

**INTERPRETASI KUAT GESER TANAH LEMPUNG
TEGUH JAKARTA DARI DATA *PRESSUREMETER*
BERDASARKAN PENGEMBANGAN
TEORI *CAVITY EXPANSION***

DISERTASI



Oleh:

**Gouw Tjie-Liong
2013832003**

Promotor:

Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D.

Ko-Promotor:

Prof. Dr. Ir. A. Aziz Djajaputra, MSCE

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
AGUSTUS 2017**

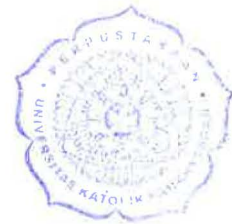
HALAMAN PENGESAHAN

**INTERPRETASI KUAT GESER TANAH LEMPUNG TEGUH JAKARTA
DARI DATA *PRESSUREMETER* BERDASARKAN PENGEMBANGAN
TEORI *CAVITY EXPANSION***



Oleh:

**Gouw Tjie-Liong
2013832003**



**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang Terbuka pada Hari/Tanggal:
Sabtu, 12 Agustus 2017**

Promotor:

Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D.

DIS-PDITS
GOU
i/17
dis 249

Ko-Promotor:

Prof. Dr. Ir. A. Aziz Djajaputra, MSCE

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
AGUSTUS 2017**



PERNYATAAN

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

Nama : Gouw Tjie-Liong
Nomor Pokok Mahasiswa : 2013 832 003
Program Studi : Doktor Teknik Sipil
Program Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Disertasi dengan judul:

INTERPRETASI KUAT GESER TANAH LEMPUNG TEGUH JAKARTA DARI DATA *PRESSUREMETER* BERDASARKAN PENGEMBANGAN TEORI *CAVITY EXPANSION*

Adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Promotor dan Ko-Promotor. 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 : 12 Agustus 2017



GOUW Tjie-Liong

INTERPRETASI KUAT GESER TANAH LEMPUNG TEGUH JAKARTA DARI DATA PRESSUREMETER BERDASARKAN PENGEMBANGAN TEORI *CAVITY EXPANSION*

Gouw Tjie Liong (NPM: 2013832003)
Promotor: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D.
Ko-Promotor: Prof. Dr. Ir. A. Aziz Djajaputra, MSCE
Doktor Ilmu Teknik Sipil
Bandung
Agustus 2017

ABSTRAK

Tanah lempung teguh Jakarta dijumpai di kedalaman antara 30 hingga lebih dari 150 m, berwarna keabuan, bernilai N SPT antara 18 hingga 25 pukulan/30cm, sering dilaporkan tersementasi, dan bersifat agak getas, sulit diperoleh contoh tanah tak terganggu. Gangguan pada contoh tanah dari mulai pengambilan di lapangan hingga persiapan contoh tanah di laboratorium dan *stress relieve* yang besar tidak jarang menimbulkan rekahan-rekahan mikro pada contoh tanah yang dipersiapkan untuk uji triaxial, akibatnya parameter kuat geser lempung teguh tersementasi ini tidak dapat terkuantifikasi dengan baik. Akan jauh lebih baik bilamana parameter kuat geser tanah ini bisa diperoleh dari uji *in-situ* karena efek gangguan pengambilan dan persiapan contoh tanah dapat dihindari. Hingga saat ini satu-satunya uji *in-situ* yang dapat menghasilkan kurva tegangan-regangan tanah seperti uji triaxial, hanya uji Pressuremeter (PMT), karena itu dihipotesakan bahwa melalui teori *cavity expansion* akan dapat diturunkan parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam). Dengan mengembangkan teori *cavity expansion* parameter kuat geser berhasil diturunkan dengan cara pencocokan (*matching*) kurva perhitungan teoretis dengan kurva data uji PMT. Didapatkan bahwa: sebelum tegangan leleh, P_y , parameter kohesi lempung teguh Jakarta meningkat secara linear terhadap kedalaman dengan angka 145 kPa di kedalaman 30 m hingga 475 kPa di kedalaman 100 m, dan nilai sudut geser dalam bervariasi antara 21°-33°; di atas tegangan leleh, P_y , kohesi tidak lagi bekerja dan hanya sudut geser dalam yang bekerja. Nilai sudut geser dalam yang didapatkan dari uji PMT bernilai tetap yaitu: $\phi_{peak} = \phi_{ultimate} = \phi_{PMT}$, ini berarti sudut dilatansi lempung teguh Jakarta sama dengan nol ($\psi = 0$). Nilai ϕ_{PMT} berada pada rentang nilai sudut geser dalam efektif (*drained*) yang didapatkan dari uji triaxial *consolidated undrained*, namun nilai kohesi yang didapatkan lebih besar dari uji triaxial. Nilai kohesi uji triaxial lebih kecil dikarenakan efek gangguan dan relaksasi menimbulkan retak mikro dalam contoh tanah yang berakibat efek sementasi tanah lempung teguh berkurang. Disimpulkan bahwa kuat geser tanah lempung teguh Jakarta dapat diturunkan dari uji PMT dan kuat geser yang dihasilkan adalah kuat geser efektif (*drained*). Untuk kuat geser undrained didapatkan konstanta pressuremeter N_p sebesar 5.50.

Kata Kunci:

Lempung Teguh Jakarta, Kuat Geser, Pressuremeter, Pengembangan Teori *Cavity Expansion*

SHEAR STRENGTH INTERPRETATION OF JAKARTA STIFF CLAY BY PRESSUREMETER DATA BASED ON DEVELOPMENT OF CAVITY EXPANSION THEORY

Gouw Tjie Liong (NPM: 2013832003)

Advisor: Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D.
Co-advisor: Prof. Dr. Ir. A. Aziz Djajaputra, MSCE
Doctor in Civil Engineering
Bandung
August 2017

ABSTRACT

Jakarta stiff clay, found at a depth of 30 - 150 m depth or more, greyish in color, having SPT N values around 18 to 25 blows/ft, often reported cemented, showing rather brittle characteristic, and difficult to retrieve undisturbed samples. Sample disturbances, starting from sampling process in the field to sample preparation in the laboratory and large stress relieve, often induced micro cracks on the soil samples prepared for triaxial test, hence the shear strength parameters of this stiff clay are not well quantified. It will be better if the shear strength parameters can be obtained from in-situ testing because by performing the test in-situ, sample disturbance and large stress relieve can be significantly reduced. Up to the present time, the only in-situ testing device that can produce soil stress strain relationship as triaxial test, is Pressuremeter test (PMT). Therefore, it is hypothesis that the shear strength parameters, i.e. cohesion and angle of internal friction, can be derived through cavity expansion theory. Through a thorough research, the writer succeeded in deriving shear strength parameters of Jakarta stiff clay by matching theoretical curve obtained through the development of cavity expansion theory with the PMT test curve. It was obtained that: before yield pressure, P_y , the cohesion parameter of Jakarta stiff clay increases with depth, with a value of 145kPa at a depth of 30m to 475kPa at a depth of 100m. The angle of internal frictions varies between 21° to 33° . Above the yield pressure, P_y , the stiff clay loses its cohesion and only left with its angle of internal frictions. The angle of internal frictions obtained from PMT have constant values, i.e. $\phi_{peak} = \phi_{ultimate} = \phi_{PMT}$, which means Jakarta cemented stiff clay has zero dilatancy ($\psi = 0$). The angle of internal frictions obtained fall within the value of drained angle of internal frictions obtained from triaxial consolidated undrained test. However, the cohesion values obtained is larger than triaxial test results. The smaller triaxial cohesion values are attributed to the disturbances and stress relieve experienced by the soil samples, causing the cemented stiff clay to loss part of its cementation and cohesion effect. It is concluded that the shear strength parameters of Jakarta stiff clay can be obtained from Pressuremeter test and the parameters obtained is effective (drained) parameters. To calculate undrained shear strength, it is found that the pressuremeter constant N_p is equal to 5.50.

Keywords:

Jakarta stiff clay, Shear Strength, Pressuremeter, Development of Cavity Expansion Theory

PENGANTAR

Disertasi dengan judul “Interpretasi Kuat Geser Tanah Lempung Teguh Jakarta dari Data *Pressuremeter* Berdasarkan Pengembangan Teori *Cavity Expansion*” ini ditujukan untuk memenuhi sebagian syarat kelulusan untuk program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

Rasa syukur yang mendalam disampaikan kepada Yang Maha Kuasa atas terselesainya studi dan disertasi doktor teknik sipil dalam sub bidang keilmuan geoteknik ini. Sebuah impian yang tidak dapat terlaksana selama 30 tahun. Keterbatasan finansial memaksa penulis lebih mengutamakan kepentingan keluarga dalam membesarkan, mendidik anak-anak dan membina keluarga. Kini di usia yang terhitung tidak muda lagi ini akhirnya impian ini menjadi kenyataan. Sebuah pencapaian keilmuan dalam cita-cita pribadi yang tidak mungkin terlaksana tanpa masukan, dorongan, dan dukungan yang sangat berharga dari:

- Bapak Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D selaku Promotor,
- Bapak Prof. Dr. A. Aziz Djajaputra selaku Ko-Promotor,
- Bapak Prof. Hadi U. Moeno Ph.D, Ibu Silvia Herina Ph.D dan Ibu Rinda Karlina Sari Ph.D selaku dewan penguji.
- Bapak Ir. Bigman Marihat Hutapea MSc., Ph.D, selaku penguji luar.
- Bapak Yohannes Timbul Widodo dan tim selaku tata usaha Fakultas Pasca Sarjana.
- Bapak Ir. P. Benny Kumara, Bapak Ir. Y.P. Chandra M.Eng, kawan dan rekan dari PT. GEC., PT. Pondasi Kisocon Raya, PT. Geotama Trinita dan PT.

Tarumanegara Bumiayasa yang memberikan bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini.

Penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya dihaturkan kepada bapak-bapak dan ibu-ibu tersebut di atas. Penghargaan tinggi disampaikan pula kepada papa Gouw Seh Toh, istri Rika Yanti Tanudjaja, dan anak-anak Anthony dan Evelyn Gunawan, yang telah memberi dukungan moril selama proses studi S3 ini. Penulis berjanji untuk selalu berkarya, menyumbangkan tenaga, pikiran dan pengetahuan kepada dunia pendidikan Indonesia, khususnya dalam bidang geoteknik. Akhir kata semoga penelitian yang menghasilkan parameter kuat geser drained dan undrained dari uji Pressuremeter ini dapat memberikan sumbangsih yang berharga untuk kemajuan dunia ilmu Geoteknik.

Bandung, 12 Agustus 2017

Penulis,

Gouw Tjie Liong

DAFTAR ISI

ABSTRAK (bahasa Indonesia)	
ABSTRACT (bahasa Inggris)	
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	2
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	3
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Hipotesa	5
1.6 Rencana Penelitian	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA	11
2.1 Geologi Jakarta	11
2.2 Uji Pressuremeter	13
2.3 Jenis Pressuremeter	14
2.4 Prosedur Uji Pressuremeter Pra-bor	19
2.4.1 Persiapan Lubang Bor	19
2.4.2 Kalibrasi PMT (ASTM D4719-00, 2000)	20
2.4.3 Memasukkan Probe PMT ke dalam Lubang Bor	29
2.4.4 Pelaksanaan Uji PMT	32
2.5 Kurva Uji dan Parameter PMT Ménard	38
2.5.1 Kurva Uji dan Parameter PMT Tipe Ménard	38
2.5.2 Tekanan Batas (Limit Pressure), P_L	40
2.5.3 Tekanan Leleh (Yield Pressure), P_y	40
2.5.4 Tekanan Tanah Horisontal Ménard, P_{oM}	40
2.5.5 Tekanan Batas Netto (Net Limit Pressure), P^*_L	41
2.5.6 Modulus Pressuremeter, E_M dan Modulus Geser, G .	41
2.6 Kurva Uji dan Parameter PMT OYO	42
2.6.1 Tekanan Batas (atau disebut juga Tekanan Runtuh), P_L	43
2.6.2 Tekanan Leleh, P_y	43
2.6.3 Tekanan Tanah Horisontal Dalam Keadaan Diam, P_o	44
2.6.4 Koefisien Reaksi Tanah Dalam Arah horisontal, K_m	44
2.6.5 Tekanan Batas Netto (Tekanan Runtuh Netto), P^*_L	44

2.6.6	Modulus Deformasi, E_M , dan Modulus Geser, G	44
2.7	Ekstrapolasi untuk Menentukan Tekanan Batas, P_L	46
2.8	Modulus Deformasi dan Modulus Unloading- Reloading	47
2.9	Teori Cavity Expansion	48
2.10	Hubungan Teori Cavity Expansion dengan Uji Pressuremeter	52
2.11	Penurunan Parameter Kuat Geser Tanah dari uji PMT	59
2.11.1	Kuat Geser Undrained Tanah Lempung, S_u	59
2.11.2	Sudut Geser Dalam Tanah Pasir, ϕ'	62
2.11.3	Parameter Kohesi dan Sudut Geser Dalam Tanah Lempung, c dan ϕ	66
BAB III METODA PENELITIAN		69
3.1	Program Pengujian di Lapangan	69
3.2	Program Pengujian di Laboratorium	70
3.3	Validasi Pengujian	71
3.4	Analisa Hasil Pengujian	72
3.5	Menurunkan Parameter Kuat Geser c dan ϕ dari PMT	73
3.6	Pemilihan Data (Data Selection)	76
3.7	Mengkaji Hasil Pemodelan dan Menarik Kesimpulan	78
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		81
4.1	Data Tanah di Lokasi Penelitian	81
4.2	Hasil Uji X-ray	89
4.3	Hasil Uji Konsolidasi Horisontal vs Vertikal	98
4.4	Data Uji Pressuremeter (PMT)	102
4.5	Analisis Uji PMT Berdasarkan Model Cavity Expansion Meksi	110
4.6	Studi Numerik Uji PMT melalui Analisa Elemen Hingga	112
4.7	Kajian Parameter Indeks Kekakuan Model Cavity Expansion	118
4.8	Derivasi c_{PMT} ϕ_{PMT} Berdasarkan Fungsi Indeks Kekakuan	123
4.9	Derivasi c_{PMT} ϕ_{PMT} Berdasarkan Normalisasi Fungsi Kekakuan	128
4.10	Regresi Data Uji PMT	136
4.11	Kuat Geser Undrained dari Data Uji PMT vs Data Uji Triaxial	141
4.12	Evaluasi Parameter Kekakuan PMT vs Oedometer	147
4.13	Pemilihan Data (Data Selection)	148
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		153
DAFTAR PUSTAKA		165

LAMPIRAN

L-1 Sertifikasi Alat Uji	L1.1 – L1.14
L-2 Data Uji PMT	L2.1 – L2.21
L-3 Data Uji PMT dan Penurunann Kuat Geser C_{PMT} ϕ_{PMT} melalui Coba - coba Indeks Kekakuan a	L3.1 – L3.21
L-4 Penurunan Kuat Geser C_{PMT} ϕ_{PMT} melalui Normalisasi Fungsi Kekakuan	L4.1 – L4.21
L-5 Beberapa Foto Saat Uji Lapangan Dilakukan	L5.1 – L5.3

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tegangan vs Regangan dan Sudut Geser Dalam Tanah	6
Gambar 2.1 Peta Geologi Jakarta (Jakartapedia, 2016)	12
Gambar 2.2 Uji dan Kurva Uji Pressuremeter (modifikasi dari Briaud, 2013)	13
Gambar 2.3 Skematik Teori Cavity Expansion (Yu, H.S., 2000)	14
Gambar 2.4 Jenis-jenis Pressuremeter	15
Gambar 2.5 Jenis Probe PMT	17
Gambar 2.6 Jenis dan Aplikasi PMT Sel Tunggal	17
Gambar 2.7 Probe Sel Tunggal vs Probe Tiga Sel (Ohya dkk, 1983)	18
Gambar 2.8 Kalibrasi Volume (Baguelin dkk, 1978)	21
Gambar 2.9 Kalibrasi Tekanan (modifikasi Baguelin dkk, 1978)	23
Gambar 2.10 Kalibrasi Lengan Pengukur PMT OYO	26
Gambar 2.11 Kalibrasi Perlawanan Membrane (OYO Corporation)	27
Gambar 2.12 Radius Luar vs Radius Dalam (OYO Corporation)	28
Gambar 2.13 Penggunaan Casing di Tanah Lunak dan Pasir Lepas	31
Gambar 2.14 Penggunaan Slotted Tube pada Kerikil (Baguelin dkk, 1978)	31
Gambar 2.15 Kurva Uji PMT yang telah Dikoreksi (modifikasi dari Baguelin, 1978)	39
Gambar 2.16 Kurva Uji PMT OYO yang Sudah Dikoreksi (Gouw, 1984)	43
Gambar 2.17 Pengembangan Probe PMT Silinder	44
Gambar 2.18 Konversi Volume Saat Runtuh PMT Ménard ke PMT OYO	46
Gambar 2.19 Ekstrapolasi untuk mendapatkan harga P_L (Baguelin dkk, 1978, Ghionna dkk, 1981)	47
Gambar 2.20 Notasi untuk Penentuan E_o dan E_r (Briaud, 2013)	47
Gambar 2.21 Teori Cavity Expansion (modifikasi dari Mecsi, 2013)	49
Gambar 2.22 Cavity Expansion dengan Keberadaan Gaya Vertikal	50
Gambar 2.23 Daerah Pengaruh Pengembangan Rongga Silindris (Mecsi, 2013)	52
Gambar 2.24 Persamaan Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb (Mecsi, 2013)	53
Gambar 2.25 Kekakuan Tanah Non-Linear (Mecsi, 2013)	54

Gambar 2.26 Distribusi Tegangan dan Regangan di sekitar Pengembangan Rongga	55
Gambar 2.27 Parameter Kuat Geser Undrained dari PMT (Gibson dan Anderson, 1961)	60
Gambar 2.28 Parameter Kuat Geser Undrained dari Kurva unloading PMT (Jefferies, 1988)	61
Gambar 2.29 Kuat Geser Undrained PMT vs Uji Lain	62
Gambar 2.30 Sudut Geser Dalam Tanah Pasir dari Kurva PMT	64
Gambar 2.31 Nomogram untuk Perkiraan Sudut Geser Dalam Tanah	65
Gambar 2.32 Perbandingan Sudut Geser Dalam Pasir dari Data PMT vs CPT	66
Gambar 2.33 Penurunan Nilai Kohesi dan Kuat Geser dari uji PMT	68
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	69
Gambar 3.2 Distribusi Data Bentuk Bel dengan Tingkat Kepercayaan 95% (modifikasi dari statisticshowto.com, 2017)	76
Gambar 4.1 Sebaran Nilai SPT dan Batas-Batas Atterberg di Lokasi Penelitian	81
Gambar 4.2 Indeks Plastisitas dan Liquiditas (Plasticity and Liquidity Indices)	82
Gambar 4.3 Berat Isi Tanah (Dry and Bulk Unit Weight)	83
Gambar 4.4 Spesifik Graviti dan Kadar Air (Specific Gravity and Water Content)	84
Gambar 4.5 Rasio Pori dan Derajat Kejenuhan (Void Ratio and Degree of Saturation)	85
Gambar 4.6 Indeks Kompresi dan Rekompresi (Compeession and Recompression Indices)	86
Gambar 4.7 Tegangan Prakonsolidasi dan Kuat Geser Undrained Triaxial UU (Pre-consolidation Pressure and Undrained Shear Strength from UU Triaxial)	87
Gambar 4.8 Kuat Geser Drained dan Undrained dari Uji Triaxial CU	88
Gambar 4.9 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-04 – Kedalaman 29.0-29.5m	89
Gambar 4.10 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-04 – Kedalaman 29.5-30.0m	90

Gambar 4.11 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-03 – Kedalaman 48.5-49.0m	91
Gambar 4.12 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-03 – Kedalaman 49.0-49.50m	92
Gambar 4.13 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-06 – Kedalaman 56.5-57.0m	93
Gambar 4.14 Hasil Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-01 – Kedalaman 82.5-83.0m	94
Gambar 4.15 Uji Difraksi Sinar X – Borehole DB-03–Kedalaman 96.5-97.0m	95
Gambar 4.16 Grafik e-log σ Uji Konsolidasi Sample Arah Horizontal	99
Gambar 4.17 Grafik e-log σ Uji Konsolidasi Sample Arah Vertikal	100
Gambar 4.18 Grafik ε vs σ Sample Arah Horizontal	100
Gambar 4.19 Grafik ε vs σ Sample Arah Vertikal	101
Gambar 4.20 E_{oed} Horizontal vs E_{oed} Vertical	102
Gambar 4.21 Kurva Uji dan Penurunan Parameter PMT	105
Gambar 4.22 Grafik Uji PMT	106
Gambar 4.23 Parameter PMT	109
Gambar 4.24 Simulasi Kurva Uji PMT dengan Model Meccsi - PMT DB-9/66m	110
Gambar 4.25 Simulasi Numerik Uji PMT dengan Metoda Elemen Hingga	113
Gambar 4.26 Pengaruh Dilatasi terhadap Kurva PMT	114
Gambar 4.27 Pengaruh Nilai E terhadap Kurva Uji PMT	114
Gambar 4.28 Pengaruh Power m (Indeks Kekakuan) terhadap Kurva Uji PMT	115
Gambar 4.29 Pengaruh Kohesi, c' , terhadap Kurva Uji PMT	115
Gambar 4.30 Pengaruh Sudut Geser Dalam, ϕ' , terhadap Kurva Uji PMT	116
Gambar 4.31 Simulasi Uji PMT dengan Pendocokan Indeks Kekakuan a	117
Gambar 4.32 Parameter Indeks Kekakuan a vs Regangan dalam Fase Plastis (Stiffness index a vs Cavity Radial Plastic Strain)	121
Gambar 4.33 Parameter c_{PMT} dan ϕ_{PMT} berdasarkan Formulasi Indeks Kekakuan vs Parameter c' dan ϕ' Drained (Efektif) Uji Triaxial CU	126

Gambar 4.34 Parameter c_{PMT} dan ϕ_{PMT} berdasarkan Formulasi Indeks Kekakuan vs Parameter c_u dan ϕ_u Undrained (Total) Uji Triaxial CU	127
Gambar 4.35 Mencari Parameter m_y dan a_{ye} berdasarkan Fungsi Normalisasi Kekakuan	130
Gambar 4.36 Parameter c_{PMT} dan ϕ_{PMT} berdasarkan Normalisasi Fungsi Kekakuan vs Parameter c' dan ϕ' Drained (Efektif) Uji Triaxial CU	133
Gambar 4.37 Parameter c_{PMT} dan ϕ_{PMT} berdasarkan Normalisasi Fungsi Kekakuan vs Parameter c_u dan ϕ_u Undrained (Total) Uji Triaxial CU	134
Gambar 4.38 Pendekatan Kurva Uji PMT dengan Regresi Linear dan Regresi Hiperbolik	137
Gambar 4.39 c_{PMT} dan ϕ_{PMT} Berdasarkan Normalisasi Fungsi Kekakuan dengan Tolok Ukur Regresi Data PMT vs Parameter c' dan ϕ' Drained (Efektif) Uji Triaxial CU	139
Gambar 4.40 c_{PMT} dan ϕ_{PMT} Berdasarkan Normalisasi Fungsi Kekakuan dengan Tolok Ukur Regresi Data PMT vs Parameter c_u dan ϕ_u Undrained (Total) Uji Triaxial CU	140
Gambar 4.41 Parameter Kuat Geser Undrained, C_u , berdasarkan Metoda Gibson dan Anderson (1961) – Data PMT DB-9, $z = 66m$	141
Gambar 4.42 Parameter Kuat Geser Undrained, C_u , berdasarkan Metoda Mair dan Wood (1987) – Data PMT DB-9, $z = 66m$	142
Gambar 4.43 Kuat Geser Undrained, C_u , dari PMT vs Triaxial UU	143
Gambar 4.44 Kuat Geser Undrained, C_u , dihitung dari C_{PMT} dan ϕ_{PMT} vs Triaxial UU	145
Gambar 4.45 Perbandingan Kuat Geser Undrained, C_u	146
Gambar 4.46 Kekakuan Tanah dari PMT, E_m vs Kekakuan Oedometer, E_{oed} .	148
Gambar 4.47 Distribusi Normal ϕ_{PMT} untuk Pemilihan Data	149
Gambar 4.48 c_{PMT} dan ϕ_{PMT} Setelah Seleksi Data vs c' dan ϕ' Drained (Efektif) Triaxial CU	151
Gambar 4.49 Kuat Geser Undrained, C_u , dihitung dari Data Terpilih C_{PMT} dan ϕ_{PMT} vs Triaxial UU	152

Gambar 5.1 Tegangan dan Regangan Tangential dapat Menimbulkan Rekahan Mikro	157
Gambar 5.2 Peningkatan Berat Isi Tanah pada Akhir Uji PMT	159
Gambar 5.3 Contoh Lempung Teguh Tersementasi Jakarta	160

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Kalibrasi Lengan Pengukur PMT OYO	25
Tabel 2.2 Nilai Tipikal Tekanan Batas, P^*_L (Briaud, 2013)	33
Tabel 2.3 Contoh Tabel Pembacaan Uji Pmt Ménard (Baguelin Dkk, 1978)	34
Tabel 2.4 Contoh Tabel Pembacaan Uji PMT OYO (Gouw, 1984)	36
Tabel 2.5 Koreksi Data Uji Pressuremeter Ménard (Baguelin dkk, 1978)	38
Tabel 2.6 Nilai Tipikal Sudut Geser Kritis ϕ'_{cv} (Schnaid, 2009)	64
Tabel 4.1 Mineral Hasil Uji Uji Difraksi Sinar X sebanyak 7 Sample Tanah	96
Tabel 4.2 Komposisi Senyawa Kimiawi Lempung Teguh Jakarta	97
Tabel 4.3 Data Uji Konsolidasi Sample Arah Horizontal Kedalaman 56.5 m	98
Tabel 4.4 Data Uji Konsolidasi Sample Arah Vertikal Kedalaman 56.5 m	99
Tabel 4.5 Parameter Hasil Uji Konsolidasi	101
Tabel 4.6 Data Uji Pressuremeter (DB-9 z = 66m)	104
Tabel 4.7 Parameter-Parameter Uji PMT	109
Tabel 4.8 Derivasi c_{PMT} , ϕ_{PMT} dan a dengan Cara Coba-coba (DB-9, z = 66m)	120
Tabel 4.9 Derivasi c_{PMT} , ϕ_{PMT} dengan Fungsi Indeks Kekakuan (DB-9, z = 66m)	125
Tabel 4.10 Derivasi c_{PMT} , ϕ_{PMT} dengan Fungsi Normalisasi Kekakuan (DB-9, z = 66m)	131
Tabel 4.11 Derivasi Konstanta Pressuremeter, N_p	144
Tabel 4.12 Derivasi Konstanta Pressuremeter, N_p melalui Pemilihan Data Berdasarkan Statistik	150

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lapisan tanah dasar di wilayah DKI Jakarta pada umumnya terdiri dari lapisan lempung lunak atau lapisan lempung merah kelanauan hingga kedalaman 15-20m, setelah itu hingga kedalaman 30m, umumnya dijumpai lapisan tanah pasir padat tersementasi berselang-seling dengan lapisan tanah lempung teguh. Di kedalaman lebih dari 30m umumnya didapatkan lapisan lempung teguh. Lapisan lempung teguh tersebut seringkali juga dilaporkan tersementasi dengan nilai SPT pada umumnya berkisar sekitar 18-25 pukulan/30cm.

Para praktisi penyelidikan tanah sering kali mengalami kesulitan untuk mengambil contoh tanah tak terganggu lempung teguh dari kedalaman yang melebihi 40m. Dilaporkan bahwa seringkali contoh tanah lempung teguh tersementasi yang didapatkan mengalami retak-retak hingga sulit untuk mendapatkan parameter kuat geser dan kekakuan tanah yang representatif melalui uji triaxial dan uji konsolidasi. Pada umumnya pada lapisan tanah lempung teguh dan pasir padat tersementasi ini hanya dilakukan uji SPT yang sangat populer di Indonesia; sedangkan uji sondir yang juga sangat umum dilakukan terkendala oleh panjang batang sondir dan sistem reaksi jangkar yang ada sehingga tidak dapat dilakukan terlalu dalam.

Kesulitan untuk memperoleh contoh tanah tidak terganggu ini mengakibatkan banyak para praktisi geoteknik menentukan parameter-parameter perhitungan geoteknik berdasarkan uji SPT dan uji indeks properti. Sebagai contoh dalam

perhitungan kapasitas pondasi dalam dan galian dalam, parameter-parameter kuat geser (kohesi, c , dan sudut geser dalam, ϕ), dan parameter deformasi tanah (kekakuan atau modulus deformasi tanah, E) yang diperlukan sering kali diambil melalui korelasi dengan uji SPT yang berasal dari penelitian di luar negeri digabung dengan pengalaman ahli geoteknik yang bersangkutan. Penentuan parameter desain dengan korelasi SPT ini sering kali bervariasi sangat jauh antara satu insinyur dengan insinyur lainnya.

1.2 Inti Permasalahan

Sebagaimana diketahui uji SPT semata-mata hanya memberikan angka perlawanan tanah terhadap penetrasi tabung belah SPT sejauh 30cm. Sebagian ahli, terutama para ahli luar negeri tidak menginginkan uji SPT diaplikasikan di tanah lempung atas dasar alasan uji SPT akan menimbulkan tegangan air pori yang cukup besar yang membuat nilai N SPT bisa bervariasi cukup jauh dalam setiap pengujian. Sekalipun dinamakan uji penetrasi standar, jenis palu dan sistem penjatuhan palu SPT akan sangat mempengaruhi energi efektif yang dihasilkan pada setiap pukulan. Energi yang sampai ke ujung tabung belah mata SPT bisa sangat bervariasi (Seed dkk, 1984; Skempton, 1986; Gouw, 1994), sehingga sesungguhnya energi setiap alat uji SPT yang digunakan harus dikalibrasi dan sayangnya dalam praktek di Indonesia dan Jakarta khususnya, hingga kini belum ada peraturan yang mengharuskan kalibrasi uji SPT. Uji SPT ini tidak dapat memberikan hubungan kurva tegangan-regangan tanah, juga tidak menghasilkan parameter-parameter penting seperti: parameter kuat geser, c dan ϕ , dan parameter kekakuan atau modulus deformasi tanah, E . Parameter-parameter penting tersebut, sebagaimana

disampaikan dalam sub bab sebelumnya, hanya dapat diperkirakan melalui korelasi yang terdapat dalam banyak buku teks dari luar negeri dan diterapkan di Jakarta tanpa dasar penelitian mendalam terhadap karakteristik tanah setempat. Cara demikian tentunya sulit dikuantifikasi dan diajarkan secara ilmiah, dan bisa bersifat subjektif dan dapat berbeda secara signifikan antara satu ahli dengan ahli lainnya. Karena itu tidak jarang perkiraan daya dukung pondasi bisa sangat berbeda dari satu konsultan ke konsultan lainnya. Sebagai contoh, pengalaman peneliti beberapa tahun lalu di suatu proyek di jalan Muhammad Husni Thamrin, untuk pondasi tiang bor berdiameter 1 m dengan kedalaman 50 m, dua konsultan menghasilkan dua daya dukung ijin yang berbeda jauh. Perencana pertama memberikan daya dukung ijin sebesar 375 ton, sementara perencana kedua mengatakan daya dukung izin dapat mencapai 750 ton. Tentunya prakiraan daya dukung yang berbeda hingga dua kali lipat ini dapat jauh dikurangi apabila dapat dihasilkan parameter kuat geser tanah yang lebih representatif daripada hanya melalui korelasi dan *judgement* perencana.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Menilik dari kesulitan untuk mengambil contoh tanah yang representatif untuk mencari parameter kuat geser dan parameter kekakuan melalui uji triaxial dan uji konsolidasi di tanah lempung teguh Jakarta, penelitian ini ditujukan untuk mencari metoda perhitungan melalui pengembangan teori *cavity expansion* yang dapat mengkuantifikasi parameter kuat geser *drained* (kohesi efektif, c' , dan sudut geser dalam efektif, ϕ') dan parameter kuat geser *undrained*, c_u , tanah lempung teguh Jakarta dengan menggunakan data uji in-situ, yaitu data uji pressuremeter.

Bilamana parameter kuat geser lempung teguh Jakarta ini, baik dalam kondisi drained ataupun undrained, dapat diturunkan melalui uji pressuremeter, tentunya penelitian ini akan memberikan kontribusi yang berarti bagi perkembangan ilmu geoteknik dan akan sangat bermanfaat bagi para insinyur untuk melakukan analisis geoteknik atas dasar data kuat geser yang terukur baik daripada hanya mengandalkan pada korelasi kasar dengan pukulan SPT. Perhitungan kapasitas pondasi dalam, analisis kestabilan galian dalam dan analisis permasalahan geoteknik lainnya, misalnya pembuatan terowongan transportasi massal MRT yang sudah mulai dibangun di Jakarta, akan dapat dilakukan dengan kualitas yang lebih terukur dan tingkat kepastian yang lebih baik.

1.4 Pembatasan Masalah

Hingga saat ini, selain uji SPT dan uji sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT), yang sudah sangat umum dilakukan di Indonesia, uji *in situ* lain yang telah dikenal namun relatif masih jarang diaplikasikan adalah uji geser baling (*Vane Shear Test*, VST), sondir elektrik yaitu sondir dengan pengukuran tegangan air pori yang dikenal dengan nama CPTu, *Dilatometer* (DMT), dan uji *pressuremeter* (PMT). Dari semua jenis uji tersebut, uji pressuremeter adalah satu-satunya uji lapangan yang dapat menghasilkan hubungan tegangan dan regangan tanah secara *in situ*.

Uji Pressuremeter (selanjutnya disebut sebagai uji PMT) yang dilaksanakan dengan mengembangkan sebuah membran silinder di dalam lubang bor secara radial menghasilkan kurva tegangan vs regangan dengan cara mengukur tekanan yang diberikan dan regangan radial yang dihasilkan. Selama ini kurva tegangan regangan ini pada umumnya digunakan untuk menurunkan parameter kekakuan

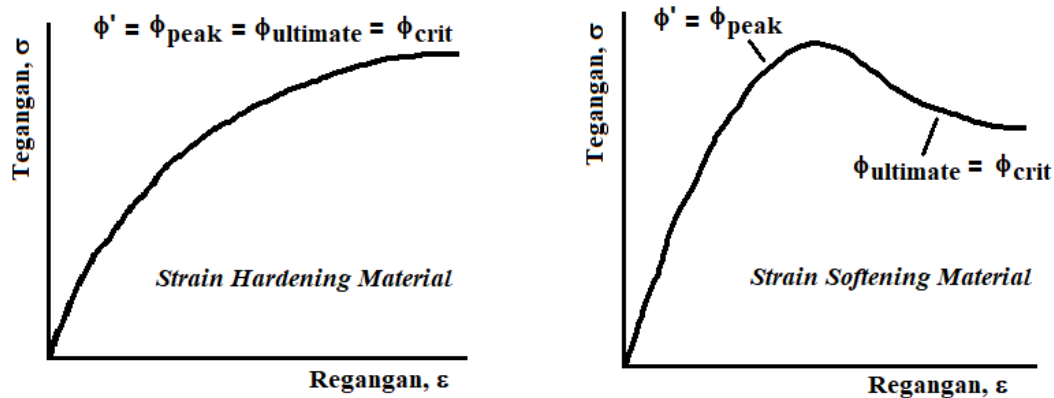
tanah, E_{PMT} . Hingga penelitian ini dilakukan belum terdapat metoda yang mapan untuk menurunkan parameter kuat geser tanah, c dan ϕ dari uji PMT. Penelitian ini dibatasi untuk mencari parameter kuat geser tanah, c dan ϕ , lempung teguh Jakarta dari uji PMT. Karena uji PMT pada kedalaman 30m ke atas hanya dapat dilakukan pada lubang bor vertikal dan tidak dapat dilakukan pada lubang bor horisontal, efek anisotropik kuat geser tanah (*strength anisotropy*) tidak ditinjau.

1.5 Hipotesa

Penelitian untuk menurunkan parameter kuat geser tanah lempung teguh Jakarta ini dimulai dengan beberapa hipotesa dan rencana penelitian sebagai berikut:

1. Tanah lempung teguh Jakarta merupakan lempung teguh yang tersementasi. Penelitian apakah benar ada efek sementasi perlu dilakukan pemeriksaan senyawa kimiawi terhadap contoh tanah yang diambil di lapangan dengan metoda difraksi sinar x (*x-ray diffraction*).
2. Model *cavity expansion* yang ada belum dapat dipakai untuk menghasilkan parameter kuat geser efektif dan perlu dimodifikasi dengan jalan meneliti dan mengembangkan persamaan-persamaan *cavity expansion*.
3. Ada sudut dilatasi ψ ($\psi = \phi'_{\text{peak}} - \phi'_{\text{ultimate}}$) pada tanah lempung teguh tersementasi Jakarta. Penelitian akan dilakukan dengan melaksanakan uji pressuremeter hingga regangan yang besar (di atas 20%). Bila kurva uji pressuremeter menunjukkan perilaku *strain softening* maka berarti ada perilaku dilatasi, sebaliknya bila kurva uji menunjukkan *strain hardening* maka tidak ada sudut dilatasi dan hanya akan dihasilkan satu nilai sudut geser dalam,

yaitu $\phi'_{\text{peak}} = \phi'_{\text{ultimate}}$. Gambar 1.1 menunjukkan sketsa perilaku tegangan regangan tanah yang berperilaku *strain hardening* dan *strain softening*.



Gambar 1.1 Tegangan vs Regangan dan Sudut Geser Dalam Tanah

4. Formulasi perubahan kekakuan (modulus deformasi) tanah, E , yang berubah bersama besaran tegangan dan regangan yang dialaminya agaknya merupakan salah satu parameter penentu untuk dapat menurunkan parameter kuat geser tanah. Penelitian seksama akan dilakukan untuk mencari formulasi perubahan nilai E bersama regangan yang dialaminya.
5. Atas dasar bahwa tanah adalah material partikuler (*particulate material*) dan dari teori *critical state soil mechanics*, dihipotesakan bahwa saat kurva tegangan regangan uji PMT masih relatif linear, dua parameter kuat geser tanah, c dan ϕ , termobilisasi secara bersamaan. Saat kurva tegangan regangan mulai bersifat non-linear, dimana tanah mulai memasuki fase leleh (*yield phase*), sesuai dengan perilaku fundamental tanah yang bersifat partikuler dan friksional, pada fase plastis ini tanah akan kehilangan parameter kohesinya dan hanya tinggal parameter sudut geser dalam saja yang bekerja.

6. Umumnya titik-titik baca uji PMT agak kurang beraturan saat beban yang diberikan mencapai titik leleh tanah, karena setiap penambahan beban dilakukan akan terjadi regangan yang cukup besar dan saat itu tegangan yang diberikan juga akan menurun, dalam usaha menjaga agar tegangan yang diberikan bersifat konstan, pembacaan tegangan dan deformasi tanah dapat menjadi naik turun agak kurang teratur. Dihipotesakan bahwa data titik-titik uji PMT yang kurang teratur tersebut dapat dihaluskan dengan meregresikan titik-titik uji PMT tersebut hingga dapat dihasilkan kurva uji yang tidak lagi zig-zag tetapi halus beraturan. Kurva yang telah diidealisasikan melalui proses regresi matematik ini diduga akan lebih baik untuk digunakan sebagai tolok ukur dalam proses *matching* kurva uji dengan kurva hasil perhitungan melalui pengembangan teori *cavity expansion*.
7. Mengingat proses pembebanan uji PMT diberikan secara radial, maka akan timbul tegangan tangential yang bekerja seolah “memekarkan” dan “mengeser” tanah, maka dihipotesakan uji PMT pada tanah lempung teguh akan lebih bersifat drained daripada kondisi undrained. Hipotesa ini akan diuji dengan membandingkan nilai sudut geser dalam yang diturunkan terhadap data sudut geser dalam yang didapatkan dari uji triaxial CU.
8. Lempung teguh Jakarta sering dilaporkan tersementasi. Dihipotesakan keberadaan sementasi ini akan menghasilkan nilai kohesi yang tinggi bila nilai kohesi ini dapat diturunkan dari uji PMT. Hal ini dikarenakan uji PMT dilaksanakan langsung di lapangan dan relatif tidak menimbulkan gangguan pada struktur tanah sehingga efek sementasi bisa lebih tertangkap saat pengukuran dilakukan. Sementara itu nilai kohesi yang didapatkan dari uji

triaxial cenderung memberikan nilai yang lebih rendah karena contoh tanah terganggu dan juga mengalami relaksasi tegangan sejak dikeluarkan dari dalam tanah hingga persiapan contoh benda uji di laboratorium.

9. Proses pembebanan uji PMT, paling tidak di bagian tengah probe (membran) hanya akan menimbulkan regangan satu dimensi, yaitu regangan horizontal dan tidak menimbulkan regangan dalam arah vertikal, hal ini mirip dengan uji oedometer satu dimensi. Perbedaannya adalah uji PMT menimbulkan regangan horizontal, sedangkan uji oedometer menghasilkan regangan vertikal. Karena sama-sama menimbulkan regangan satu dimensi, dihipotesakan parameter kekakuan atau modulus deformasi tanah yang dihasilkan dari uji PMT ekuivalen dengan yang dihasilkan dari uji oedometer.
10. Atas dasar alasan yang sama seperti di atas, tegangan leleh, P_y , yang diperoleh dari uji PMT dihipotesakan lebih kurang ekuivalen dengan tegangan pra-konsolidasi, P_c' yang didapatkan dari uji oedometer konvensional.
11. Bila dari data PMT bisa diturunkan parameter kuat geser efektif c' dan ϕ' maka melalui kuat geser efektif c' dan ϕ' tersebut akan dapat diturunkan pula nilai kuat geser undrained, c_u .

1.6 Rencana Penelitian

Berdasarkan hipotesa di atas, penelitian direncanakan akan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Memilih lokasi penelitian di daerah Bendungan Hilir, Jakarta.
2. Melakukan kajian pustaka mengenai uji PMT dan teori terkait.

3. Melakukan uji PMT terhadap tanah lempung teguh mulai dari kedalaman lebih kurang 30m hingga 100 m.
4. Mengambil beberapa contoh tanah tak terganggu di dekat posisi uji PMT.
5. Melakukan uji difraksi sinar X terhadap contoh tanah untuk memeriksa apakah tanah lempung teguh Jakarta benar merupakan tanah lempung teguh tersementasi. Juga untuk memeriksa kesamaan mineral tanah lempung teguh yang bersangkutan, dengan demikian dapat dipastikan penelitian dilakukan pada tanah yang berkarakteristik sama.
6. Melakukan uji laboratorium untuk mencari *index properties*, yaitu: berat isi tanah, rasio pori, derajat kejenuhan, *specific gravity*, kadar air, dan batas-batas Atterberg.
7. Melakukan uji triaxial CIU dengan pengukuran tekanan air pori terhadap contoh tanah yang berhasil di ambil.
8. Melakukan uji konsolidasi dengan memotong contoh tanah dalam arah horizontal dan vertikal. Hal ini dimaksudkan untuk memeriksa keberadaan efek anisotropik kekakuan tanah (efek anisotropic terhadap kuat geser tidak ditinjau).
9. Melakukan simulasi numerik dengan program elemen hingga untuk mencari parameter-parameter mana yang lebih sensitif dalam mencari parameter c dan ϕ tanah. Hal ini dilakukan dengan mencari kedekatan kurva uji lapangan dengan kurva hasil uji simulasi elemen hingga.
10. Dari hasil simulasi numerik dengan program elemen hingga, meneliti dan mengembangkan teori pengembangan rongga silindris untuk mencoba menurunkan parameter kuat geser c dan ϕ tanah, dengan cara mencocokkan

kurva tegangan regangan yang dihasilkan dari modifikasi teori pengembangan rongga terhadap data uji pressuremeter yang sebenarnya.

11. Membandingkan parameter kuat geser yang dihasilkan dengan kuat geser yang diperoleh dari uji triaxial.
12. Menganalisa dan menarik kesimpulan dari hasil penelitian.