TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS LERENG TIMBUNAN REKLAMASI DAN TINJAUAN PENURUNAN KONSOLIDASI DENGAN *STONE COLUMN* DI BALIKPAPAN KALIMANTAN TIMUR (*ANALYSIS OF SLOPE STABILITY ON RECLAIMED EMBANKMENT AND ASSESSMENT OF CONSOLIDATION SETTLEMENT IMPROVEMENT USING STONE COLUMN IN BALIKPAPAN, EAST KALIMANTAN*)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Aulia Nabila Tambawang
20511363

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL – PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS LERENG TIMBUNAN REKLAMASI DAN TINJAUAN PENURUNAN KONSOLIDASI DENGAN *STONE COLUMN* DI BALIKPAPAN KALIMANTAN TIMUR (*ANALYSIS OF SLOPE STABILITY ON RECLAIMED EMBANKMENT AND ASSESSMENT OF CONSOLIDATION SETTLEMENT IMPROVEMENT USING STONE COLUMN IN BALIKPAPAN, EAST KALIMANTAN*)

Disusun Oleh:

Aulia Nabila Tambawang
20511363

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada Tanggal 13 Agustus 2026

Oleh Dewan Penguji

Dosen Pembimbing :
Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng.
NIK: 215111305
Tanggal : 01 September 2026

Penguji I :
Dr. Ir. Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T.
NIK: 045110407
Tanggal : 01 September 2026

Penguji II :
Ir. Muhammad Irfan Marasabessy, S.T., M.T
NIK: 245110502
Tanggal : 05 September 2026

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Dr. Eng. Ir. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.
NIK: 145110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa sesungguhnya laporan tugas akhir yang saya susun sebagai syarat untuk menyelesaikan strata sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil katya sendiri. Bagian-bagian dalam penulisan yang merupakan kutipan dari hasil karya pihak lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila dikemudian hari ditemukan adanya plagiarism atau bukan merupakan karya tulis saya sendiri, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 31 Agustus 2026

Oleh pembuatan pernyataan,



Aulia Nabila Tambawang

(20511363)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullah wabarakatuh.

Alhamdulillah, Puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan limpahan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "*Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Reklamasi dan Tinjauan Penurunan Konsolidasi dengan Stone Column di Balikpapan, Kalimantan Timur"*. Tugas Akhir ini menjadi salah satu persyaratan akademik yang harus ditempuh untuk menyelesaikan studi tingkat srata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam proses penyusunan dan penyelesaian Tugas Akhir ini banyak hambatan dan tantangan yang dihadapi penulis, namun berkat Rahmat Allah SWT dan pertolongannya yang tiada henti, yang datang melalui saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan hal tersebut, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, Terimakasih banyak atas bimbingan, dorongan, nasihat, saran, motivasi dan rasa sabar yang luar biasa yang diberikan kepada penulis dalam proses penyusunan dan penyelesaian Tugas Akhir ini. Terimakasih sudah membantu penulis mewujudkan cita-cita orang tua penulis untuk melihat penulis menyandang gelar sarjana. Semoga Allah SWT membalas dan melimpahkan segala hal baik dalam kehidupan ibu anisa.
2. Ibu Dr.Eng. Ir. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Prodi Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

3. Teruntuk seluruh Dosen Pengajar yang sudah memberikan banyak Ilmu dan pengetahuan dan seluruh Staff Prodi Teknik Sipil dan Perencanaan.
4. Teruntuk surgaku, duniaku, wanita hebat, separuh nyawaku mama tercinta dan tersayang mama Qomaria.Fere yang menjadi alasan paling besar penulis berusaha menyelesaikan Tugas Akhir ini. Terimakasih sudah senantiasa mendoakan penulis, mama menjadi alasan penulis berusaha untuk menyelsesaikan Tugas Akhir ini. Terimakasih untuk setiap menu masakan yang mama buat dan sediakan dengan penuh cinta, Terimakasih untuk selalu berjuang, berkat do'a-do'a mama penulis bisa dan ada sampai di titik ini. Semoga mama Panjang umur, sehat dan selalu dilimpahkan segala hal baik dunia akhirat. I love u mama.
5. Teruntuk yang sangat ku rindukan yang jauh di atas sana, Baba M. Ghafur. Tambawang (Alm). Walaupun secara fisik baba tidak mendampingi penulis tetapi penulis yakin baba ada setiap hari melihat, menemani, dan mendoakan setiap proses kehidupan penulis. Terimakasih baba untuk setiap do'a yang baba panjatkan, motivasi, kalimat penenang, pelukan yang sangat penulis rindukan hingga hari ini, pengorbanan materi maupun non materi yang selalu baba cukupi. Semoga baba tetap dan turut bangga, bahagia dan merayakan pencapaian kecil ini di atas sana. Terimakasih banyak untuk semua memori indah dan hal baik yang masih rapih tersimpan dan akan selalu seperti itu. Terimakasih baba, penulis rindu sekali baba. I love you.
6. Teruntuk cici dan koko ku tersayang, Cici Ela, Koko cak, Ko beng dan Cece winda. Terimakasih sudah memberikan kehidupan yang baik, menyayangi, mencintai, memberikan contoh yang baik kepada penulis, yang senantiasa memberikan motivasi, semangat, mendukung secara materil maupun non materil.
7. Teruntuk Umi kia dan Bunda Iin, kaka-kaka ipar ku, Terimakasih untuk motivasi, semangat yang membangun untuk penulis dalam proses Tugas Akhir ini.
8. Teruntuk PAUNA, sahabat penulis Putri Anjani dan Nadya Safira terimakasih sudah membersamai penulis dari awal perjalanan perkuliahan penulis hingga hari ini. Terimakasih atas uluran tangan maupun waktu yang diberikan untuk

membantu penulis. Setiap keseruan, kesulitan, lika-liku kehidupan yang sudah kita lewati bersama selama di perantauan akan selalu penulis ingat. Semoga segala urusan kalian dipermudah dan diridhoi Allah SWT.

9. Teruntuk abang afsar, balqis, ginana, khaleed dan maliq keponakan-keponakan tersayang penulis yang menjadi salah satau penguat dalam hari-hari penulis yang berat, kalian hadir dengan tingkah dan cerita kalian yang sangat lucu mengubah rasa berat di pundak penulis menjadi tawa dan senyuman. Love you
10. Teruntuk keluarga penulis bapa hock (Alm), bapa sun (Alm), bapa pace, dan mama yaya terimakasih untuk sukacita, kalimat penyemangat yang selalu di berikan kepada penulis.
11. Teruntuk sahabat-sahabat penulis sejak SMA, Alya, Egi, oma, dan ammar yang masih membersamai penulis hingga hari ini
12. Teruntuk teman-teman seangkatan Teknik Sipil Angkatan 20 yang memberikan doa dan semangat.
13. Teruntuk semua pihak yang sudah terlibat dalam proses penulisan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-satu.
14. Terakhir ucapan terimakasih kepada diri sendiri, terimakasih sudah tetap bertahan hingga hari ini walaupun proses yang dilewati tidak mudah, tetapi Alhamdulillah penulis ada di tahap ini. Semangat berjuang untuk fase kehidupan yang baru di dunia kerja.

Yogyakarta, 31 Agustus 2026

Aulia Nabila Tambawang
20511363

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

HALAMAN PENGESAHAN **Error! Bookmark not defined.**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI **Error! Bookmark not defined.**

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vii

DAFTAR TABEL x

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR LAMPIRAN xiv

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xv

ABSTRAK xvii

ABSTRACT xviii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 3

1.3. Tujuan Penelitian 4

1.4. Manfaat Penelitian 5

1.5. Batas Penelitian 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1. Analisis Stabilisasi Lereng Timbunan 7

2.2. Perbaikan tanah dengan metode Stone column 8

2.3. Analisa Konsolidasi Pada Lahan Reklamasi 9

2.4. Perbandingan dengan penelitian terdahulu 10

BAB III LANDASAN TEORI 16

3.1. Tanah 16

3.1.1. Klasifikasi Tanah 16

3.1.2. Pengujian Properties Tanah 18

3.1.3. Kuat Geser Tanah 27

3.1.4. Uji Triaksial (Triaxial test) 28
3.1.5. Beban lalu lintas 31
3.2. Penurunan Tanah (*settlement*) 31
3.2.1. Penurunan Segera (*immediate Settlement*) 31
3.2.2. Penurunan Konsolidasi Primer (*Primary Consolidated settlement*) 31
3.3. Konsolidasi 36
3.3.1. Konsolidasi Satu Dimensi 36
3.4. Parameter Perhitungan Penurunan 37
3.4.1. Koefisien Arah Vertikal (Cv) 37
3.4.2. Indeks Pemampatan (Cc) 37
3.5. Stabilisasi Lereng 38
3.5.1. Faktor Aman 38
3.6. Perbaikan Tanah 39
3.6.1. Metode *Preloading* 39
3.6.2. Metode *Stone Column* 40
3.7. Program PLAXIS 2D V21 43
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 45
4.1. Lokasi Penelitian 45
4.2. Prosedur Analisis 45
4.2.1. Pengumpulan Data 45
4.2.2. Analisis Data 47
4.3. Bagan Alir 49
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 50
5.1. Data Analisis 50
5.2. Analisis Perhitungan Analitik 52
5.2.1. Menentukan Properties Awal 52
5.2.2. Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer dengan Metode Terzaghi 54
5.2.3. Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Tanpa Perkuatan *Stone Column* 56

5.3. Analisis Menggunakan Program *PLAXIS 2D v21* 58
5.3.1 Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan PLAXIS 2D v21 59
5.3.2. Analisis Konsolidasi Tanah dengan *Stone Column* PLAXIS 2D v21 61
5.4. Pembahasan 68
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 74
6.1. Kesimpulan 74
6.2. Saran 75
DAFTAR PUSTAKA 76
LAMPIRAN 79

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Korelasi Nilai N-SPT Dengan Berat Volume Tanah 19
Tabel 3.2 Nilai Berat Jenis Tanah 21
Tabel 3.3 Nilai Indeks Plastisitas 24
Tabel 3.4 Kisaran Permeabilitas tanah (k) pada temperature 20° C 24
Tabel 3.5 Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah (Bowles, 1977) 25
Tabel 3.6 Nilai Perkiraan angka poisson tanah (Bowles, 1977) 26
Tabel 3.7 Nilai Kisaran Sudut Geser Dalam Tanah Pasir 26
Tabel 3.8 Nilai estimasi sudut gesek dalam dari pengujian triaxial 30
Tabel 3.9 Beban Lalu Lintas untuk Analisis Stabilisasi dan Beban di Luar Jalan 31
Tabel 3.10 Nilai *Safety Factor* 39
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian N-SPT di Lapangan 46
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Laboratorium 46
Tabel 4. 3 Klasifikasi Tanah berdasarkan USCS 47
Tabel 4.4 Tahapan Kerja PLAXIS 2D kondisi *Preloading* 48
Tabel 4.5 Tahapan Kerja Program PLAXIS 2D kondisi Preloading dengan *Stone column* 48
Tabel 5.1 Data Pengambilan Titik *Bore hole* 50
Tabel 5.2 Parameter Tanah BHL.04 51
Tabel 5.3 Rekapitulasi Nilai Tegangan Overbunden Efektif (Po) 52
Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Nilai OCR 53
Tabel 5.5 Rekapitulasi Nilai Indeks Kompresi Tanah (Cc) 53
Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Tanah Konsolidasi Primer 56
Tabel 5.7 Hasil Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Tanpa Perkuatan *Stone Column* 57
Tabel 5.8 Parameter Tanah pada PLAXIS 2D 58
Tabel 5.9 Rekapitulasi Perhitungan Konsolidasi Tanah 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Klasifikasi Tanah Menurut USCS 18
Gambar 3.2 Metode Cassagrande Pada Grafik e – log P’ 34
Gambar 3.3 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Osterberg, 1957) 35
Gambar 3.4 *Layout* Pemasangan *Stone Column* Pola Segitiga Sama Sisi 42
Gambar 3.5 *Layout* pola pemasangan *Stone column* skema 1 42
Gambar 3.6 *Layout* pola pemasangan *Stone column* skema 2 43
Gambar 3.7 *Layout* pola pemasangan *Stone column* skema 3 43
Gambar 4.1 Lokasi Penelitian 45
Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian 49
Gambar 5.1 Grafik Konsolidasi Terhadap Waktu Tanpa Perkuatan *Stone Column* 57
Gambar 5.2 Permodelan Awal Kondisi Preloading (Tanpa *Stone Column*) dengan Autocad 59
Gambar 5.3 Permodelan PLAXIS 2D Kondisi Preloading (Tanpa *Stone Column*) PLAXIS 2D 59
Gambar 5.4 *Total Displacement* kondisi Beban Timbunan Tanpa *Stone Column* PLAXIS 2D 60
Gambar 5.5 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan Tanpa *Stone Column* PLAXIS 2D 60
Gambar 5.6 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone column*) PLAXIS 2D 60
Gambar 5.7 *Safety Factor* Setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone column*) PLAXIS 2D 61
Gambar 5.8 Permodelan Awal Kondisi Preloading dengan *Stone Column Autocad* Skema 1 61
Gambar 5.9 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1 62

Gambar 5.10 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 1 62
Gambar 5.11 *Deformed Mesh* Kondisi Preloading dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 1 62
Gambar 5.12 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1 63
Gambar 5.13 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1 63
Gambar 5.14 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* Autocad Skema 2 64
Gambar 5.15 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D Skema 2 64
Gambar 5.16 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 2 64
Gambar 5.17 Deformed Mesh Kondisi Preloading dengan Stone Column PLAXIS 2D skema 2 65
Gambar 5.18 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 2 65
Gambar 5.19 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 2 65
Gambar 5.20 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* Autocad Skema 3 66
Gambar 5.21 Permodelan Awal Kondisi Preloading dengan *Stone Column* PLAXIS 2D Skema 3 66
Gambar 5.22 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 3 67
Gambar 5.23 *Deformed Mesh* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 3 67
Gambar 5.24 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 3 67

Gambar 5.25 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 3 68
Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Kondisi *Preloading* dan Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* 71
Gambar 5.27 Grafik Perbandingan Penurunan Konsolidasi Kondisi *Preloading* dan *Preloading* dengan *Stone Column* 71
Gambar 5.28 Grafik perbandingan Angka Aman Kondisi *Preloading* 72
Gambar 5.29 Grafik Perbandingan Angka Aman Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* 72

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Parameter Tanah 80
Lampiran 2. Data Bor-Log 81

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

c	= Kohesi tanah (kN/m²)
c'	= Kohesi tanah efektif (kN/m²)
C_c	= Indeks pemampatan (kompresi) tanah
C_s	= Indeks pemuaian tanah (m²/hari)
C_u	= Koefisien keseragaman butiran
C_v	= Koefisien konsolidasi vertikal (m²/hari)
C_{vgab}	= Koefisien konsolidasi vertikal gabungan (m²/hari)
D	= Diameter *stone column* (m)
e_0	= Angka pori awal
E	= Modulus elastisitas tanah (kN/m²)
Gs	= Berat jenis tanah
H	= Tebal lapisan tanah (m)
H_{dr}	= Panjang aliran drainase (m)
HR	= Tinggi timbunan rencana (m)
I	= Faktor pengaruh akibat beban timbunan
k	= Koefisien permeabilitas tanah (m/hari)
LL	= Batas cair (*liquid limit*) (%)
N	= Jumlah pukulan / nilai N-SPT
OCR	= *Overconsolidation ratio*
P_0	= Tekanan *overburden* efektif (kN/m²)
$P_{c'}$	= Tekanan prakonsolidasi (kN/m²)
PI	= Indeks plastisitas (%)
PL	= Batas plastis (*plastic limit*) %
q_0	= Beban timbunan (kN/m²)
s	= Jarak antar *stone column* (m)
Sc	= Penurunan konsolidasi primer (m)
Si	= Penurunan segera (*immediate settlement*) (m)
SL	= Batas susut (*shrinkage limit*) (%)

S_p = Penurunan primer (*primary settlement*) (m)

t = Waktu konsolidasi (hari)

T_v = Faktor waktu konsolidasi vertikal (hari)

u = Tekanan air pori (kN/m²)

U_v = Derajat konsolidasi arah vertikal (%)

v = *Poisson's ratio*

V_0 = Volume tanah kering (cm³)

V_s = Volume butiran padat (cm³)

w = Kadar air (%)

W = Berat tanah basah (gr)

W_0 = Berat tanah kering (gr)

W_s = Berat butiran padat (tanah kering) (gr)

W_w = Berat air (gr)

γ_{unsat} = Berat volume tanah (kN/m³)

γ_b = Berat volume tanah basah (kN/m³)

γ_d = Berat volume tanah kering (kN/m³)

γ_s = Berat volume butiran padat (kN/m³)

γ_{sat} = Berat volume tanah jenuh (kN/m³)

$\gamma_{timbunan}$ = Berat volume tanah timbunan (kN/m³)

γ_w = Berat volume air (kN/m³)

Δp = Distribusi (tambahan) tegangan vertikal (kN/m²)

τ = Kuat geser tanah (kN/m²)

σ = Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

σ' = Tegangan normal efektif (kN/m²)

σ_1 = Tegangan utama mayor (kN/m²)

σ_3 = Tegangan utama minor (kN/m²)

φ = Sudut geser dalam tanah (°)

φ' = Sudut geser dalam tanah efektif (°)

ψ = Sudut dilatasi (°)

π = Konstanta phi (3,14)

SF = *safety factor*

ABSTRAK

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki sebaran tanah lunak yang luas akibat proses geologi Kuarter, sehingga pekerjaan reklamasi pesisir seperti di Balikpapan, Kalimantan Timur, rawan mengalami ketidakstabilan lereng timbunan dan penurunan konsolidasi yang besar. Penelitian yang berjudul "Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Reklamasi dan Tinjauan Penurunan Konsolidasi dengan *Stone Column* di Balikpapan Kalimantan Timur" ini bertujuan untuk menganalisis waktu dan penurunan tanah pada konsolidasi 90% dengan kondisi *Preloading*, kondisi *Preloading* dikombinasi *Stone Column* dan Stabilitas lereng angka aman sebelum dan sesudah konsolidasi.

Penelitian ini dilakukan menggunakan dua metode perhitungan. Kondisi preloading di analisis dengan metode Terzaghi secara manual dan metode elemen hingga menggunakan PLAXIS, kondisi Preloading kombinasi *Stone Column* di analisis dengan metode elemen hingga menggunakan PLAXIS dan analisis Angka aman menggunakan PLAXIS. Variasi diameter dan jarak yang digunakan untuk perencanaan *Stone column* terbagi menajadi 3 skema, skema 1 dengan diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m, skema 2 dengan diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m dan skema 3 dengan diameter 1,1 m dan jarak 2 m dengan sudut geser dalam 35^{o}. Sehingga dari variasi *stone column* ini didapatkan konfigurasi yang paling efektif.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi eksisting tanpa perkuatan (*preloading*) memerlukan waktu 475 hari (manual) dan 276,4 hari (PLAXIS) untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, dengan penurunan berturut-turut 1,1567 m dan 0,08175 m. Penerapan *stone column* pada tiga skema variasi diameter dan jarak mempercepat waktu konsolidasi secara signifikan, dengan lama waktu 82,17 hari dan penurunan 0,05628 m (skema 1), waktu 98,43 hari dan penurunan 0,07081 m (skema 2) serta waktu 303,4 hari dan penurunan 0,07077 m (skema 3). Dengan Angka Aman yang diperoleh untuk kondisi *preloading* sebelum dan sesudah konsolidasi 1,842 dan 1,912, sedangkan untuk skema 1 diperoleh 1,985 dan 2,011, skema 2 diperoleh 1,804 dan 1,842 sedangkan skema 3 diperoleh 1,788 dan 1,845. Hasil yang ditunjukkan bahwa pada kondisi preloading (tanpa *stone column*) membutuhkan waktu penurunan lebih lama, serta nilai penurunan yang cukup besar dibandingkan dengan kondisi *Preloading* kombinasi *Stone column*. Sedangkan untuk konfigurasi variasi stone column menunjukkan bahwa variasi diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m membutuhkan waktu penurunan sangat cepat dan nilai penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan dua variasi lainnya dan kondisi preloading. Untuk angka aman yang ditunjukkan untuk kondisi *preloading* maupun *preloading* kombinasi *stone column* mengalami kenaikan angka yang signifikan dan sudah berada di atas ambang batas aman (> 1,5). Dapat disimpulkan bahwa perkuatan *stone column* diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m paling optimal mempercepat waktu konsolidasi tanah dan mengurangi penurunan tanah dasar reklamasi.

Kata kunci: stabilitas lereng, penurunan konsolidasi, stone column, timbunan reklamasi, PLAXIS 2D

ABSTRACT

Indonesia, as an archipelagic country is characterized by extensive distributions of soft soil deposits resulting from Quaternary geological processes. Consequently coastal reclamation works, including that undertaken in Balikpapan, East Kalimantan, are highly suspectible to embankment slope instability and considerable consolidation settlement. This study, entitle "Analysis of Slope Stability on Reclaimed Embankment and Assessment of Consolidation Settlement Improvement Using Stone Column In Balikpapan, East Kalimantan" is intended to analyxe the duration and magnitude of soil settlement at 90% degree of consolidation under preloading conditions and under preloading combined with stone column treatments, and to evaluate the slope safety factor prior to and following consolidation.

Two calculation methods were employed in this study. The preloading condition was analyzed through the manual Terzaghi method and the finite element method utilizing PLAXIS, wheres the preloading condition combined with stone columns was analyzed exclusively through the finite element method utilizing PLAXIS, with the safety factor likewise determined usin PLAXIS. Three design schemes, differentiated by stone column diameter and spacing, were formulated: scheme 1, with diameter 1,1 m and spacing 2,1 m; scheme 2, with diameter 0,50 m and 1,5 m; scheme 3, with diameter 1,1 m and 2,0 m, each employing an internal friction angle of 35º. Through comparative analysis of these variations, the most effective stone column configuration was subsequently identified.

The result demonstrate that the exixting condition without reinforcement (preloading) requires 475 days according to the manual method and 276,4 days according to the PLAXIS ethod to attain a 90% degree of consolidation, with corresponding settlement values of 1,1567 m dan 0,08175 m, respectively. The implementation of stone columns across the three diameter-spacing schemes was found to substantially accelerate the consolidation process, yielding consolidation durations and settlement values of 82,17 days and 0,05628 m (scheme 1), 98,43 days and 0,07081 m (scheme 2), and 303,4 days and 0.07077 m (scheme 3). The safety factor obtained for the preloading condition prior to and following consolidation were 1,842 and 1,912 respectively, for scheme 1, 1,985 and 2,011; scheme 2, 1,804 and 1,842; and for scheme 3, 1,788 and 1,845. These findings indicate that the preloading conditions, in the absence of stone column, necessitates a considerably longer settlement duration and results in markedly greater settlement magnitude relative to the preloading condition combined with stone columns. Regarding to the stone column configurations, the variation employing a diameter 1,1 m and spacing 2,1 m was found to achieve the most rapid settlement duration and the smallest settlement magnitude among the three schemes examined, as well as relative to the preloading condition. Furthermore, the safety factors for both the preloading condition and the preloading combined with stone columns exhibited significant increases and were consistently maintained above the established safety threshold (> 1,5). It may therefore be concluded that stone column reinforcement with a diameter 1,1 m and spacing 2,1 m constitutes the most optimal configurations for accelerating the rate of soil consolidation and mitigating settlement of the reclamation subgrade.

***Keywords**: Slope stability, consolidation settlement, stone column, reclamation embankment, PLAXIS 2D*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia menjadi salah satu Negara di Asia Tenggara yang memiliki ribuan pulau yang terbentang sepanjang khatulistiwa dari Sabang sampai Merauke. Indonesia di juluki juga sebagai Negara Maritim atau Negara Kepulauan secara resmi oleh konverensi PBB atau *United Nation Convention on Law of the sea* (*UNCLOS*) pada tahun 1982 melalui deklarasi Juanda 13 desember 1957 yang sekarang di peringati sebagai hari Nusantara. Pada tahun 2017 dalam pertemuan ke -30 UNGEGN dan konferensi ke-11UNCSGN Delegasi Republik Indonesia mendaftarkan pulau-pulau yang ada di Wilayah Indonesia untuk dibakukan. Total keseluruhan pulau di Indonesia yang telah didaftarkan dan dicatat pada UNGEGN (*United Nation Group of Experts on Georapchical Names*) adalah 17.504 (Deputi Kedaulatan Maritim Kemenko Bidang Kemaritiman). Hal ini diperkuat dengan adanya Salinan Keputusan Menteri Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi Republik Jakarta Nomor 169/Tahun 2020 yang menyatakan luas wilayah Indonesia mencapai lebih 70% dari seluruh wilayah Indonesia. Dimana hal ini bahwa perbandingan persentase kepulauan dan daratan yang di miliki Indonesia adalah 70% perairan dan 30% daratan.

Wilayah Indonesia merupakan salah satu wilayah yang ditutupi dengan endapan Kuarter yang tersusun oleh kerikil, lanau, pasir, lumpur karbonat dan gambut (Moechtar, 2019). Selama periode Kuarter terbentuknya dataran aluvial yang merupakan hasil dari interaksi proses laut dan aktivitas aliran air sungai, hal ini juga yang dapat mengakibatkan adanya proses pelapukan karena material yang tersusun terbawa aliran air, faktor iklim maupun curah hujan yang tinggi. Faktor-faktor ini mengakibatkan peningkatan massa air yang masuk ke dalam tanah sehingga menghasilkan air tanah yang akan mengisi pori-pori butiran tanah

sehingga menghasilkan struktur tanah yang lebih lunak atau dikenal dengan Tanah Lunak.

Adanya sebaran tanah lunak pada wilayah Indonesia ini berdasarkan geologi umum, dimulai pada akhir kala paleosen sekitar 60 juta tahun lalu dimana permulaan jaman tersier terjadinya awal mula terbentuknya kepulauan di Indonesia. Sekitar 10 juta tahun yang lalu (jaman miosen akhir) terjadi peristiwa geologi yang cukup memberikan dampak yang besar bagi Indonesia, dimana terjadi pengangkatan batuan sedimen dari dasar laut dan pembentukan pulau-pulau vulkanik baru dan selama jaman tersier akhir, terjadi erosi pada deretan pegunungan sehingga menghasilkan endapan sedimen yang tebal (Panduan Geoteknik 1). Dengan adanya proses erosi dari deretan pegunungan ini bertepatan dengan iklim dan curah hujan yang ada di Indonesia, dapat mempercepat terjadinya pelapukan dan pemindahan dari masa tanah sehingga dari proses ini menghasilkan tanah residual dan tanah terangkut. Maka dari itu banyak wilayah di Indonesia memiliki sebaran tanah lunak yang cukup banyak di berbagai daerah karena adanya peristiwa geologi ini.

Banyaknya sebaran tanah lunak pada beberapa wilayah Indonesia menjadi risiko yang perlu diperhatikan dalam proses perencanaan dan pelaksanaan, perlu dilakukan *soil investigation* untuk mengetahui kekuatan tanah dasar untuk menahan beban atau struktur di atasnya. Banyak permasalahan di lapangan yang ditemui berkaitan dengan struktur bawah yaitu tanah. Tanah yang memiliki ukuran butiran yang sangat buruk adalah tanah yang mempunyai ukuran butiran halus, lebih kecil dari 0,002 mm, mempunyai permeabilitas rendah, kadar kembang susut yang tinggi dan proses konsolidasi lambat tanah yang tersebut adalah tanah lempung (Hardiyatmo, 2002). Lapisan tanah lunak memiliki daya dukung dan permeabilitas yang rendah, gaya gesekan kecil serta kemampatannya besar Toha (1989) dalam Kamila (2022).

(Iskandar dkk, 2016) melakukan penelitian guna untuk mengetahui perbaikan tanah menggunakan *Stone Column* di tanah lempung lunak di bawah tanah timbunan. Dengan adanya kondisi ini maka di perlukan suatu upaya untuk

menghindari faktor-faktor yang dapat mengakibatkan kegagalan konstruksi. Upaya yang dapat dilakukan dengan menggunakan perkuatan tanah untuk memperkuat stabilisasi lereng tanah timbunan.

Stone column merupakan salah satu metode perkuatan tanah untuk memperkuat tanah dasar agar struktur atasnya tidak mengalami keruntuhan. Teknik *stone column* biasanya berupa kolom-kolom yang terdiri dari agregat batu pecah atau kerikil yang akan di pasang secara vertikal ke dalam tanah pada kedalaman yang sudah di tentukan. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pemasangan perkuatan tanah dasar dan Analisa dengan *stone column*, dimana hal ini bertujuan guna mengetahui kinerja dan dampak yang diberikan *stone column* untuk tanah tersebut sebagai metode untuk meningkatkan kapasitas daya dukung tanah dan juga mencegah terjadinya penurunan tanah yang mengakibatkan keruntuhan konstruksi struktur atas.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasakan latar belakang yang ada, maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* perhitungan analitik Terzaghi variasi timbunan 7 m?
2. Bagaimana nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21 variasi timbunan 7 m?
3. Bagaimana nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21?
4. Bagaimana nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21?
5. Bagaimana nilai *Safety Factor* (Angka Aman) setelah konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21?

6. Bagaimana nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21?
7. Bagaimana nilai *Safety Factor* (Angka Aman) setelah konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* perhitungan analitik Terzaghi variasi timbunan 7 m.
2. Untuk mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21 variasi timbunan 7 m.
3. Untuk mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
4. Untuk mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
5. Untuk mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) setelah konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
6. Untuk mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
7. Untuk mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) setelah konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* perhitungan analitik Terzaghi variasi timbunan 7 m.
2. Mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21 variasi timbunan 7 m.
3. Mengetahui nilai penurunan dan waktu konsolidasi tanah pada derajat konsolidasi 90% dengan metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
4. Mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
5. Mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
6. Mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) sebelum konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.
7. Mengetahui nilai *Safety Factor* (Angka Aman) setelah konsolidasi 90% dengan metode *Preloading* dikombinasikan *Stone Column* menggunakan program PLAXIS 2D v21.

1.5. Batas Penelitian

Adapun Batasan penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Ketinggian lereng timbunan yang digunakan adalah 7 m sesuai data lapangan.
2. Analisis stabilisasi lereng berdasarkan hasil pengujian tanah berupa data N-SPT yang diperoleh dari lokasi penelitian.
3. Penelitian ini menggunakan bantuan *software* PLAXIS 2D versi 21.
4. Penelitian ini tidak memperhitungkan beban gempa dan beban kendaraan.
5. Penelitian ini tidak mencakup perhitungan anggaran biaya dan gambar yang terperinci.
6. Parameter *Stone Column* berdasarkan nilai tipikal dari referensi terkait.

7. Parameter tanah berdasarkan Data sekunder lapangan dan pendekatanan dari referesi terkait.
8. Penelitian ini tidak mencakup Muka Air tanah
9. Penelitian ini tidak memperhitungkan Angka Aman dengan metode analitik (manual).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Analisis Stabilisasi Lereng Timbunan

Rakhman (2021) melakukan penelitian analisis stabilisasi lereng timbunan pada Jalan Tol Tebanggi Besar-Pematang Panggang yang merupakan Jalan Tol Trans Sumatera pada Sta 6+800. Penelitian ini dilakukan guna untuk mengetahui *Safety Factor* timbunan saat konstruksi dan paska konstruksi serta nilai konsolidasi dalam kurun waktu 365 hari (1 tahun). Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eleman hingga dengan PLAXIS 8.6. Penelitian ini menganalisis timbunan tanah asli, timbunan *replacement*, timbunan tanah asli dengan perkuatan geotekstil dan timbunan *replacement* dengan perkuatan geotekstil. Dari hasil penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa timbunan pengganti dengan geotekstil berpotensi meningkatkan angka aman timbunan.

Habibi (2025) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui nilai penurunan tanah dan waktu konsolidasi akibat beban timbunan pada tanah terkonsolidasi 90%, baik tanpa perkuatan, dengan kombinasi *preloading* + PVD, maupun *Vacuum pressure* + PVD. Studi kasus ini berlokasi di area hutan tergenang air, pesisir laut Teluk Balikpapan, Balikpapan Barat, Kalimantan Timur. Pada penelitian ini digunakan dua metode perhitungan yaitu, dengan perhitungan analitik (Terzaghi) dan Program PLAXIS 2D, pada penelitian ini menggunakan metode *Preloading*, *Preloading* kombinasi PVD dan *Vacuum Pressure* kombinasi PVD dengan pola pemasangan PVD segiempat. Hasil dari penelitian ini bahwa penurunan konsolidasi 90% dengan metode preloading adalah sebesar 0,495 m dengan waktu 1038 hari, untuk metode preloading dengan PVD adalah sebesar 0,3 m dengan waktu 37 hari dan untuk metode vacuum pressure dengan PVD adalah sebesar 0,3 m dengan waktu 11 hari.

2.2. Perbaikan tanah dengan metode *Stone column*

Somantri dkk. (2021) melakukan penelitian untuk menganalisis angka aman dan perkuatan tanah dengan *Stone column* pada timbunan junction tebing tinggi yang dinilai memiliki peluang terjadinya likuefaksi karena, jenis tanah pada daerah tersebut cenderung pasir sedikit lanau dengan konsistensi yang sangat lepas dan dilihat dari nila N-SPT yang didapatkan pada BH 15 sampai dengan BH-18 sekitar 0-4 dengan kedalaman 3 m – 15,3 m dan muka air tanah di kedalaman 1,2 m di bawah tanah dasar, sangat beresiko terjadinya likuefaksi. Dilakukan analisis evaluasi potensi likuefaksi dengan mencari nilai *cyclic stress Ratio* (CSR), *cyclic Resitance Ratio* (CRR). Penelitian ini menggunakan metode Youd & Idriss (2001), Robertson & Wride (1998) dan NCEER (1997) yang dimana perhitungan ini didapatkan dengan menggunakan metode sondir atau CPT terlebih dahulu. Dari hasil perbandingan CSR dan CRR didapatkan hasil yang berbeda dari ketiga metode ini. Hasil dengan metode Youd&Idriss didapatkan likuefakasi terjadi pada kedalaman 3,4 m – 13,6 m, metode Robertson &Wride terjadi pada kedalaman 2,4 m -13,8 m dan menurut NCEER terjadi pada kedalaman 4,2 m -13,8 m. Maka dapat dikatakan dari ketiga metode tersebut potensi terjadinya likuefaksi terdapat pada lapisan kedua dan ketiga tanah tersebut. Selain itu diperoleh nilai angka aman adalah 1,4. Untuk mengatasi potensi terjadinya likuefaksi ini digunakan perkuatan tanah dasar dengan metode *stone column* yang dipasang pada kedalaman 10 m dengan diameter *stone column* adalah 1,2 m dan jarak antar *stone column* adalah 1,5 m yang dipasang sepanjang tanah dasar di bawah timbunan. Dengan adanya perkuatan tanah dengan *stone column* ini didapatkan hasil akhir bahwa tidak adanya potensi terjadi likuefaksi karena dengan metode *stone column* penurunan tereduksi sebanyak 48-54% dan angka aman stabilisasi lereng meningkat dari 1,4 menjadi 2,6.

Kamila dkk. (2022) melakukan penelitian ini guna untuk mengetahui parameter pengaruh penggunaan *stone column* sebagai metode perbaikan tanah terhadap daya dukung tanah lunak. Penelitian ini mengambil lokasi yang memiliki struktur lahan yang di dominasi oleh daerah rawa atau yang memiliki intensitas air yang tinggi. Point-point penting yang akan diujikan dalam penelitian ini adalah

Variasi diameter, jarak, sudut geser *stone column* serta pola konfigurasinya. Variasi diameter yang digunakan mulai dari 1 m, 1,2 m dan 1,5 m, untuk jarak antar *stone column* bervariasi dari 1,5 m, 1,9 m dan 2,1 m, dan sudut geser yang digunakan adalah 35° dan 40°. Variasi pola yang digunakan dalam penelitian ini adalah pola bujur sangkar dan segitiga dengan kedalaman total yang diperbaiki adalah 14 m. Perhitungan daya dukung tanah dilakukan secara manual dengan menggunakan rumus daya dukung *local shear failure* dan dengan program PLAXIS 2D. Dari hasil perhitungan baik secara manual maupun dengan PLAXIS 2D didapatkan hasil bahwa kondisi tanah asli sebelum dilakukan perkuatan dengan *stone column* memiliki nilai Q sebesar 1,45 Kn sedangkan dengan pembebanan dan perhitungan plaxis didapatkan Q sebesar 9 kN dimana dapat dikatakan bahwa dengan metode *stone column* daya dukung tanah meningkat. Selain itu didapatkan kesimpulan bahwa, semakin besar diameter *stone column* yang digunakan maka semakin besar daya dukung, lalu apabila jarak *stone column* yang dipakai lebih besar maka akan menghasilkan daya dukung yang semakin kecil dan untuk pola konfigurasi *stone column* bahwa pola segitiga memberikan daya dukung yang lebih besar dibandingkan dengan pola bujur sangkar.

2.3. Analisa Konsolidasi Pada Lahan Reklamasi

Napitupulu dkk. (2021) melakukan penelitian terkait dengan pembuatan lahan daratan baru dengan memanfaatkan lahan perairan atau yang sering disebut dengan reklamasi. Analisis konsolidasi pada penelitian ini akan berfokus pada area *non-sand key*. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui besar penurunan konsolidasi dengan perhitungan analisanya menggunakan metode elemen hingga dengan permodelan menggunakan plaxis 2D dan 3D. Pada penelitian ini membahas pada BH-02 dengan kedalaman Uds yang diambil dari 4,55 m – 44 m. Pada penelitian ini juga digunakan perkuatan tanah dengan PVD sebanyak 1 baris dengan jarak 1,5 dengan pola konfigurasi segitiga pada kedalaman 4,00 m – 40 m. Hasil penelitian yang didapatkan adalah penurunan konsolidasi menggunakan teori analitis relatif mendekati penurunan aktual di lapangan yaitu 7,829 m hasil Analisa dan penurunan aktual di lapangan adalah 7,850 m dengan presentasi penurunan 0,260%. Sedangkan untuk metode dengan penggunaan PLAXIS 2D dan 3D

penurunan yang didapatkan adalah 7,930 m dan 7,935 m dengan persentase perbedaan penurunan sebesar 1,008% dan 1,071%.

2.4. Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Hasil perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian Terdahulu						**Penelitian yang Dilakukan**
Peneliti	**Rakhman (2021)**	**Somantri dkk. (2021)**	**Habibi (2025)**	**Kamila dkk. (2022)**	**Napitupulu dkk. (2021)**	**Tambawang (2025)**
Judul Penelitian	Analisis Stabilisasi Lereng Timbunan Badan Jalan Di atas Tanah Lunak Dengan Perkuatan Geotekstil	Perbaikan Tanah Dasar Yang Berpotensi Terjadi Likuefaksi Dengan Metode *Stone Column* Pada *Junction* Tebing Tinggi	Pengaruh Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan Metode *Vacuum Pressure* Terhadap Konsolidasi Tanah	Studi Parametrik Pengaruh *Stone Column* Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak	Analisa Konsolidasi Di Area *Non Sand-Key* Pada Area Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan-Phase I Menggunakan *Plaxis* 2D dan 3D	Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Reklamasi Dan Tinjauan Penurunan Konsolidasi Dengan *Stone Column* di Balikpapan Kalimantan Timur
Tujuan Penelitian	Mengetahui angka aman (SF) timbunan saat konstruksi dan paska konstruksi serta nilai konsolidasi.	Menganalisis angka aman dan perkuatan tanah dengan *stone column* pada timbunan.	Mengetahui penurunan dan waktu konsolidasi tanah tanpa perbaikan, dengan preloading+PVD dan Vacuum Pressure +PVD	Mengetahui parameter pengaruh penggunaan *stone column* sebagai metode perbaikan tanah terhadap daya dukung tanah lunak	Mengetahui besar penurunan konsolidasi pada area reklamasi *nonsand-key*	Menganalisis lama waktu penurunan dan besar nilai penurunan konsolidasi serta angka aman pada timbunan reklamasi dengan variasi ketinggian 7 m

Tabel 2.1 Lanjutan Tabel Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian Terdahulu						**Penelitian yang Dilakukan**
Peneliti	**Rakhman (2021)**	**Somantri dkk. (2021)**	**Pratama dkk. (2023)**	**Kamila dkk. (2022)**	**Napitupulu dkk. (2021)**	**Tambawang (2025)**
Metode penelitian	Metode elemen hingga & PLAXIS 8.6	Metode Youd & Idriss (2001), Robertson & Wride (1998), NCEER (1997)	Metode Manual (Terzaghi) dan PLAXIS 2D	Metode Manual (dengan rumus daya dukung *local shear failure*) & PLAXIS 2D	Metode elemen hingga & PLAXIS 2D 3D	Metode analitik Terzaghi dan *Software* PLAXIS 2D v21, Metode *preloading* dengan dan tanpa *stone column*
Hasil Penelitian	Didapatkan bahwa timbunan pengganti (*replacement*) dengan geotekstil berpotensi meningkatkan angka aman timbunan.	Didapatkan potensi terjadinya likuefaksi pada lapisan kedua dan ketiga tanah tersebut. Dengan adanya pemasangan *stone column* didapatkan hasil akhir bahwa tidak adanya potensi likuefaksi dan	Didapatkan hasil penurunan dan waktu konsolidasi tanah tanpa PVD: 0.495 m dengan waktu 1038 hari, *preloading* dengan PVD: 0,3 m dengan waktu 37 hari,	Kondisi tanah asli setelah dilakukan perkuatan dengan *stone column* mengalami peningkatan daya dukung (Q) dari 1,45 kN menjadi 9 kN, semakin besar diameter *stone column* semakin besar daya dukung	Penurunan konsolidasi menggunakan teori analitis relatif mendekati penurunan aktual di lapangan yaitu 7,829 m dan hasil aktual di lapangan adalah 7,850 m dengan persentase penurunan 0,206%.	Penurunan tanah metode preloading dengan perhitungan manual membutuhkan waktu dan lebih lama dibandingkan dengan perhitungan dengan PLAXIS, yaitu 475 hari dengan penurunan 1,1567 m untuk *preloading* dengan analitik, 276,4 hari dengan penurunan 0,0175 m untuk

Tabel 2.1 Lanjutan Tabel Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang Dilakukan
Peneliti	**Rakhman (2021)**	**Somantri dkk. (2021)**	**Habibi (2025)**	**Kamila dkk. (2022)**	**Napitupulu dkk. (2021**	**Tambawang (2025)**
Hasil penelitian		Penurunan yang tereduksi sebanyak 48% - 54% dengan angka aman yang meningkat dari 1,4 menjadi 2,6.	*Vacuum Pressure* dengan PVD: 0,3 m dengan waktu 11 hari (PLAXIS 2D).	Dan semakin besar jarak *stone column* yang dipakai semakin kecil daya dukungnya, selain itu pola konfigurasi seitiga lebih besar daya dukungnya dibandingkan dengan pola bujur sangkar.	Dengan menggunakan PLAXIS 2D & 3D penurunan yang didapatkan sebesar 7,930 m dan 7,395 m dengan persentase perbedaan penurunan sebesar 1,008% dan 1,071%.	perhitungan PLAXIS. Perbaikan dengan *Stone column* menggunakan 3 skema dengan diameter dan jarak yang berbeda. Diameter 1,1 m dan jaraj 2,1 m membutuhkan waktu lebih singkat dibandingkan dengan skema 2 dan skema 3 yaitu, 82,17 hari dengan penurunan 0,0563 m. untuk diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m: 98,43 hari dengan penurunan 0,07081 m sedangkan diameter 1,1 m dan jarak 2,0 m membutuhkan waktu yang lebih lama dari skema 1 dan 2 yaitu, 303,4 hari dengan

Tabel 2.1 Lanjutan Tabel Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian Terdahulu						Penelitian yang Dilakukan
Peneliti	**Rakhman (2021)**	**Somantri dkk. (2021)**	**Habibi (2025)**	**Kamila dkk. (2022)**	**Napitupulu dkk. (2021**	**Tambawang (2025)**
Hasil penelitian						Penurunan 0,07077 m. sedangkan. *safety factor* sebelum dan sesudah konsolidasi kondisi preloading PLAXIS adalah sebesar 1,842 dan 1,912, skema 1 sebesar 1,985 dan 2,011, skema 2 sebesar 1,804 dan 1,842 dan utnuk skema 3 sebesar 1,788 dan 1,845.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1. Tanah

Tanah secara umum di definisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yan tidak tersementasi satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang melapuk di sertai dengan zat cair dan gas yang mengisi rungan-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut (Das,1988). Tanah merupakan kumpulan bagian pada tetapi tidak terikat satu dengan yang lainnya yang menjadikan kaitan antara butirannya menjadi relatif lemah. Ikatan yang relatif lemah pada butiran tanah dapat terjadi disebabkan oleh karbonat, zat organik atau oksidasi-oksidasi yang mengendap di antara partikel. Ruang di antara partikel dapat berisi air, udara atau bahan lain (Hardiyatmo, 2002).

3.1.1. Klasifikasi Tanah

Pada dasarnya tanah memiliki sifat-sifat yang berbeda-beda. Untuk mendeskripsikan sifat-sifat umum maupun khusus serta ukuran partikel tanah digunakan istilah lempung, pasir, lanau, dan kerikil untuk menjelaskan karakter suatu tanah tersebut. Mengategorikan sifat-sifat tanah ke dalam kelompok atau sub kelompok tertentu disebut dengan klasifikasi (Hardiyatmo,2002). Untuk mengategorikan tanah ke dalam kelompok atau sub kelompok diperlukan adanya pengujian karakteristik tanah untuk menganalisis distribusi ukuran partikel tanah. Terdapat dua pengujian yang dapat dilakukan antara lain.

1. Analisis saringan

   Analisis saringan merupakan salah pengujian untuk menentukan distribusi ukuran suatu tanah, agar tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ukuran partikelnya sehingga mendapatkan presentasi berat tanah yang tertahan maupun lolos saringan dengan nomor saringan tertentu. Analisis saringan cenderung digunakan untuk partikel tanah yang memiliki ukuran butiran

> 0.074 mm atau dalam standar US lolos saringan No. 200. Ukuran partikel ini biasa di temui pada tanah berbutir kasar seperti, pasir dan kerikil.

2. Analisis Hidrometer

   Analisis hidrometer memiliki tujuan yang sama dengan analisis saringan, tetapi analisis hidrometer dilakukan untuk ukuran butiran yang < 0.074 mm atau dalam standar US lolos saringan No.200. dengan prinsip kerja pada analisis hidrometer ini menggunakan hukum stokes atau dapat dikatakan pengujian ini menggunakan prinsip sedimentasi partikel dalam air. Yang dimana ukuran partikel tersebut dapat ditemui pada tanah berbutir halus seperti, lanau dan lempung.

   Dari hasil pengelompokan karakter tanah berdasarkan ukuran distribusi butiran tersebut didapatkan spesifikasi klasifikasi tanah sering digunakan yaitu USCS, AASHTO, ASTM, FAA, MIT dan spesifikasi Jakarta nomen clatur. Dalam klasifikasi USCS tanah dikelompokkan dalam dua kelompok besar, yaitu Tanah berbutir kasar (coarse grained soil) dan tanah berbutir halus (*fine grains soil*), dimana tanah berbutir kasar yang di dalamnya terdapat 50% berat total contoh tanah (tanah kerikil dan pasir) lolos ayakan No.200 dan diberikan simbol untuk kerikil adalah G (*gravel*) sedangkan pasir S (*sand*). Sedangkan untuk tanah berbutir halus, lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200, simbol yang untuk lanau adalah M (*silt*), C (*clay*) untuk lempung dan O untuk lanau organik dan lempung organik (Das,1988). Berikut merupakan klasifikasi tanah USCS yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Kriteria untuk Menetapkan Simbol-Simbol Kelompok dan Nama-Nama Kelompok Menggunakan Pengujian-Pengujian Laboratorium[A]				Klasifikasi Tanah	
				Simbol Kelompok	Nama Kelompok[B]
TANAH BERBUTIR KASAR >50% tertahan ayakan No. 200	Kerikil (Lebih besar dari 50% Fraksi kasar yang tertahan ayakan No. 4)	Kerikil bersih (Butir halus[C] < 5%)	Cu ≥ 4 dan 1 ≤ Cc ≤ 3[D]	GW	Kerikil[E] bergradasi baik
			Cu < 4 dan/atau Cc < 1 atau Cc > 3[D]	GP	Kerikil[E] bergradasi jelek
		Kerikil dengan butir halus (Butir halus[C] > 12%)	Butir halus diklasifikasikan sebagai ML atau MH	GM	Kerikil[E,F,G] lanauan
			Butir halus diklasifikasikan sebagai CL atau CH	GC	Kerikil[E,F,G] lempungan
	Pasir (Lebih besar ≥ 50% Fraksi kasar yang lolos ayakan No. 4)	Pasir bersih (Butir halus[H] < 5%)	Cu ≥ 6 dan 1 ≤ Cc ≤ 3[D]	SW	Pasir[I] bergradasi baik
			Cu < 6 dan/atau Cc < 1 atau Cc > 3[D]	SP	Pasir[I] bergradasi jelek
		Pasir dengan butir halus (Butir halus[H] > 12%)	Butir halus diklasifikasikan sebagai ML atau MH	SM	Pasir[F,G,I] lanauan
			Butir halus diklasifikasikan sebagai CL atau CH	SC	Pasir[F,G,I] lempungan
TANAH BERBUTIR HALUS ≥ 50% lolos Ayakan No. 200	Lanau dan lempung Batas cair < 50	Non Organik	PI > 7 dan terletak pada atau di atas garis "A"	CL	Lempung[K,L,M] rendah
			PI < 4 atau terletak di bawah garis "A"	ML	Lanau[K,L,M]
		Organik	Batas cair - kering oven / Batas cair – tidak kering < 0,75	OL	Lempung[K,L,M,N] organik / Lanau[K,L,M,O] organik
	Lanau dan lempung Batas cair ≥ 50	Non Organik	PI terletak pada atau di atas garis "A"	CH	Lempung[K,L,M] tinggi
			PI terletak di bawah garis "A"	MH	Lanau[K,L,M] elastis
		Organik	Batas cair - kering oven / Batas cair – tidak kering < 0,75	OH	Lempung[K,L,M,P] organik / Lempung[K,L,M,O] organik
TANAH BERORGANIK	Secara primer terdiri atas zat-zat organik, berwarna gelap dan berbau organik			PT	Gambut

[A] Berdasarkan material lolos ayakan 3 inci (75 mm)
[B] Apabila contoh lapangan mengandung bongkahan atau kerakal, atau keduanya tambahkan "dengan bongkahan atau kerakal atau keduanya" pada nama kelompok
[C] Kerikil-kerikil dengan butiran halus 5% sampai dengan 12% diperlukan simbol ganda:
GW–GM Kerikil bergradasi baik dengan lanau
GW–GC Kerikil bergradasi baik dengan lempung
GP–GM Kerikil bergradasi jelek dengan lanau
GP–GC Kerikil bergradasi jelek dengan lempung
[D] $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$
[E] Apabila tanah mengandung ≥ 15% pasir, tambahkan "dengan pasir" pada nama kelompok
[F] Apabila butiran halus diklasifikasikan sebagai CL–ML gunakan simbol ganda GC–GM atau SC–SM.
[G] Apabila butiran halus adalah organik, tambahkan "dengan butiran halus organik" pada nama kelompok

[H] Pasir-pasir dengan butiran halus 5% sampai dengan 12% diperlukan simbol ganda:
SW–SM Pasir bergradasi baik dengan lanau
SW–SC Pasir bergradasi baik dengan lempung
SP–SM Pasir bergradasi jelek dengan lanau
SP–SC Pasir bergradasi jelek dengan lempung
[I] Apabila tanah mengandung ≥ 15% kerikil, tambahkan "dengan kerikil" pada nama kelompok
[J] Apabila batas-batas Atterberg berada di dalam daerah yang diarsir, tanah adalah lempung lanauan CL–ML
[K] Apabila tanah mengandung 15% sampai 29% tertahan ayakan No. 200, tambahkan "dengan pasir" atau "dengan kerikil" mana yang paling dominan
[L] Apabila tanah mengandung ≥ 30% tertahan ayakan No. 200 dan dominan pasir, tambahkan "pasiran" pada nama kelompok
[M] Apabila tanah mengandung ≥ 30% tertahan ayakan No. 200 dan dominan kerikil, tambahkan "kerikilan" pada nama kelompok
[N] PI ≥ 4% dan berada pada atau di atas garis "A"
[O] PI < 4% atau berada di bawah garis "A"
[P] PI berada di atas garis "A"
[Q] PI berada di bawah garis "A"

Gambar 3.1 Klasifikasi Tanah Menurut USCS

(Sumber: SNI 6317:2015)

3.1.2. Pengujian Properties Tanah

Sekumpulan tanah memiliki setidaknya dua hingga bagian di dalamnya, bagian-bagian ini bisa berupa butiran tanah (bagian padat), air pori dan pori-pori udara. Terdapat tiga fase tanah, yaitu tanah kering, tanah jenuh dan tanah tidak jenuh yang di mana dari ketiga jenis tanah ini memiliki bagian-bagian yang berbeda. Tanah kering hanya memiliki dua bagian (butir tanah dan pori udara), tanah jenuh juga hanya memiliki dua bagian (butiran atau bagian padat dan air pori), sedangkan tanah tidak jenuh memiliki semua bagian yang ada pada dua jenis tanah lainnya yaitu, tiga bagian (butiran atau bagian padat, pori udara dan air pori). Dapat dikatakan bahwa sekumpulan tanah memiliki dua hingga tiga bagian di dalamnya

dimana bagian ini bisa saja berupa air, udara maupun butiran atau bagian padat. Dalam mekanika tanah ada beberapa hubungan – hubungan volume yang sering kali digunakan yang dapat dilihat pada penjelasan di bawah.

1. Kadar Air (*w*)

   Kadar air merupakan salah satu metrik yang sangat penting yang dimana mempresentasikan kadar air yang ada antara perbandingan berat air (Ww) dengan berat butiran tanah (Ws). Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk memperhitungkan kadar air, dapat dilihat pada Persamaan 3.1 di bawah ini.

   $$W\,(\%) = \frac{Ww}{Ws}\ x\ 100 \qquad (3.1)$$

   dengan:

   Ww = berat air

   Ws = berat tanah kering

   w = kadar air

2. Berat volume (*density test*)

   Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui berat volume suatu sampel tanah, dimana akan didapatkan nilai perbandingan berat tanah total dan kandungan air di dalamnya. Berikut merupakan persamaan berat volume yang dapat dilihat pada persamaan 3.2 di bawah ini.

   $$\gamma = \frac{W_{2-}W_1}{V} \qquad (3.2)$$

   dimana:

   γ = berat volume (gr/cm^3)

   W_1 = Berat ring kosong (gr)

   W_2 = Berat ring + tanah basah (gr)

   Berikut merupakan nilai korelasi antara N-SPT dengan berat volume tanah yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.1 Korelasi Nilai N-SPT Dengan Berat Volume Tanah

Jenis Tanah	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_{unsat} (kN/m^3)
Kerikil	20-22	15-17
Pasir	18-20	13-16
Lanau	18-20	14-18

Lanjutan Tabel 3.1 Korelasi Nilai N-SPT Dengan Berat Volume Tanah

Jenis Tanah	γ_{sat} (kN/m^3)	γ_{unsat} (kN/m^3)
Lempung	16-22	14-21

(Sumber: *Soil Mechanic and Foundation, John Wiley & sons.,* 2000)

3. Berat volume basah (γ_b)

   Berat volume basah dalam satu satuan volume tanah yang merupakan perbandingan antara berat tanah basah (W) dengan volume tanah (V). Dimana dapat dilihat persamaannya pada persamaan 3.3 di bawah ini.

   $$\gamma_b = \frac{W}{V}$$

   $$\gamma_b = \frac{W_w + W_s + W_a}{V_a} \quad (3.3)$$

   dengan:

   γ_b = Berat volume basah

   W = Berat tanah basah

   V = Volume tanah

   W_w = Berat volume basah

   W_s = Berat butiran padat

   W_a = Berat udara ($W_a = 0$)

   V_a = Volume udara ($V_a = 0$)

4. Berat volume kering (γ_d)

   Berat volume kering dalam satu satuan volume tanah yang merupakan perbandingan antara berat tanah kering (butiran tanah) (W_s) dengan volume tanah (V). Yang dapat dilihat pada persamaan 3.4 di bawah ini.

   $$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.4)$$

   dengan:

   γ_d = Berat volume kering

   W_s = berat tanah kering (butiran tanah)

   V = Volume tanah

5. Berat volume butiran padat (γ_s)

Berat tanah butiran tanah kering dalam satu satuan volume butiran tanah yang merupakan perbandingan antara berat butiran padat (W_s) dengan volume butiran padat (V_s). Yang dapat dilihat pada persamaan 3.5 di bawah ini.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.5)$$

dengan:

γ_s = Berat volume butiran padat

W_s = berat butiran padat

V_s = Volume butiran padat

6. Berat jenis (Gs)

Berat jenis dideskripsikan sebagai nilai perbandingan antara berat butiran padat (W_s) dengan berat air (W_w) destilasi di udara dalam volume yang sama pada temperature tertentu ($20^{\circ}C$). Yang dapat dilihat pada persamaan 3.6 di bawah ini.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.6)$$

dengan:

G_s = Berat jenis tanah

γ_s = Berat volume butiran padat

γ_w = Berat volume air pada temperature atau suhu $20^{\circ}C$

Berikut ini merupakan kisaran nilai berat jenis tanah yang dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2 Nilai Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis (G_s)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organic	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Lanjutan Tabel 3.2 Nilai Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis (G_s)
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

7. Batas – batas Atterberg atau *Consistency of soil*

Salah satu karakteristik dari tanah berbutir halus adalah memiliki sifat plastisitas. Plastisitas merupakan kemampuan butiran tanah untuk tetap melekat satu sama lain (kohesif) atau kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume yang konstan tanpa retak. Untuk menentukan nilai plastisitas tanah, diperlukan kondisi fisik tanah pada kadar tertentu atau disebut Konsistensi. Konsistensi untuk setiap fase tanah beragam dan berbeda antara satu fase dengan fase yang lainnya, tergantung pada kadar air (w). Kedudukan fisik tanah lempung (kohesi) pada kadar air tertentu dibagi menjadi empat kondisi yaitu dapat berbentuk padat, semi padat, plastis dan cair (Atterberg, 1991). Dari keempat kondisi ini kedudukannya dibedakan oleh Batas cair (*Liquid limit*), batas plastis (*Plastic limit*) dan batas susut (*Shrinkage limit*), pembahasan lebih lanjut dapat dilihat pada butir-butir di bawah ini.

a. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair atau simbolkan dengan LL merupakan kondisi batas atas daerah plastis, dimana kadar air berada pada kondisi transisi dari kondisi cair ke plastis. Batas cair dapat diperhitungkan dengan uji Casagrande. Dengan berbagai proses dalam pengujian seperti penggunaan *grooving tool*, mengetuk sampel dengan alat penggetar dengan persentase kadar air yang diperlukan untuk menutup jelah adalah 12,7 mm, dilakukan 25 kali pukulan untuk menunjukkan tanah sebagai batas cair. Berikut merupakan persamaan untuk batas cair, yang dapat dilihat pada persamaan 3.7 di bawah ini.

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25}\right)^{tg\beta} \quad (3.7)$$

dimana:

LL = Batas Cair

N = Jumlah pukulan

w_N = kadar air (%)

$tg\beta$ = 0.121

b. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis atau disimbolkan dengan PL merupakan kondisi kedudukan kadar air berada pada kondisi transisi dari daerah plastis dan semi padat. Untuk menentukan batas plastis (PL) di tandai dengan adanya keretakan pada sampel tanah yang digulung dengan diameter ± 3 mm.

c. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Batas susut atau disimbolkan dengan SL merupakan kondisi kedudukan kadar air berada pada kondisi semi padat ke padat. Pada kondisi ini masa tanah tidak akan mengalami perubahan volume apabila kadar air berkurang. Untuk mendapatkan nilai batas susut dilakukan dengan menempatkan sampel tanah ke dalam *mold* lalu dikeringkan hingga terjadi pengurangan volume. Berikut merupakan persamaan untuk batas susut yang dapat dilihat pada persamaan 3.8 di bawah ini.

$$SL = \left(\frac{V_0}{W_0} - \frac{1}{G_s}\right) x\ 100\% \quad (3.8)$$

dimana:

SL = Batas susut tanah

V_0 = Volume tanah kering

W_0 = Berat tanah kering

G_s = Berat jenis tanah

d. Indeks Plastisitas (*Placiticy index*)Indeks plastisitas atau disimbolkan dengan PI merupakan kondisi yang menunjukkan sifat keplastisan tanah. Indeks plastisitas adalah kondisi selisih antara batas cair dan batas plastis. Semakin tinggi nilai PI maka butiran lempung dalam tanah banyak, sebaliknya jika PI rendah maka tanah menjadi kering karena adanya

pengurangan kadar air. Persamaan untuk memperhitungkan indeks plastisitas dapat dilihat pada persamaan serta Batasan mengenai nilai indeks plastisitas dapat dilihat pada persamaan 3.9 dan Tabel 3.3 di bawah ini.

$$PI = LL - PL \quad (3.9)$$

dimana:

PI = Indeks Plastisitas

LL = Batas Cair

PL = Batas Plastis

Tabel 3.3 Nilai Indeks Plastisitas

PI	Sifat	Jenis Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 – 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

8. Koefisien Permeabilitas/ *Coefficient of Permeability* (k)

Koefisien permeabilitas atau *coefficient of Permeability* adalah kemampuan tanah untuk meloloskan atau mengalirkan air melalui pori-pori. Semakin besar nilai permeabilitas semakin cepat air mengalir melalui tanah, sedangkan semakin kecil nilai permeabilitas semakin lama air mengalir melalui tanah. Berikut ini merupakan nilai kisaran permeabilitas yang dapat dilihat pada Tabel 3.4 di bawah ini.

Tabel 3.4 Kisaran Permeabilitas tanah (k) pada temperature 20^{o} C

Jenis Tanah	k (mm/det)
Butiran kasar	$10 - 10^{-2}$
Kerikil halus, butiran kasar bercampur pasir butiran sedang	$10^{-2} - 10$
Pasir halus, lanau longgar	$10^{-4} - 10^{-2}$
Lanau padat, lanau berlempung	$10^{-5} - 10^{-4}$
Lempung berlananu, lempung	$10^{-8} - 10^{-5}$

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

9. Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas atau *young's modulus* didefinisikan sebagai perbandingan antara teganan yang bekerja pada material dengan regangan yang dihasilkan selama material masih berada dalam batas elastis. Berikut ini merupakan nilai modulus elastasisitas yang dapat di lihat pada Tabel 3.5 di bawah ini.

Tabel 3.5 Nilai perkiraan modulus elastisitas tanah (Bowles, 1977)

Macam Tanah	**E (kg/cm^2)**
Lempung	
Sangat lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Keras	70 – 200
Berpasir	300 - 425
Pasir	
Berlanau	50 – 200
Tidak padat	100 – 250
Padat	500 – 1000
Pasir dan kerikil	
Padat	800 – 2000
Tidak padat	500 – 1400
Lanau	20 – 200
Loess	150 – 600
Cadas	1400– 14000

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

10. *Poisson's Ratio* (v)

Poisson's ratio atau rasio *poisson* didefinisikan perbandingan antara regangan lateral terhadap regangan aksial yang terjadi ketika suatu material mengalami pembebanan. Berikut nilai perkiraan angka poissin tanah yang dapat dilihat pada Tabel 3.6 di bawah ini.

Tabel 3.6 Nilai Perkiraan angka poisson tanah (Bowles, 1977)

Macam tanah	μ
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3
Lempung berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir padat	0,2 – 0,4
Pasir kasar (e = 0,4 – 0,7)	0,15
Pasir halus (e = 0,4 – 0,7)	0,25
Batu	0,1 – 0,4
Loess	0,1 – 0,3

(Sumber: Hardiyatmo, 2002

11. Sudut Gesek dalam (φ)

Sudut gesek dalam merupakan salah satu parameter yang menggambarkan besar tahanan terhadap geseran yang timbul akibat gesekan serta terjadi proses penguncian antar butir-butir tanah, ketika tanah menerima beban atau mengalami perubahan bentuk akibat gaya geser. Berikut merupakan nilai kisaran sudut geser dalam tanah pasir dari penyelidikan di lapangan yang dapat dilihat pada Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.7 Nilai Kisaran Sudut Geser Dalam Tanah Pasir

Kondisi	Sudut Gesek dalam (φ)
Sangat tidak padat	$< 30^{o}$
Tidak Padat	30^{o} - 35^{o}
Agak Padat	35^{o} - 40^{o}
Padat	40^{o} - 45^{o}
Sangat Padat	$>45^{o}$

(Sumber: Hardiytmo, 2002)

3.1.3. Kuat Geser Tanah

Kemampuan tanah untuk menahan gaya geser yang bekerja pada suatu bidang tanah sebelum terjadinya keruntuhan disebut dengan kuat geser. Kuat geser sangat diperlukan dalam konstruksi terutama dalam menganalisis stabilisasi tanah guna untuk meninjau ketahanan tanah dalam menahan beban struktur di atasnya maupun tekanan dari lingkungan di sekitar. Selain itu kuat geser tanah juga digunakan sebagai penentu parameter kuat geser tanah, parameter yang dimaksud adalah sudut gesek dalam (*internal friction*) atau disimbolkan dengan Ø dan kohesi (*cohesion*) yang disimbolkan *c*.

Hardiyatmo (2002) pada bukunya menjelaskan bahwa kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir -butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Hal ini mendasari adanya dua komponen penting yang menahan tanah apabila terjadi pembebanan yaitu

1. kohesi yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.
2. Gesekan antar butir – butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidangnya. Maka Coulumb (1776) dalam Hardiyatmo (2002) mendefinisikan f(σ) atau kuat geser pada persamaan 3.10 di bawah ini.

   $\tau = c + \sigma \text{ tg } \varphi$ (3.10)

   dimana:

   τ = Kuat geser tanah (Kn/m^2)

   c = Kohesi tanah (Kn/m^2)

   σ= Tegangan normal pada bidang runtuh (Kn/m^2)

   φ= Sudut geser dalam tanah (derajat)

   dari persamaan ini dapat divisualisasikan dengan grafik yang menjelaskan kondisi keruntuhan akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) dimana keruntuhan geser akan terjadi apabila mencapai titik yang ada pada garis selubung kegagalan (*failure envelope*).

   Persamaan kriteria kegagalan Mohr-Columb dalam Hardiyatmo (2002) dikatakan tegangan–tegangan efektif yang terjadi di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan air pori sehingga Terzaghi (1925) memodifikasi

persamaan Mohr-Columb menjadi persamaan berikut, yang dapat dilihat pada persamaan 3.11 di bawah ini

$\tau = c' + (\sigma - u)\ tg\ \varphi'$ (3.11)

$\tau = c' + \sigma'\ tg\ \varphi'$

dimana:

τ = Kuat geser tanah (kN/m^2)

c'= Kohesi tanah efektif (kN/m^2)

σ'= Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2)

φ' = Sudut geser dalam tanah efektif (derajat)

u = tekanan air pori (kN/m^2)

untuk menentukan nilai kuat geser tanah dapat dilakukan beberapa pengujian yang bisa ditempuh untuk menentukan nilai kuat geser tanah, yaitu dengan pengujian antara lain.

1. Uji geser langsung (*direct shear test*)
2. Uji triaksial (*triaxsial test*)
3. Uji tekan bebas (*unconfined compression test*)

Pada dasarnya kuat geser tergantung pada jenis kondisi tanah, dimana dalam Hardiyatmo (2002) dijelaskan kuat geser terbagi pada tiga kondisi jenis tanah yaitu, tanah pasir, tanah lempung, dan tanah tak jenuh. Penelitian ini akan membahas lebih terkait kuat geser tanah lempung.

3.1.4. Uji Triaksial (*Triaxial test*)

Uji triaksial merupakan salah satu pengujian laboratorium yang digunakan untuk mendapatkan nilai parameter kuat tanah, yaitu c dan Ø dalam tegangan total maupun efektif yang mendekati keadaan asli di lapangan.

Pengujian triaksial dilakukan dengan memasukkan benda uji kedalaman selubung karet tipis lalu diletakkan ke dalam tabung kaca, bagian luar dari tabung kaca diisi dengan air. Lalu alat pengujian triaksial dihubungkan dengan pengatur drainase ke dalam maupun ke luar dari benda uji. Untuk mendapatkan kegagalan geser, gaya aksial diberikan beban vertikal dari atas. Pada uji triaksial ini hanya meninjau dua dimensi sehingga terdapat dua tegangan pokok yaitu, tegangan utama

mayor (σ_1) dan tegangan utama minor (σ_3). Tegangan yang terjadi dari selisih tegangan utama mayor dan tegangan utama minor ($\sigma_1 - \sigma_3$) disebut sebagai tegangan deviator. Selain itu pada pengujian *drained* tegangan total akan sama dengan tegangan efektifnya. Jadi, tegangan utama mayor efektifnya $\sigma_1' = \sigma_1 = \sigma_3 + \Delta_\sigma$ dan untuk tegangan utama minor efektif $\sigma_3' = \sigma_3$. Pada saat keruntuhan terjadi, tegangan umata mayor efektif $(\sigma_1') = \sigma_3' + \Delta_{\sigma f}$. Hardiyatmo (2002) dalam bukunya membagi uji triaxial dalam 3 test percobaan yaitu, *Unconsolidated Undrained Test* (UU), *Consolidated Undrained Test* (CU) dan *Consolidated Drained Test* (CD).

1. *Unconsolidated Undrained Test* (UU)

   Uncosolidated Undrained Test atau *Quick test* ini dilakukan dengan membebani benda uji dengan penerapan tegangan keliling atau tegangan sel lalu dibebani dengan beban normal melalui penerapan deviator sampai mencapai keruntuhan. Pada penerapan deviator selama pergeserannya tidak diperbolehkan air keluar dari dalam benda uji atau dapat dikatakan selama pengujian berlangsung katup drainasi ditutup (*undrained*). Jika katup *drainase* ditutup beban normal tidak mengalami perpindahan ke butiran tanahnya, sehingga mengakibatkan adanya tekanan berlebih tekanan pori dengan tidak ada tahanan geser hasil perlawanan dari butiran tanah.

2. *Consolidated Undrained Test* (CU)

   Consolidated Undrained Test atau *consolidated quick test* (pengujian konsolidasi cepat) tidak terlalu berbeda dengan *Uncosolidated Undrained Test* tetapi pada pengujian CU benda uji dibebani dengan tegangan sel atau tegangan keliling dengan memperbolehkan air mengalir ke luar hingga konsolidasi selesai. Selanjutnya tegangan deviator diberikan dengan keadaan katup tertutup (*undrained*) hingga keruntuhan terjadi. Karena katup dalam keadaan undrained, volume tidak akan mengalami perubahan selama pergeserannya, sehingga pada pengujian CU ini ditemukan kelebihan tekanan air pori dalam benda uji.

3. *Consolidated Drained Test* (CD)

Sama halnya dengan dua pengujian lainnya, pada pengujian ini benda uji akan diberikan tegangan sel atau tegangan keliling namun pada pengujian ini katup dibiarkan dalam keadaan terbuka (*drained*) sampai konsolidasi selesai. Tegangan deviator yang bekerja diberikan dengan kecepatan yang rendah hingga terjadinya keruntuhan pada benda uji. Tegangan deviator yang diberikan dengan kecepatan rendah dimaksudkan untuk menjaga tekanan pori tetap nol selama proses pergeserannya. Seluruh tegangan ditahan oleh gesekan antar butiran pada kondisi ini.

Berikut ini merupakan nilai-nilai estimasi sudut gesek dalam dari hasil pengujian triaksial menurut Bowles (1977) dalam Hardiyatmo (2002) yang dapat dilihat pada Tabel 3.8 di bawah ini.

Tabel 3.8 Nilai estimasi sudut gesek dalam dari pengujian triaxial

Jenis Tanah	Macam Pengujian Triaxial		
	UU	**CU**	**CD**
Kerikil			
Ukuran sedang	40˚- 55˚	-	40˚- 55˚
Berpasir	35˚- 50˚	-	35˚- 50˚
Pasir			
Kering & tidak padat	28˚- 34˚	-	-
Jenuh & tidak padat	28˚- 34˚	-	-
Kering & padat	35˚- 64˚	-	43˚- 45˚
Jenuh & padat	1˚- 2˚kurang dari kering & padat	-	43˚- 50˚
Lanau atau pasir -berlanau			
Tidak Padat			
Padat	20˚- 22˚	-	27˚- 30˚
	25˚- 30˚	-	30˚- 35˚
Lempung	0˚(jika jenuh)	14˚- 20˚	20˚- 42˚

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

3.1.5. Beban lalu lintas

Beban lalu lintas merupakan beban yang akan di terapkan pada luasan permukaan jalan dan setiap kelas memiliki masing-masing beban lalu lintas sesuai dengan kelas jalannya. Kriteria beban lalu lintas sesuai dengan kelasnya dapat dilihat pada tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.9 Beban Lalu Lintas untuk Analisis Stabilisasi dan Beban di Luar Jalan

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)	Beban di Luar Jalan (kPa)
I	15	10
II	12	10
III	12	10

(Sumber: SNI 8460:2017)

3.2. Penurunan Tanah (*settlement*)

Penurunan tanah merupakan peristiwa yang terjadi dalam suatu pekerjaan konstruksi dimana peristiwa ini menggambarkan bagaimana suatu tanah lunak yang tidak dapat menahan beban tambahan yang diberikan di atasnya. Penurunan tanah lebih sering ditemui pada kasus tanah lunak yang memiliki nilai permeabilitas yang cenderung lebih rendah. Penurunan pada umumnya di bagi dalam dua kelompok besar, yaitu penurunan konsolidasi dan penurunan segera dalam penelitian ini.

3.2.1. Penurunan Segera (*immediate Settlement*)

Penurunan segera (*immediate settlement*) dengan simbol (Si) merupakan penurunan tanah yang terjadi segera setelah beban digunakan. Penurunan ini biasanya terjadi pada tanah berbutir kasar dan halus dengan kondisi tidak jenuh. Penurunan yang terjadi relativ kecil yang dipengaruhi oleh sifat elastisitas tanah. Semakin besar modulus elastisitas tanah semakin kecil penurunan yang terjadi. Selain itu, regangan dan tegangan yang tersebar di setiap lapisan tanah memengaruhi besarnya penurunan segera.

3.2.2. Penurunan Konsolidasi Primer (*Primary Consolidated settlement*)

Penurunan konsolidasi primer merupakan penurunan yang disebabkan adanya perubahan volume tanah selama air pori keluar dari tanah. Pada kondisi ini tegangan air pori secara kontinu berpindah ke dalam tegangan efektis yang diakibatkan kerena keluarnya air pori. Penurunan konsolidasi primer ini cenderung terjadi pada lapisan tanah kohesi seperti tanah lempung. Besaran penurunan

konsolidasi pada tanah kohesi tergantung pada bagaimana geologis tanah tersebut. Tegangan efektif pra-konsolidasi adalah tegangan efektif tertinggi yang dialami tanah sebelumnya, yang terjadi pada kedalaman tertentu. Tegangan efektif pra-konsolidasi ini tidak menentu bisa jadi tegangan pra-konsolidasi memiliki nilai yang sama dengan tegangan overbunden efektif pada saat itu atau dapat lebih kecil. Dengan adanya kondisi ini maka, penurunan konsolidasi di bagi menjadi 2 bagian besar yaitu tanah terkonsolidasi normal (*normally consolidated*) dan tanah terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*). Untuk menganalisis penurunan konsolidasi ini dapat dilakukan dengan memperhitungkan rumus *overconsolidation Ratio* (OCR) yang dijabarkan pada Persamaan 3.12 di bawah ini.

$$\text{OCR} = \frac{Pc\prime}{P0} \tag{3.12}$$

dimana,

Pc' = Tekanan pra-konsolidasi

P0 = Tekanan *Overburden* efektif

1. Tanah terkonsolidasi normal (*normally consolidated*)

   Pada tanah terkonsolidasi normal tegangan efektif yang membebani tanah pada waktu sekarang adalah nilai tegangan maksimum yang bekerja saat ini (OCR =1). Hal ini dapat dijabarkan dalam sebuah persamaan yang dapat dilihat pada persamaan 3.13 di bawah ini.

   $$Sc = \frac{Cc\ .H}{1+e0}\log\frac{Po' + \Delta p}{Po\prime} \tag{3.13}$$

   dimana,

   Sc = Penurunan konsolidasi primer

   Cc = Indeks pemampatan

   eo = Angka Pori awal

   Po' = Tekanan *Overbuden* efektif

   Δp = Tambahan tegangan akibat beban

2. Penurunan Tanah terlalu terkonsolidasi (*overconsolidated*)

   Kondisi ini menjelaskan keadaan dimana tekana efektif *overbunden* pada saat ini lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami oleh tanah tersebut sebelumnya (OCR > 1). Tekanan overbunden yang pernah dialami ini disebut juga sebagai

prakonsolidasi (*preconsolidated pressure*). Perhitungan angka penurunan *overconsolidated* ini terbagi menjadi 2 kondisi, hal ini dapat dijabarkan dalam sebuah persamaan yang dapat dilihat pada persamaan 3.14 dan 3.15 di bawah ini.

a. Apabila P0 + Δp > Pc', maka persamaan yang digunakan sebagai berikut :

$$Sp = \frac{Cs\ H}{1+eo}\log\frac{Pc}{Po} + \frac{Cc\ H}{1+eo}\log(\frac{Po+\Delta p}{Pc}) \quad (3.14)$$

b. Apabila P0 + Δp pc' ≤ Pc'

$$Sp = \frac{Cs\ x\ H}{1+eo}\log(\frac{Po+\Delta p}{Pc}) \quad (3.15)$$

dimana:

Sp = *Primary Settlement*,

Cs = indeks pemuaian [Cs = (0.2)Cc],

H = Tebal lapisan tanah,

eo = Angka Pori awal,

Pc' = Tekanan prakonsolidasi,

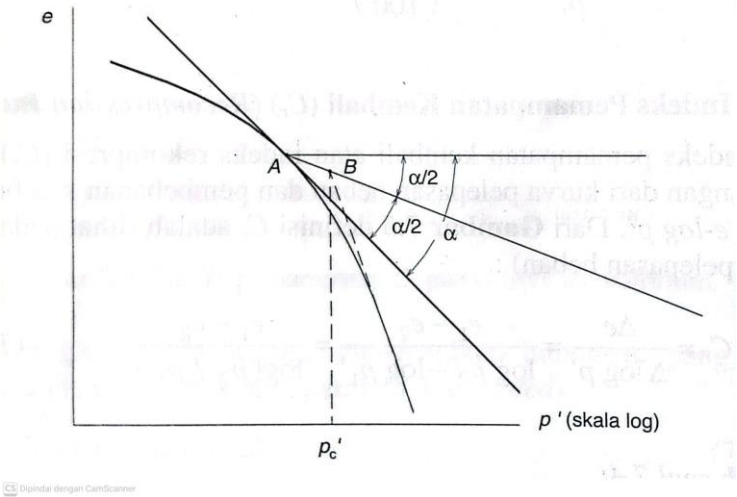
Cc = Indeks Kompresi tanah,

Δp = Distribusi tekanan,

P0 = Teknanan Overburden efektif.

Untuk memperhitungkan nilai Pc' (tekanan prakonsolidasi) dapat diperoleh dengan Metode *Cassagrande* pada grafik hubungan antara tekanan dan angka pori yang didapatkan dari hasil pengujian laboratorium. Berikut merupakan

gambar grafik Metode *Cassagrande* yang dapat dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Metode Cassagrande Pada Grafik e – log P'

(Sumber: Hardiyatmo, 1994)

Tekanan *overburden* awal (P0) merupakan salah satu tekanan yang memiliki peran penting dalam menentukan kondisi tegangan awal. Tekanan ini adalah tekanan vertikal efektif dari tanah asli yang berasal dari beban dan lapisan tanah di atas titik tanah asli. Tekanan *overburden* awal dapat dihitung dengan persamaan 3.16 di bawah ini.

$$P0 = \gamma' \text{ x } H \qquad (3.16)$$

dimana,

P0 = Tekanan overburden efektif awal,

γ' = Berat Volume tanah efektif,

H = Tebal Lapisan Tanah.

Distribusi Tegangan Tanah (ΔP) merupaksan salah satu perhitungan yang digunakan untuk menentukan seberapa besar beban memengaruhi tanah lunak. Tambahan tegangan yang dihasilkan dari pengaruh tambahan di atas tanah yang di tinjau di tengah-tengah lapisan disebut sebagai distribusi tegangan tanah. Distribusi tegangan tanah dapat dihitung dengan persamaan 3.17 di bawah ini.

$$\Delta P = 2 \times q_0 \times I \quad (3.17)$$

$$q_0 = \gamma_{timbunan} \times H_R$$

dimana,

ΔP = Tambahan Tegangan vertikal,

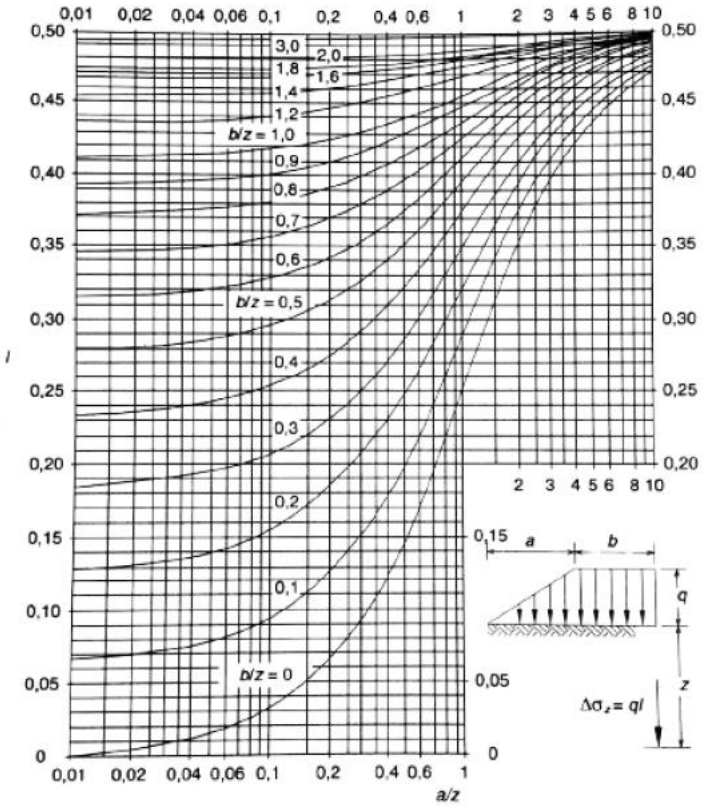
q_0 = Beban Timbunan,

$\gamma_{timbunan}$ = Berat Volumen Tanah timbunan,

H_R = Tinggi Timbunan,

I = Faktor pengaruh,

Nilai Faktor pengaruh (I) dapat diperhitungkan dengan grafik Faktor pengaruh Akibat Beban Timbunan, yang dapat dilihat pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Osterberg, 1957)

(Sumber: Hardiyatmo, 2002)

3.3. Konsolidasi

Konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume rongga pori dari tanah jenuh dengan permeabilitas rendah yang di akibatkan oleh pembebanan, proses ini sangat dipengaruhi oleh laju kecepatan air pori yang keluar dari rongga tanah (Hardiyatmo, 2002).

3.3.1. Konsolidasi Satu Dimensi

Konsolidasi satu dimensi (*one dimensional consolidation*) adalah proses berkurangnya volume tanah jenuh air, terutama tanah lempung akibat keluarnya air pori dikarenakan pembebanan. Teori mengasumsikan bahwa aliran air pori dan deformasi tanah hanya terjadi pada satu arah, yaitu arah vertikal.

Persamaan untuk memperhitungkan konsolidasi satu dimensi yang digagas oleh Terzaghi untuk menentukan nilai derajat konsolidasi arah vertikal (Uv) dapat dilihat pada Persamaan 3.18 di bawah ini.

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4\,x\,Tv}{\pi}}}{(1+(\frac{4Tv}{\pi})^{2,8})^{0,179}} \qquad (3.18)$$

dimana,

Uv = Derajat Konsolidasi arah vertikal,

Π = Phi (3,14),

Tv = Faktor waktu konsolidasi vertikal.

Untuk memperhitungkan factor waktu penurunan konsolidasi, Hardiyatmo (2002) dalam bukunya menyatakan persamaan 3.19 di bawah ini.

$$Tv = \frac{t\,x\,Cv}{Hdr^2} \qquad (3.19)$$

Dimana,

t = Waktu Konsolidasi

Tv = Faktor waktu konsolidasi vertikal,

Cv = Koefisien Konsolidasi vertikal,

Hdr = Panjang aliran (Hdr = 0,5 H).

3.4. Parameter Perhitungan Penurunan

Untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di dalam tanah perlu dilakukan juga perhitungan beberapa parameter untuk menghitung penurunan konsolidasi primer antara lain:

3.4.1. Koefisien Arah Vertikal (Cv)

Konsolidasi secara umum hanya terjadi pada satu dimensi, yaitu pada arah vertikal sehingga tidak ada aliran air lateral ataupun pergerakan tanah. Perhitungan koefisien arah vertikal dapat dijabarkan dalam persamaan 3.20 dan 3.21 di bawah ini.

$$Cv = \frac{Tv.H^2}{t} \quad (3.20)$$

$$Cv\ gab = \frac{(H1+H2+\cdots+Hn)^2}{(\frac{H1}{\sqrt{Cv1}}+\frac{H2}{\sqrt{Cv2}}+\cdots\frac{Hn}{\sqrt{Cvn}})^2} \quad (3.21)$$

Dimana:

Cv = koefisien konsolidasi vertikal,

Cv gab = Koefisien konsolidasi gabungan,

Tv = Faktor waktu

H = Panjang aliran yang harus ditempuh oleh air pori selama proses konsolidasi

t = waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi

H1 = Lapisan Tanah ke-1,

Hn = Lapisan Tanah ke-2.

3.4.2. Indeks Pemampatan (Cc)

Indek pemampatan merupakan salah satu parameter dalam perhitungan penurunan konsolidasi yang digunakan untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di lokasi sebagai akibat dari konsolidasi.Terzaghi & Peck (1967) dalam Hardiyatmo (2002) membagi persamaan untuk menghitung indeks pemampatan pada lempung yang dimana struktur tanahnya belum rusak atau tidak terganggu (*undisturbed*). Berikut merupakan persamaan yang dapat menjabarkan indeks pemampatan yang dapat dilihat pada persamaan 3.22 di bawah ini.

Cc = 0,009 (LL-10) (3.22)

Dimana:

Cc = Indeks pemempatan

LL = Batas Cair (%)

3.5. Stabilisasi Lereng

Stabilisasi lereng didasarkan dengan konsep keseimbangan plastis batas (*lim*it *plastic equilibrium*). stabilisasi lereng berangkat dari faktor-faktor yang terjadi di lapangan yang menyebabkan adanya ketidakseimbangan parameter tanah. Terzaghi (1950) dalam Hardiyatmo (1994) menyatakan penyebab terjadinya longsoran pada lereng diakibatkan oleh dua hal, yaitu akibat pengaruh dalam (*internal effect*) dan pengaruh luar (*external effect*). Stabilisasi tanah merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan parameter-parameter tanah ketika kondisi tanah eksisting tidak mampu memenuhi kriteria tanah yang stabil, seperti daya dukung tanah, penurunan dan potensi likuefaksi. Dengan adanya stabilisasi tanah dapat membantu memperbaiki dua komponen penting, yaitu meningkatkan kapasitas dukung tanah dengan penambahan bahan lain dan juga meningkatkan kapasitas dukung dengan meningkatkan parameter kuat geser tanah tersebut. Tujuan dengan adanya analisis stabilitas lereng untuk mencari faktor aman dengan meninjau tegangan geser rata – rata dan kuat geser rata-rata sepanjang bidang longsor.

3.5.1. Faktor Aman

Faktor aman didefinisikan sebagai perbandingan antara momen dari tahanan geser ($\sum M_r$) dan momen dari berat massa tanah ($\sum M_d$). Persamaan faktor aman dapat dilihat pada persamaan 3.23 dan 3.24 di bawah ini.

$$F = \frac{Jumlah\ momen\ dari\ tahanan\ geser\ sepanjang\ bidang\ longsor}{Jumlah\ momen\ dari\ berat\ massa\ tanah\ yang\ longsor}$$

$$= \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \quad (3.23)$$

Dimana:

F = Faktor aman

$\sum M_r$= momen tahanan geser

$\sum M_d$= momen berat massa tanah

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (Wi \cos\theta i - uiai)\ tg\emptyset}{\sum_{i=1}^{i=n} Wi \sin\theta i} \quad (3.24)$$

Dimana:

F = Faktor aman

c = Kohesi tanah (kN/m^2)

Ø = sudut gesek tanah (˚)

ai = panjang bagian lingkaran pada irisan ke- i (m)

Wi = berat irisan tanah ke- i (kN)

ui = tekanan air pori pada irisan ke–i (kN/m^2)

θi = sudut yang didefinikan dalam gambar

Berikut merupakan Nilai Safety Factor yang dapat dilihat pada Tabel 3.10 di bawah ini.

Tabel 3.10 Nilai *Safety Factor*

Konsekuensi kegagalan	Faktor Keamanan
Rendah	1,25
Tinggi	1,50
Biaya perbaikan lebih besar	1,50 – 2,00

(Sumber: SNI 8460:2017)

3.6. Perbaikan Tanah

Perbaikan tanah (*ground improvement*) merupakan suatu cara yang dilakukan untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat teknis tanah sehingga memenuhi persyaratan untuk mendukung suatu konstruksi. Perbaikan tanah di bagi menjadi tiga jenis, perbaikan secara mekanis, perbaikan secara modifikasi Hidrolik dan perbaikan secara fisika dan kimia. Terdapat berbagai metode yang dapat digunakan seperti, metode pemadatan getar (*vibro compaction*), prapembebanan (*preloading*) dengan timbunan, injeksi dan metode lainnya. Upaya perbaikan tanah lunak juga dapat dilakukan dengan menerapkan prapembebanan (*preloading*) dengan *stone column* atau kolom batuan.

3.6.1. Metode *Preloading*

Metode *preloading* atau prapembebanan merupakan teknik yang dengan memberikan beban sementara pada tanah sebelum dilakukan konstruksi. Metode *preloading* ditujukan untuk membantu mengkonsolidasikan tanah, dengan

memanfaatkan tanah timbunan dengan ketinggian tertentu agar proses konsolidasi dapat terjadi dengan baik. Perhitungan tinggi timbunan rencana dapat dilihat pad persamaan 3.25 di bawah ini.

$H_R = q / \gamma_{timbunan}$ (3.25)

Dimana:

H_R = Tinggi timbunan rencana,

q = Beban rencana,

γtimbunan = Berat Volume tanah timbunan.

3.6.2. Metode *Stone Column*

Stone column merupakan salah satu metode perbaikan yang dilakukan dengan memadatkan tanah dengan teknik getaran yang dimana bersamaan dengan mengganti tanah yang memiliki parameter yang kurang bagus dengan tanah yang lebih baik. *Stone column* terdiri material kerikil yang ditanam dalam tanah kohesi atau tanah lembek dan berfungsi untuk menambah daya dukung tanah. Proses penggantian tanah asli yang memiliki parameter kurang bagus ini biasanya dilakukan dengan menggali tanah dasar lalu mengganti tanah dengan parameter yang lebih baik dengan menimbun tanah pada daerah penggalian. *Stone column* dilakukan dengan melakukan pengeboran pada titik yang akan direlokasi dengan menggunakan metode *vibrometer* sampai kedalaman yang ditentukan lalu mengisi bagian itu dengan agregat untuk proses pemampatan. *Stone column* bersifat tulangan dalam suatu lapisan tanah sehingga beban timbunan badan jalan akan dipikul oleh dua komponen utama, yaitu tanah dasar dan *stone column* itu sendiri.

Kebutuhan perhitungan dan permodelan *stone column* tergantung pada kondisi lapangan suatu konstruksi berlangsung, namun beberapa parameter utama yang secara umum harus dipersiapkan dalam proses analisis dan permodelan atau desain *stone column* dapat dilihat pada penjabaran di bawah ini.

1. Jarak *stone column*

   Dalam proses perbaikan tanah dengan metode *stone column* untuk menentukan jarak antar *stone column* satu dan lainnya bervariasi bergantung pada kebutuhan dan masalah yang ada pada lapangan. (Iskandar dkk, 2016).

Jarak antar *stone column* (kolom batuan) secara umum berkisar antara 1,5 m-3,5 m. Jarak yang di terapkan pada proses analisis dapat berbeda bergantung pada kedalaman tanah yang diperbaiki, proses pelaksanaan dan sensitivitas tanah pada lokasi.

2. Kedalaman *stone column*

   Kedalaman pemasangan *stone column* bergantung pada permasalah tanah dasar yang ada di lapangan, kedalaman pemasangan *stone column* dapat mengikuti data lapangan seperti bor log atau menyesuaikan dengan kondisi tanah dilapangan yang bermasalah. (Kamila dkk, 2022). Kedalaman efektif *stone column* (kolom batuan) berkisar antara 6 m-10 m.

3. Diameter dan Pola Pemasangan *stone column*

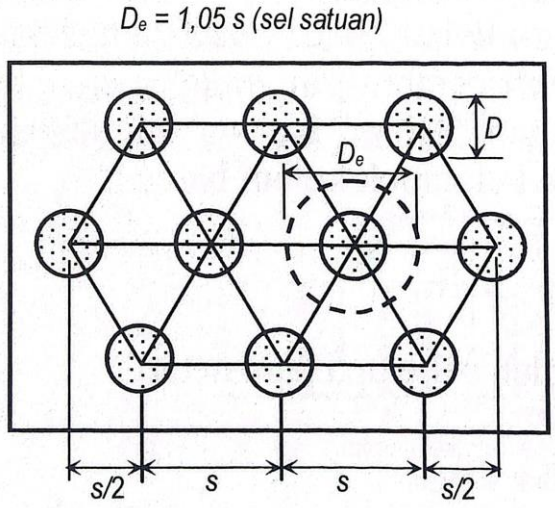
   Stone column atau kolom batuan dimodelkan dengan bentuk silinder dengan penampang melintang berupa lingkarang dengan diameter D. Besar nilai diameter *stone column* atau kolom batuan berpengaruh terhadap Rasio penggantian area (*area replacement ratio*), yaitu perbandingan antara luas tampang kolom batuan dan luas total sel satuan. Beberapa faktor seperti sifat tanah yang akan diperbaiki, besarnya beban yang dipikul, dan pola pemasangan yang digunakan menjadi pertimbangan untuk menentukan diameter *stone column* atau kolom batuan. Selama proses analisis, stone column dan tanah lunak di sekitarnya disederhanakan menjadi satu unit yang disebut *unit cell*. Metode ini digunakan untuk menyederhanakan perhitungan tanpa mengurangi gambaran tentang bagaimana sistem beroperasi secara keseluruhan. *Unit cell* bergantung pada pola pemasangan *stone column*. Secara umum susunan pemasangan *stone column* yang sering digunakan di kelompokan menjadi dua, yaitu susunan segitiga sama sisi dan susunan bujur sangkar. Bentuk anggapan area yang mewakili kolom batuan dengan pola segitiga sama sisi sebenarnya berbentuk segi enam tetapi dalam hitungan dianggap berbentuk lingkaran dengan luas keduanya sama yang memiliki diameter efektif lingkar (D_e).

   Pada penelitian ini digunakan variasi diameter dan jarak yang berbeda untuk pemasangan stone column. Terdapat tiga skema dengan skema 1 diameter

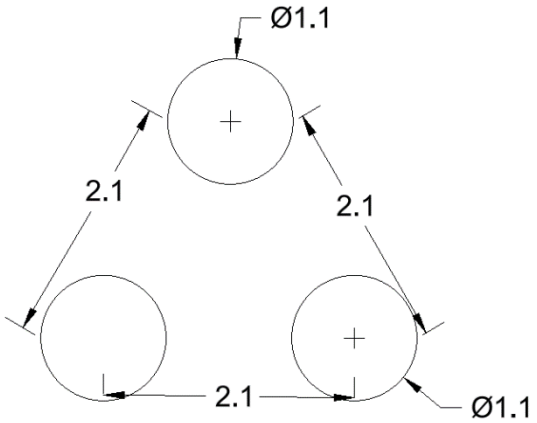
sebesar 1,1 m dan jarak 2,1 m, skema 2 dengan diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m dan skema 3 dengan diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m. Diameter ekuivalen untuk pola segitiga dan bujur sangkar dapat dilihat pada persamaan 3.26 dan 3.27 serta *layout* pemasangan *stone column* dengan pola segitiga secara umum dan layout pemasangan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 sampai 3.7 di bawah ini.

D_e pola segitiga sama sisi = 1,05 s (3.26)

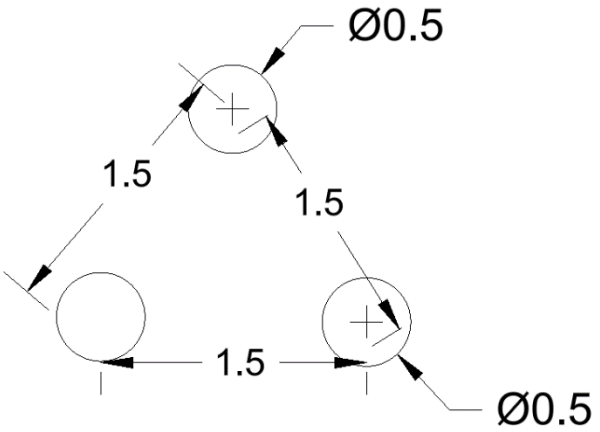
D_e pola bujursangkar = 1,13 s (3.27)



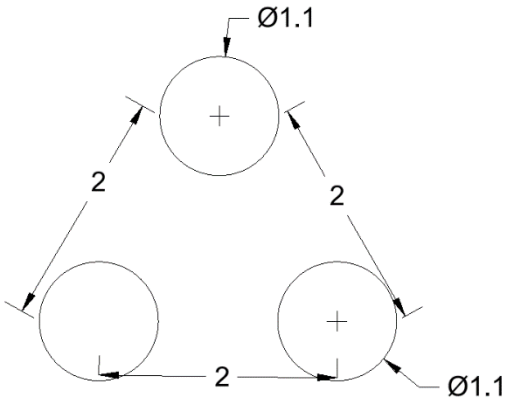
Gambar 3.4 Layout Pemasangan *Stone Column* Pola Segitiga Sama Sisi



Gambar 3.5 Layout pola pemasangan *Stone column* skema 1 (diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m)



Gambar 3.6 Layout pola pemasangan *Stone column* skema 2 (diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m)



Gambar 3.7 Layout pola pemasangan *Stone column* skema 3 (diameter 1,1 m dan jarak 2 m)

3.7. Program PLAXIS 2D V21

PLAXIS atau *Plane Strain and Axial Symmetry* merupakan salah satu program komputer yang sangat familiar dalam bidang teknik sipil terutama dalam bidang geoteknik. Dalam sejarahnya PLAXIS adalah program yang di kembangkan pada tahun 1987 oleh salah satu kampus terbaik di Belanda yaitu *Delft University of Technology*. Program ini digunakan untuk menganalisis stabilisasi tanah dengan menggunakan metode elemen hingga yang mampu melakukan analisis sehingga

dapat mendekati perilaku tanah yang sebenarnya. PLAXIS mampu juga menganalisa faktor aman, tegangan dalam tanah dan parameter lain.

Beberapa tahapan secara umum yang perlu di perhatikan dan digunakan dalam proses analisis menggunakan PLAXIS, diantaranya dapat dilihat pada penjabaran di bawah ini.

1. *Input* data

   Pada tahapan input data ini akan dilakukan permodelan kondisi tanah asli yang ada di lapangan, selanjutnya dilakukan input data – data yang di perlukan seperti data *properties* tanah. Sehingga pada tahapan awal ini menghasilkan kondisi tanah asli di lapangan tanpa ada penambahan atau pengurangan data.

2. *Calculation*

   Setelah semua data yang diperlukan sudah melawati proses input data, pada tahapan kedua ini akan dilakukan proses perhitungan atau analisis yang sesuai dengan kebutuhan kondisi di lapangan.

3. *Output*

   Dari dua tahapan yang sudah dilakukan sebelumnya, proses *calculation* atau analisis ini akan menghasilkan *output* atau hasil akhir dari analisi dan permodelan yang sudah dilakukan. *Output* yang dihasilkan beragam dapat berupa angka, gambar ataupun kurva.

4. *Curve*

   Tahapan akhir yang akan dilalui dalam proses analisis menggunakan PLAXIS adalah *curve* atau kurva. PLAXIS mampu menggambarkan kurva hubungan antara variabel yang diperhitungkan. Yang dimana kurva ini bisa digunakan sebagai perbandingan setelah dilakukan analisis.

BAB IV
METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian Tugas Akhir ini berada di Teluk Balikpapan, Balikpapan Barat, Balikpapan, Kalimantan Timur dengan proyek yang ditinjau adalah Proyek Pembangunan *Nickel Smelter*.



Gambar 4.1 Lokasi Penelitian

4.2. Prosedur Analisis

Prosedur analisis pada sub-bab ini terdiri dari beberapa tahapan, seperti pengumpulan data, analisi data dan permodelan dengan PLAXIS 2D v21. Tahapan-tahapan yang dimaksud sebagai berikut.

4.2.1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan salah satu tahapan yang sangat penting untuk dilakukan dalam suatu penelitian. Dalam penelitian ini beberapa data yang dikumpulkan sebagai berikut.

1. Data Borelog
2. Data uji N-SPT
3. Data parameter tanah hasil uji laboratorium
4. Gambar Rencana Kerja

5. Referensi berupa jurnal-jurnal terkait.

Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data uji N-SPT pada titik BHL04 di lapangan dan hasil uji laboratorium. Data pengujian titik BHL.04 dapat dilihata pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian N-SPT di Lapangan

Kode titik	Metode	Kedalaman		N-SPT	Deskripsi	Konsistensi
		Awal	Akhir			
BHL.04	Pembebanan Inti	0 3 5,0	3,0 5,0 5,5	0 0 0	Lanau campur pasir berwarna abu-abu Lempung campur pasir berwarna abu-abu	Sangat Lunak
		5,5 7,0 7,5	7,0 7,5 8,5	3 3 8	Lempung berpasir berwana abu-abu	Lunak Teguh
		8,5	9,0	8		Sangat Teguh
		9,0 9,5	9,5 10,0	8 60	Pasir halus berwarna cokelat	Keras
		10,0	11,0	60	Pasir halus berwarna cokelat keabu-abuan	
		11,0 15,0	15,0 20,0	60 60	Pasir Halus berwarna cokelat kekuningan Pasir halus berwarna cokelat keabu- abuan	Sangat Keras

Sumber: Data Sekunder Pengujian Laboratorium Titik BHL.04

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Laboratorium

Kode Sampel	**Kedalaman (m)**	**Kadar Air**	**Densitas**		**Specific Gravity**	**Angka Pori**	***Unconfine Compression***	**Sudut geser Dalam**	**Kohesi**	
		W (%)	γ (gr/cm³)	γ (kN/m³)	Gs	e	u (kg/cm	φ (°)	c (kg/cm²)	c (kN/m²)
BHL.04 UDS.01	3,0 – 3,5	52,6	1,429	14,01	2,627	0,61	0,880	25,32	0,080	7,85
BHL.04 UDS.02	7,0 – 7,5	48,9	1,624	16,10	2,634	0,44	0,094	28,25	0,155	15,20

Tabel 4. 3 Klasifikasi Tanah berdasarkan USCS

No.BHL	Batas Atterberg			Hidrometer tes & Analisa Saringan				Karakteristik Tanah
	LL	PL	PI	Lempung	Lanau	Pasir	Kerikil	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	CL - ML dimana tanah merupakan percampuran antara *clay* (lempung) & *Silt* (lanau) yang memiliki plastisitas yang rendah
BHL.04 UDS.01	25,89	21,37	4,52	43,35	45,13	11,52	0	
BHL.04 UDS.02	26,01	21,5	4,51	42,75	45,19	12,06	0	

(Sumber: Data Hasil Pengujian Laboratorium)

4.2.2. Analisis Data

Analisis data yang dilakukan dalam penilitian ini menggunakan metode analitik dan pemrograman PLAXIS 2D v21 keduanya memiliki *output* yang sama yaitu, untuk mendapatkan Waktu dan nilai penurunan konsolidasi tanah. Berikut merupakan perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini.

1. Memperhitungkan nilai OCR (*overconsolidated Ratio*)
2. Menghitung nilai konsolidasi primer
3. Waktu dan nilai penurunan konsolidasi tanah

Pada penelitian digunakan Program PLAXIS 2D v21 untuk permodelan dan juga memperhitungkan waktu dan nilai penurunan konsolidasi tanah dengan adanya perkuatan tanah *Stone Column* dan tanpa perkuatan tanah *Stone Column*. Berikut merupakan tahapan analisis sebagai berikut.

1. Menyiapkan data parameter tanah sesuai dengan uji laboratorium
2. Membuat lembar kerja baru pada PLAXIS 2D
3. Mengatur dimensi untuk permodelan program PLAXIS 2D
4. Menpersiapkan geometri proyek
5. Mengatur parameter material
6. Menghitung kebutuhan konstruksi sesuai tinjauan

7. Menganalisa hasil analisis PLAXIS 2D

Tahapan kerja yang digunakan pada proses analisis dengan PLAXIS disederhanakan dalam bentul tabel dengan dua kondisi yaitu, kondisi *Preloading* dan kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 sampai Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.4 Tahapan Kerja PLAXIS 2D kondisi *Preloading*

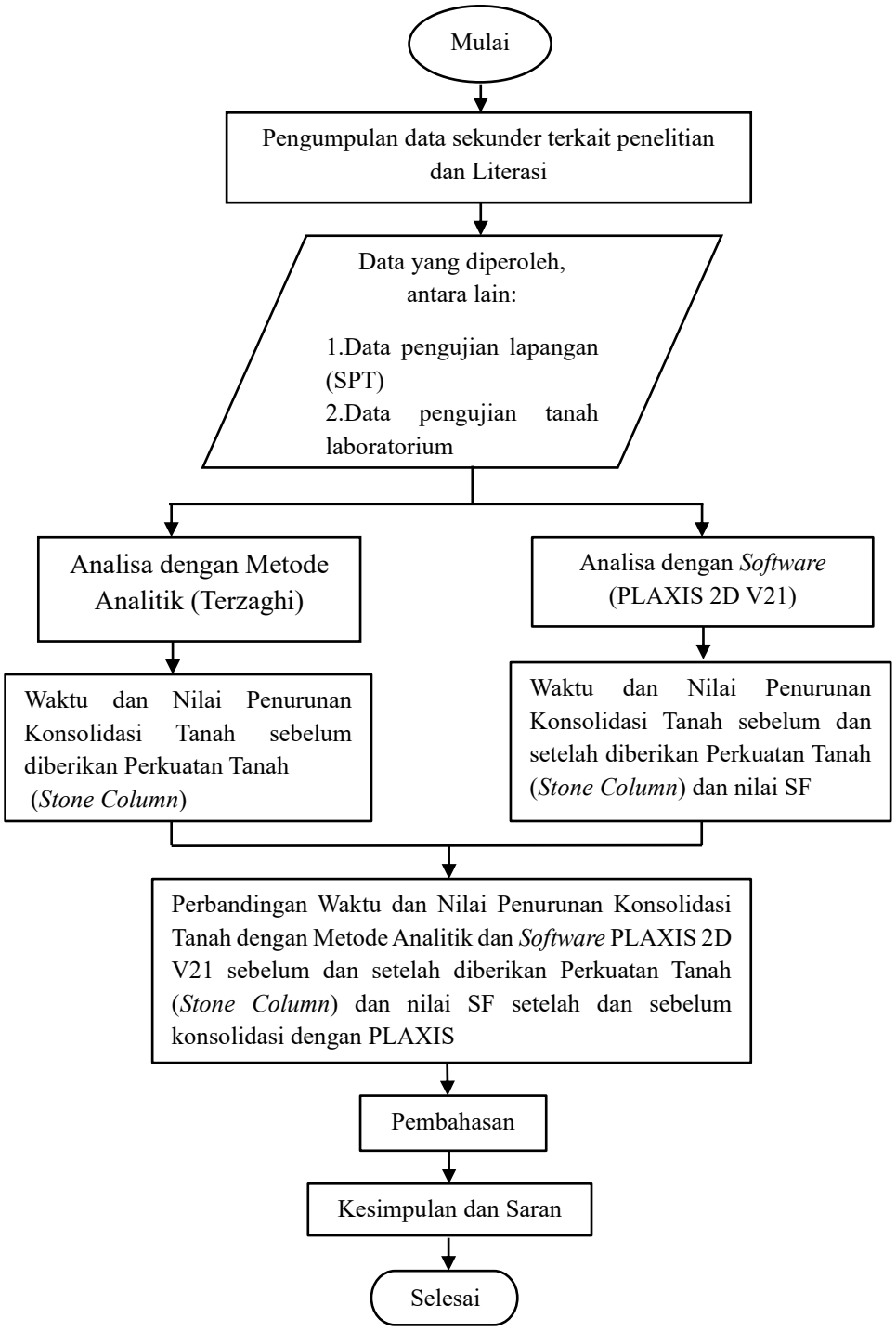
No	Tahapan	Uraian Pekerjaan
1	*Soil*	Persiapan geometri dengan memasukkan parameter tanah yang di butuhkan dan menentukan sifat material.
2	*Structure*	Membentuk geometri setiap lapisan tanah dan geometri timbunan sesuai dengan rencana
3	*Mesh*	Pilih opsi Generate Mesh dan element distribution "*very fine*"
4	*Flow conditions*	Membuat *Water Level*
5	*Staged Constructions.*	Menentukan *phase* dan parameter *phase* dan menganalisis *Degree of Consolidation*

Tabel 4.5 Tahapan Kerja Program PLAXIS 2D kondisi *Preloading* dengan *Stone column*

No	Tahapan	Uraian Pekerjaan
1	*Soil*	Persiapan geometri dengan memasukkan parameter tanah yang di butuhkan dan menentukan sifat material.
2	*Structure*	Membentuk geometri setiap lapisan tanah dan geometri timbunan sesuai dengan rencana dan diikuti dengan membuat geometri *stone column* sesuai dengan spesifikasi yang sudah direncanakan.
3	*Mesh*	Pilih opsi Generate Mesh dan element distribution "*very fine*"
4	*Flow conditions*	Membuat *Water Level*
5	*Staged Constructions*	Menentukan *phase* dan parameter *phase* dan menganalisis *Degree of Consolidation*

4.3. Bagan Alir

Berikut merupakan penjabaran Bagan Alir penelitian yang dilakukan dari awal proses penelitian dimulai hingga selesaianya penelitian ini. Bagan alir dapat dilihat pada Gambar 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Data Analisis

Data tanah yang digunakan untuk analisa tugas akhir ini diambil pada lokasi proyek pembangunan *nickel smelter* yang berlokasi di Balikpapan, Kabupaten Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur. Pada lokasi penelitian dilakukan pengambilan data tanah pada dua titik *bore hole.* Data pengambilan titik *bore hole* disajikan pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Data Pengambilan Titik *Bore hole*

No. BHL	Kedalaman	Jenis tanah (USCS)
BHL.04 UDS.01	-{03.00 – 03.50}	CL-ML
BHL.04 UDS.02	-{07.00 – 07.50}	CL-ML

Sumber: Data sekunder Lapangan

Dari beberapa titik *Bore hole* yang di ambil pada lokasi proyek, penelitian ini menggunakan data sekunder dengan titik *bore hole* BHL.04 UDS.01 dan UDS.02. Dimana pada titik Bor hole deengan kedalaman tersebut jenis tanah di dominasi tanah campuran lanau dan lempung (CL-ML) dengan plastisitas rendah. Setelah didapatkan Titik *Bore hole* dengan kondisi tanah seperti itu, dilakukan perhitungan parameter tanah seperti kadar air, berat volume *saturated* maupun *unsaturated* dan parameter yang lain yang digunakan untuk proses analisis.Berikut parameter tanah untuk BHL 04 UDS. 01 dan UDS.02 disajikan dalam Tabel 5.2 di bawah ini.

Tabel 5.2 Parameter Tanah BHL.04

Karakteristik	Simbol	Satuan	Lapisan BHL.04				Tanah Timbunan
			Lap. 1	Lap.2	Lap.3	Lap.4	
Kedalaman	H	m	0 - 5	5 - 7	7 - 9	9 - 20	+7
Kadar Air	W	%	0,53	0,49	0,49	0,10	-
Berat Volume (*Unsaturated*)	γ	kN/m^3	14,02	16,11	16,11	20	16
Berat Volume (*Saturated*)	γ_{sat}	kN/m^3	19,7	20,9	20,9	21,3	18
Berat Volume (kering)	γ_d	kN/m^3	9,19	10,81	10,81	18,26	-
Angka Pori	e	-	0.607	0,44	0,44	0,44	0,60
Sudut gesek dalam	φ	^{o}	25,32	28,25	27	45	38
Kohesi	c	kN/m^2	7,85	15,2	15,2	15	11
Koef. Permeabilitas	k	m/hari	0,000086	0,000475	0,000475	0,000864	0,0864
Modulus Elastisitas	E	kN/m^2	3000	4000	4000	51000	11000
Sudut Dilatasi	ψ	^{o}	0	0	0	15	5
Koef. Konsolidasi	Cv	-	0,0025	0,0193	0,0193	3,0929	-
Possion's ratio	v	-	0,30	0.35	0,35	0,25	0,25

5.2. Analisis Perhitungan Analitik

Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan manual (analitik) dengan menggunakan teori Terzaghi. beberapa tahapan perhitungan yang akan dijabarkan pada pembahasan di bawah ini.

5.2.1. Menentukan Properties Awal

1. Perhitungan Nilai *Overconsolidation Ratio* (OCR)

Tahapan pertama dalam perhitungan manual (metode analitik) ini dilakukan perhitungan nilai *Overconsolidation Ratio* (OCR) dengan tujuan untuk menganalisis jenis konsolidasi yang terjadi pada tanah yang di tinjau apakah masuk dalam kategori *Normally consolidation* atau *Underconsolidation.* Selain itu, nilai OCR dapat digunakan untuk menentukan waktu konsolidasi. Untuk mendapatkan nilai OCR diperlukan nilai tegangan *overburdend* (P0) dan nilai Tekanan konsolidasi max efektif (Pc'). Nilai P0 dan Pc' dapat di hitung dengan persamaan 3.16 di bawah ini.

P0 = γ' x H

P0 1 = (19,7 - 9,81) x 5

= 49,66 kN/m2

Tabel 5.3 Rekapitulasi Nilai Tegangan Overbunden Efektif (Po)

Lapisan	Tegangan Overbunden Efektif (P0) (kN/m2)
1	49,66
2	100,18
3	100,18
4	228,90
Total	149,845

Dari hasil perhitungan Tegangan *Overbunden* Efektif didapatkan nilai Total P0 sebesar 149,845 kN/m2. Untuk mendapatkan nilai tekanan prakonsolidasi (Pc') digunakan Grafik Tekanan vs Angka Pori yang dimana data tersebut didapatkan dari hasil uji laboratorium. Berdasarkan grafik Tekanan vs Angka Pori didapatkan nilai Pc' sebesar 1,2 Kg/cm2 atau 117,68 kN/m2. Maka, nilai OCR bisa didapatkan dengan persamaan 3.12 di bawah ini.

$$OCR = \frac{P0}{Pc'}$$

$$= \frac{49,66}{117,68}$$

$$= 2,370 > 1$$

Nilai OCR yang didapatkan sebesar 2,370 yang berarti nilai OCR1 ini lebih besar dari 1. Maka, konsolidasi tanah masuk dalam kategori *Overconsolidated type*. Rekapitulasi perhitungan OCR dapat dilihat pada Tabel 5.5 di bawah ini.

Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Nilai OCR

Lapisan	Nilai OCR (kN/m2)	Kategori
1	2,370	*Overconsolidated*
2	1,175	*Overconsolidated*
3	1,175	*Overconsolidated*
4	0,514	*Underconsolidated*

2. Menghitung Nilai Indeks Kompresi Tanah (Cc)

Untuk menghitung Nilai Indeks Kompresi Tanah (Cc) digunakan persamaan 3.22 di bawah ini. Diikuti dengan pemaparan hasil rekapitulasi nilai cc pada Tabel 5.6 dibawah ini.

Cc = 0,009 x (LL-10)

Cc = 0,009 x (25,89 – 10)

= 0,143

= 1,236

Tabel 5.5 Rekapitulasi Nilai Indeks Kompresi Tanah (Cc)

Lapisan	Batas Plastis (LL) (%)	Nilai Cc	
		-	-
1	25,89	0,143	1,236
2	26,01	0,144	1,245
3	26,01	0,144	1,245
4	11,11	0,287	0,027

3. Menghitung Koefisien Konsolidasi Vertikal Gabungan (Cvgab)

Pada penelitian ini nilai Cv didapatkan dari data sekunder. Dalam penelitian ini menggunakan Cvgabungan yang dihitung menggunakan persamaan 3.21 di bawah ini.

$$\text{Cvgab} = \frac{(H1+H2+\cdots+Hn)^2}{(\frac{H1}{\sqrt{Cv1}}+\frac{H2}{\sqrt{Cv2}}+\cdots+\frac{H3}{\sqrt{Cv3}})^2}$$

$$= \frac{(5+2+2+11)^2}{(\frac{5}{\sqrt{0,0025}}+\frac{2}{\sqrt{0,0193}}+\frac{2}{\sqrt{0,0193}}+\frac{11}{\sqrt{3,0929}})^2}$$

$$= 0,02194 m^2/hari$$

5.2.2. Perhitungan Penurunan Konsolidasi Primer dengan Metode Terzaghi

Pada perhitungan Penurunan Konsolidasi ini ada beberapa analisis perhitungan yang dilakukan, seperti tinggi timbunan rencana, perhitungan nilai distribusi tegangan dan perhitungan lain yang penjabarannya sebagai berikut.

1. Perhitungan Tinggi Timbunan Rencana

   Pada penelitian ini diketahui nilai γtimbunan =16 kN/m^3 dengan elevasi rencana tanah eksisting Hel = +7m, sehingga perhitungannya sebagai berikut.

   q = H_{el} x γtimbunan
   = 7 x 16
   = 112 kN/m^2

   dengan mendapatkan nilai q maka dapat dilakukan perhitungan Tinggi rencana dengan persamaan di bawah ini.

   $H_R = \frac{q}{\gamma\text{timbunan}}$
   $= \frac{112}{16}$
   = 7 m

2. Perhitungan Nilai Distribusi Tegangan Tanah ΔP

   Perhitungan nilai ΔP dapat diperhitungkan dengan persamaan di bawah ini.

   q_0 = H_R x γtimbunan
   = 7 x 16
   = 112 kN/m^2

Nilai I didapatkan melalui Grafik Osterberg, 1975 pada Gambar 3.4 sehingga diketahui nilai a = 40 m, b = 80 m, dan z = 20 m

a/z = 40/20

= 2 m

b/z = 80/20

= 4 m

Maka, didapatkan nilai I sebesar 0,5. Sehingga nilai distribusi tegangan tanah sebagai berikut.

$\Delta P = 2 \times q_0 \times I$

$= 112\ kN/m^2$

3. Perhitungan Penurunan Konsolidasi Tanah

Perhitungan penurunan tanah konsolidasi primer pada lapisan pertama diperhitungkan dengan persamaan di bawah ini.

$P_0 + \Delta P > Pc'$

$49{,}66 + 112 > 117, 68$

$161{,}66 > 117, 68$

Dengan diketahui

$H_1 = 5\ m$

$Cc_1 = 1{,}236\ m^2$ /hari

$Cs_1 = 0{,}2 \times C_c$

$= 0{,}2 \times 1{,}236$

$= 0{,}247\ m^2$/hari

E01 = 0,607

P01 = 49,66 kN/m^2

$\Delta P = 112\ kN/m^2$

Sehingga dapat dilakukan perhitungan penurunan tanah konsolidasi sebagai berikut.

$$S_{p1} = \frac{Cs\ x\ H}{1+ e_0} \log \left(\frac{Pc\prime}{P0\prime}\right) + \frac{Cc\ x\ H}{1+ e_0} \log \left(\frac{P0+ \Delta p}{Pc\prime}\right)$$

$$= \frac{0{,}247\ x\ 5}{1+ 0{,}607} \log \left(\frac{117{,}68}{49{,}66}\right) + \frac{1{,}236\ x\ 5}{1+ 0{,}607} \log \left(\frac{49{,}66+ 112}{117{,}68}\right)$$

$= 0{,}818\ m$

Untuk perhitungan lapisan 2 hingga 4 dirangkap menjadi satu dalam Tabel 5.7 Rekapitulasi Penurunan Tanah Konsolidasi di bawah ini.

Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Penurunan Tanah Konsolidasi Primer

Lapisan Tanah	H (Ketebalan) (m)	Cc (kN/m^2)	Cs (kN/m^2)	e_0	P_0 (kN/m^2)	Sp (m)
1	5	1,236	0,247	0,607	49,66	0,818
2	2	1,245	0,249	0,44	100,18	0,467
3	2	1,245	0,249	0,44	100,18	0,467
4	11	0,229	0,046	0,44	228,90	0,082
Total Penurunan Tanah						1,285

5.2.3. Perhitungan Derajat Konsolidasi Metode *Preloading* Tanpa Perkuatan *Stone Column*

Untuk memperhitungkan persamaan konsolidasi tanpa menggunakan Perkuatan *Stone Column* di jabarkan dan diperhitungkan dengan beberapa peersamaan di bawah ini.

H_{dr} = 0,5 x H

= 0,5 x 7

= 3,5 m

$Tv_{\text{hari ke-1}} = \frac{t\ x\ Cv}{Hdr^2}$

$= \frac{1\ x\ 0{,}02194}{3{,}5^2}$

= 0,001790 hari

$Uv_{\text{hari ke-1}} = \frac{\sqrt{\frac{4\ x\ Tv}{\pi}}}{(1+\frac{4Tv}{\pi})^{2.8})^{0.179}}$

$= \frac{\sqrt{\frac{4\ x\ 0{,}001790}{3{,}14}}}{(1+\frac{4(0{,}001790)}{3.14})^{2.8})^{0.179}}$

= 0,04775 ~ 4,77 %

Dari perhitungan Hdr, Tv dan Uv pada penurunan tanah dengan waktu t =1 dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini.

S_1 = Uv_1 x $S_{p(Total)}$

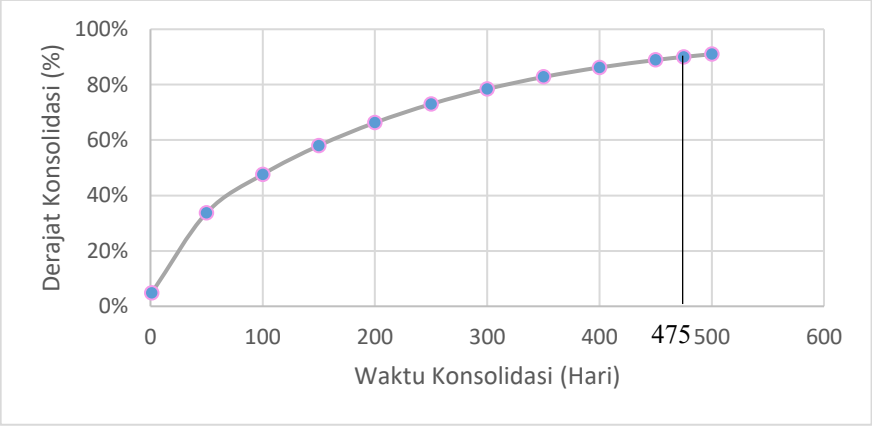
= 0,04775 x 1,285

= 0,06136 m

Hasil Rekapitulasi perhitungan derajat konsolidasi tanpa perkuatan *stone column* dapat dilihat pada Tabel 5.8 dan Grafik derajat Konsolidasi terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 5.1 di bawah ini.

Tabel 5.7 Hasil Rekapitulasi Perhitungan Derajat Konsolidasi Tanpa Perkuatan *Stone Column*

t	Cv gabungan	Tv	Uv 90%	S
Hari	m^2/hari			m
1	0,2719	0,0018	0,0478	0,0614
50		0,0895	0,3375	0,4338
100		0,1791	0,4762	0,6119
150		0,2686	0,5798	0,7451
200		0,3582	0,6627	0,8517
250		0,4477	0,7300	0,9381
300		0,5373	0,7843	1,0079
350		0,6268	0,8277	1,0637
400		0,7164	0,8620	1,1078
450		0,8059	0,8889	1,1423
475		**0,8507**	**0,9001**	**1,1567**



Gambar 5.1 Grafik Konsolidasi Terhadap Waktu Tanpa Perkuatan *Stone Column*

Kesimpulan yang didapatkan bahwa, untuk mencapai derajat konsolidasi 90% pada penelitian ini diperlukan waktu 475 hari dengan besar penurunan 1,1567 m.

5.3. Analisis Menggunakan Program *PLAXIS 2D v21*

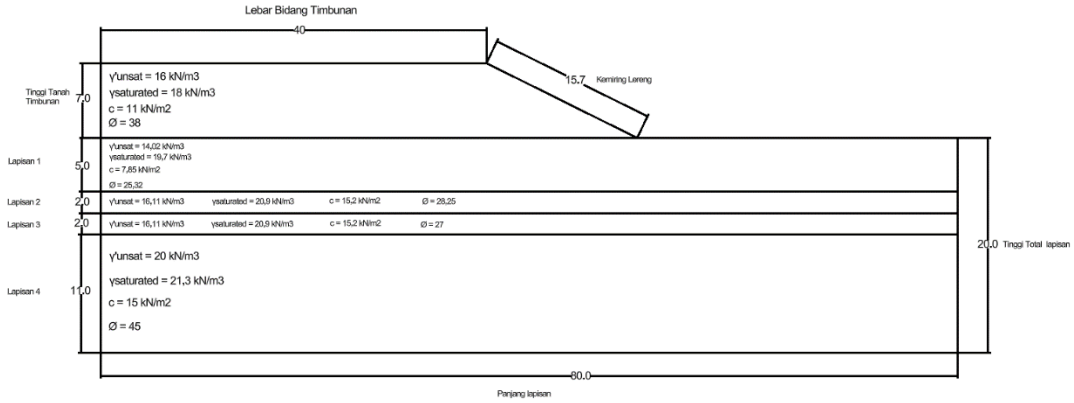
Pada penelitian ini dilakukan analisis dengan menggunakan *Software* PLAXIS 2D v21, tahapan yang dilakukan pertama dengan menggambarkan geometri tanah pada halaman kerja PLAXIS dan memasukkan parameter tanah yang di perlukan sehingga didapatkan dua *output* berbeda yaitu, Pola deformasi tanah (*deformed mesh*) dan Perpindahan total (*Total displacement*). Parameter tanah yang digunakan dalam sistem PLAXIS dapat dilihat pada Tabel 5.9 dibawah ini.

Tabel 5.8 Parameter Tanah pada PLAXIS 2D

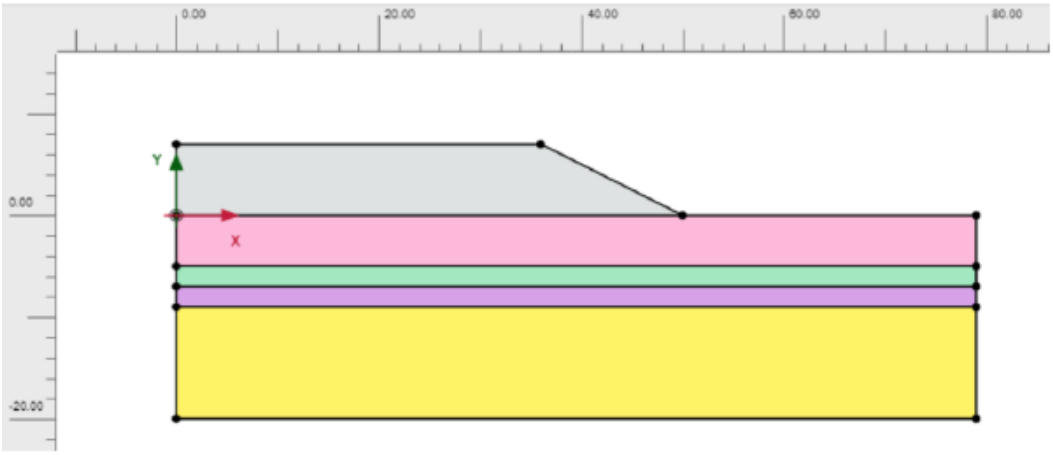
Karakteristik	Simbol	Satuan	Lap.1	Lap.2	Lap.3	Lap.4	Tanah Timbunan
Elevasi	H	m	-5,0	-7,0	-9,0	-20	+7
B. Volume (*Unsaturated*)	γ	kN/m^3	14,02	16,11	16,11	20	16
B. Volumen (*Saturated*)	γsat	kN/m^3	19,7	20,9	20,9	21,3	18
Angka Pori	e	-	0,607	0,44	0,44	0,44	0,60
Modulus Elastisitas	E	kN/m^2	3000	4000	4000	51000	11000
Poisson's Ratio	v	-	0,30	0,35	0,35	0,25	0,25
Kohesi	c	kN/m^2	7,85	15,2	15,2	15	11
Sudut Gesek Dalam	φ	°	25,32	28,25	27	45	38
Sudut Dilatasi	ψ	°	0	0	0	15	5
Koef. Permeabilitas	k		0,000086	0,000475	0,000475	0,00086	0,0864

5.3.1. Analisis Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan PLAXIS 2D v21

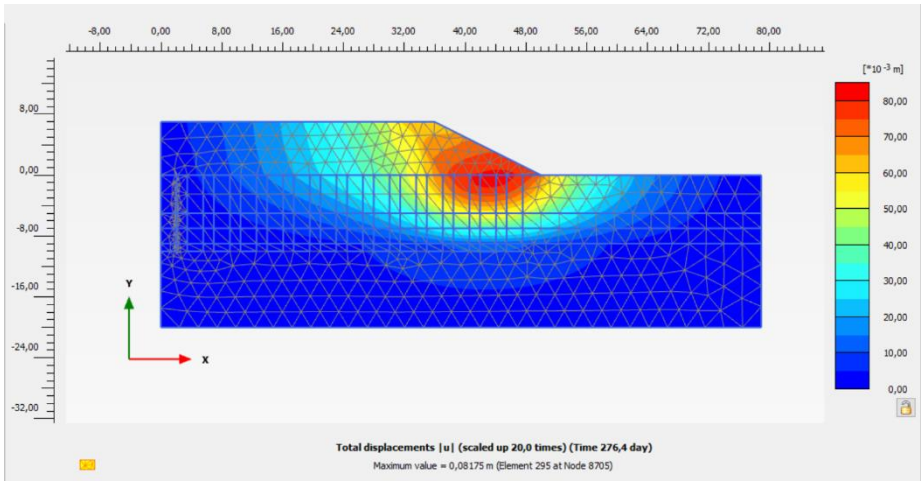
Berdasarkan hasil analisis dengan program PLAXIS 2D v21 dengan tidak menambahkan Perkuatan Tanah (*Stone Column*) atau metode *Preloading* kondisi eksisting didapatkan hasil analisis dengan nilai penurunan tanah maksimum sebesar 0,08175 m dengan waktu 276,4 hari. Hasil *output* dengan PLAXIS 2D v21 dapat dilihat pada Gambar 5.2 hingga 5.4 di bawah ini.



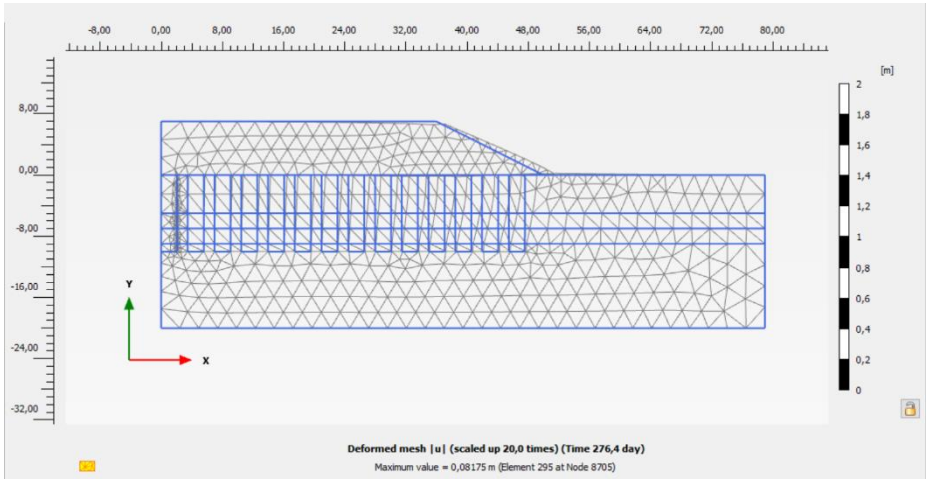
Gambar 5.2 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone Column*) dengan *Autocad*



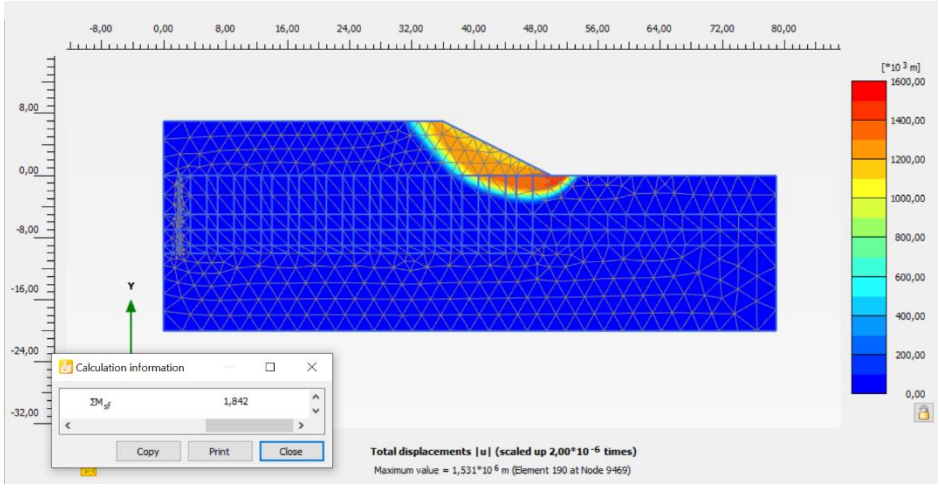
Gambar 5.3 Permodelan PLAXIS 2D Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone Column*) PLAXIS 2D



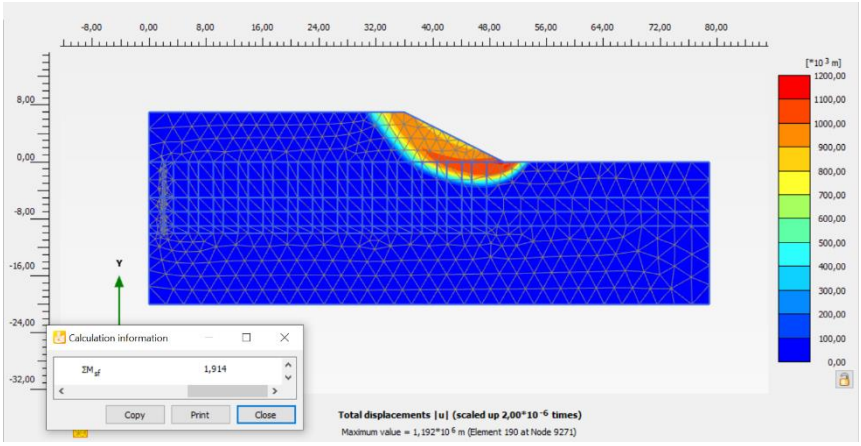
Gambar 5.4 *Total Displacement* kondisi Beban Timbunan Tanpa *Stone Column* PLAXIS 2D



Gambar 5.5 *Deformed Mesh* Kondisi Beban Timbunan Tanpa *Stone Column* PLAXIS 2D



Gambar 5.6 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone column*) PLAXIS 2D



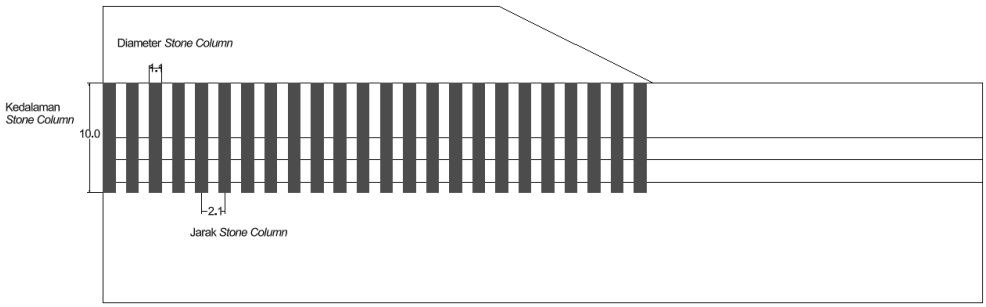
Gambar 5.7 Safety Factor Setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* (Tanpa *Stone column*) PLAXIS 2D

5.3.2. Analisis Konsolidasi Tanah dengan *Stone Column PLAXIS 2D v21*

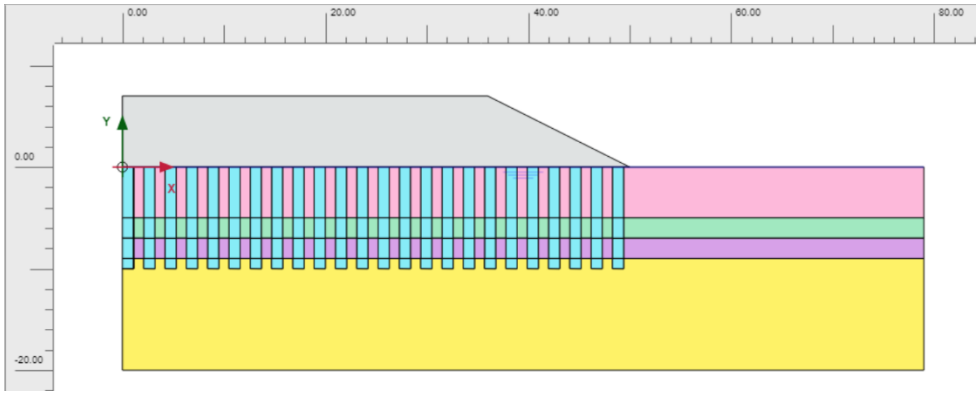
Untuk menganalisis Konsolidasi Tanah dengan *PLAXIS 2D v21* dengan menambahkan *Stone Column* pada penelitian ini menggunakan tiga variasi diameter dan jarak dengan pola pemasangan segitiga. Untuk tiga variasi diameter dan jarak di bagi menjadi Skema 1 dengan diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m, skema 2 dengan diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m dan skema 3 dengan diameter 1,1 m dan jarak 2 m dengan pembahasan setiap skema di jabarkan di bawah ini.

1. Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan *Stone Column* Skema 1

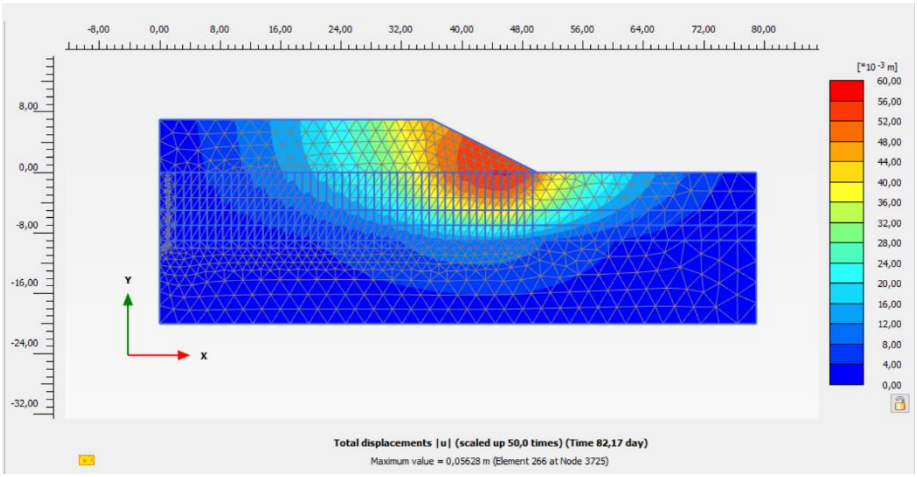
   Pada analisis skema 1 ini metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone column* dengan Variasi Diameter 1,1 m dan Jarak antar *stone column* (s) 2,1 m. dari hasil analisis skema 1 ini di dapatkan nilai penurunan tanah maksimum (*Displacement Total*) sebesar 0,05628 m dengan waktu 82,17 hari. Hasil *Output* dapat dilihat pada Gambar 5.8 hingga 5.13 di bawah ini.



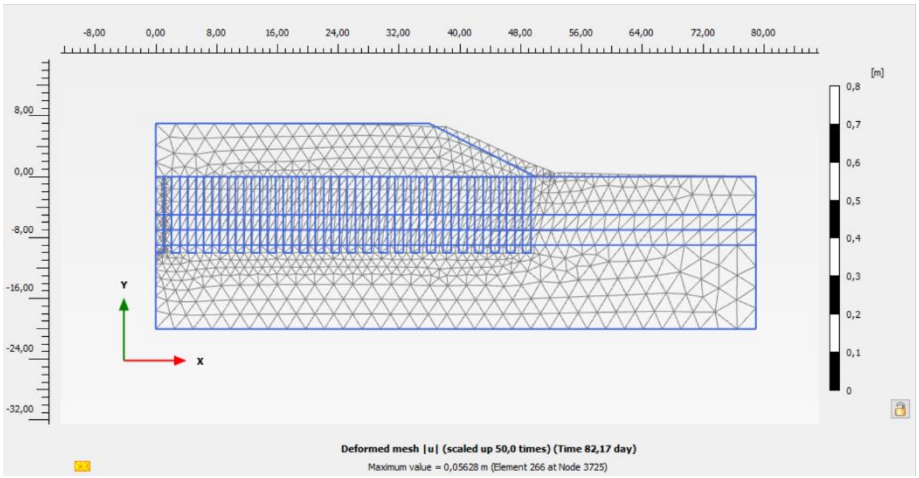
Gambar 5.8 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column Autocad* Skema 1



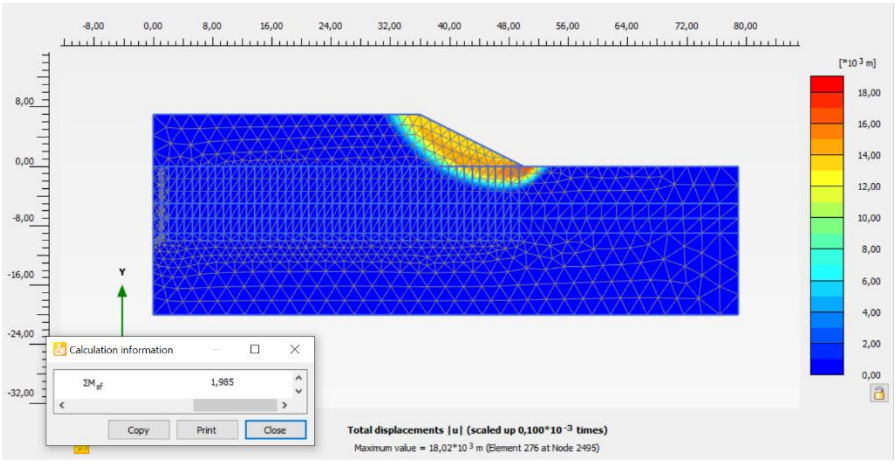
Gambar 5.9 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1



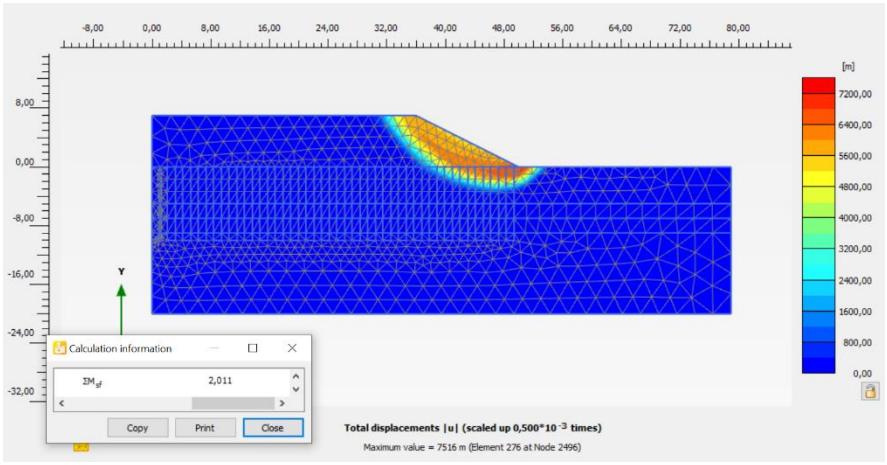
Gambar 5.10 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 1



Gambar 5.11 *Deformed Mesh* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 1



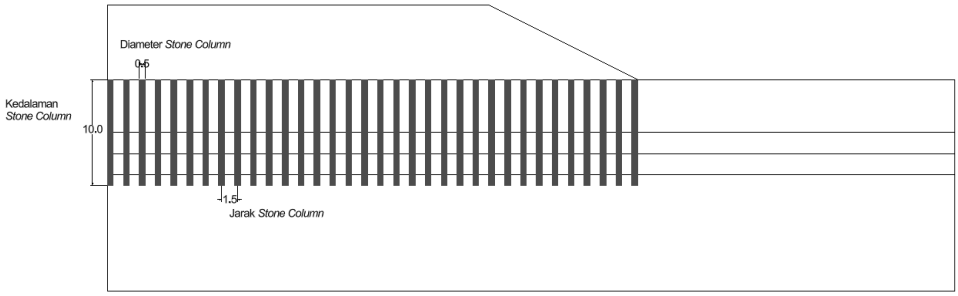
Gambar 5.12 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1



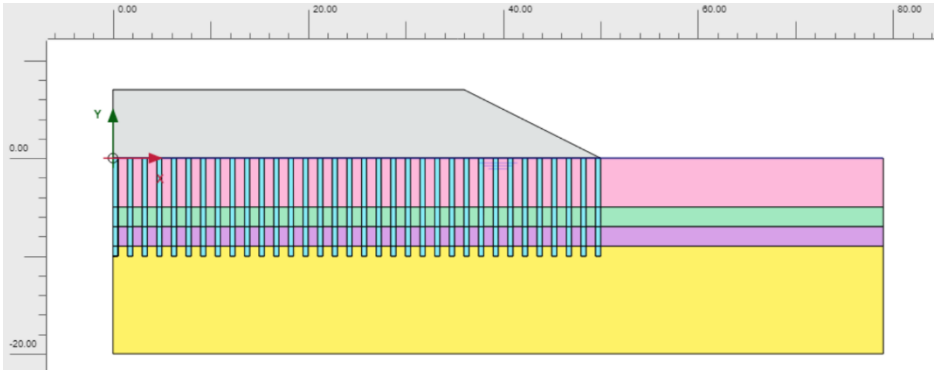
Gambar 5.13 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 1

2. Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan Kombinasi *Stone Column* Skema 2

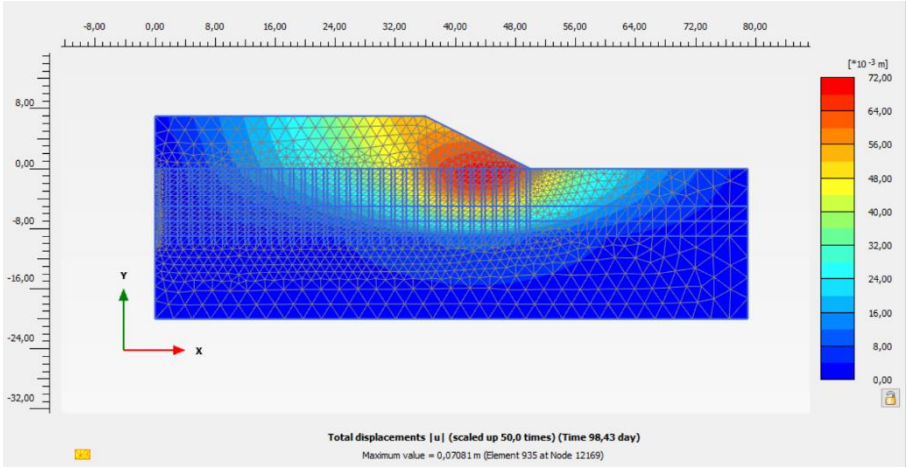
   Pada analisis skema 2 ini metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone column* dengan Variasi Diameter 0,50 m dan Jarak antar *stone column* (s) 1,5 m. dari hasil analisis skema 2 ini di dapatkan nilai penurunan tanah maksimum (*Displacement Total*) sebesar 0,07081 m dengan waktu 98,43 hari. Hasil *Output* dapat dilihat pada Gambar 5.14 hingga 5.19 di bawah ini.



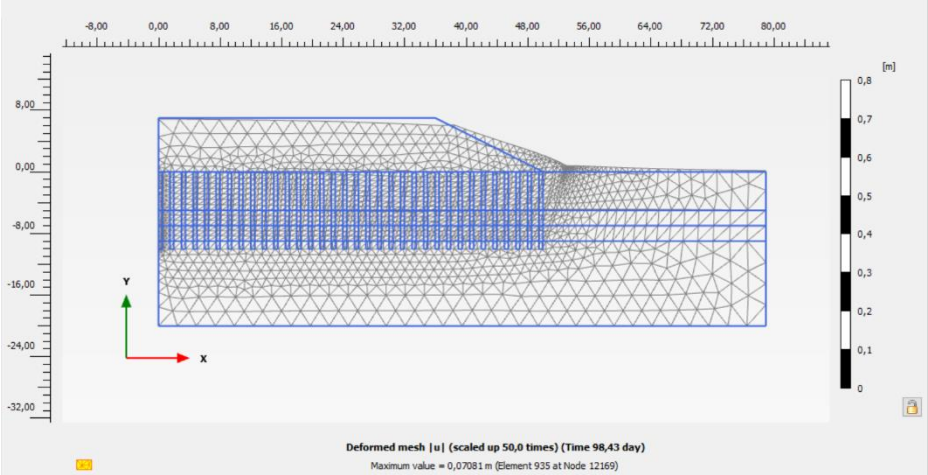
Gambar 5.14 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column Autocad* Skema 2



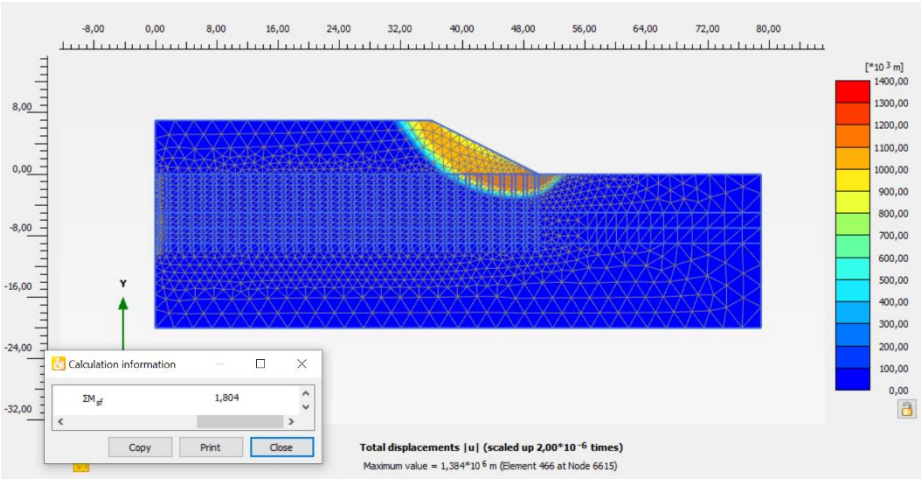
Gambar 5.15 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D Skema 2



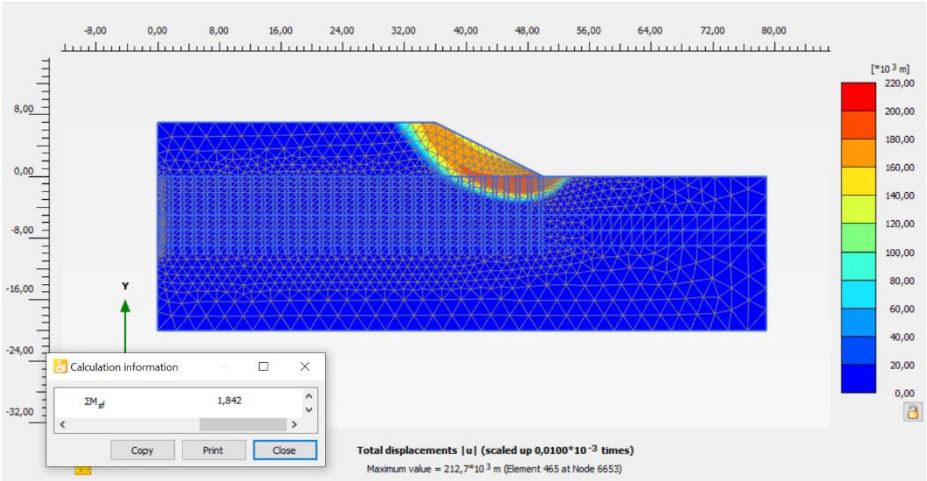
Gambar 5.16 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 2



Gambar 5.17 *Deformed Mesh* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 2



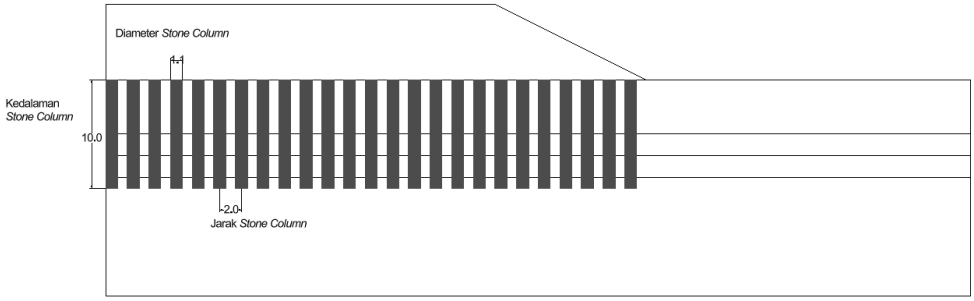
Gambar 5.18 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 2



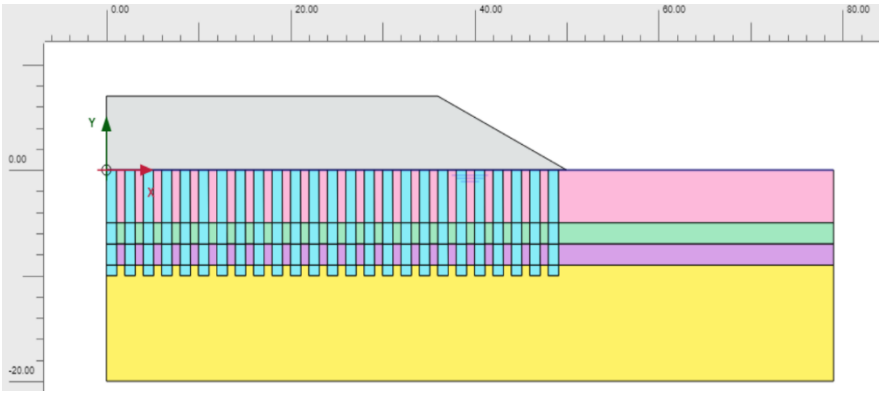
Gambar 5.19 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 2

3. Konsolidasi Tanah Metode *Preloading* dengan Kombinasi *Stone Column* Skema 3

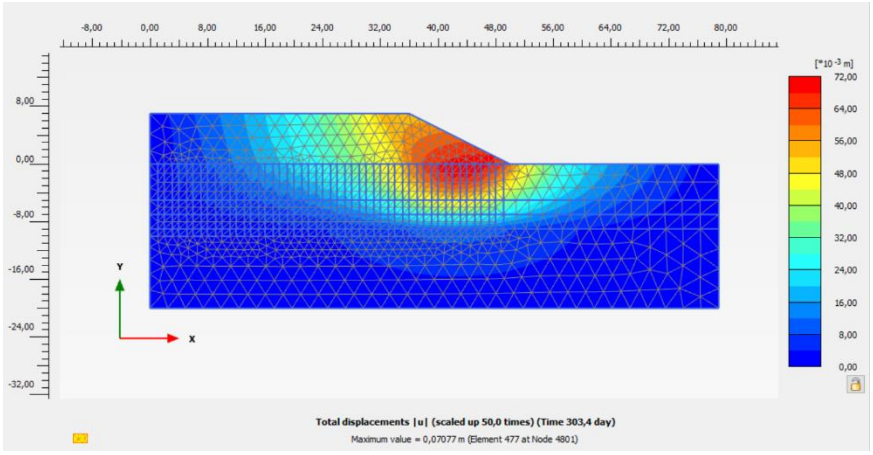
   Pada analisis skema 3 ini metode *preloading* dikombinasikan dengan *Stone column* dengan Variasi Diameter 1,1 m dan Jarak antar *stone column* (s) 2 m. dari hasil analisis skema 3 ini di dapatkan nilai penurunan tanah maksimum (*Displacement Total*) sebesar 0,07077 m dengan waktu 303,4 hari dengan safety factor sesudah dan sebelum konsolidasi adalah sebesar 1,788 dan 1,845. Hasil *Output* dapat dilihat pada Gambar 5.20 hingga 5.26 di bawah ini.



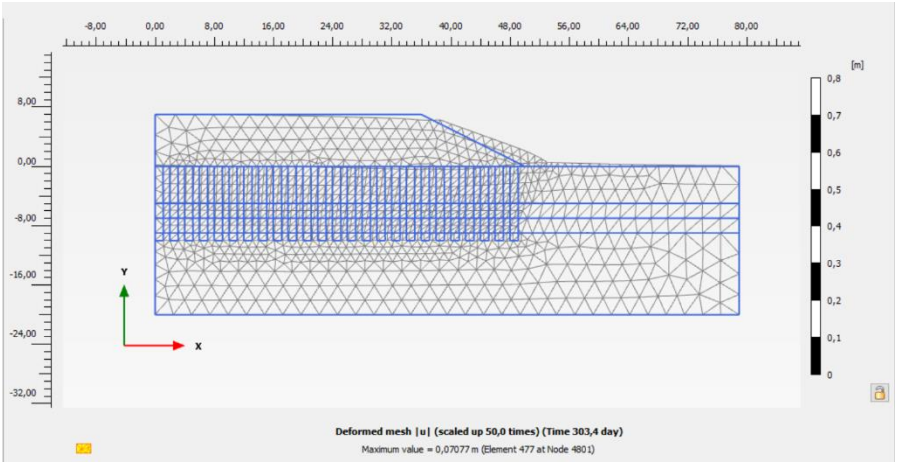
Gambar 5.20 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column Autocad* Skema 3



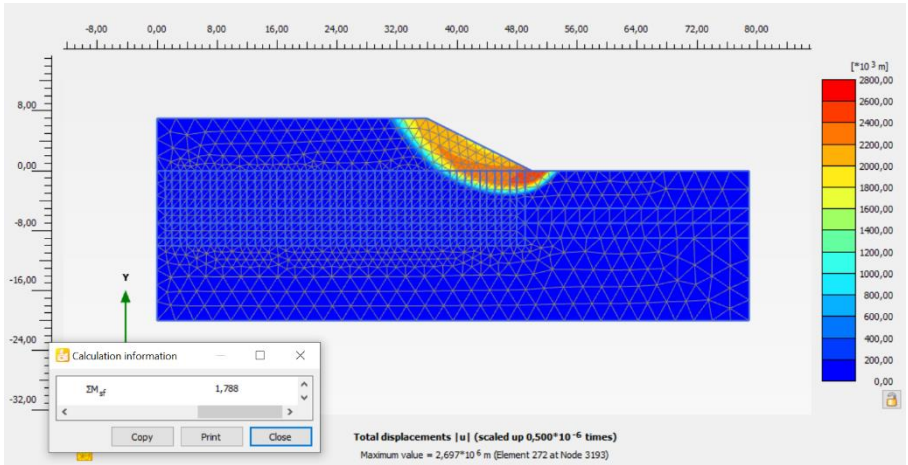
Gambar 5.21 Permodelan Awal Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D Skema 3



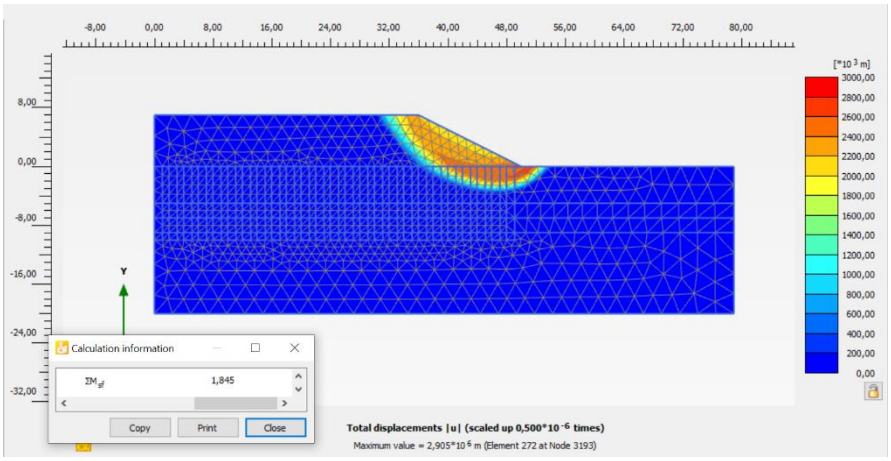
Gambar 5.22 *Total Displacement* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 3



Gambar 5.23 *Deformed Mesh* Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column* PLAXIS 2D skema 3



Gambar 5.24 *Safety Factor* sebelum Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 3



Gambar 5.25 *Safety Factor* setelah Konsolidasi Kondisi *Preloading* dengan *Stone column* PLAXIS 2D skema 3

5.4. Pembahasan

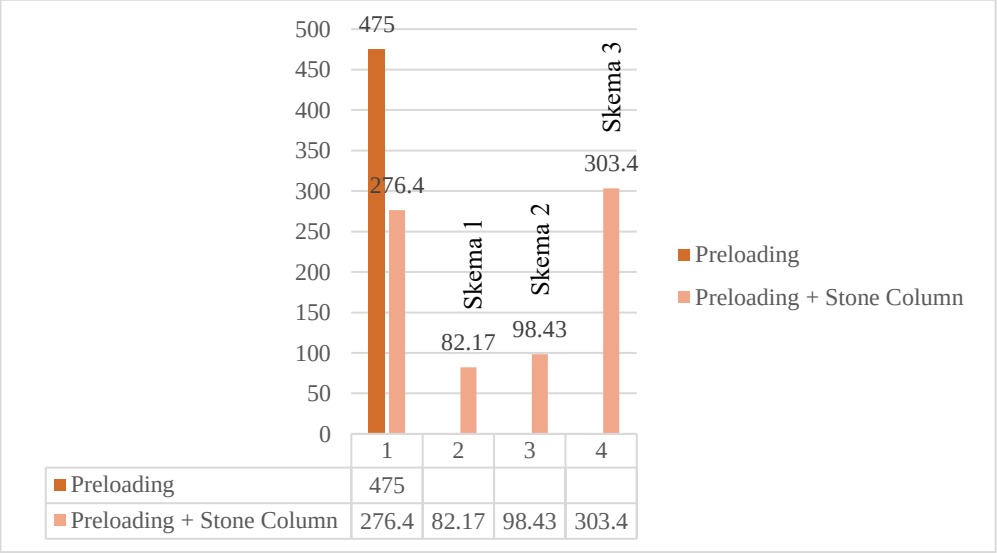
Dari analisis yang sudah dikerjakan, didapatkan dua hasil berbeda dari penelitian ini, yaitu hasil analisis secara manual (Terzaghi) dan hasil dengan *software PLAXIS 2D v21* dengan dua kondisi yang berbeda, hasil yang di paparkan pada tabel rekapitulasi di bawah berisi data hasil analisis secara manual untuk kondisi *preloading* (tanpa *stone column*), kondisi preloading (tanpa *stone column*) dengan PLAXIS 2D dan kondisi *Preloading* dengan *Stone column* untuk setiap skema yang sudah di jelaskan. Perbandingan hasil analisis secara manual dan menggunakan program *PLAXIS 2D v21* untuk setiap kondisi dapat dilihat pada Tabel 5.9 di bawah ini.

Tabel 5.9 Rekapitulasi Perhitungan Konsolidasi Tanah

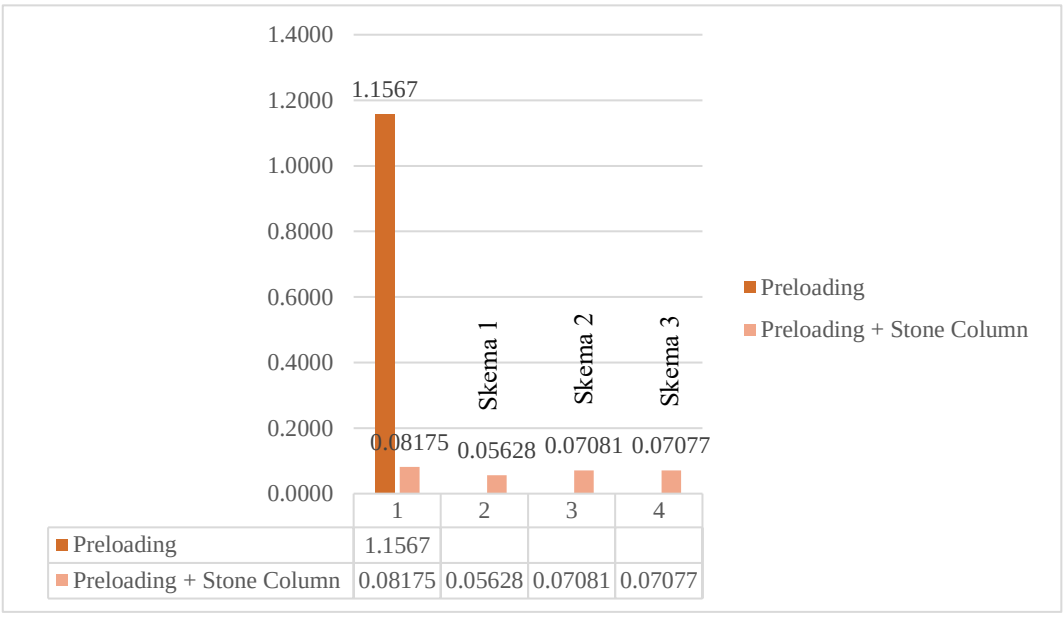
No	Parameter	Simbol	Penurunan Konsolidasi 90%					Satuan
			Eksisting Manual (*Preloading*)	**Eksisting *PLAXIS 2D* (*Preloading*)**	**Skema 1 *preloading* + *Stone Column* dengan *PLAXIS***	**Skema 2 *preloading* + *Stone Column* dengan *PLAXIS***	**Skema 3 *preloading* + *Stone Column* dengan *PLAXIS***	
1	Diameter *Stone Column*	D	-	-	1,1	0,50	1,1	m
2	Jarak *Stone Column*	s	-	-	2,1	1,5	2,0	m
3	Waktu	t	475	276,4	82,17	98,43	303,4	hari
4	*Settlement* (Penurunan)	S	1,1567	0,08175	0,05628	0,07081	0,07077	m
5	*Safety Factor* Sebelum Konsolidasi	Sf	-	1,842	1,985	1,804	1,788	
6	*Safety Factor* Setelah Konsolidasi	Sf	-	1,912	2,011	1,842	1,845	

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan konsolidasi tanah pada Tabel 5.9 di atas dibagi menjadi dua kondisi analisis yaitu, kondisi *preloading* dengan perhitungan secara manual maupun PLAXIS dan kondisi *preloading* dengan *stone column* menggunakan PLAXIS. Pada analisis kondisi kombinasi *preloading* dan *stone column* digunakan 3 skema dengan diameter dan jarak *stone column* yang bervariasi. Skema 1 dengan diameter (D) 1,1 m dan jarak antar *stone column* (s) 2,1, skema 2 dengan diameter (D) 0,50 m dan jarak antar *stone column* (s) 1,5 m dan untuk skema 3 digunakan diameter (D) 1,1 m dan jarak antar *stone column* (s) 2,00 m.

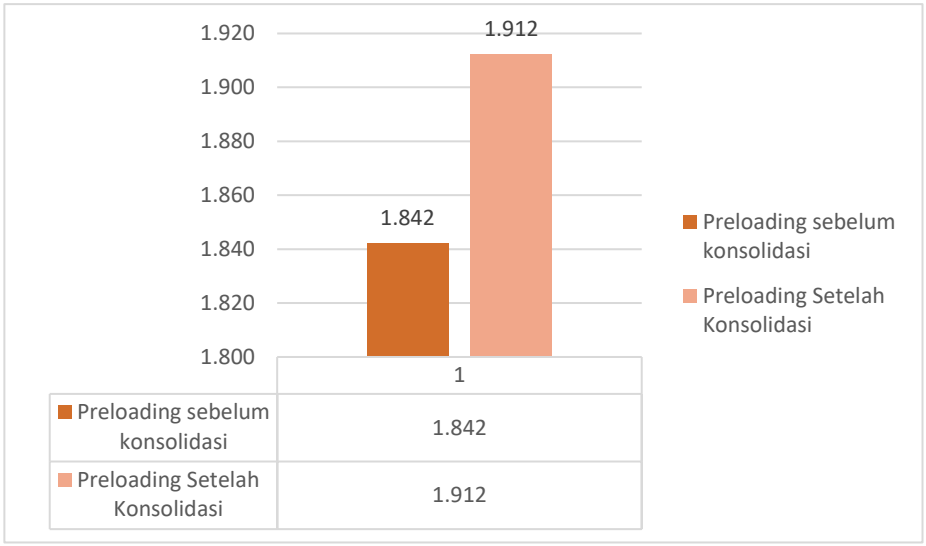
Dari hasil analisis dengan perhitungan manual didapatkan waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi 90% kondisi *preloading* (tanpa *stone column*) sebesar 475 hari dengan besar penurunan 1,1567, sedangkan perhitungan dengan PLAXIS kondisi *preloading* (tanpa *stone column*) membutuhkan waktu yang lebih cepat, selama 276,4 hari dengan besar penurunan 0,08175 m. untuk perhitungan dengan PLAXIS kondisi *Preloading* dengan *Stone column* untuk skema 1 membutuhkan waktu konsolidasi selama 82,17 hari dengan besar penurunan 0,05628 dengan angka aman sebelum dan sesudah konsolidasi sebesar 1,985 dan 2,011, skema 2 membutuhkan waktu yang lebih lama dari skema 1 dengan lama waktu konsolidasi selama 98,43 hari dengan besar penurunan 0,06081 m dengan angka aman sebelum dan sesudah konsolidasi sebesar 1,804 dan 1,842 sedangkan untuk skema 3 menghasilkan perbandingan nilai yang sangat signifikan disbanding dengan 2 skema lainnya, skema 3 selama 303,4 hari dengan besar penurunan 0,07077 dengan Angka aman sebelum dan sesudah konsolidasi sebesar 1,788 dan 1,845. Dari hasil analisis dapat dibuat nilai perbandingan antara dua kondisi dan metode yang digunakan. Perbandingan ini di buat dalam suatu grafik perbandingan yang dapat dilihat pada Gambar 5.26 sampai 5.29 di bawah ini.



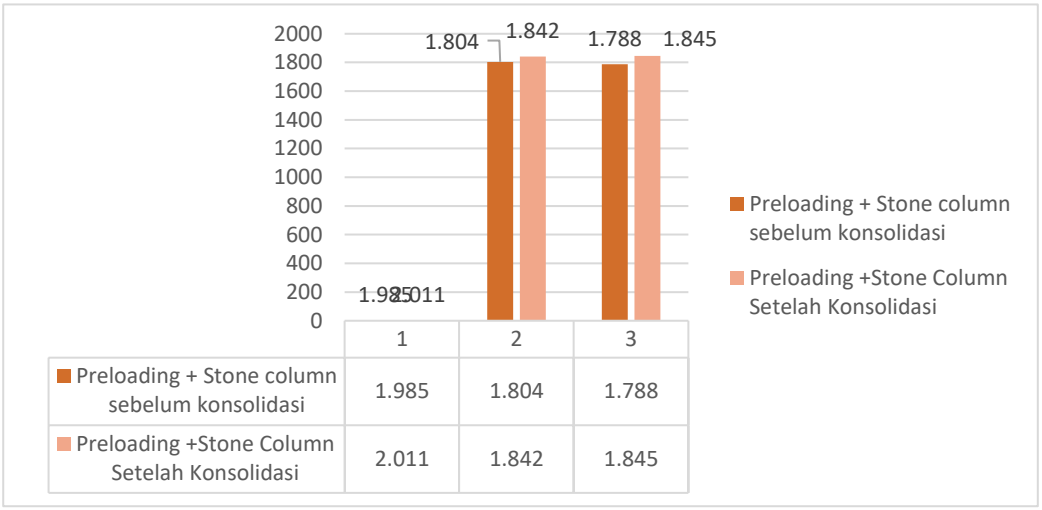
Gambar 5.26 Grafik Perbandingan Waktu Konsolidasi 90% Kondisi *Preloading* dan Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column*



Gambar 5.27 Grafik Perbandingan Penurunan Konsolidasi Kondisi *Preloading* dan *Preloading* dengan *Stone Column*



Gambar 5.28 Grafik perbandingan Angka Aman Kondisi *Preloading*



Gambar 5.29 Grafik Perbandingan Angka Aman Kondisi *Preloading* dengan *Stone Column*

Dari grafik perbandingan yang sudah di paparkan, masing-masing grafik menjelaskan terkait dengan hasil analisis yang sudah di perhitungkan selama penelitian ini. Pada Gambar Grafik 5.26 sampai 5.29 dapat dilihat bahwa metode perhitungan dan kondisi yang digunakan memiliki pengaruh yang besar terhadap nilai dan waktu penurunan tanah. Pada kondisi *preloading* dengan metode perhitungan manual dan PLAXIS menunjukkan angka perbandingan yang signifikan yaitu sebesar 1,1567 m dan 0,08175 m dan waktu yang diperlukan untuk mencapai konsolidasi 90% selama 475 hari dan 276,4 hari. Hal ini diperkuat dengan adanya perbandingan nilai kondisi *Preloading* yang dikombinasikan dengan *Stone column* yang memberikan angka yang signifikan lebih unggul di bandingkan dengan kondisi *Preloading* (manual dan PLAXIS) dimana penurunan yang didapatkan untuk setiap skemanya lebih cepat dari kondisi *preloading* yaitu,

0,05628 m, 0,07081 m dan 0,07077 m dengan waktu yang diperlukan selama 82,17 hari, 98,43 hari dan 303,4 hari.

Dari grafik perbandingan diatas dapat dilihat bahwa nilai yang dihasilkan berbeda-beda tergantung pada metode perhitungan dan kondisi yang digunakan. Pada kondisi *preloading* dengan metode Terzaghi (manual) waktu konsolidasi yang dibutuhkan jauh lebih lama bila dibandingkan dengan waktu konsolidasi kondisi *preloading* dengan program PLAXIS 2D. sedangkan Kondisi *preloading* (manual dan PLAXIS) membutuhkan waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan metode kombinasi *preloading* dengan *stone column*. Hasil metode kombinasi *preloading* dengan *stone column* memberikan hasil yang membuktikan bahwa *stone column* mampu mempercepat waktu dan penurunan tanah, meskipun terdapat nilai variasi yang ditunjukkan skema 1 hingga skema 3 berbeda-beda yang dapat diakibatkan oleh kondisi tanah setempat. Hal ini disebabkan karena metode *stone column* mampu mempercepat keluarnya air pori tanah sehingga waktu konsolidasi dapat terefiensi dengan cepat.

Hasil *Safety Factor* juga menunjukkan kenaikan yang signifikan setelah dan sesudah konsolidasi tanah. Angka aman kondisi *Preloading* (PLAXIS) setelah dan sesudah konsolidasi sebesar 1,842 dan 1,912. Untuk skema 1 sebesar 1,985 dan 2,011, skema 2 sebesar 1,804 dan 1,842 dan skema 3 sebesar 1,788 dan 1,845. Dari hasil safety factor ini dapat dilihat bahwa angka aman mengalami kenaikan yang signifikan antara kondisi *Preloading* dan Kondisi *Preloading* dengan *stone column*. Dimana angka aman yang dihasilkan setelah konsolidasi menunjukkan perkuatan sudah berada di atas ambang batas aman (> 1,5).

Sehingga dari hasil pembahasan ini metode perhitungan dengan kondisi kombinasi *Preloading* dan *Stone Column* menunjukkan angka-angka yang siginifikan yang mampu membuktikan bahwa waktu dan penurunan yang dihasilkan dengan *Stone column* lebih cepat dibandingkan dengan kondisi *preloading* .

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% dengan perhitungan manual kondisi preloading didapatkan waktu penurunan 475 hari dengan angka penurunan sebesar 1,1567 m, sedangkan untuk perhitungan kondisi *Preloading* dengan program PLAXIS 2D V21 dibutuhkan 276,4 hari dengan angka penurunan sebesar 0,08175 m.
2. Penurunan tanah pada saat konsolidasi 90% kondisi *preloading* dengan *Stone column* untuk 3 skema dengan diameter dan jarak yang berbeda. Untuk variasi diameter 1,1 m dan jarak 2,1 m di butuhkan waktu 82,17 hari dengan besar penurunan 0,05628 m, untuk skema 2 dengan diameter 0,50 m dan jarak 1,5 m dibutuhkan waktu 98,43 hari dan besar penurunan 0,07081 m, dan analisis dengan variasi diameter 1,1 m dan jarak 2,0 m konsolidasi 90% memerlukan waktu 303,4 hari dengan besar penurunan sebesar 0,07077 m.
3. Dari hasil analisis dengan kondisi *preloading* perhitungan manual dan kondisi *preloading* dengan Plaxis 2D disimpulkan bahwa kondisi *preloading* dengan perhitungan manual membutuhkan waktu yang lebih lama yaitu 475 hari sedangkan kondisi preloading Plaxis menunjukkan angka yang lebih cepat yaitu 276,4 hari.
4. Hasil analisis kondisi *preloading* dengan *Stone column* dengan program PLAXIS untuk skema 1 hingga skema 3 memiliki perbedaan angka yang cukup signifikan. Untuk skema 1 didapatkan waktu penurunan 82,17, skema 2 membutuhkan waktu yang lebih lama dari skema 1 yaitu 98,43 hari, sedangkan skema 3 membutuhkan waktu cukup lama dibandingkan dengan skema 1 dan skema 2 yaitu 303,4 hari.

5. Nilai penurunan konsolidasi 90% yan dihasilkan dari analisis kondisi *preloading* dengan *stone column* untuk skema 1 hingga skema 3 berbeda-beda. Skema 1 membutuhkan waktu 0,05628 m lebih cepat di bandingkan skema 2, skema 2 membutuhkan waktu 0,07081 m lebih lama di bandingkan dengan skema 3. Skema 3 membutuhkan waktu 0,07077 m.
6. Nilai *safety factor* yang didapatkan untuk kondisi *Preloading* setelah dan sesudah konsolidasi dengan PLAXIS sebesar 1,842 dan 1,912.
7. Nilai *safety factor* yang didapatkan untuk kondisi Preloading dengan stone column untuk skema 1, skema 2 dan skema 3 setelah dan sesudah konsolidasi dengan PLAXIS sebesar 1,985 dan 2,011, 1,804 dan 1,842 dan 1,788 dan 1,845.
8. Dari hasil angka aman /safety factor yang didapatkan, nilai angka aman setelah konsolidasi sudah berada di atas ambang batas aman.
9. Dari ke-3 skema yang digunakan skema 1 merupakan skema yang paling relevan untuk digunakan karena waktu dan penurunan konsolidasi yang dihasilkan lebih cepat dibandingkan skema lainnya dan *preloading*.

6.2. Saran

Berdasarkan hasil Analisa yang tertera dalam tugas akhir ini, berikut merupakan beberapa saran yang dapat dikembangkan pada penelitiannya antara lain sebagai berikut.

1. Dapat dilakukan Pengembangan metode analisis dengan aplikasi lain seperti Geoside atau aplikasi yang relevan dengan geoteknik.
2. Perhitungan Konsolidasi dengan metode analitik yang lebih detail.
3. Dapat memperhitungkan waktu dan penurunan konsolidasi tanah metode stone *column* dengan variasi diameter dan jarak yang lebih bervariatif
4. Dapat dilakukan perhitungan Stabilitas Lereng dengan metode Analitik agar lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2015). Tata Cara Pengklasifikasian Tanah Untuk Keperluan Teknik Dengan Sistem Klasifikasi Unifikasi Tanah (SNI 6371: 2015). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460: 2017). Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2018). Cara Uji Penetrasi Lapangan Dengan Standard Penetration Test (SNI 4153: 2008). Badan Standardisasi Nasional.

Bowles, J.E. (1977) *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Kogakusha.

Bowles, J.E. (1986) *Sifat-sifat fisis dan geoteknis tanah*. J.K. Hainim (Penerj.)). Erlangga.

Das, B.M. (1988). Mekanika Tanah Prinsip–Prinsip Rekayasa Geoteknik (1st ed.); Endah, N. dan Mochtar, I.B (penerj.)). Erlangga.

Fajarwati, Y. and Kusuma, R.I. (2021) Analisis Potensi Likuefaksi dan Perbaikan Tanah dengan Stone Column (Studi Kasus pada Coal Shelter PLTU Lontar, Banten), *INERSIA: Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 17(1), 27–35.

Habibi, M.A. (2025). *Pengaruh Kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) Dengan Metode Preloading Dan Metode Vaccum Pressure Terhadap Konsolidasi Tanah.* Universitas Indonesia.

Hardiyatmo, H.C. (1994) *Mekanika Tanah II*. (3 ed.). Gadjah Mada University Press

Hardiyatmo, H.C. (2002) *Mekanika Tanah I*. (3 ed.). Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H.C. (2020) *Perbaikan Tanah.* Gadjah Mada University Press.

Iskandar, F.F. and Hamdhan, I.N. (2016) Pemodelan Numerik Pada Perbaikan Tanah Menggunakan *Stone Column* Di Tanah Lempung Lunak Di Bawah Tanah Timbunan, *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 107.

Kamila, B.S. and Farichah, H. (2022) Studi Parametrik Pengaruh Stone Column Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak, *Agregat*, 7(1).

Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi. (2017) *PBB Verifikasi 16.056 Nama Pulau*. https://maritim.go.id/detail/pbb-verifikasi-16-056-nama-pulau-Jakarta

Moechtar, R.A.T. (2019) Evaluasi Cekungan pada Periode Holosen Kaitannya dengan Fluktuasi Muka Air Laut, Tektonik dan Perubahan Iklim di Nabire dan Sekitarnya, Papua. Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral, 20(4), 237–248.

Napitupulu, M.M., Roesyanto and Iskandar, R. (2021) Analisa Konsolidasi di Area Non Sand-Key Pada Area Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan-Phase Menggunakan PLAXIS 2D dan 3D, *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 6(1).

Panduan Geoteknik. (2002) *Panduan Geoteknik 1: Proses Pembentukan dan Sifat – Sifat Dasar Tanah Lunak*. WSP Internasional.

Pratama, I.B., Artati, H.K. and Amalina, A.N. (2023) Analisis Stabilisasi Lereng Timbunan Jalan Dengan *Prefabricated Vertical Drain* dan Geotekstil Menggunakan Program PLAXIS (Studi kasus: Jalan Tol Solo-Kertosono STA 118+700 – 139+760), *Proceeding Civil Engineering Research Forum*.

Rakhman, I.A. (2021) *Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Badan Jalan Diatas Tanah Lunak Dengan Perkuatan Geotekstil*. Universitas Islam Indonesia.

Somantri, A.K. et al. (2021) Perbaikan Tanah Dasar yang Berpotensi Terjadi Likuefaksi dengan Metode *Stone Column* pada Junction Tebing Tinggi, *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 23(1), 67–76.

Suherman. (1992) *Perilaku Stone Column*. Penelitian 1-71. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan.

Bahri, S. (2017). *Studi Perencanaan Perbaikan Tanah Dengan Stone Column Pada Stock Pile Batu Bara Rencana PLTU Sorong (4x7 MW)*. Universitas Brawijaya.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons.

Tjahyati, H. (1989) *Stone column*. Jurnal Teknik Sipil.

Warman, R.S. (2019) *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jenderal Bina Marga.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Parameter Tanah

No. BH	Depth	USCS	Moisture Content (W)	Density (γ)	Specific Gravity	Atterberg Limit			Hydrometer Test and Sieve Analysis				Unconfine Compression	Direct Shear		Triaxial Compression Test (UU)		Consolidation	Triaxial Compression Test (CU)			
						LL	PL	PI	Clay	Silt	Sand	Gravell		Ø	C	Ø	C		Ø	C	Ø	C
			(%)	(gr/cm³)	(Gs)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	qu (Kg/cm²)	(°)	(Kg/cm²)	(°)	(Kg/cm²)	Cc	(°)	(kN/m²)	(°)	(kN/m²)
BHL.01	- (03,00 - 03,50)	SC	17.52	2.288	2.653	Non Cohesive			21.00	26.64	52.36	0.00	1.635	37.30	4.000	30.27	0.588	0.14	14.76	8.11	23.17	9.68
BHL.02	- (03,00 - 03,50)	SC	19.32	2.190	2.662	Non Cohesive			15.00	29.22	55.78	0.00	1.918	38.45	4.432	30.41	0.548	0.10	3.65	10.77	12.63	9.85
BHL.03	- (05,00 - 05,50)	SC	15.06	1.784	2.675	Non Cohesive			18.55	26.73	54.72	0.00	1.618	35.21	1.456	31.34	0.394	0.13	5.87	6.62	15.47	5.04
BHL.04 UDS.01	- (03,00 - 03,50)	CL ML	52.60	1.429	2.627	25.89	21.37	4.52	43.35	45.13	11.52	0.00	0.088	25.32	0.095	28.75	0.060	0.27	5.05	7.40	14.30	5.66
BHL.04 UDS.02	- (07,00 - 07,50)	CL-ML	48.95	1.642	2.634	26.01	21.50	4.51	42.75	45.19	12.06	0.00	0.944	28.25	0.783	28.78	0.155	0.24	3.02	8.62	7.88	7.52
BHL.05 UDS.01	- (03,00 - 03,50)	CL-ML	53.88	1.424	2.624	26.01	21.22	4.79	42.89	41.01	16.10	0.00	0.189	26.44	0.098	27.42	0.087	0.24	3.29	8.55	11.56	6.29
BHL.05 UDS.02	- (09,00 - 09,50)	CL-ML	52.92	1.441	2.647	27.40	22.32	5.07	44.12	40.38	15.50	0.00	0.232	27.53	0.198	25.59	0.196	0.28	3.90	6.64	12.52	5.10
BHL.05 UDS.03	- (11,00 - 11,50)	CL-ML	43.29	1.645	2.629	28.28	22.55	5.73	42.55	42.27	15.18	0.00	0.976	26.81	0.802	26.53	0.312	0.34	5.94	6.55	15.03	5.41

Lampiran 2. Data Bor-Log

