunjukkan kurva disipasi yang diprediksi cukup mendekati hasil uji disipasi yang terukur di lapangan.

**Kata Kunci:** Piezocone, Tanah Lempung Tak Teralir, *Stress Path*, Penetrasi Konus, Model Numerik

# **NUMERICAL STUDY OF BEHAVIOR OF CLAYS DUE TO CONE PENETRATION**

**Aflizal Arafianto (NPM: 2016831032)**

**Advisor: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ir., MSCE., Ph.D.**

**Co-Advisor: Aswin Lim, ST., M.Sc.Eng, Ph.D.**

**Magister of Civil Engineering**

**Bandung**

**January 2019**

## **ABSTRACT**

One of the newest numerical method to simulate cone penetration to the soil mass is Press Replace Method (PRM). The behavior of undrained clay due to cone penetration, namely stress path, is investigated both in the location of cone face and shoulder. Simulations has been conducted using finite element software, PLAXIS 2D. The obtained results then compared to the measured CPTu data. For 13 simulations, the results show that the cone resistance predicted from the simulation is 59% lower than the measured data. Furthermore, comparison is also conducted for pore water pressure ( $u_2$ ) and undrained shear strength of the soil ( $s_u$ ). The results show that the differential between the predicted and measured data for pore water pressure ( $u_2$ ) and undrained shear strength is 7.5% and 3%, respectively. Moreover, the simulation of dissipation test is also conducted and compared to the measured data. The predicted dissipation curve shows a good agreement with measured data.

**Keywords:** Piezocone, Undrained Clay, Stress Path, Cone Penetration, Numerical Model

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah Subhanahuwata'ala karena atas kehendak, ridha dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan makalah penelitian ini. Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi tingkat S-2 (Pascasarjana) di Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

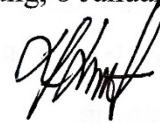
Dengan tulus, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D. dan Bapak Aswin Lim, Ph.D., selaku dosen dan ko-pembimbing. Bapak, terima kasih banyak atas segala waktu, upaya, diskusi, dan pengetahuan yang diberikan. Semoga menjadi kebaikan untuk Bapak.
2. Bapak Budijanto Widjaja Ph.D., dan Ibu Dr. Nurindahsiah Setionegoro, selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran kepada penulis sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan lebih baik.
3. Keluarga kecil saya tercinta, Papi, Mami dan Ade yang selalu memberikan semangat dan motivasi, yang selalu ada mendukung. *Makasih* Pi, Mi, De, atas doa dan dukungan yang tiada henti.
4. Bapak & Ibu serta kawan-kawan di GEC, terutama Ibu Stefani yang sudah membantu mengumpulkan data penelitian dan selalu mendorong serta memotivasi penulis untuk menyelesaikan tesis ini dengan baik dan segera. *Bro* Kirana, Ricky, dan Ci Susan yang selalu menjadi tempat bertanya dan teman diskusi seputar tesis.
5. Kawan-kawan sipil angkatan 2012, teman-teman seperjuangan penulis selama studi; Nisa, Hermil, Ahiap, dan Evelyn. *Thanks guys* sudah menjadi teman diskusi, bercanda, dan juga belajar bersama. Juga untuk kawan-kawan seperjuangan selama jenjang S1; Husain, Chitbul, Ao, Fri, Daryan. Terima kasih atas dukungan dan kebersamaannya hingga saat ini.

Tidak lupa saya sampaikan terima kasih kepada seluruh staf di Sekolah Pascasarjana Universitas Katolik Parahyangan atas penyediaan dan pelayanan studi yang sangat baik selama penulis menuntut ilmu di kampus.

Penulis menyadari bahwa tesis ini belum sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran akan sangat dihargai. Akhir kata, penulis berharap penelitian tesis ini dapat menjadi berkah dan manfaat bagi semua orang yang membacanya.

Bandung, 8 Januari 2019



Afizal Arafianto

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Lingkup Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	3
1.5.1 Studi Literatur	3
1.5.2 Pengumpulan Data	3
1.5.3 Analisis dan Komparasi	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Diagram Alir Penelitian	5
<b>BAB 2 STUDI PUSTAKA</b>	<b>7</b>
2.1 Penetrasi Konus dengan Model Elemen Hingga	7
2.1.1 Formulasi Regangan Kecil ' <i>Small Strain</i> '	7
2.1.2 Formulasi Regangan Besar ' <i>Large Strain</i> '	8
2.2 Metode Penetrasi Konus <i>Press-Replace</i> (PRM)	8
2.3 Model Tanah <i>Modified Cam-Clay</i> (MCC)	12



2.3.1	<i>Virgin Consolidation Line</i> dan <i>Swelling Line</i>	12
2.3.2	Bidang Kelelehan	14
2.4	<i>Stress Path</i> Saat Penetrasi Konus	17
2.5	Pengujian Piezocone (CPTu)	19
2.5.1.	Konfigurasi Alat	21
2.5.2.	Prosedur Uji	23
2.5.3.	Klasifikasi Jenis Tanah	28
2.5.4.	Interpretasi Data Uji CPTu pada Tanah Butir Halus	31
<b>BAB 3 METODE ANALISIS</b>		<b>49</b>
3.1	Penentuan Parameter untuk Input Pemodelan	49
3.1.1	Parameter Konus	49
3.1.2	Parameter Tanah	50
3.1.3	Penentuan Parameter Kuat Geser Tak Teralir ( $s_u$ )	55
3.2	Geometri dan Diskretisasi Model	55
3.3	Simulasi Penetrasi Konus dengan Metode <i>Press-Replace</i> (PRM)	57
3.4	Interpretasi Hasil Pemodelan Numerik	59
3.4.1	<i>Stress Path</i> pada Elemen Tanah saat Penetrasi Konus	60
3.4.2	Prediksi Kuat Geser Tak Teralir ( $s_u$ prediksi)	60
3.4.3	Kontur Tekanan Air Pori Ekses	62
3.4.4	Disipasi Tekanan Air Pori Ekses	62
3.5	Pengolahan Data Hasil Uji CPTu	64
<b>BAB 4 DATA DAN ANALISIS</b>		<b>65</b>
4.1	Rekapitulasi Data Uji Lapangan dan Data Uji Laboratorium	65
4.2	Kondisi Tanah Lokasi Studi	68

4.2.1	Kondisi Geologi	68
4.2.2	Hasil Uji CPTu	69
4.2.3	Hasil Uji Laboratorium	73
4.2.4	Karakteristik Tanah Lempung Lunak Gedebage	80
4.2.5	Penentuan Nilai OCR	82
4.3	Input Parameter	83
4.4	Hasil Simulasi Penetrasi Konus	85
4.4.1	Pola Deformasi Tanah Akibat Penetrasi	85
4.4.2	Distribusi Tekanan Air Pori Ekses	86
4.4.3	Stress Path saat Penetrasi dan Uji Disipasi	88
4.5	Komparasi dengan Data Terukur	94
4.5.1	Tahanan konus ( $q_c$ )	94
4.5.2	Tekanan Air Pori ( $u_2$ )	97
4.5.3	Kuat Geser Tak Teralir ( $s_u$ )	98
4.5.4	Komparasi Hasil Uji Disipasi	102
4.5.5	Kurva Disipasi pada Bahu dan Muka Konus	103
4.6	Studi Parametrik	104
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>		<b>111</b>
5.1	Kesimpulan	111
5.2	Saran	113
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>115</b>
<b>LAMPIRAN</b>		<b>125</b>

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

### Daftar Notasi

$a$	: Rasio luas konus
$B_q$	: Rasio tekanan air pori $(=(u_2-u_o)/(q_t-\sigma_{vo}))$
$C_c$	: Indeks kompresi
$c_h$	: Koefisien konsolidasi arah horizontal
$C_s$	: Indeks pengembangan
$c'$	: Kohesi efektif
$c_{CU}$	: Kohesi dalam kondisi tegangan total ' <i>total stress</i> '
$D$	: Diameter konus <i>probe</i> CPTu
$e$	: Angka pori
$F_r$	: Rasio gesekan ternormalisasi $= (f_s/(q_t-\sigma_{vo}))$
$f_s$	: Gesekan selimut
$G$	: Modulus geser
$G_s$	: Berat jenis ' <i>specific gravity</i> '
$I_r$	: Indeks kekakuan tanah ' <i>rigidity index</i> '
$I_p$	: Indeks Plastisitas
$k$	: Koefisien permeabilitas tanah
$k_h$	: Koefisien permeabilitas tanah pada arah horizontal
$K_o$	: Koefisien lateral tanah <i>at rest</i>
$k_v$	: Koefisien permeabilitas tanah pada arah vertikal
$M$	: Gradien <i>Critical State Line</i>
$N_{kt}$	: Faktor konus (fungsi dari tahanan konus terkoreksi, $q_t$ )
$N_{ke}$	: Faktor konus (fungsi dari tahanan konus terkoreksi efektif, $q_e = q_t - u_2$ )
$N_{\Delta u}$	: Faktor konus (fungsi dari tekanan air pori eksese, $\Delta u$ )
$p_c$	: Tegangan pra-konsolidasi
$p'$	: Tegangan normal rata-rata ( <i>mean normal stress</i> )
$q$	: Tegangan deviator

- $q_c$  : Tahanan konus  
 $q_e$  : Tahanan konus efektif =  $(q_t - u_2)$   
 $q_t$  : Tahanan konus terkoreksi =  $q_c + (1-a) \cdot u_2$   
 $Q_t$  : Tahanan konus ternormalisasi =  $(q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$   
 $R_f$  : Rasio gesekan '*friction ratio*'  
 $S_t$  : Sensitivitas  
 $s_u$  : Kuat geser tak teralir  
 $t_{50}$  : Waktu yang dibutuhkan untuk 50% disipasi tekanan air pori eksese  
 $T^*$  : Faktor waktu termodifikasi  
 $u_o$  : Tekanan air hidrostatik  
 $u_1$  : Tekanan air pori terukur di muka konus  
 $u_2$  : Tekanan air pori terukur di bahu/belakang konus  
 $w_n$  : Kadar air alami  
 $\Delta u$  : Tekanan air pori eksese =  $u - u_o$   
 $\gamma$  : Berat isi  
 $\kappa$  : Gradien *Swelling Line*  
 $\lambda$  : Gradien *Normal Consolidation Line*  
 $\nu$  : Angka Poisson  
 $\nu_{ur}$  : Angka Poisson kondisi *unloading-reloading*  
 $\phi'$  : Sudut geser dalam efektif  
 $\phi_u$  : Sudut geser dalam kondisi *undrained*  
 $\phi_{CU}$  : Sudut geser dalam kondisi tegangan total '*total stress*'  
 $\sigma'_{vo}$  : Tegangan vertikal efektif awal/ *effective overburden pressure*  
 $\sigma_{vo}$  : Tegangan vertikal total awal/ *total overburden pressure*  
 $\sigma_h$  : Tegangan horizontal total  
 $\sigma'_h$  : Tegangan horizontal efektif  
 $v$  : *Specific volume*

## **Daftar Singkatan**

ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CPT	: Cone Penetration Testing
CPTu	: Cone Penetration Testing dengan Pengukuran Tekanan Air Pori
CSL	: Critical State Line
CSSM	: Critical State Soil Mechanics
CU	: Consolidated Undrained (Triaxial)
DSS	: Direct Simple Shear
ESOPT	: European Symposium on Penetration Testing
ESP	: Effective Stress Path
GBLA	: Gelora Bandung Lautan Api
ISSMFE	: International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
ISOPT	: International Symposium on Penetration Testing
MCC	: Modified Cam Clay
NC	: Normally Consolidated
NCL	: Normal Consolidation Line
NGI	: Norwegian Geotechnical Institute
OC	: Over Consolidated
OCR	: Over Consolidation Ratio
PRM	: Press Replace Method
SCE	: Spherical Cavity Expansion
TSP	: Total Stress Path

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Alir	5
Gambar 2.1 Kompresi Isotropik dan <i>Swelling</i> (Atkinson, 2007)	13
Gambar 2.2 Bidang Kelelahan Model CC dan Model MCC pada bidang $p' - q$	14
Gambar 2.3 Evolusi Bidang Kelelahan pada <i>Wet Side</i> (a), dan (b) Kurva Respon Tegangan-Regangan ( <i>Hardening</i> ) pada <i>Wet Side</i> saat uji <i>Simple Shear</i>	15
Gambar 2.4 Evolusi Bidang Kelelahan pada <i>Dry Side</i> (a), dan (b) Kurva Respon Tegangan-Regangan ( <i>Softening</i> ) pada <i>Dry Side</i> saat uji <i>Simple Shear</i>	16
Gambar 2.5 Zona Keruntuhan di Bawah Titik yang Berpenetrasi ' <i>Penetrating Point</i> ' (Vesić, 1972)	17
Gambar 2.6 Pendekatan <i>Stress Path</i> untuk Memperoleh Komponen Tekanan Air Pori (Chen dan Mayne, 1994)	18
Gambar 2.7 Analisis <i>Stress Path</i> pada Elemen Tanah di samping Konus yang Berpenetrasi (Tipe $u_2$ ) (Chen dan Mayne, 1994)	19
Gambar 2.8. Pelbagai Dimensi <i>Probe</i> CPTu (Robertson, 2012)	20
Gambar 2.9. Komponen internal alat uji CPTu (diadaptasi dari Zuidberg 1988)	21
Gambar 2.10. Alat Penetrasi Konus Manual	22
Gambar 2.11. <i>Probe</i> CPTu dan set alat akuisisi data (sumber: vertekcpt.com)	23
Gambar 2.12. Contoh alat pengukur kedalaman untuk uji CPT/CPTu (Lunne et al 1997)	26
Gambar 2.13. Penjenuhan elemen filter dengan gliserin (Larsson 1992)	27
Gambar 2.14 Kurva Klasifikasi <i>Soil Behavior Type</i> (Robertson et al, 1986)	29

Gambar 2.15. Kurva klasifikasi <i>soil behavior type</i> berdasarkan parameter CPT/CPTu ternormalisasi (Robertson, 1990)	31
Gambar 2.16. Estimasi nilai $K_o$ dari data CPTu (Kulhawy dan Mayne, 1990)	33
Gambar 2.17. $(u_1 - u_2)/\sigma'_{vo}$ terhadap $K_o$ (Sully dan Campanella, 1991)	34
Gambar 2.18. Hubungan $f_s$ , OCR, dan $K_o$ (Masood dan Mitchell, 1993)	35
Gambar 2.19. Hubungan faktor konus $N_{kt}$ terhadap indeks plastisitas $I_p$ (Aas et al 1986)	37
Gambar 2.20. Faktor konus $N_{kt}$ terhadap $B_q$ (Karlsruud et al 1996)	38
Gambar 2.21. Faktor konus $N_{ke}$ terhadap $B_q$ (Karlsruud et al 1996)	39
Gambar 2.22. Faktor konus $N_{du}$ terhadap $B_q$ (Karlsruud et al 1996).	41
Gambar 2.23. Hubungan rasio gesekan, $R_f$ terhadap sensitivitas, $S_t$ (Rad dan Lunne, 1986)	42
Gambar 2.24. Perbandingan hasil uji triaxial (sampel <i>remoulded</i> ) terhadap gesekan selimut dari uji CPT (Quiros dan Young, 1988)	43
Gambar 2.25. Kurva tipikal hasil uji disipasi pada tanah lempung lunak (Schnaid, 2009)	44
Gambar 2.26. Interpretasi data uji disipasi (Schnaid, 2009)	45
Gambar 2.27. Kurva untuk menentukan $c_h$ (Robertson et al 1992)	46
Gambar 2.28. Kurva untuk evaluasi nilai $k_h$ dari data $t_{50}$ untuk alat CPTu dengan diameter <i>probe</i> 10 cm <sup>2</sup> (Robertson et al 1992)	47
Gambar 3.1 Titik Keruntuhan pada Uji Triaxial Kondisi <i>Undrained</i> dan <i>Drained</i> pada Spesimen Tanah Lempung Weald (Atkinson dan Bransby, 1978)	53
Gambar 3.2. Konfigurasi Model Elemen Hingga (dimodifikasi dari Lim et al 2018)	57

Gambar 3.3 Sketsa metode Press-Replace untuk Simulasi Penetrasi Konus hingga Kedalaman 0.2 Diameter Konus: (a) Kondisi Awal; (b) Press Pertama; (c) Replace Pertama; (d) Press Kedua (digambar ulang dari Lim et al 2018)	58
Gambar 3.4 Pengukuran Tahanan Konus ( $q_c$ ) dan Lokasi Pengukuran Tekanan Air Pori ( $u_2$ ) (dimodifikasi dari Lim et al 2018)	62
Gambar 4.1 Lokasi Titik Bor (BH) dan Uji CPTu (a) Stadion GBLA, (b) Plaza Summarecon	66
Gambar 4.2 Lokasi Studi pada Peta Geologi Lembar Bandung (Silitonga, 1973)	68
Gambar 4.3 Tipikal Kondisi Tanah Stadion GBLA (CPTu-02)	70
Gambar 4.4 Tipikal Kondisi Tanah Plaza Summarecon (CPTu-02)	72
Gambar 4.5 Distribusi Berat Isi ( $\gamma$ ) dan Angka Pori terhadap Kedalaman ( $e$ ) (Stadion GBLA)	74
Gambar 4.6 Distribusi <i>Undrained Shear Strength</i> ( $s_u$ ) dan Sudut Geser Dalam Efektif ( $\phi'$ ) terhadap Kedalaman (Stadion GBLA)	75
Gambar 4.7 Distribusi <i>Compression Index</i> ( $C_c$ ) dan <i>Swelling Index</i> ( $C_s$ ) terhadap Kedalaman (Stadion GBLA)	76
Gambar 4.8 Distribusi Berat Isi ( $\gamma$ ) dan Angka Pori ( $e$ ) terhadap Kedalaman (Plaza Summarecon)	77
Gambar 4.9 Distribusi <i>Undrained Shear Strength</i> ( $s_u$ ) dan Sudut Geser Dalam Efektif ( $\phi'$ ) terhadap Kedalaman (Plaza Summarecon)	78
Gambar 4.10 Distribusi <i>Compression Index</i> ( $C_c$ ) dan <i>Swelling Index</i> ( $C_s$ ) terhadap Kedalaman (Plaza Summarecon)	79
Gambar 4.11 Korelasi Angka Pori ( $e$ ) terhadap Tegangan Vertikal Efektif ( $\sigma_v'$ ) untuk Tanah Lempung Sedimen (Lambe dan Whitman, 1969)	80



Gambar 4.12 Distribusi <i>Liquid Limit</i> (LL) terhadap Kedalaman	81
Gambar 4.13 Distribusi OCR terhadap Kedalaman pada Lokasi Studi	83
Gambar 4.14 Pola Deformasi <i>Mesh</i> pada Kedalaman Penetrasi <i>7D</i>	86
Gambar 4.15 Distribusi Tekanan Air Pori Ekses pada Kedalaman Penetrasi <i>0.1D</i> , <i>3D</i> , dan <i>7D</i> (Simulasi No. 2)	87
Gambar 4.16 Distribusi Tekanan Air Pori Ekses Arah Lateral pada Bahu Konus (Potongan A-A')	87
Gambar 4.17 <i>Stress Path</i> pada Kedalaman Penetrasi <i>0.1D</i> (Titik Tegangan Tinjauan: M)	89
Gambar 4.18 Lokasi Pengamatan <i>Stress Path</i>	90
Gambar 4.19 Kurva <i>Stress Path</i> pada Titik O dan P	91
Gambar 4.20 Kurva <i>Stress Path</i> pada Titik Q dan R	92
Gambar 4.21 Kurva <i>Stress Path</i> saat Konsolidasi	93
Gambar 4.22 Distribusi Tahanan Konus terhadap Kedalaman Penetrasi Ternormalisasi (Simulasi No.3)	95
Gambar 4.23 Perbandingan antara $q_c$ Terprediksi dan $q_c$ Terukur	96
Gambar 4.24 Perbandingan antara $u_2$ Terprediksi dan $u_2$ Terukur	98
Gambar 4.25 Perbandingan antara $s_u$ Terprediksi dan $s_u$ Terukur berdasarkan Faktor Konus $N_{kt}$	100
Gambar 4.26 Perbandingan antara $s_u$ Terprediksi dan $s_u$ Terukur berdasarkan Faktor Konus $N_{\Delta u}$	101
Gambar 4.27 Perbandingan antara Kurva Disipasi Terprediksi terhadap Kurva Disipasi Terukur di Stadion GBLA (a) CPTu-01, $z = 10.64$ m, dan (b) CPTu- 03, $z = 15.4$ m	103

Gambar 4.28 Perbandingan Kurva Disipasi pada Lokasi Muka ( $u_1$ ) dan Bahu ( $u_2$ )	
Konus	104
Gambar 4.29 Pengaruh Nilai $M$ dan $k_o$ terhadap Tahanan konus ( $q_c$ ) (Simulasi No. 3)	105
Gambar 4.30 Pengaruh Nilai $\lambda$ dan $\kappa$ terhadap Tahanan konus ( $q_c$ ) (Simulasi No. 3)	106
Gambar 4.31 Pengaruh Nilai $v_{ur}$ terhadap Tahanan konus ( $q_c$ ) (Simulasi No. 3)	107
Gambar 4.32 Pengaruh Nilai Permeabilitas Tanah ( $k$ ) terhadap Kurva Disipasi	108
Gambar 4.33 Pengaruh Anisotropi Permeabilitas Tanah terhadap Kurva Disipasi	108

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tingkat keandalan uji CPT dalam penentuan parameter (Lunne et al, 1997)	32
Tabel 2.2. Faktor konus teoritis untuk pondasi dalam berbentuk lingkaran (dimodifikasi dari Konrad dan Law, 1987)	36
Tabel 2.3. Faktor waktu $T^*$ (Houlsby dan Teh, 1988)	46
Tabel 2.4. Rasio permeabilitas untuk tanah lempung lunak (Jamiolkowski et al 1985)	47
Tabel 4.1. Rincian Uji Lapangan	65
Tabel 4.2. Rincian Uji Laboratorium	67
Tabel 4.3 Klasifikasi Plastistas Tanah Berdasarkan Nilai Batas Cair ( <i>Center of Geotechnical Engineering - CGE, 2014</i> )	82
Tabel 4.4 Input Parameter untuk Simulasi Penetrasi Konus	84
Tabel 4.5 Tahanan Konus Terprediksi dan Tahanan Konus Terukur pada Kondisi <i>Steady State</i>	96
Tabel 4.6 Tekanan Air Pori Terprediksi dan Tekanan Air Pori Terukur pada Kondisi <i>Steady State</i>	97
Tabel 4.7 Kuat Geser Tak Teralir Terprediksi dan Kuat Geser Tak Teralir Terukur	99
Tabel 4.8 Kuat Geser Tak Teralir Terprediksi dan Kuat Geser Tak Teralir Terukur	101

## **DAFTAR LAMPIRAN**

- L.1 HASIL UJI CPTU
- L.2 HASIL UJI DISIPASI
- L.3 RESUME HASIL UJI LABORATORIUM

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Penyelidikan tanah merupakan pekerjaan yang wajib dilakukan sebelum memulai proyek konstruksi sipil. Tujuannya adalah untuk mendapatkan informasi jenis dan karakteristik mekanis serta fisis dari tanah. Informasi ini dapat diperoleh dengan melakukan uji pada sampel tanah di laboratorium atau pengujian langsung di lapangan '*in situ*'.

Pengujian di laboratorium dan *in situ* lebih merupakan satu kesatuan yang saling melengkapi daripada saling bertentangan. Namun demikian, uji *in situ* umumnya lebih disukai daripada uji di laboratorium karena uji *in situ* dapat dilakukan dengan waktu yang relatif lebih cepat dan ekonomis. Selain itu juga uji *in situ* memiliki keunggulan untuk mengukur langsung properti tanah sesuai dengan kondisi tegangan riil di lapangan.

Dari sekian banyak jenis uji *in situ*, *piezocone* (CPTu) merupakan uji yang paling banyak kegunaan dan kemampuannya dalam penyelidikan tanah. Uji CPTu dapat memberikan profil menerus dari suatu lapisan tanah dan pengujiannya juga umumnya dapat dilakukan berulang dengan waktu yang singkat. Meskipun demikian, data hasil pengukuran dari uji CPTu tidak serta merta menghasilkan parameter tanah secara langsung, melainkan perlu diinterpretasi dan diolah untuk mendapatkan informasi properti tanah yang lebih akurat.

## 1.2 Inti Permasalahan

Untuk melakukan interpretasi yang akurat terhadap data hasil pengukuran dari uji CPTu, maka dibutuhkan pemahaman mengenai mekanisme proses penetrasi konus ke dalam massa tanah. Proses penetrasi konus ke dalam massa tanah merupakan mekanisme yang kompleks, dimana hal ini termasuk permasalahan deformasi tanah yang besar '*large deformations problem*'.

Mekanisme yang kompleks tersebut dapat diteliti secara ilmiah dengan melakukan pemodelan numerik. Model elemen hingga yang telah dikembangkan diantaranya adalah *Steady State Finite Element* (Yu et al 2000), *Large Deformation Finite Element* (Lu et al 2004), *Full-Penetration Finite Element Analysis* (Sheng et al 2013), dan *Material Point Method* (Ceccato dan Simonini 2016). Namun demikian, pemodelan numerik tersebut dapat dikatakan tidak mudah karena dibutuhkan prosedur yang kompleks untuk mengatasi ketidakstabilan numerik akibat distorsi yang besar pada massa tanah. Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif model elemen hingga yang dapat mengakomodasi permasalahan tersebut sehingga dapat menyimulasikan penetrasi konus ke dalam massa tanah secara lebih akurat dan realistis.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meneliti perilaku tanah saat proses penetrasi konus, dan membandingkan hasil simulasi penetrasi konus pada model elemen hingga dengan data hasil uji CPTu riil yang terukur di lapangan.

## 1.4 Lingkup Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian, lingkup penelitian meliputi:

1. Menentukan parameter tanah berdasarkan hasil uji laboratorium.
2. Mengkaji perilaku tanah yaitu lintasan tegangan '*stress path*' pada lokasi bahu konus ( $u_2$ ) dan muka konus ( $u_1$ ).
3. Menentukan besarnya tahanan konus ( $q_c$ ) dan tekanan air pori ( $u_2$ ) dari pemodelan numerik.
4. Menentukan nilai dan distribusi tekanan air pori eksese di sekitar konus.
5. Membandingkan hasil pemodelan numerik dengan data terukur, meliputi tahanan konus ( $q_c$ ), tekanan air pori ( $u_2$ ), dan kuat geser tak teralir ( $s_u$ ).

## 1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan terdiri atas studi literatur, pengumpulan data, dan interpretasi serta analisis data.

### 1.5.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan informasi dari buku teks, jurnal, artikel ilmiah '*paper*', serta tesis dan disertasi peneliti terdahulu yang relevan sebagai acuan untuk melakukan analisis, pemodelan, dan interpretasi hasil.

### 1.5.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder, yaitu berupa data hasil uji lapangan (CPTu) dan hasil uji laboratorium.

### 1.5.3 Analisis dan Komparasi

Sebagai data input, penentuan parameter tanah dilakukan dengan menginterpretasi data hasil uji laboratorium dan uji CPTu. Simulasi penetrasi konus ke dalam massa tanah kemudian dilakukan dengan membuat pemodelan menggunakan elemen hingga. Keluaran '*output*' dari pemodelan kemudian dibandingkan dengan data hasil uji CPTu yang terukur di lapangan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dibagi ke dalam lima bab sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN, yaitu menjelaskan latar belakang masalah, inti permasalahan yang dihadapi, tujuan penelitian, lingkup penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan, serta diagram alir penelitian.

BAB 2 STUDI PUSTAKA, yaitu menjabarkan teori mekanisme penetrasi konus ke dalam massa tanah, metode simulasi penetrasi konus dengan elemen hingga, model tanah *Modified Cam-Clay*, teori lintasan tegangan '*stress path*' pada elemen tanah saat penetrasi konus, deskripsi komponen alat dan prosedur pengujian CPTu, serta interpretasi hasil pengukuran CPTu.

BAB 3 METODE ANALISIS yaitu menjabarkan metode penentuan *input* parameter, geometri & konfigurasi model, simulasi penetrasi konus dengan metode *Press-Replace*, interpretasi hasil pemodelan numerik, dan pengolahan data hasil uji CPTu.

BAB 4 DATA DAN ANALISIS, yaitu memaparkan data hasil uji lapangan (CPTu) dan hasil uji laboratorium, interpretasi kondisi tanah lokasi studi, penentuan

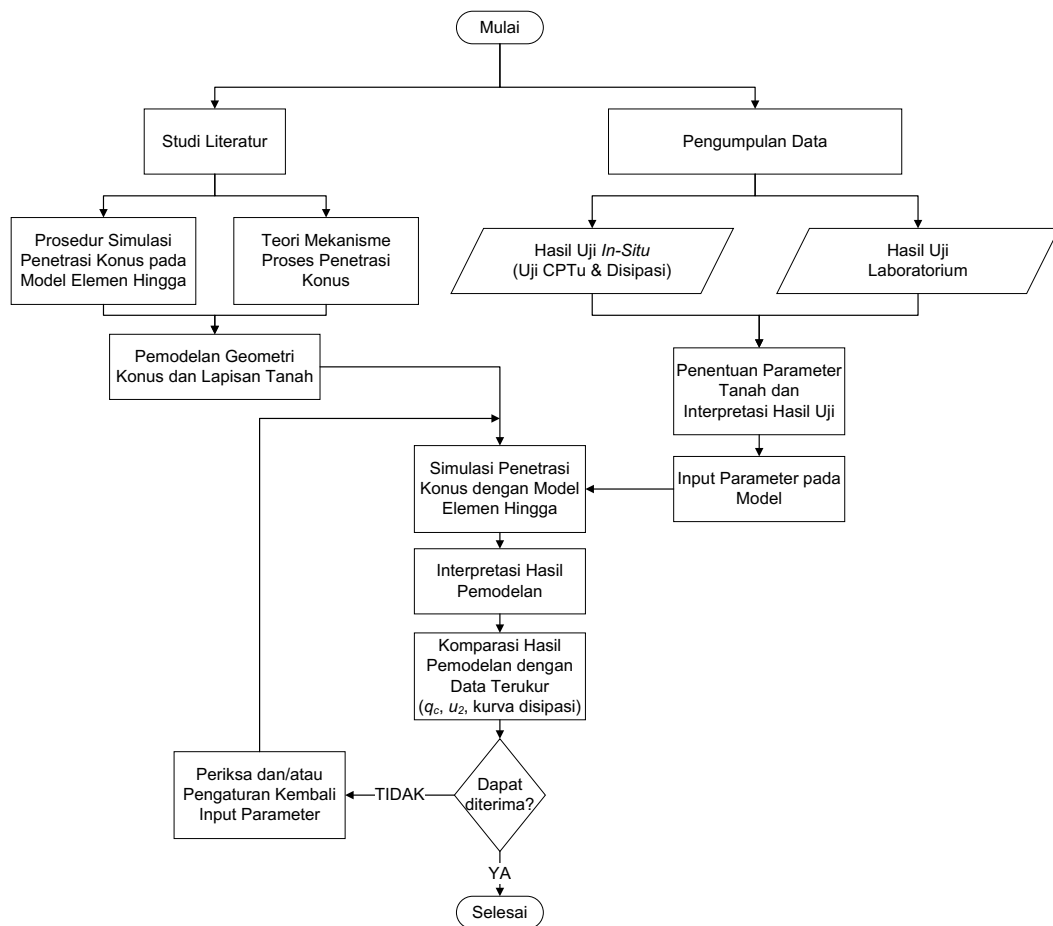


*input* parameter, hasil simulasi penetrasi konus, komparasi hasil simulasi dengan data terukur, dan studi parametrik.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN, yaitu menyimpulkan hasil analisis, investigasi, dan komparasi yang diperoleh, serta saran untuk penelitian selanjutnya.

## 1.7 Diagram Alir Penelitian

Rangkaian tahapan setiap pekerjaan dalam penelitian ini ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 1.1.



**Gambar 1.1** Diagram Alir

