

**PERFORMA FONDASI BETON PRACETAK BERONGGA  
SEBAGAI ALTERNATIF FONDASI DANGKAL  
STRUKTUR BANGUNAN RINGAN PADA TANAH  
LEMPUNG EKSPANSIF JAWA BARAT**

**DISERTASI**



**Oleh:**

**Edwin Laurencis Hendrikus  
2015832002**

**Promotor:**

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

**Ko-Promotor:**

**Dr. Eng. Ir. Imam Achmad Sadisun, MT.**

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
SEPTEMBER 2021**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PERFORMA FONDASI BETON PRACETAK BERONGGA SEBAGAI  
ALTERNATIF FONDASI DANGKAL UNTUK BANGUNAN STRUKTUR RINGAN  
PADA TANAH LEMPUNG EKSPANSIF JAWA BARAT**



**Oleh:**

**Edwin Laurencis Hendrikus  
2015832002**

**Telah Dinyatakan Lulus dari Program Doktor Teknik Sipil  
Universitas Katolik Parahyangan  
Dalam Ujian Disertasi Terbuka  
pada Hari/Tanggal:  
Sabtu, 11 September 2021**

**Promotor:**

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

**Ko-Promotor:**

**Dr. Eng. Imam Achmad Sadisun, S.T., M.T.**

**PROGRAM DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
SEPTEMBER 2021**

**PERFORMA FONDASI BETON PRACETAK BERONGGA SEBAGAI  
ALTERNATIF FONDASI DANGKAL UNTUK BANGUNAN STRUKTUR  
RINGAN PADA TANAH LEMPUNG EKSPANSIF JAWA BARAT**

**Edwin Laurencis Hendrikus (NPM: 2015832002)**

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

**Ko-Promotor: Dr. Eng. Ir. Imam Achmad Sadisun, MT.**

**Doktor Ilmu Teknik Sipil**

**Bandung**

**September 2021**

**ABSTRAK**

Meningkatnya kebutuhan yang pesat akan jumlah unit hunian dan pengembangan area pemukiman di Indonesia telah mendasari penelitian untuk menciptakan rumah tinggal sederhana yang ekonomis sekaligus layak dari segi teknis. Dari aspek geoteknik, salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah berinovasi dalam hal rekayasa fondasi yang cocok untuk suatu karakteristik tanah di suatu area. Dalam penelitian ini, suatu model fondasi beton pracetak dikembangkan dan diusulkan sebagai alternatif fondasi pada area dengan tanah ekspansif. Fondasi dirancang dengan rongga pada badan fondasi untuk mengakomodasi tekanan pengembangan yang berpotensi muncul pada tanah lempung ekspansif ketika mengalami proses penjuhan pada fase layan. Penelitian ini menitikberatkan pada kelayakan geoteknik ditinjau dari daya dukung fondasi. Pengujian beban skala utuh dilakukan untuk menentukan daya dukung di lapangan. Serangkaian pengujian laboratorium menggunakan model terskala dilakukan untuk mengontrol variabel kadar air. Melalui berbagai korelasi, dibentuk suatu hubungan antara peningkatan kadar air dan reduksi daya dukung fondasi. Beberapa uji juga dilakukan untuk memperoleh hubungan yang unik antara parameter kuat geser, kekakuan, daya dukung, dan perubahan kadar air untuk digunakan sebagai pedoman praktis.

**Kata Kunci:** lempung, tanah ekspansif, daya dukung, fondasi dangkal, kadar air

**PERFORMANCE OF PRECAST CONCRETE HOLLOWED FOUNDATION  
AS AN ALTERNATIVE FOR SHALLOW FOUNDATION OF LIGHT WEIGHT  
STRUCTURE ON EXPANSIVE CLAY IN WEST JAVA**

**Edwin Laurencis Hendrikus (NPM: 2015832002)**  
**Promotor: Prof. Ir. Paulus Pramono Rahardjo, MSCE., Ph.D**  
**Co-Promotor: Dr. Eng. Ir. Imam Achmad Sadisun, MT.**  
**Doctor of Civil Engineering**  
**Bandung**  
**September 2021**

**ABSTRACT**

A vast, increasing requirement of residential houses and area development in Indonesia has driven research in creating an economic yet technically-feasible residential structures. In geotechnical aspect, one way to contribute is by innovating in foundation engineering that might be feasible for a soil characteristic in a certain area. In this research, a precast concrete foundation model is developed and proposed as a foundation alternative in an area with expansive clay deposit. The foundation is predesigned with hollow, purposely to accommodate swelling pressure during saturation process in service phase. The research focuses in geotechnical feasibility evaluated from bearing capacity. A full-scaled load test is done to determine in-situ bearing capacity. A series of laboratory testing has been conducted on a scaled model to control soil saturation variable. Through several correlations, a relationship between increment of moisture content and reduction of bearing capacity has been developed. Some test has also been performed to determine a unique correlation between strength parameter, stiffness modulus, bearing capacity, and water content change – for a practical use

**Keywords:** clay, expansive soil, bearing capacity, shallow foundation, water content

## KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa. atas berkat dan rahmat perlindungan-Nya, penyusunan disertasi ini telah dirampungkan. Penulis menemui banyak hal menantang dalam perjalanan pelaksanaan penelitian hingga penyusunan makalah karya ilmiah ini, baik yang berkaitan dengan teknis penelitian, maupun hal-hal yang bersifat personal. Kondisi pandemi COVID-19 yang berdampak secara global dan telah berlangsung sejak awal tahun 2020 hingga dicetaknya buku disertasi ini telah menjadikan suatu pengalaman yang unik dan sangat berharga bagi pribadi Penulis.

Secara khusus, Penulis mengucapkan terima kasih dan apresiasi yang sangat besar kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Paulus Pramono Rahardjo, MSCE., Ph.D sebagai promotor yang telah menyampaikan banyak gagasan yang luar biasa dalam aspek geoteknik, serta memberikan motivasi personal sehingga penelitian dapat berjalan dengan baik hingga tuntas.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Imam Achmad Sadisun, MT. selaku ko-promotor yang telah banyak memberikan waktu membimbing dan menyumbangkan banyak ide terutama terkait aspek geologi teknik, sekaligus memberikan dorongan semangat bagi Penulis.
3. Alm. Bapak Prof. Dr. Ir. Abdul Aziz Djayaputra, MSCE. selaku ko-promotor yang telah bersedia memberikan bimbingan saat tahap awal program penelitian ini diusulkan, sekaligus memberikan berbagai nasehat yang sangat bermanfaat bagi Penulis selama penelitian berlangsung.
4. Ibu Prof. Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng., Ibu Dr. Ir. Silvia Fransisca Herina, MT., Ibu Dr. Ir. Rinda Karlinasari, MT., dan Bapak Budijanto Widjaja, ST., MT. sebagai tim penguji yang telah memberikan penilaian dan masukan-masukan berharga bagi Penulis untuk semakin dapat menyempurnakan karya tulis ini.
5. Bapak Doddi Yudianto, ST., M.Sc., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik, serta Bapak Aswin Lim., ST., MT., Ph.D selaku Ketua Program Doktor Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan beserta seluruh jajaran yang bertugas, atas arahan dan dukungan yang diberikan selama Penulis menjalani segala proses akademik yang terkait.
6. Teristimewa untuk istri Penulis: Joanie, S.T., M.M. yang telah setia bersabar menemani Penulis dalam memulai dan menyelesaikan studi ini; Anak-anak Penulis: Jesselyn dan Jason yang selalu memberikan semangat; Orang tua Penulis: Ibu Velina Yulianti dan Alm. Bapak Bernard Hendrik, serta saudari Penulis: Sdri. Silvy Laurencia Hendrikus,

S.Ars., M.M. atas dukungan doa, moral, semangat, maupun materi yang diberikan.

7. Bapak Dr. Aksan Kawanda, S.T., M.T. atas kesempatan dan dukungan yang diberikan kepada Penulis untuk menyelesaikan studi ini, serta seluruh rekan PT. Rekayasa Geoteknik Indonesia dan PT. Geotech Efathama atas kerja sama yang diberikan bagi Penulis.
8. Rekan-rekan mahasiswa, alumni, dan dosen program pascasarjana Universitas Katolik Parahyangan
9. Kolega, relasi, dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu namun telah memberikan banyak dukungan bagi Penulis.

Adapun bagi Penulis, buku disertasi ini tidak hanya merupakan karya ilmiah yang disusun sebagai syarat formal dalam menempuh studi tingkat doktoral di program pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Parahyangan. Secara pribadi, penelitian ini merupakan awal pembelajaran untuk dapat mengembangkan potensi Penulis di masa mendatang.

Meskipun belum sempurna, Penulis berharap penelitian ini dapat menjadi suatu gagasan awal yang dapat berkembang menjadi gagasan-gagasan baru dalam penelitian berikutnya di masa mendatang. Oleh karenanya, Penulis dengan hati yang lapang dan terbuka bersedia menerima kritik dan saran yang membangun.

Bandung, 11 September 2021  
Penulis,

Edwin Laurencis Hendrikus

# DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Maksud & Tujuan Penelitian	4
1.3. Metode dan Pembatasan Penelitian	5
1.3.1. Kajian Pustaka	5
1.3.2. Lingkup Penelitian	5
1.4. Sistematika Penulisan	6
1.5. Hipotesis	7
1.6. Kontribusi Penelitian	8
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>9</b>
2.1 Mineralogi Tanah	9
2.1.1 Ilmu Mineralogi	9
2.1.2 Struktur Penyusun Mineral Tanah	9
2.1.3 Jenis Mineral Pembentuk Lempung	13
2.1.4 Interaksi Tanah-Air	18
2.2 Zona Aktif Tanah	23
2.3 Identifikasi Tanah Ekspansif	26
2.3.1 Inspeksi Visual dan Morfologis	26

2.3.2	Uji Batas Atterberg	27
2.3.3	Uji Distribusi Ukuran Butir	30
2.3.4	Uji Potensi Pengembangan	33
2.3.5	Uji Mineralogi	37
2.3.6	Metode Identifikasi Lain	38
2.4	Perilaku Tak Jenuh pada Tanah	39
2.4.1	Kondisi Jenuh dan Tak Jenuh pada Tanah	39
2.4.2	Hisapan pada Tanah	43
2.4.3	Hisapan Matriks pada Tanah Ekspansif	47
2.4.4	Kurva Karakteristik Tanah-Air	49
2.5	Model Konstitutif Tanah Ekspansif	51
2.6	Permasalahan Akibat Tanah Ekspansif	51
2.6.1	Kegagalan pada Struktur Atas	52
2.6.2	Penurunan Daya Dukung Fondasi	52
2.6.3	Reduksi Kuat Geser Tanah Akibat Siklus Basah-Kering	57
2.7	Fondasi Dangkal pada Tanah Ekspansif	62
2.7.1	Persamaan Daya Dukung Dasar	62
2.7.2	Fenomena <i>Heave</i> Tanah Ekspansif pada Sistem Fondasi	63
2.7.3	Persamaan Daya Dukung Fondasi pada Tanah Ekspansif	64
<b>BAB 3</b>	<b>METODE PENELITIAN</b>	<b>67</b>
3.1	Pemilihan Lokasi Pengujian	67
3.2	Penyelidikan Geoteknik In-Situ	67
3.2.1	Pendahuluan	67
3.2.2	Pengeboran dalam	68

3.2.3	Uji Penetrasi Standar (SPT)	69
3.2.4	Uji <i>Piezo-Cone Penetration Test</i> (CPTu)	69
3.3	Pengambilan Sampel Tanah	72
3.4	Pengujian Laboratorium	72
3.5	Pengujian Beban Statik Skala Utuh	75
3.5.1	Model Fondasi Skala Utuh	75
3.5.2	Instrumentasi Uji Beban	76
3.5.3	Metode Uji Beban Statik	79
3.6	Pengujian Beban dan Pengembangan Skala Laboratorium	82
3.6.1	Pendahuluan	82
3.6.2	Tinjauan Efek Batas untuk Model Skala Laboratorium	82
3.6.3	Pengambilan <i>Bulk Sample</i>	84
3.6.4	Model Fondasi Skala Laboratorium	84
3.6.5	Peralatan dan Instrumentasi Uji Skala Laboratorium	85
3.6.6	Pembentukan Media Tanah	91
3.6.7	Prosedur Uji Pengembangan Skala Laboratorium	94
3.6.8	Prosedur Uji Beban Skala Laboratorium	95
3.7	Permodelan dan Analisis	99
<b>BAB 4</b>	<b>DATA &amp; HASIL PENGUJIAN</b>	<b>101</b>
4.1	Karakteristik Geologi Daerah Studi	101
4.2	Karakteristik Geoteknik	102
4.3	Hasil Penyelidikan Geoteknik In-Situ	103
4.4	Hasil Uji Laboratorium	104
4.4.1	Pengujian Mikroskop Pemindai Elektron	104

4.4.2	Pengujian Difraksi Sinar X	104
4.5	Hasil Uji Laboratorium pada <i>Bulk Sample</i>	108
4.5.1	Distribusi Ukuran Butir	108
4.5.2	Berat Jenis	109
4.5.3	Plastisitas Material	109
4.5.4	Kepadatan Kering Maksimum & Kadar Air Optimum	110
4.5.5	Potensi Pengembangan	111
4.5.6	Perbandingan Kadar Air Volumetrik dan Gravimetrik	122
4.6	Hasil Uji Pembebanan Fondasi Skala Utuh	123
4.7	Hasil Uji Efek Saturasi Terhadap Pengembangan Tanah	125
4.8	Hasil Uji Efek Saturasi Terhadap Daya Dukung Fondasi	127
4.9	Efek Kadar Air Terhadap Kuat Geser Tanah	138
<b>BAB 5 KARAKTERISTIK DAYA DUKUNG FONDASI TERHADAP PERUBAHAN KADAR AIR</b>		<b>145</b>
5.1	Kalibrasi Kadar Air Volumetrik dan Gravimetrik	145
5.2	Pengaruh Kadar Air Terhadap Penurunan Fondasi	146
5.3	Hubungan Kuat Geser dan Indeks Kecairan	149
5.4	Hubungan Kuat Geser dan Modulus $E_{50}$	150
5.5	Analisis Balik Hasil Uji Melalui Metode Elemen Hingga	153
<b>BAB 6 KESIMPULAN PENELITIAN</b>		<b>159</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>162</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Struktur Tetrahedral dan Oktahedral	10
Gambar 2-2 Lapisan Lembar Tetrahedral & Oktahedral	11
Gambar 2-3 Lambang Lembar Struktur Mineral	12
Gambar 2-4 Pola Susunan Mineral Lempung	16
Gambar 2-5 Ikatan Antar Kelompok pada Kelas-Kelas Mineral Lempung	17
Gambar 2-6 Molekul air tunggal	18
Gambar 2-7 Molekul Air dalam Rangkaian	19
Gambar 2-8 Interaksi Molekul Air dan Lempung	22
Gambar 2-9 Teori lapisan rangkap muatan	22
Gambar 2-10 Definisi Zona Aktif Tanah	24
Gambar 2-11 Penentuan Zona Aktif Melalui Kadar Air dan Plastisitas	25
Gambar 2-12 Fluktuasi Kadar Air Pada Zona Aktif	25
Gambar 2-13 Perbedaan Visual Tanah Ekspansif Kondisi Kering dan Basah	26
Gambar 2-14 Posisi Mineral Tanah pada Diagram Plastisitas	27
Gambar 2-15 Potensi Pengembangan Berdasarkan Plastisitas	29
Gambar 2-16 Potensi Pengembangan Berdasarkan Derajat Aktivitas Tanah	31
Gambar 2-17 Mineral Tanah Berdasarkan CEAC	33
Gambar 2-18 Kurva Pengembangan Terhadap Waktu	34
Gambar 2-19 Uji Potensi Pengembangan dengan Metode Kembang Bebas	35
Gambar 2-20 Uji Potensi Pengembangan dengan Metode Volume Konstan	35
Gambar 2-21 Hasil Uji Tipikal Difraksi X-Ray pada tanah lempung ekspansif	37
Gambar 2-22 Tegangan pada Elemen Tanah dalam Kondisi Jenuh dan Kering	42

Gambar 2-23 Lingkaran Mohr dari Triaxial UU pada Tanah Tak Jenuh	42
Gambar 2-24 Pengelompokan Kondisi Tanah Berdasarkan Derajat Kejenuhan	43
Gambar 2-25 Tegangan pada Tanah Tak Jenuh	45
Gambar 2-26 Modifikasi Diagram Mohr-Coulomb Tanah Tak Jenuh	46
Gambar 2-27 Hubungan Matrik Hisapan dan Kuat Geser Tanah Tak Jenuh	47
Gambar 2-28 SWCC sebagai hubungan kadar air gravimetrik dan hisapan	49
Gambar 2-29 SWCC sebagai hubungan kadar air ternormalisasi dan hisapan	50
Gambar 2-30 Mekanisme Kegagalan Akibat Tanah Ekspansif	52
Gambar 2-31 Kerusakan Struktural Akibat Penyusutan Tanah Dasar	53
Gambar 2-32 Mekanisme Kegagalan Fondasi Akibat Kembang-Susut Tanah	53
Gambar 2-33 Gaya Tarik pada Tiang Akibat Pengembangan Tanah Ekspansif	54
Gambar 2-34 Potensi Penurunan Kapasitas Tiang Pada Tanah Ekspansif	54
Gambar 2-35 Pergerakan Vertikal Kepala Tiang Akibat Kembang-Susut Tanah	55
Gambar 2-36 Pergerakan Fondasi Terhadap Waktu Pada Tanah Ekspansif	55
Gambar 2-37 Mekanisme Pergerakan Tiang Fondasi pada Zona Aktif	56
Gambar 2-38 Rasio Pergerakan Tiang Pada Tanah Ekspansif	57
Gambar 2-39 Reduksi Kuat Geser Tanah Ekspansif Kondisi	57
Gambar 2-40 Perubahan Bidang Longsor dan Faktor Keamanan Lereng Tanah Ekspansif Jawa Barat	58
Gambar 2-41 Variasi Kuat Geser Tanah Ekspansif pada Berbagai Kondisi	59
Gambar 2-42 Pengaruh Waktu Terhadap Parameter Kuat Geser <i>Shale</i>	60
Gambar 2-43 Pola Potensi Pengembangan Tanah Pada Siklus Basah-Kering	60
Gambar 2-44 Mekanisme Kelongsoran Akibat Reduksi Kuat Geser Tanah	61
Gambar 2-45 Pola Kegagalan pada Tanah 'Regina Clay' Di Iklim Sub-Tropis	62

Gambar 3-1 Lokasi Penyelidikan Tanah Awal	68
Gambar 3-2 Kegiatan Pengeboran di Lokasi Studi	69
Gambar 3-3 Kegiatan Uji <i>Piezo-Cone</i> di Lokasi Studi	70
Gambar 3-4 Klasifikasi Perilaku Tanah dari Uji CPTu	71
Gambar 3-5 Dimensi Benda Uji Fondasi Skala Utuh	76
Gambar 3-6 Posisi <i>Crackmeter</i> pada Model Benda Uji Skala Utuh	77
Gambar 3-7 Posisi Instalasi Instrumentasi pada Uji Skala Utuh	78
Gambar 3-8 Skema Pengujian Fondasi Skala Utuh	80
Gambar 3-9 Kegiatan Persiapan Uji Fondasi Skala Utuh	81
Gambar 3-10 Tinjauan Efek Batas dengan Elemen Hingga	83
Gambar 3-11 Kegiatan Pengambilan <i>Bulk Sample</i> untuk Uji Laboratorium	84
Gambar 3-12 Wadah dan Rangka Pemasangan	86
Gambar 3-13 Sensor kadar air volumetrik	88
Gambar 3-14 Perangkat Jetfill Tensiometer	89
Gambar 3-15 Sistem pembacaan tekanan udara pori pada tensiometer	90
Gambar 3-16 Tampak Atas Lokasi Pemasangan Peralatan dan Instrumentasi	91
Gambar 3-17 Proses Pelaksanaan Uji Skala Laboratorium	92
Gambar 3-18 Susunan Peralatan pada Uji Pengembangan Skala Laboratorium	97
Gambar 3-19 Susunan Peralatan pada Uji Beban Skala Laboratorium	97
Gambar 3-20 Kegiatan Pengujian Beban Skala Laboratorium	98
Gambar 4-1 Kondisi Geologi Area Studi	101
Gambar 4-2 Klasifikasi Plastisitas Tanah Di Sekitar Area Studi	103
Gambar 4-3 Foto <i>Micrograph</i> Sampel di Lokasi Studi	105
Gambar 4-4 Log Bor dan Rekaman SPT di Lokasi Studi	106

Gambar 4-5 Hasil Pengujian CPTu di Lokasi Studi	107
Gambar 4-6 Distribusi Ukuran Butir <i>Bulk Sample</i>	109
Gambar 4-7 Hasil Uji Batas Atterberg <i>Bulk Sample</i>	110
Gambar 4-8 Hasil Uji <i>Standard Proctor</i> pada <i>Bulk Sample</i>	110
Gambar 4-9 Rangkuman Uji Pengembangan Bebas Oedometer	111
Gambar 4-10 Penentuan Parameter Pengembangan Bebas	112
Gambar 4-11 Kurva Beban – Penurunan Uji Skala Utuh	123
Gambar 4-12 Grafik Beban– <i>Heave</i> pada Rongga Fondasi	125
Gambar 4-13 Pengukuran Pengembangan dan Kadar Air Terhadap Waktu dengan Penjenuhan dari Bawah (Pipa Perforasi)	129
Gambar 4-14 Pengukuran Pengembangan dan Kadar Air Terhadap Waktu dengan Penjenuhan dari Atas (Penggenangan)	130
Gambar 4-15 Pengujian ke-1: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 40%	131
Gambar 4-16 Pengujian ke-2: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 39,5%	132
Gambar 4-17 Pengujian ke-3: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 39,3%	133
Gambar 4-18 Pengujian ke-4: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 40,5%	134
Gambar 4-19 Pengujian ke-5: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 41,3%	135
Gambar 4-20 Pengujian ke-6: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 43,4%	136

Gambar 4-21 Pengujian ke-7: Kurva Beban vs Penurunan dan Beban vs Hisapan dengan Kadar Air Volumetrik Permukaan 41%	137
Gambar 4-22 Pengambilan Spesimen Triaxial UU dari Sampel Rekonstitusi	138
Gambar 4-23 Hasil Uji Triaxial UU pada Sampel Rekonstitusi	139
Gambar 5-1 Hubungan Antara Kadar Air Gravimetrik dan Volumetrik	145
Gambar 5-2 Plot kurva tekanan aksial terhadap penurunan ternormalisasi	147
Gambar 5-3 Hubungan Kadar Air Gravimetrik dan Daya Dukung Ultimit	148
Gambar 5-4 Hubungan Indeks Kecairan dan Kuat Geser Tak Terdrainase	149
Gambar 5-5 Rentang Nilai Hubungan Kuat Geser dan Modulus $E_{50}$	152
Gambar 5-6 Hubungan Kuat Geser dan Modulus $E_{50}$ Ternormalisasi $\sigma_3$	152
Gambar 5-7 Hubungan Kuat Geser dan Modulus $E_{50}$ Ternormalisasi $\sigma'_{v0}$	153
Gambar 5-8 Model Fondasi Skala Utuh dalam Perangkat Lunak Plaxis 3D	154
Gambar 5-9 Deformasi pada Simulasi Elemen Hingga Saat Beban Puncak	156
Gambar 5-10 Perbandingan Kurva Penurunan Terhadap Beban	158

## DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Kapasitas Tukar Kation Mineral Tanah	20
Tabel 2-2 Nilai batas Atterberg berbagai mineral tanah	28
Tabel 2-3 Potensi Pengembangan dari Indeks Plastisitas	28
Tabel 2-4 Potensi Pengembangan dari Batas Cair	28
Tabel 2-5 Potensi Pengembangan dari Batas Susut	29
Tabel 2-6 Nilai aktivitas mineral lempung	30
Tabel 2-7 Identifikasi Pengembangan Melalui Persentase Kembang Oedometer	36
Tabel 2-8 Rangkuman Metode untuk Menentukan Potensi Pengembangan	38
Tabel 2-9 Identifikasi Sifat Kembang Tanah Melalui Kadar Koloid, Batas Susut, Indeks Penyusutan, dan Indeks Pengembangan Bebas	38
Tabel 2-10 Referensi $\phi_b$ dari Uji Eksperimen	48
Tabel 2-11 Perbedaan Nilai CBR Tanah Ekspansif	59
Tabel 3-1 Koordinat Titik Penyelidikan Geoteknik Awal	67
Tabel 3-2 Daftar pengujian laboratorium pada sampel yang diperoleh	75
Tabel 4-1 Ringkasan Uji Laboratorium Awal	108
Tabel 4-2 Perbandingan Pengukuran Kadar Air Volumetrik dan Gravimetrik	122
Tabel 4-3 Rangkuman Hasil Pengujian Beban Statik Skala Utuh	124
Tabel 5-1 Pengukuran Penurunan Fondasi terhadap Variasi Kadar Air	148
Tabel 5-2 Parameter Masukan Elemen Struktur Fondasi	154
Tabel 5-3 Parameter Masukan Model Tanah Lempung	154
Tabel 5-4 Deformasi Vertikal Uji Skala Utuh dan Pendekatan Elemen Hingga	157

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Indonesia telah dikenal sebagai negara dengan jumlah penduduk yang sangat besar. Badan Pusat Statistik menyebutkan bahwa proyeksi jumlah penduduk Indonesia di tahun 2020 sejumlah 269.603.400 jiwa, dengan kenaikan setiap tahun rata-rata diproyeksikan sekitar 200.000 – 300.000 jiwa [1]. Sumber yang sama menyebutkan pertumbuhan penduduk paling besar di daerah Pulau Jawa di mana sebagian besar kegiatan ekonomi dan komersial berpusat. Pertumbuhan yang tinggi ini merupakan suatu tantangan dalam menyediakan kebutuhan pokok mendasar bagi penduduk, salah satunya adalah penyediaan hunian secara meluas dan merata dengan kualitas yang layak ditinjau dari segi teknis maupun ekonomi. Dalam laporannya [2], Pusat Litbang dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (PUSKIM) menyebutkan bahwa kebutuhan rumah tinggal yang belum terpenuhi di Pulau Jawa sendiri masih mendekati angka 7.800 unit dari total angka kebutuhan di Indonesia sebesar 13.526.000 unit.

Peningkatan kebutuhan jumlah unit struktur rumah tinggal yang harus dipenuhi mengakibatkan meningkatnya pula kebutuhan akan lahan yang harus dibebaskan dalam membangun struktur-struktur permukiman tersebut. Pemerintah pusat Republik Indonesia bersama pemerintah-pemerintah daerah saat ini telah mulai gencar membangun dan mengembangkan kawasan hunian, baik berupa kawasan yang diperuntukkan sebagai kluster rumah tinggal, maupun kompleks

bangunan hunian bertingkat (apartemen dan rusun). Tidak jarang, kawasan-kawasan yang diperuntukkan sebagai lokasi berdirinya bangunan-bangunan sipil tersebut merupakan lahan yang ‘bermasalah’ dari segi geoteknik, sehingga memicu terjadinya kegagalan struktur. Lahan yang ‘bermasalah’ dapat berarti bahwa area tersebut berada pada lokasi yang kurang memadai untuk dibangun bangunan-bangunan sipil, misalnya di area yang berada pada pasang-surut air sungai atau laut, atau area dengan geometri lereng yang curam. Lahan ‘bermasalah’ juga dapat berarti area tersebut memiliki karakteristik tanah yang problematik, misalnya tanah lempung lunak yang rentan mengalami penurunan jangka panjang, tanah pasir lepas yang berpotensi mengalami likuefaksi, tanah gambut dengan kandungan organik yang tinggi, dan tanah ekspansif dengan potensi kembang-susut yang besar.

Umumnya, untuk mencegah maupun mengatasi timbulnya masalah-masalah ini, maka perencana teknik struktur akan merekomendasikan opsi konservatif, seperti penggunaan fondasi dalam, yakni tiang pracetak atau tiang bor. Penggunaan fondasi dalam saat ini sangat diminati karena memiliki tingkat kepastian yang lebih tinggi dari segi kriteria desain. Namun demikian, opsi ini menjadi suatu pertimbangan ulang bila ditinjau dari segi biaya. Biaya investasi untuk pengadaan unit bangunan ringan seperti bangunan rumah tinggal sederhana satu lantai menjadi kurang proporsional apabila tetap menggunakan fondasi dalam.

Dibandingkan dengan penggunaan fondasi tiang, penggunaan fondasi dangkal terkesan lebih konvensional. Selain itu, proses pelaksanaan yang dilakukan untuk mengonstruksi suatu sistem fondasi dangkal (misalnya fondasi pasangan batu kali, atau fondasi telapak setempat) untuk bangunan rumah tinggal saat ini masih dilakukan secara tradisional dengan metode yang berbeda-beda, sehingga muncul

suatu anggapan bahwa kualitas pekerjaan dan struktur yang dihasilkan menjadi tidak konsisten. Ditambah lagi, proses pekerjaan yang hampir seluruhnya dilakukan dengan tenaga manusia menyebabkan durasi pelaksanaan pembangunan yang lebih panjang secara keseluruhan.

Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya dalam memunculkan suatu inovasi baru dalam pengembangan jenis fondasi untuk bangunan rumah tinggal ringan dan sederhana yang efektif dan efisien. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan merancang suatu sistem fondasi beton pracetak yang dapat diproduksi secara massal dengan karakteristik fabrikasi yang seragam dan terkontrol, sehingga diharapkan dapat memangkas waktu konstruksi. Meskipun demikian, setiap tipe fondasi tidak selalu menjamin dapat mengakomodasi kendala-kendala teknis yang dihadapi pada setiap lokasi pekerjaan.

Berangkat dari gagasan ini, PUSKIM bersama Universitas Katolik Parahyangan pada tahun 2017 [2] melakukan studi untuk merancang suatu fondasi yang cocok untuk kebutuhan tersebut. *Output* utama dari studi ini adalah merancang suatu sistem fondasi beton pracetak yang cocok untuk tanah ekspansif, yang kemudian menjadi suatu bahasan lebih mendalam dari studi ini, sekaligus melatarbelakangi pengembangan penelitian tersebut.

Secara umum, tanah ekspansif didefinisikan sebagai adalah tanah yang mengalami kembang-susut yang signifikan dengan pengaruh perubahan kadar air: tanah akan mengembang dengan tekanan dan perubahan volume yang besar bila mengalami peningkatan kadar air. Sebaliknya, tanah akan mengalami penyusutan yang volume yang besar pada saat kehilangan kadar air tertentu. Selain perubahan volume, sifat tanah lempung ekspansif yang unik lainnya adalah karakteristik

perubahan kuat gesernya akibat perubahan kadar air. Dengan demikian, fenomena kembang-susut tanah ini pun diiringi dengan perubahan kekuatan geser. Hal ini menjadi suatu tinjauan khusus dalam bidang geoteknik, sekaligus tantangan pada tahap perencanaan, konstruksi, maupun pemeliharaan.

Berdasarkan studi spesifik dan pengalaman yang telah dilakukan hingga saat ini, deposit tanah ekspansif cukup luas ditemukan dan membentang di seluruh bagian Indonesia. Di Pulau Jawa sendiri, tanah ekspansif ditemukan hampir di sepanjang provinsi Jawa Barat [3] [4], Jawa Tengah [5], dan Jawa Timur [3] [6]. Dengan demikian, penelitian mengenai tanah ekspansif cukup cocok dilaksanakan di Indonesia.

## **1.2. Maksud & Tujuan Penelitian**

Maksud dari studi ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan pengujian pembebanan pada model fondasi berongga skala utuh di lapangan
2. Melakukan pengujian pembebanan pada model fondasi berongga skala laboratorium akibat proses penjumlahan dengan variabel kadar air yang terukur
3. Melakukan pengujian kuat geser pada tanah lempung ekspansif
4. Melakukan komparasi terhadap hasil uji pembebanan skala utuh lapangan dan skala laboratorium
5. Melakukan pemodelan pembebanan fondasi menggunakan pendekatan metode elemen hingga dan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh

Studi ini bertujuan untuk mempelajari hal-hal berikut:

1. Menentukan daya dukung fondasi dangkal dari pengujian beban skala utuh dan skala laboratorium
2. Memperoleh korelasi antara efek saturasi terhadap penambahan kadar air akibat daya dukung fondasi dan mempelajari kecenderungan perubahannya
3. Mendapatkan hubungan antara kuat geser tanah lempung ekspansif pada saat jenuh dan saat tidak jenuh (jenuh sebagian)

### **1.3. Metode dan Pembatasan Penelitian**

#### 1.3.1. Kajian Pustaka

Kajian pustaka dilakukan untuk mempelajari dasar teori sekaligus perkembangan mutakhir (*state of the art*) terkait topik bahasan. Bahan kajian merupakan karya ilmiah seperti: kumpulan skripsi, tesis, disertasi, makalah, dan jurnal yang berkaitan dengan studi yang dilakukan.

#### 1.3.2. Lingkup Penelitian

Ruang lingkup kajian penelitian antara lain sebagai berikut:

1. Kajian literatur yang diperdalam meliputi perilaku tanah lempung ekspansif, mekanika tanah tak jenuh, kondisi geologi dan geoteknik setempat, hukum konstitutif mekanika tanah, serta metode elemen hingga.
2. Data tanah lempung ekspansif yang ditinjau merupakan lempung ekspansif yang ditemukan di daerah Cikarang, Provinsi Jawa Barat.
3. Model fondasi yang digunakan untuk pengujian skala utuh di lapangan merupakan fondasi beton pracetak berongga sesuai penelitian yang telah

dikembangkan pada penelitian bersama antara Universitas Katolik Parahyangan dan PUSKIM [2].

4. Pengujian laboratorium dilakukan pada model fondasi terskala, bertujuan untuk memprediksi besarnya reduksi daya dukung akibat perubahan kadar air akibat proses saturasi.
5. Spesimen tanah lempung ekspansif yang digunakan untuk pengujian di laboratorium merupakan sampel dalam kondisi dibentuk kembali atau direkonstitusi dengan teknik pemadatan mekanik sesuai kriteria pemadatan Proctor dengan energi pemadatan standar
6. Metode permodelan untuk analisis dilakukan dengan tiga dimensi menggunakan pendekatan metode elemen hingga.

#### **1.4. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan untuk penelitian yang akan dilakukan dibagi dalam enam bab sebagai berikut:

1. **Bab 1 Pendahuluan**, membahas latar belakang penelitian, tujuan penelitian, metodologi dan pembatasan masalah, serta sistematika penulisan.
2. **Bab 2 Tinjauan Pustaka**, merupakan studi literatur dan berbagai referensi yang memiliki keterkaitan dengan bahan studi.
3. **Bab 3 Metode Penelitian**, menjelaskan lebih lanjut dan detail mengenai langkah penelitian secara detail, meliputi proses pengumpulan data, persiapan benda uji, proses penelitian, dan prosedur pengolahan data.

4. **Bab 4 Data & Hasil Pengujian**, merumuskan hasil analisis secara teoritis, hasil pengujian, pengolahan data, perhitungan, grafik dan korelasi-korelasi yang diperoleh.
5. **Bab 5 Karakteristik Daya Dukung Fondasi Terhadap Perubahan Kadar Air**, mencakup pembahasan tentang pengaruh saturasi terhadap perubahan daya dukung fondasi berongga berdasarkan hasil pengujian lapangan dan laboratorium.
6. **Bab 6 Kesimpulan dan Saran**, merangkum secara garis besar hasil dari pengolahan data dan rekomendasi yang berisi upaya lanjutan untuk penelitian di masa yang akan datang.

### 1.5. Hipotesis

Dugaan awal terkait dari studi yang akan dilakukan ini, sebagai berikut:

1. Daya dukung fondasi akan mengalami penurunan daya dukung yang signifikan karena mengalami reduksi kuat geser akibat penambahan kadar air akibat proses saturasi.
2. Pada saat penjenjuran berlangsung, tanah ekspansif akan mengalami mekanisme pengembangan bebas dengan mengisi celah yang terdapat pada sistem fondasi berongga. Besarnya *heave* dapat didekati melalui pengujian pengembangan dengan oedometer, mendekati mekanisme *free swell*.
3. Parameter kuat geser dan kekakuan tanah lempung ekspansif mendekati model hiperbolik dan dapat mengarah pada hukum konstitutif tanah tak jenuh (*unsaturated soil mechanics*).

## **1.6. Kontribusi Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terkait hal-hal berikut:

1. Memberikan opsi penggunaan fondasi beton pracetak berongga sebagai alternatif fondasi dangkal untuk struktur bangunan ringan dengan kebutuhan daya dukung rendah pada area dengan tanah lempung ekspansif
2. Memberikan korelasi empirik yang dapat menghubungkan perubahan daya dukung fondasi dangkal terhadap perubahan kadar air, yang dapat menjadi pedoman praktis penentuan daya dukung di lapangan.
3. Mengembangkan parameter tanah lempung ekspansif berdasarkan pengujian kuat geser, serta melengkapi model yang telah ada sehingga dapat digunakan dalam praktek.