

**SIMULASI PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK
DENGAN METODE *STONE COLUMN*
(Studi Kasus: Tangki Penyimpanan Kapasitas 10000 m³)**



TUGAS AKHIR

Oleh:

Muhamad Akbar Afriandi

NIM. 2102060

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN INDUSTRI
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
2025**

LEMBAR HAK CIPTA
SIMULASI PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK
DENGAN METODE *STONE COLUMN*
(Studi Kasus: Tangki Penyimpanan Kapasitas 10000 m³)

Oleh
Muhamad Akbar Afriandi

Sebuah Tugas Akhir yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh
gelar Sarjana Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil

©Muhamad Akbar Afriandi 2025
Universitas Pendidikan Indonesia
2025

Hak cipta dilindungi oleh undang – undang
Tugas Akhir ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian, dengan dicetak
ulang difotokopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis

LEMBAR PENGESAHAN

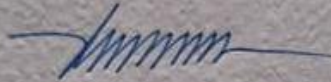
MUHAMAD AKBAR AFRIANDI

SIMULASI PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK DENGAN METODE STONE COLUMN

(Studi Kasus: Tangki Penyimpanan Kapasitas 10000 m³)

Disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

Pembimbing I

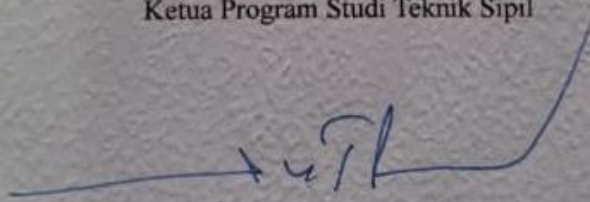


Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng.

NIP. 19800128 200812 1 001

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Dr. T. Ir. Juang Akbardin, MT., IPM., ASEAN.Eng

NIP. 19770307 200812 1 001

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Akbar Afriandi
NIM : 2102060
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Karya : Simulasi Perbaikan Tanah Lempung Lunak Dengan
Metode Stone Column (Studi Kasus: Tangki Penyimpanan
Kapasitas 10000 m³)

Dengan ini saya menegaskan bahwa naskah ini disusun secara mandiri oleh saya. Tidak ada bagian, baik sebagian maupun seluruhnya, yang merupakan salinan dari karya orang lain, kecuali yang telah dinyatakan dan dicantumkan sumbernya. Jika di kemudian hari ditemukan pelanggaran etika akademik atau indikasi plagiarisme, saya siap dikenai sanksi berdasarkan peraturan Universitas Pendidikan Indonesia.

Bandung, Agustus 2025

Muhamad Akbar Afriandi

NIM. 2102060

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan karunia – Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul “Simulasi Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Stone Column (Studi Kasus: Tangki Penyimpanan Kapasitas 10.000 m³)” tepat pada waktunya. Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan yang penulis miliki, baik dari segi isi maupun tata bahasa. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca. Akhir kata, semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi penulis dan umumnya bagi para pembaca.

Bandung, Agustus 2025

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas kasih dan tuntunan – Nya, hingga setiap paragraf menemukan tempatnya dan setiap angka menemukan maknanya. Tugas akhir ini rampung bukan hanya semata karena jemari yang mengetik, melaikan karena doa yang menenangkan, bimbingan yang menajamkan, dan bantuan yang datang tepat saat kurva motivasi mulai stagnan menurun. Di sepanjang proses, ada kalimat yang perlu diyakinkan, grafik yang minta dirapikan, serta revisi yang datang tanpa janji, namun satu per satu akhirnya duduk manis pada barisnya. Jika terdapat kekurangan pada tugas akhir ini, biarlah itu menjadi pengingat bahwa penelitian ini dikerjakan manusia, bukan mesin yang selalu sempurna. Dengan hati penuh syukur, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng., selaku dosen pembimbing, atas kesabaran yang meneduhkan, masukan yang mencerahkan, arahan yang menuntun, dan dukungan yang setia, setiap revisi Bapak bukan sekadar koreksi, melainkan penerang jalan yang membuat argumen ini berdiri lebih tegak.
2. Ibu Asrinia Desilia S.T., M.T., selaku dosen penguji, atas pertanyaan yang tajam, koreksi grafik yang menuntut konsistensi, dan penataan logika geoteknik yang jelas, secara khusus penulis menyampaikan apresiasi yang mendalam, masukan Ibu telah memperkaya dan menajamkan naskah ini secara bermakna.
3. Bapak Dr. Ir. Yudi Sekaryadi M.T., selaku dosen penguji, atas koreksi penulisan yang telaten, dari ejaan hingga alur, serta pertanyaan bernada ingin tahu yang menuntun penulis memperjelas maksud dan merapikan narasi.
4. Bapak Drs. Odih Supratman S.T., M.T., selaku dosen penguji, atas pertanyaan eksploratif yang membuka ruang uji nalar, serta dorongan untuk menautkan logika teknik sipil secara runtut hingga argumen berdiri lebih tertib.

5. Bapak Ir. H. Dadang Ma'soem, MSCE, Ph.D., selaku dosen penguji, atas penekanan pada penerapan di lapangan serta pertanyaan eksploratif yang menguji keberlakuan praktis temuan, arahan Bapak membantu menjembatani teori dan praktik.
6. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil, atas ilmu yang ditanamkan, teladan yang diwariskan, dan ruang diskusi yang dibukakan, dari ruang kuliah hingga laboratorium, Bapak/Ibu menyalakan rasa ingin tahu yang menuntun penulis sampai garis akhir.
7. Staf Administrasi Program Studi Teknik Sipil, terima kasih atas kesabaran dan bantuan yang selalu tepat waktu, dari loket kecil itulah, urusan besar penulis menemukan jalannya.
8. Muhamad Julsandi dan Muhamad Gushandi, yang sejak SMP hingga tuntasnya pendidikan tinggi bukan saja menanggung biaya, tetapi juga menjaga semangat, meneguhkan pilihan, dan mendoakan tanpa lelah. Terima kasih telah menjadi bahu penyangga yang menghantarkan langkah ini ke garis akhir sekaligus membuka garis awal perjalanan berikutnya. Tanpa kalian, bab baru ini mungkin takkan terbuka, dan perubahan baik yang tumbuh dalam diri penulis takkan sematang hari ini.
9. Ibunda dan Ayahanda, atas segala bentuk dukungan baik materi maupun spiritual, serta doa yang tak putus, kesabaran yang memeluk, dan kepercayaan yang menegakkan hati, penulis menyadari, tanpa keluarga, perjalanan panjang ini takkan pernah mencapai garis akhir.
10. Ardelia Luna S.T., selaku mentor yang berperan bak *stone column* dalam tanah lunak perjalanan ini. Memberi perkuatan saat beban pikiran memusat, melancarkan drainase gagasan ketika tekanan di kepala meninggi, serta berbagi *load sharing* agar langkah tidak terperosok dalam keraguan. Melalui arahan yang tenang namun tegas, proses mentoring bekerja layaknya konsolidasi – tekanan pori kegelisahan berangsur surut, tegangan efektif keyakinan bertambah, dan dari waktu ke waktu daya dukung logika geoteknik penulis meningkat hingga naskah ini mencapai kestabilan yang memenuhi syarat.

11. Teman – teman yang setia berjalan beriring, menghadirkan diskusi yang jujur, tawa yang meredakan tegang, dan dorongan yang menjaga langkah tetap utuh. Dari obrolan singkat hingga malam – malam panjang, kalian membuat perjalanan ini terasa lebih ringan dan bermakna.
12. Yang terakhir dan tak kalah penting, penulis ingin berterima kasih kepada diri penulis sendiri, penulis berterima kasih karena telah percaya, telah melakukan semua kerja keras ini, dan tidak pernah menyerah.

SIMULASI PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK DENGAN METODE *STONE COLUMN*

(Studi Kasus: Tangki Penyimpanan Kapasitas 10000 m³)

Muhamad Akbar Afriandi¹; Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng.²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Industri,

Universitas Pendidikan Indonesia

Email: m.akbarafriandi@gmail.com

ABSTRAK

Tanah lempung lunak pada pondasi tangki kerap memicu penurunan total dan diferensial yang melampaui batas layanan, karena itu diperlukan perbaikan tanah yang andal. Studi ini mengevaluasi kinerja *stone column* pada fondasi tangki 10000 m³ menggunakan pemodelan numerik 3D berbasis data investigasi tanah lokal. Rancangan parametrik mencakup variasi panjang kolom (L 3, 9, 17, 19, 25 m), *area replacement ratio* (As 25% dan 35%), serta kekakuan kolom (Ec 35 dan 70 MPa). Analisis difokuskan pada kinerja penurunan (*settlement performance*), pola deformasi, dan distribusi tegangan untuk mengidentifikasi parameter dengan pengaruh signifikan. Hasil menunjukkan konfigurasi optimum L 17 m, As 35%, dan Ec 70 MPa dengan penurunan 0.139 m, lebih kecil dari syarat 0.15 m; dibanding kondisi *unimproved* 0.45 m, perbaikan ini setara dengan *settlement improvement factor* reduksi 69%. Secara mekanisme terjadi transisi deformasi dari *punching* (kolom pendek) menuju kombinasi *punching* – *bulging* (L mendekati ketebalan lapisan lunak, 17 m), hingga *bulging* dominan saat kolom menembus lapisan lunak, pada kondisi ini peran As dan Ec meningkat signifikan melalui tambahan kekangan lateral dan *load sharing* yang lebih merata antara kolom – tanah. Studi ini menegaskan bahwa penentuan L yang menyamai/lebih besar dari ketebalan lapisan lunak merupakan faktor kunci keberhasilan, sedangkan As dan Ec mengoptimalkan efisiensi perbaikan dan mengurangi risiko penurunan diferensial pada fondasi tangki di atas tanah lempung lunak.

Kata Kunci: *Area replacement ratio*, Panjang kolom, Pola Deformasi, *Settlement Improvement Factor*, *Stone column*, *Stress Concentration Ratio*, Tanah lempung lunak

SIMULATION OF SOFT CLAY GROUND IMPROVEMENT USING THE STONE COLUMN METHOD

(Case Study: 10000 m³ Storage Tank)

Muhamad Akbar Afriandi¹; Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng.²

¹Civil Engineering Study Program, Faculty of Engineering and Industry

Education, Indonesia University of Education

Email: m.akbarafriandi@gmail.com

ABSTRACT

Soft clay soil at tank foundations often causes total and differential settlement that exceeds service limits, so reliable soil improvement is needed. This study evaluates the performance of stone columns in 10000 m³ tank foundations using 3D numerical modeling based on local soil investigation data. The parametric design includes variations in column length (L 3, 9, 17, 19, 25 m), area replacement ratio (As 25% and 35%), and column stiffness (Ec 35 and 70 MPa). The analysis focused on settlement performance, deformation patterns, and stress distribution to identify parameters with significant influence. Results indicate the optimal configuration of L 17 m, As 35%, and Ec 70 MPa with a settlement of 0.139 m, smaller than the requirement of 0.15 m; compared to the unimproved condition of 0.450 m, this improvement is equivalent to a settlement improvement factor of reduction 69%. Mechanistically, there is a transition in deformation from punching (short columns) to a combination of punching and bulging (L 17 m), until bulging becomes dominant when the column penetrates the soft layer. Under these conditions, the roles of As and Ec increase significantly through additional lateral restraint and more even load sharing between the column and the soil. This study confirms that determining L to be equal to or greater than the thickness of the soft layer is a key factor for success, while As and Ec optimize repair efficiency and reduce the risk of differential settlement in tank foundations on soft clay soil.

Keywords: Area replacement ratio, Column length, Deformation pattern, Settlement improvement factor, Soft clay soil, Stone column, Stress concentration ratio

DAFTAR ISI

LEMBAR HAK CIPTA.....	II
LEMBAR PENGESAHAN	III
LEMBAR PERNYATAAN	IV
KATA PENGANTAR.....	V
UCAPAN TERIMA KASIH	VI
ABSTRAK	IX
ABSTRACT	X
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR	XIV
DAFTAR TABEL	XVII
DAFTAR GRAFIK	XVIII
DAFTAR LAMPIRAN	XX
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 MANFAAT PENELITIAN	3
1.5 RUANG LINGKUP PENELITIAN	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 TANAH LEMPUNG LUNAK	7
2.1.1 Deskripsi Umum.....	7
2.1.2 Sifat Fisis dan Mekanis Tanah	8
2.2 STONE COLUMN	17
2.2.1 Konsep Dasar.....	17

2.2.2	<i>Teori Dasar Stone Column</i>	18
2.2.3	<i>Parameter Stone Column</i>	19
2.2.4	<i>Penurunan pada Sistem Stone Column</i>	22
2.2.5	<i>Pola Deformasi pada Sistem Stone Column</i>	29
2.2.6	<i>Distribusi Tegangan Pada Sistem Stone Column</i>	31
2.3	ANALISIS NUMERIK METODE ELEMEN HINGGA	32
2.3.1	<i>Deskripsi Umum</i>	32
2.3.2	<i>Pengoperasian Perangkat Lunak Plaxis</i>	33
2.3.3	<i>Pendekatan Analisis pada Perangkat Lunak Plaxis 3D</i>	36
2.4	PENELITIAN TERDAHULU	45
2.4.1	<i>Improvement of The Critical Speed in High-Speed Ballasted Railway Tracks with Stone Columns: A Numerical Study on Critical Length</i>	45
2.4.2	<i>Numerical Modelling of Small Groups of Stone Columns</i>	46
2.4.3	<i>Numerical Study of Floating Stone Columns</i>	48
BAB III METODOLOGI		49
3.1	DESAIN PENELITIAN.....	49
3.2	LOKASI PENELITIAN.....	49
3.3	PENGUMPULAN DATA.....	49
3.4	PROSEDUR PENELITIAN.....	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		56
4.1	HASIL.....	56
4.1.1	<i>Interpretasi Data Tanah</i>	56
4.1.2	<i>Pemodelan Finite Element</i>	58
4.1.3	<i>Simplifikasi Model Analisis</i>	61
4.1.4	<i>Settlement Kondisi Natural dan Perbaikan</i>	63
4.1.5	<i>Distribusi Tegangan</i>	67
4.1.6	<i>Distribusi Regangan</i>	70
4.2	PEMBAHASAN	71
4.2.1	<i>Pemodelan Numerik</i>	71
4.2.2	<i>Analisis Settlement Performance</i>	76

4.2.3	<i>Analisis Pola Deformasi</i>	84
4.2.4	<i>Analisis Distribusi Tegangan</i>	89
4.2.5	<i>Analisis Karakteristik Perilaku Stone Column</i>	96
4.2.6	<i>Evaluasi Ekonomi Perbaikan Stone Column</i>	105
BAB V KESIMPULAN DAN REKOMENDASI		111
5.1	KESIMPULAN.....	111
5.2	REKOMENDASI	113
DAFTAR PUSTAKA.....		XXV
LAMPIRAN.....		115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta Sebaran Tanah Lunak Indonesia.....	8
Gambar 2. 2 Kondisi Natural Tanah dan Tiga Elemen Penyusun Tanah	8
Gambar 2. 3 Ilustrasi Fenomena Regangan Vertikal dan Lateral Pada Material	14
Gambar 2. 4 Beberapa Tipe Deep Replacement	17
Gambar 2. 5 Tinjauan Konsep Unit Cell pada Pola Triangular.....	19
Gambar 2. 6 Tributary Area untuk Berbagai Pola Pemasangan Kolom.....	20
Gambar 2. 7 Pengaruh Panjang Kolom Terhadap Efektivitas Stone Column.....	21
Gambar 2. 8 Pola Grid Stone Column (a) dan Kondisi Ekuivalen Kolom (b)	25
Gambar 2. 9 Asumsi Model Perbaikan pada Metode Elastic - Plastic Method	27
Gambar 2. 10 Model Perhitungan Konsolidasi Unit Cell	28
Gambar 2. 11 Pola Deformasi pada Single Stone Column (a) General Shear, (b) Punching, dan (c) Bulging.....	29
Gambar 2. 12 Penurunan pada Sistem Stone Column	30
Gambar 2. 13 (a) Kondisi Equal Strain, (b) Kondisi Equal Stress (c) Kondisi Not-equal Stress Not-Equal Strain	31
Gambar 2. 14 Ilustrasi Model Element Hingga dan Elemen Penyusunnya.....	33
Gambar 2. 15 Penentuan Bore Hole dan Input Parameter Tanah.....	34
Gambar 2. 16 Pemodelan Beban Pada Kondisi Tanah Dasar	34
Gambar 2. 17 Contoh Pemodelan Stone Column	34
Gambar 2. 18 Contoh Pemodelan Stone Column, LTP dan Pembebanan.....	35
Gambar 2. 19 Contoh Hasil Meshing pada Perangkat Lunak Plaxis 3D	35
Gambar 2. 20 Contoh Hasil Analisis pada Perangkat Lunak Plaxis 3D	36
Gambar 2. 21 Contoh Hasil Analisis (Total Settlement).....	36
Gambar 2. 22 Contoh Hasil Analisis (Stress)	36
Gambar 2. 23 Contoh Hasil Analisis (Total Strain)	36
Gambar 2. 24 Kondisi Soil Model pada Analisis.....	37
Gambar 2. 25 Model Geometri Stone Column	38
Gambar 2. 26 Pemodelan Load Transfer Platform untuk Kasus Rigid Inclusion. 40	
Gambar 2. 27 Kondisi Layout Tanki pada Penelitian Sieira & Castro 2022	41
Gambar 2. 28 Pemodelan yang Dilakukan oleh Sieira & Castro 2022.....	41

Gambar 2. 29 Pemodelan Beban Tangki yang dilakukan Fernandes, Romaned, & Filho 2022	41
Gambar 2. 30 Pemodelan Numerik 1/4 Bagian	43
Gambar 2. 31 Pemodelan Seperempat pada Penelitian Terdahulu.....	44
Gambar 2. 32 Distribusi Tegangan pada setiap variasi panjang Stone Column ...	46
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	50
Gambar 3. 2 Acuan Displacement u pada Analisis Pola Deformasi	53
Gambar 3. 3 Penentuan Perhitungan Tegangan pada Tanah dan Kolom (a) Metode pengambilan titik (b) Metode area	54
Gambar 4. 1 Stratifikasi Tanah Dasar	57
Gambar 4. 2 Konfigurasi Stone Column (a) 25% dan (b) 35%	59
Gambar 4. 3 Sketsa Pemasangan Stone Column	59
Gambar 4. 4 Element Distribution dari Hasil Mesh Kondis Full Scale	61
Gambar 4. 5 Element Distribution dari Hasil Mesh Kondisi Quarter Model	62
Gambar 4. 6 Hasil Analisis Settlement Kondisi Natural.....	63
Gambar 4. 7 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 25% - L 3m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	64
Gambar 4. 8 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 25% - L 9m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	64
Gambar 4. 9 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 25% - L 25m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	65
Gambar 4. 10 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 35% - L 3m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	66
Gambar 4. 11 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 35% - L 9m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	66
Gambar 4. 12 Penurunan Tanah Kondisi Stone Column As 35% - L 25m (a) 70 MPa dan (b) 35 MPa.....	66
Gambar 4. 13 Contoh Pola Distribusi Tegangan pada Bidang Horizontal (a) L 25m (b) L 9m.....	69

Gambar 4. 14 Contoh Pola Distribusi Tegangan pada Bidang Horizontal (a) L 25m (b) L 9m.....	70
Gambar 4. 15 Sketsa Pemodelan Load Transfer Platform dan Stone Column	72
Gambar 4. 16 Sketsa Tangki beserta Perbaikan	73
Gambar 4. 17 Stage Construction pada Perbaikan Stone Column.....	76
Gambar 4. 18 Acuan Displacement u pada Analisis Pola Deformasi	85
Gambar 4. 19 Pola Deformasi Dominan pada (a) L 9m, (b) L 17m, dan (c) 25 m	98
Gambar 4. 20 Pemodelan Alternatif Tiang Pancang	107

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Variasi Nilai Parameter Studi Paramterik.....	6
Tabel 1. 2 Skema Studi Parametrik	6
Tabel 2. 1 Nilai Tipikal Berat Jenis Tanah Pasiran	10
Tabel 2. 2 Nilai Tipikal Berat Jenis Tanah Lempung	10
Tabel 2. 3 Hubungan antara Konsistensi, NSPT, dan Nilai Kohesi	11
Tabel 2. 4 Hubungan Konsistensi, NSPT, dan Sudut Geser Dalam	12
Tabel 2. 5 Parameter Efektif Tanah Cohesive	12
Tabel 2. 6 Nilai Tipikal Modulus tanah Lempung	13
Tabel 2. 7 Tipikal Nilai Modulus Berbagai Jenis Konsistensi Tanah.....	13
Tabel 2. 8 Variasi Nilai Poisson's Ratio untuk Berbagai Jenis Material	14
Tabel 2. 9 Nilai Permeabilitas Berdasarkan Klasifikasi Tanah	15
Tabel 2. 10 Nilai Tipikal dari Koefisien Konsolidasi.....	15
Tabel 2. 11 Variasi Nilai Koefisien Konsolidasi (NAVFAC, 1988)	16
Tabel 2. 12 Korelasi Nilai Indeks Kompresi	16
Tabel 2. 13 Variasi nilai b untuk Berbagai Kondisi Tanah	24

DAFTAR GRAFIK

Grafik 2. 1 Grafik Plastisitas Tanah USCS	7
Grafik 2. 2 Pengaruh Modulus Kolom terhadap Settlement Improvement Factor	22
Grafik 2. 3 Improvement Factor versus Area Replacement Ratio Priebe Method 1995.....	27
Grafik 2. 4 Perbandingan Hasil Pemodelan Numerik Stone Column dan Pengukuran di Lapangan.....	39
Grafik 2. 5 Variasi nilai Settlement Improvement Factor untuk (a) A/A_c 3.5 (b) A/A_c 14.1	47
Grafik 2. 6 Nilai Settlement Improvement Factor vs Area Ratio, A/A_c	47
Grafik 3. 1 Variasi Settlement Improvement Factor (a) Area Replacement Ratio 3.5 (b) Area Replacement Ratio 8.0	53
Grafik 3. 2 Pola Deformasi (a) Punching Ratio dan (b) Compression Ratio	53
Grafik 3. 3 Grafik Hubungan Stress Concentration terhadap Kedalaman dengan Pengaruh Area Replacement Ratio dan Jumlah Kolom	54
Grafik 4. 1 Load - Settlement hasil Eksperimen dan Model Numerik.....	43
Grafik 4. 2 NSPT vs Kedalaman.....	57
Grafik 4. 3 Perbandingan Hasil Settlement z pada Kondisi Full Scale dan Quarter Model	62
Grafik 4. 4 Settlement pada Tangki Kondisi Natural	63
Grafik 4. 5 Settlement Kondisi Setelah Perbaikan untuk As 25%	65
Grafik 4. 6 Settlement Kondisi Setelah Perbaikan untuk As 35%	67
Grafik 4. 7 Stress Distribution Stone Column As 25%.....	67
Grafik 4. 8 Stress Distribution Stone Column As 35%.....	68
Grafik 4. 9 Tegangan Vertikal Efektif vs Kedalaman (As 25%)	68
Grafik 4. 10 Tegangan Vertikal Efektif vs Kedalaman (As 35%).....	69
Grafik 4. 11 Distribusi Regangan As 25% vs Kedalaman	70
Grafik 4. 12 Distribusi Regangan As 35% vs Kedalaman	71
Grafik 4. 13 Settlement Kondisi Setelah Perbaikan untuk As 25%	77

Grafik 4. 14 Settlement Kondisi Setelah Perbaikan untuk As 35%	77
Grafik 4. 15 Nilai Settlement Pada Kondisi Panjang Stone Column > 17 m – As 25%	78
Grafik 4. 16 Nilai Settlement Pada Kondisi Panjang Stone Column > 17 m – As 35%	79
Grafik 4. 17 Panjang Stone Column vs (a) Penurunan (b) Settlement Improvement Factor.....	81
Grafik 4. 18 SIF Penelitian Killeen.....	81
Grafik 4. 19 Perbandingan Nilai Settlement Improvement Factor terhadap Metode Priebe (1995).....	82
Grafik 4. 20 (a) Punching Ratio dan (b) Compression Ratio	86
Grafik 4. 21 Stress Distribution Stone Column As 25%.....	89
Grafik 4. 22 Stress Distribution Stone Column As 35%.....	90
Grafik 4. 23 Tegangan Vertikal Efektif vs Kedalaman (a) As 25% dan (b) As 35%	91
Grafik 4. 24 Panjang Stone Column vs Stress Concentration Ratio	93
Grafik 4. 25 Nilai Stress Concentration Ratio pada Penelitian Killeen (2012)	94
Grafik 4. 26 Distribusi (a) Regangan Vertikal, (b) Regangan Horizontal, dan (c) Stress Concentration Ratio pada Kondisi Panjang Stone Column 9 m.....	102
Grafik 4. 27 Distribusi (a) Regangan Vertikal, (b) Regangan Horizontal, dan (c) Stress Concentration Ratio pada Kondisi Panjang Stone Column 17 m.....	103
Grafik 4. 28 Distribusi (a) Regangan Vertikal, (b) Regangan Horizontal, dan (c) Stress Concentration Ratio pada Kondisi Panjang Stone Column 25 m.....	104

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Boring Log.....	115
Lampiran 2 Kofigurasi Stone Column Area Replacement Ratio 25%.....	121
Lampiran 3 Kofigurasi Stone Column Area Replacement Ratio 35%.....	122
Lampiran 4 Settlement Kondisi Natural	123
Lampiran 5 Settlement Unimproved (90% Consolidation)	124
Lampiran 6 Deformation of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 70 MPa.....	125
Lampiran 7 Settlement of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 70 MPa.....	126
Lampiran 8 Stress Distribution of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 70 MPa	127
Lampiran 9 Strain Distribution of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 70 MPa	128
Lampiran 10 Deformation of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 35 MPa.....	129
Lampiran 11 Settlement of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 35 MPa	130
Lampiran 12 Stress Distribution of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 35 MPa	131
Lampiran 13 Strain Distribution of Improved Soil L 3m – As 25% – Ec 35 MPa	132
Lampiran 14 Deformation of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 70 MPa.....	133
Lampiran 15 Settlement of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 70 MPa	134
Lampiran 16 Stress Distribution of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 70 MPa	135
Lampiran 17 Strain Distribution of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 70 MPa	136
Lampiran 18 Deformation of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 35 MPa.....	137
Lampiran 19 Settlement of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 35 MPa	138
Lampiran 20 Stress Distribution of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 35 MPa	139
Lampiran 21 Strain Distribution of Improved Soil L 3m – As 35% – Ec 35 MPa	140
Lampiran 22 Deformation of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 70 MPa.....	141
Lampiran 23 Settlement of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 70 MPa.....	142

Lampiran 24 Stress Distribution of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 70 MPa	143
Lampiran 25 Strain Distribution of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 70 MPa	144
Lampiran 26 Deformation of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 35 MPa.....	145
Lampiran 27 Settlement of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 35 MPa	146
Lampiran 28 Stress Distribution of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 35 MPa	147
Lampiran 29 Strain Distribution of Improved Soil L 9m – As 25% – Ec 35 MPa	148
Lampiran 30 Deformation of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 70 MPa.....	149
Lampiran 31 Settlement of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 70 MPa	150
Lampiran 32 Stress Distribution of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 70 MPa	151
Lampiran 33 Strain Distribution of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 70 MPa	152
Lampiran 34 Deformation of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 35 MPa.....	153
Lampiran 35 Settlement of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 35 MPa	154
Lampiran 36 Stress Distribution of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 35 MPa	155
Lampiran 37 Strain Distribution of Improved Soil L 9m – As 35% – Ec 35 MPa	156
Lampiran 38 Deformation of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 70 MPa.....	157
Lampiran 39 Settlement of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 70 MPa	158
Lampiran 40 Stress Distribution of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 70 MPa	159
Lampiran 41 Strain Distribution of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 70 MPa	160
Lampiran 42 Deformation of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 35 MPa.....	161
Lampiran 43 Settlement of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 35 MPa	162

Lampiran 44 Stress Distribution of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 35 MPa	163
Lampiran 45 Strain Distribution of Improved Soil L 17m – As 25% – Ec 35 MPa	164
Lampiran 46 Deformation of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 70 MPa.....	165
Lampiran 47 Settlement of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 70 MPa	166
Lampiran 48 Stress Distribution of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 70 MPa	167
Lampiran 49 Strain Distribution of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 70 MPa	168
Lampiran 50 Deformation of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 35 MPa.....	169
Lampiran 51 Settlement of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 35 MPa	170
Lampiran 52 Stress Distribution of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 35 MPa	171
Lampiran 53 Strain Distribution of Improved Soil L 17m – As 35% – Ec 35 MPa	172
Lampiran 54 Deformation of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 70 MPa.....	173
Lampiran 55 Settlement of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 70 MPa	174
Lampiran 56 Stress Distribution of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 70 MPa	175
Lampiran 57 Strain Distribution of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 70 MPa	176
Lampiran 58 Deformation of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 35 MPa.....	177
Lampiran 59 Settlement of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 35 MPa	178
Lampiran 60 Stress Distribution of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 35 MPa	179
Lampiran 61 Strain Distribution of Improved Soil L 19m – As 25% – Ec 35 MPa	180
Lampiran 62 Deformation of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 70 MPa.....	181
Lampiran 63 Settlement of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 70 MPa	182

Lampiran 64 Stress Distribution of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 70 MPa	183
Lampiran 65 Strain Distribution of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 70 MPa	184
Lampiran 66 Deformation of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 35 MPa.....	185
Lampiran 67 Settlement of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 35 MPa	186
Lampiran 68 Stress Distribution of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 35 MPa	187
Lampiran 69 Strain Distribution of Improved Soil L 19m – As 35% – Ec 35 MPa	188
Lampiran 70 Deformation of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 70 MPa.....	189
Lampiran 71 Settlement of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 70 MPa	190
Lampiran 72 Stress Distribution of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 70 MPa	191
Lampiran 73 Strain Distribution of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 70 MPa	192
Lampiran 74 Deformation of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 35 MPa.....	193
Lampiran 75 Settlement of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 35 MPa	194
Lampiran 76 Stress Distribution of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 35 MPa	195
Lampiran 77 Strain Distribution of Improved Soil L 25m – As 25% – Ec 35 MPa	196
Lampiran 78 Deformation of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 70 MPa.....	197
Lampiran 79 Settlement of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 70 MPa	198
Lampiran 80 Stress Distribution of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 70 MPa	199
Lampiran 81 Strain Distribution of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 70 MPa	200
Lampiran 82 Deformation of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 35 MPa.....	201
Lampiran 83 Settlement of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 35 MPa	202

Lampiran 84 Stress Distribution of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 35 MPa	203
Lampiran 85 Strain Distribution of Improved Soil L 25m – As 35% – Ec 35 MPa	204
Lampiran 86 Surat Tugas Pembimbing Tugas Akhir	205
Lampiran 87 Lembar Asistensi Tugas Akhir.....	206

DAFTAR PUSTAKA

- Abas, H. A., & Medawi, A. M. (2024). Investigation stone column effectiveness for sabkha soil improvement: Field tests and numerical model. *J. Umm Al-Qura Univ. Eng. Archit*, 67 - 77.
- Alsirawan, R. (2021). Analysis of Embankment Supportes by Rigid Inclusion Using Plaxis 3D. *Acta Technica Jourinensis*.
- Amari, K. A., & Clarke. (2018). Effect of vibro stone Column Installation on the performance of reinforced soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer*.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. India: Springer India 2016.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2021). *Soft Clay Engineering and Ground Improvement*. Oxon: CRC Press.
- Bentley. (2024). *Scientific Manual 3D*. Bentley.
- Billoet, G., & Gauthey, J. R. (2011). Recomendation for Design, Calculation, Construction, and Quality Control of Stone Columns Under Buildings and Sesitive Structure.
- Castro, J. (2017). Modeling Stone Column. *Departement of Ground Engineering and Materials Science*, 1 - 23.
- Castro, J. (2017). Modeling Stone Column. *Materials*.
- Das, B. M. (2010). *Principle of Geotechnical Engineering 7th Edition*. USA: Cangage Learning.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2019). *Principle of Foundation Engineering Ninth Edition*. Cengage Learning. Inc.
- Felippa, C. A. (2004). *Introduction to Finite Element Methods*. Colorado.

- Fenandez-Ruis, J., Miranda, M., Castro, J., & Rodriguez, L. M. (2021). Improvement of The Critical Speed in High - Speed Ballasted Railway Tracks with Stone Column: A Numerical Study on Critical Length. *Elsevier*, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100628>
- Fernandes, R. P., Romanel, C., & Filho, P. R. (2022). Settlement Analysis of an Oil Storage Tank Considering Inclined Subsoil Layers. *Cilamce*.
- Ghorbani, A., Hosseinpour, I., & Shormage, M. (2020). Deformation and Stability Analysis of Embankment over Stone Column-Strengthened Soft Ground. *ISCE Journal of Civil Engineering*, 1-13. doi:10.1007/s12205-020-0349-y
- Hamzh, A., Mohamad, H., & Yusof, M. F. (2022). The Effect of Stone Column Geometry on Soft Soil Bearing Capacity. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- Han, J. (2015). *Principles and Practice of Ground Improvement*. Canada.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Karkush, M., & Jabbar, A. (2021). Behaviour of Floating Stone Columns and Development of Porewater Pressure Under Cyclic Loading. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s40515-021-00171-w>
- Killeen, M. (2012). *Numerical Modelling of Small Group of Stone Column*. Ireland: National University of Ireland (Master's Thesis).
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Najjar, S. S. (2013). A State-of-the-Art Review of Stone/Sand-Column Reinforced Clay System. *Springer*.
- Neto, O. d., Cunha, R. P., Albuquerque, P. J., Garcia, J. R., & Junior, O. F. (2020). Experimental and Numerical Analyses of a Deep Foundation Containing a

- Single Deflective Pile. *Latin American Journal of Solids and Structure*, 1 - 15.
- Phung, L. D. (2022). Simplified FE-Simulation of Pile Installation Effect on Bearing Capacity of Displacement Piles in Sand.
- Rafa, S. A., Rouaz, I., & Bennoui, I. (2024). Contribution of Soil - Structure Interaction in The Analysis of Water - Storage Tank Foundation Settlement.
- Ren, Y., Chen, Z., & Zhu, W. (2025). A Numerical Study of the Lateral Load-Sharing Mechanism of the Pile Cap in a 3 x 3 Pile Group. *Buildings*.
- Sekkelsten, N. H. (2024). *Vibro Replacement - Sustainable Solution for Ground Improvement*. Norwegia: Norwegia University of Science and Technology (Mater's Thesis).
- Shien, N. K. (2013). *Numerical Study of Floating Stone Columns*. Singapore: National University of Singapore.
- Sieira, A. C., & Castro, L. F. (2022). Deformation Analysis of Gasoline Storage Tanks. *Journal of Civil Engineering and Architecture* 16.
- Situmorang, A. P., Hendri, O., & Yani, M. I. (2021). Korelasi Nilai Hasil Uji Kuat Tekan Bebas Dengan Nilai California Bearing Ratio (CBR) Tanah Lempung. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Transukma*, 53-60.
- Suprayogi, B. (2021). *Analisis Numerik Perbandingan Perilaku Timbunan di Atas Tanah Lunak Tanpa Perkuatan dan Perkuatan Sistem Pelat Terpaku*. Pekanbaru: Universitas Islam Riau (Magister Thesis).
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1987). *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Thakur, A., Rawat, S., & Gupta, A. K. (2020). Experimental Study of Ground Improvement by Using Encased Stone Columns. *Innovative Infrastructure Solutions*. doi:<https://doi.org/10.1007/s41062-020-00383-y>

Utami, M. P., & Veronika. (2016). Perencanaan Dinding Tangki Minyak Kapasitas 10000 Kilo Liter dan Pondasinya. *Zona Sipil*, 6(3), 1-8.

Wardoyo, Sarwondo, Destiasari, F., Wahyudin, Wiyono, Hasibuan, G., & Sollu, W. P. (2019). *Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia*. Bandung, Jawa Barat, Indonesia: Badan Geologi.