# LAPORAN PENELITIAN

# OPTIMALISASI PERBAIKAN TANAH GAMBUT PADA KONSTRUKSI JALAN TOL

**(Studi Kasus Perencanaan Jalan Tol PPKA Seksi 3, Sumatera Selatan)**


**Oleh :**

**DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc**

**Dan**

**Muhamad Yamin Malawat**

## PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

## INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

## JAKARTA



**Februari 2022**

# PENGESAHAN
# LAPORAN PENELITIAN

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Judul Penelitian | : | **OPTIMALISASI PERBAIKAN TANAH GAMBUT PADA KONSTRUKSI JALAN TOL (Studi Kasus Perencanaan Jalan Tol PPKA Seksi 3, Sumatera Selatan)** |
| 2 | Ketua Peneliti | : | |
| | ı. Nama Lengkap | : | DR.Ir. Idrus M. Alatas M.Sc |
| | b. Jenis Kelamin | : | Laki-laki |
| | c. NIP | : | 11860032 |
| | d. Disiplin ilmu | : | Geoteknik (Teknik Sipil) |
| | e. Pangkat/Golongan | : | Lektor /III d |
| | f. Jabatan | : | Dosen |
| | g. Fakultas/Prodi | : | Teknik Sipil dan Perencanaan / Teknik Sipil |
| | h. Alamat | : | Jl. Moh. Kahfi II, Srengseng Sawah Jak-Sel. |
| | i. Telpon/Faks/E-mail | : | 0218410387/hb_idrus@yahoo.com |
| 3 | Anggota Peneliti | : | --- |
| 4 | Lokasi Penelitian | : | Kampus ISTN, Srengseng Indah Jakarta |
| 5 | Jumlah biaya | : | 12.500.000,- |

Jakarta, Februari 2022

**Mengetahui,**
**Ketua Program Studi**
**Teknik Sipil**

**Ketua Peneliti**

Rafama Dewi S.Pd, M.Arch, MT

DR. Ir. Idrus M. Alatas

**Menyetujui,**
**Ketua LP2M – ISTN**

Ir. Syahril Taufik, M.Sc.Eng., Ph.D

# KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas Rahman dan Rahim-Nya saya dapat menyelesaikan Penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dalam rangka penelitian yang dilakukan antara dosen dan mahasiswanya pada program Magister Program Studi Geoteknik pada Fakultas Pascasarjana Institut Sains Dan Teknologi Nasional. Kami menyadari masih banyak kekurangan dalam penyelesaian penelitian ini sampai pada penyusunan laporan penelitian ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

a) Rektor Institut Sains dan Teknologi Nasional;
b) Ir. Syahril Taufik M. Sc. Eng, Ph.D selaku Ketua LPM ISTN yang telah mendorong terselengaranya penelitian ini
c) Seluruh Dosen dan Staf Admin Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Pascasarjana Institut Sains dan Teknologi Nasional;
d) Pihak PT. Waskita Karya (Persero), Tbk. yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
e) Seluruh sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan Tesis ini.

Doa terbaik saya panjatkan kehadirat Allah SWT, semoga semua pihak yang telah membantu diberikan pahala yang setimpal dan penelitian ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, amin.

Jakarta, 12 Februari 2022

DR. Ir. Idrus M. Alatas M.Sc

# ABSTRAK

Pesatnya pembangunan jalan tol di Indonesia beberapa tahun belakangan ini dan waktu pelaksanaan yang sangat ketat termasuk di dalamnya menyiapkan desain dengan menyesuaikan ROW yang sudah ditentukan sebelumnya menjadi isu tersendiri terutama jika terdapat spot sepanjang trase jalan tol yang kondisi tanah dasarnya memerlukan penanganan dalam hal peningkatan kuat geser dan stabilitas daya dukungnya. Tesis ini khusus mengevaluasi penanganan pada tanah gambut pada kasus perencanaan jalan tol Pematang Panggang – Kayu Agung (PPKA), seksi 3, Sumatera Selatan. Evaluasi lebih kepada seberapa besar peningkatan kuat geser dan daya dukung tanah gambut dapat terjadi dari analisa atas beberapa metode *ground improvement (geotechnical engineering approach)* dan *geo-structural approach* menggunakan *PLAXIS 2D* berbasis *Finite Element Method.*

**Kata kunci:**

tanah gambut, penurunan, kapasitas daya dukung, *PLAXIS 2D*

# ABSTRACT

*The rapid development of toll roads in Indonesia in recent years and the very tight implementation time including preparing the design by adjusting the predetermined ROW become a separate issue, especially if there are spots along the toll road route whose basic soil conditions require handling in terms of increasing shear strength.and stability of the bearing capacity. This thesis specifically evaluates the handling of peat soils in the case of planning for the Pematang Panggang – Kayu Agung (PPKA) toll road, section 3, South Sumatra. More evaluation on how much increase in shear strength and bearing capacity of peat soil can occur from the analysis of several ground improvement methods (geotechnical engineering approach) and geo-structural approach using PLAXIS 2D based on Finite Element Method.*

**Keywords:**

*peat soil, settlement, bearing capacity, PLAXIS 2D*

# DAFTAR ISI

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS... **Error! Bookmark not defined.**

HALAMAN PERNYATAAN NON PLAGIAT ... **Error! Bookmark not defined.**

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

KATA PENGANTAR ..... iv

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI **Error! Bookmark not defined.**

ABSTRAK .....v

DAFTAR ISI..... vii

DAFTAR GAMBAR ..... xi

DAFTAR TABEL..... xiii

BAB 1 PENDAHULUAN .....1

1.1 Latar Belakang .....2

1.2 Rumusan Masalah .....4

1.3 Tujuan Penelitian .....4

1.4 Manfaat Penelitian .....5

1.5 Batasan Masalah.....5

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....6

2.1 Pengertian Tanah.....6

2.1.1 Klasifikasi Tanah.....6

2.2 Tanah Gambut.....8

2.2.1 Pembentukan Tanah Gambut .....9

2.2.2 Sifat Fisik dan Teknis Tanah Gambut.....10

2.2.3 Keterbatasan Konsolidasi Terzaghi pada Tanah Gambut .....11

2.2.4 Pemampatan dan Tipe Kurva Konsolidasi Tanah Gambut .....12
2.3 Alternatif Metode Perbaikan tanah .....13
2.3.1 *Deep Soil Mixing (DSM)* .....14
2.3.2 PVD *Preloading* .....17
2.3.3 Vacuum Preloading .....21
2.3.4 Pondasi Cakar Ayam .....23
2.3.5 *Stone Column* .....24
2.3.6 Cerucuk Matras Beton .....31
2.3.7 Pile Slab .....32
2.4 Kriteria Desain Jalan Tol .....47
2.4.1 Kriteria desain geometrik .....47
2.4.2 Kriteria desain hidrologi dan drainase .....47
2.4.3 Kriteria desain struktur .....47
2.4.4 Kriteria desain geoteknik .....47
2.5 PLAXIS 2D .....47
BAB 3 METODE PENELITIAN .....51
3.1 Metode Penelitian .....51
3.2 Lokasi Penelitian .....51
3.3 Metode Analisis Data .....52
3.3.1 Studi Pustaka .....52
3.3.2 Pengumpulan Data .....52
3.3.3 Analisis Data .....54
3.3.4 Pemodelan Konstruksi .....54
3.3.5 Matriks Metode Konstruksi .....54
3.3.6 Kesimpulan dan Saran .....54
3.4 Zonasi Kajian .....55
3.5 Hasil Soil Investigasi .....56
3.5.1 Hasil Uji Laboratorium Kadar Organik .....56
3.5.2 Hasil Uji Laboratorium *Properties Index* .....57

3.5.3 Hasil Uji *Compresibility Index* ..... 58
3.5.4 Hasil Uji *Consolidation* ..... 59
3.5.5 Hasil Uji Gambut ..... 59
3.6 Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah ..... 61
3.7 Tebal Gambut dan Tinggi Timbunan ..... 61
3.8 Rancangan Analisis ..... 63
3.9 Metodologi Matriks Penilaian ..... 63
BAB 4 PEMBAHASAN ..... 64
4.1 Analisis Pembahasan ..... 64
4.1.1 Data Analisis ..... 64
4.1.2 Perhitungan Besar Penurunan Konsolidasi Primer dan Sekunder ..... 67
4.2 Metode Konstruksi *Deep Soil Mixing* ..... 68
4.2.1 Desain *Deep Soil Mixing* ..... 68
4.2.2 Analisa Besar dan Waktu Penurunan Deep Soil Mixing ..... 68
4.2.3 Analisa Stabilitas *Deep Soil Mixing* ..... 69
4.3 Metode *PVD Preloading* ..... 70
4.3.1 Analisa Penurunan Tanpa PVD ..... 70
4.3.2 Analisa Penurunan dengan PVD ..... 71
4.3.3 Analisa Stabilitas Lereng *PVD Preloading* ..... 73
4.4 *Vacuum Preloading* ..... 74
4.4.1 Analisa Stabilitas Lereng *Vacuum Preloading* ..... 74
4.5 Pondasi Cakar Ayam ..... 75
4.5.1 Analisa Penurunan Pondasi Cakar Ayam ..... 76
4.5.2 Analisa Stabilitas Lereng Pondasi Cakar Ayam ..... 76
4.6 *Stone Column* ..... 77
4.6.1 Analisa Penurunan *Stone Column* ..... 77
4.6.2 Analisa Stabilitas *Stone Column* ..... 78
4.7 Cerucuk Matras Beton ..... 78

4.7.1 Pemodelan *Axisymmetry*....78
4.7.2 Pemodelan *Plane Strain* ....79
4.7.3 Daya Dukung Cerucuk Matras Beton ....80
4.8 *Pile Slab* ....81
4.8.1 Pemodelan *Axisymmetry*....81
4.8.2 Pemodelan *Plane Strain* ....82
4.8.3 Analisa Pemodelan *Pile Slab* Dan Cermaton ....83
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN....86
5.1 Kesimpulan ....86
5.2 Saran....86
DAFTAR REFERENSI ....87

# DAFTAR GAMBAR


| | | |
|---|---|---|
| Gambar 2.1 | Sebaran lahan gambut di Indonesia | 8 |
| Gambar 2.2 | Grafik tipe kurva kompresi pada tanah gambut | 13 |
| Gambar 2.3 | General proses deep soil mixing | 14 |
| Gambar 2.4 | Pola Pemasangan dasar deep soil mixing | 14 |
| Gambar 2.5 | Proses pelaksanaan deep soil mixing | 15 |
| Gambar 2.6 | Prinsip PVD Preloading | 17 |
| Gambar 2.7 | Sistem kerja PVD Preloading | 18 |
| Gambar 2.8 | PVD Installation for a Highway Embankment | 18 |
| Gambar 2.9 | Konsolidasi dan Preloading | 19 |
| Gambar 2.10 | Kurva konsolidasi | 20 |
| Gambar 2.11 | Skema Konsolidasi Vakum Dengan Penutup Membran | 21 |
| Gambar 2.12 | Skema Vacuum Preloading | 22 |
| Gambar 2.13 | Ilustrasi pondasi cakar ayam | 23 |
| Gambar 2.14 | Stone Column Equilateral Triangular Pattern | 24 |
| Gambar 2.15 | Unit Cell Idealization | 25 |
| Gambar 2.16 | Typical column arrangements | 26 |
| Gambar 2.17 | Vibro-replacement method | 30 |
| Gambar 2.18 | Vibro-displacement method | 30 |
| Gambar 2.19 | Geotextile Encased Columns | 30 |
| Gambar 2.20 | Standar komponen cerucuk dan matras beton | 31 |
| Gambar 2.21 | Faktor daya dukung tahanan ujung N’ç dan N’q | 33 |
| Gambar 2.22 | Jarak tipikal potongan melintang dan memanjang Pile Slab | 46 |
| Gambar 2.23 | Perbedaan 6 titik nodal dengan 15 titik nodal | 49 |
| Gambar 3.1 | Skema penelitian | 51 |
| Gambar 3.2 | Lokasi Penelitian | 52 |
| Gambar 3.3 | Bagan Alir Penelitian | 53 |
| Gambar 3.4 | Core box BH 3.3 (0.00 – 10.00 m) | 56 |
| Gambar 4.1 | Stratigrafi Stratigrafi STA 167+300 – 169+700 | 64 |
| Gambar 4.2 | Bor Log Sta 169+500 (kedalaman 0~25 m) | 65 |

Gambar 4.3 Bor Log Sta. 169+500 (kedalaman 25 – 46,5 m) ..... 66
Gambar 4.4 Penurunan konsolidasi primer dan sekunder Sta. 167+450 ..... 67
Gambar 4.5 Analisa waktu konsolidasi metode deep soil mixing ..... 69
Gambar 4.6 Analisa stabilitas metode deep soil mixing ..... 69
Gambar 4.7 Analisa penurunan tanpa PVD ..... 70
Gambar 4.8 Grafik waktu konsolidasi tanpa PVD ..... 71
Gambar 4.9 Analisa waktu penurunan dengan PVD ..... 72
Gambar 4.10 Analisa stabilitas PVD+preloading saat konstruksi ..... 73
Gambar 4.11 Analisa stabilitas PVD Preloading pasca konstruksi ..... 74
Gambar 4.12 Analisa stabilitas Vacuum Preloading saat konstruksi ..... 74
Gambar 4.13 Analisa stabilitas Vacuum Preloading pasca konstruksi ..... 75
Gambar 4.14 Desain konstruksi cakar ayam ..... 75
Gambar 4.15 Analisa penurunan metode pondasi cakar ayam ..... 75
Gambar 4.16 Analisa penurunan pondasi cakar ayam ..... 76
Gambar 4.17 Safety factor kestabilan pondasi cakar ayam ..... 76
Gambar 4.18 Analisa penurunan metode Stone column ..... 77
Gambar 4.19 Analisa kestabilan metode stone column ..... 78
Gambar 4.20 Desain metode cerucuk matras beton ..... 79
Gambar 4.21 Pemodelan plane strain cerucuk matras beton ..... 79
Gambar 4.22 Daya dukung cerucuk matras beton ..... 80
Gambar 4.23 Safety factor metode cerucuk matras beton ..... 80
Gambar 4.24 Desain metode pileslab ..... 81
Gambar 4.25 Pemodelan axisymmetry metode pileslab ..... 82
Gambar 4.26 Pemodelan plane strain metode pileslab ..... 82

# DAFTAR TABEL


Tabel 2.1 Pengelompokkan jenis tanah berdasarkan ukuran butir tanah ..... 7
Tabel 2.2 Pengelompokkan konsistensi tanah berdasarkan nilai SPT ..... 7
Tabel 2.3 Klasifikasi tanah berdasarkan angka pori, kadar air dan berat volume ..... 8
Tabel 2.4 Kandungan Kimia Kapur ..... 16
Tabel 2.5 Komposisi Kimia Abu Sekam Padi ..... 17
Tabel 2.6 Metode Pelaksanaan Stone Column ..... 27
Tabel 3.1 Zonasi Kajian ..... 55
Tabel 3.2 Resume Lapisan Gambut ..... 56
Tabel 3.3 Hasil pengujian kadar organik ..... 57
Tabel 3.4 Properties Index (1) ..... 57
Tabel 3.5 Properties Index (2) ..... 58
Tabel 3.6 Compresibility Index ..... 58
Tabel 3.7 Summary Konsolidasi ..... 59
Tabel 3.8 Summary Test Peat From Chemical Laboratory ..... 59
Tabel 3.9 Tebal gambut per 100 m ..... 62
Tabel 3.10 Sistem Penilaian ..... 63
Tabel 4.1 Parameter tanah Sta. 169+500 ..... 64
Tabel 4. 2 Perhitungan Penurunan Konsolidasi PPKA seksi 3 ..... 68
Tabel 4.3 Perhitungan besar dan waktu penurunan ..... 70
Tabel 4.4 Jarak Spasi Triangular ..... 72
Tabel 4.5 Penurunan mohr-coulomb soil model ..... 83
Tabel 4.6 Penurunan hardening soil model ..... 83
Tabel 4.7 Matriks metode perbaikan tanah ..... 84

# BAB 1 PENDAHULUAN

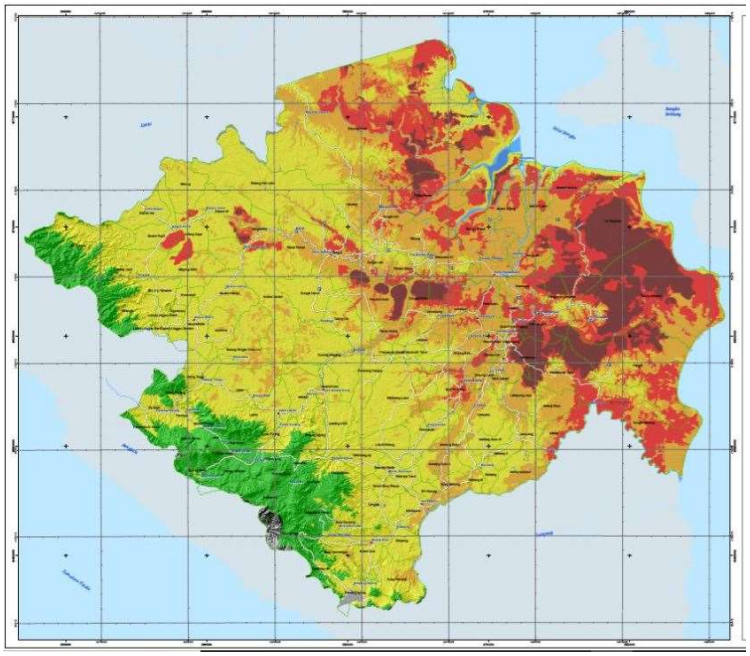
Pembangunan insfrastruktur khususnya jalan tol menjadi *trend* beberapa tahun belakangan ini yang akan memberikan akses baru dalam suatu wilayah guna meningkatkan aktivitas ekonomi dari suatu daerah ke daerah lainnya.

Permasalahan teknis dalam pembangunan jalan tol di Indonesia umumnya banyak dijumpai tanah lunak *(soft soil)* pada sebagian ruas jalan tol. Penanganan untuk peningkatan kuat geser tanah menjadi hal pertama yang harus dilakukan sebelum tahapan konstruksi selanjutnya. Berbagai metode perbaikan tanah *(soil improvement method)* dapat dipakai sebagai alternatif penanganannya tergantung dari jenis, kedalaman dan waktu konsolidasi tanah lunak yang harus mempertimbangkan juga jadwal penyelesaian konstruksi secara keseluruhan.

Dari jenis tanah lunak terdapat tanah gambut yang secara teknis lebih sulit untuk ditangani. Evaluasi atas parameter tanah gambut sangat diperlukan untuk mengetahui metode perbaikan yang paling tepat yang akan digunakan. Pengumpulan dan pengolahan data parameter tanah menjadi suatu karakterisasi tanah suatu daerah, akan memudahkan dalam mengimplementasikan desain konstruksinya (Yakin, 2013).

Pada tesis ini akan dibahas lebih lanjut, apakah masih memungkinkan perbaikan tanah gambut dengan metode perbaikan tanah lain sebagai pengganti atas pendekatan konstruksi *slab on pile (geo-structure approach)* pada lokasi jalan tol, khususnya di Sumatera Selatan.

Pada Gambar 1.1 ditunjukkan area sebaran lahan gambut di provinsi Sumatera Selatan (berwarna gelap) yang seharusnya dipakai sebagai rujukan khususnya dalam penentuan trase jalan tol untuk meminimalisir penanganan tanah gambut itu sendiri.



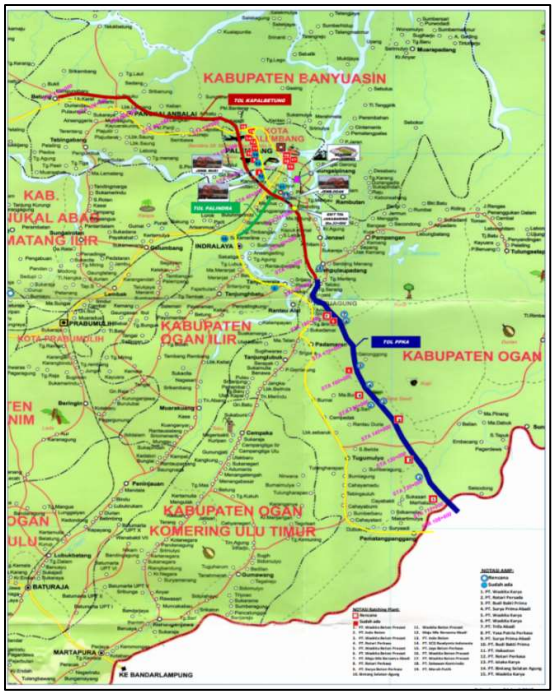
Gambar 1.1 Peta sebaran lahan Gambut di Provinsi Sumatera
(Multi Phi Beta, 2018)

## 1.1 Latar Belakang

Pembangunan ruas jalan tol Pematang Panggang – Kayu Agung (PPKA) Palembang, Sumatera Selatan sepanjang 77 km (STA 108+600 – STA 185+600) berlokasi di Palembang, Sumatera Selatan. Dimulai dari perbatasan Propinsi Lampung - Sumatera Selatan sampai dengan kota Kayu Agung dan merupakan kelanjutan dari tol Terbanggi Besar – Pematang Panggang di Lampung sebagaimana terlihat pada Gambar 1.2.

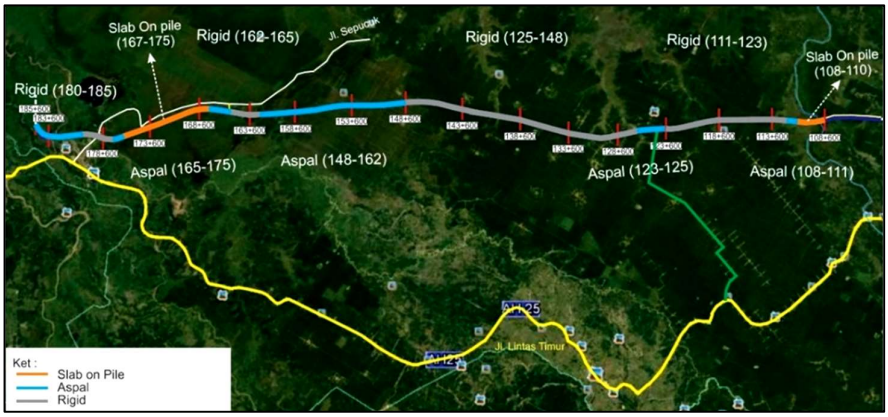
Diketahui sebesar 65% dari panjang ruas tol keseluruhan terdapat kondisi tanah lunak yang memerlukan penanganan, yang diindikasikan dari jenis lapis perkerasannya sebagaimana pada Gambar 1.3. Area yang memerlukan *soil improvement* adalah dengan lapis perkerasan yang menggunakan aspal *(grey line)*, sedangkan area dengan *rigid pavement* adalah area dengan tanah dasar dengan daya dukung yang baik *(blue line)*. Berbagai metode perbaikan dipakai mulai dari *soil replacement, PVD preloading, vacuum PVD* berdasarkan kedalaman tanah lunak dan waktu konsolidasi dengan jenis tanah umumnya *soft clay.* Selain itu digunakan

pendekatan konstruksi *slab on pile* untuk area tanah gambut *(orange line)* dimana waktu menjadi pertimbangan utama.




Gambar 1.2 Peta Lokasi Proyek Tol PPKA, Sumatera Selatan
(Waskita Karya, 2019)

Dalam kaitannya dengan hal tersebut dirasa perlu untuk melakukan pengkajian atas karakteristik fisik dan mekanis dari tanah gambut tersebut untuk mengetahui sejauh mana dapat dilakukan perbaikan untuk meningkatkan daya dukungnya dengan berbagai metode perbaikan tanah yang ada. Lokasi penelitian adalah pada Sta 167+600 – 177+600 ruas tol PPKA dengan objek penelitian adalah tanah gambut.




Gambar 1. 3 Jenis Lapis Perkerasan Proyek Tol PPKA
(Waskita Karya, 2019)

Penelitian dan evaluasi atas jenis variabel antara lain :

1. Sifat fisik dan teknis tanah gambut
2. Ketebalan lapisan tanah gambut.
3. Jenis tanah di bawah lapisan tanah gambut
4. Tinggi timbunan kritis
5. Waktu konsolidasi
6. Metode perbaikan tanah

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam kaitannya dengan penulisan ini, permasalahan lahan gambut pada pembangunan jalan tol dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana strategi pemilihan metode perbaikan tanah di lahan gambut
2. Bagaimana evaluasi pemilihan perbaikan tanah sehingga terjadi peningkatan daya dukung tanah, waktu dan biaya lebih optimum dan terukur.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis metode perbaikan tanah di lahan gambut pada perencanaan jalan tol yang optimum (dari data hasil penyelidikan tanah yang paling

kritis di lokasi antara STA 167+600 – 177+600) dengan suatu metode penilaian *(scoring)* dari setiap alternatif perbaikan tanah yang memungkinkan;
2. Dasar pengambilan keputusan pada proses desain dan pelaksanaan di lapangan.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari tesis ini adalah :

1. Sebagai acuan untuk standarisasi penanganan tanah gambut pada tiap kondisi dan kedalaman serupa di Indonesia;
2. Menjadi rujukan ilmiah (*scientific reference*) untuk standarisasi dan pengembangan di masa mendatang.

## 1.5 Batasan Masalah

Tesis ini akan dibatasi pada beberapa hal sebagai berikut :

1. Lokasi penelitian pada proyek tol PPKA STA 167+600 – 177+600;
2. Data teknis yang digunakan adalah data sekunder dari laporan penyelidikan tanah sebelumnya untuk lokasi di atas;
3. Metode perbaikan tanah hanya untuk beberapa metode *ground improvement* (*geotechnical engineering approach*) dan *geo-structural approach* dengan *PLAXIS 2D* untuk analisisnya;
4. Kriteria desain mengikuti SNI 8460 : 2017 tentang persyaratan perencanaan geoteknik.

# BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Pengertian Tanah

Tanah merupakan material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral–mineral padat yang tidak *tersementasi* (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang–ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995).

Seiring dengan berkembangnya teknologi dibidang kontruksi, banyak kegiatan kontruksi yang semakin fokus pada perilaku tanah. Tanah merupakan salah satu komponen yang menunjang stabilitas suatu struktur. Tanah sangat erat kaitannya dengan beban sehingga jika suatu struktur dibangun di atas tanah tersebut, diharapkan tidak terjadi kerusakan dikemudian hari.

Tanah selalu mempunyai peranan yang penting pada suatu lokasi pekerjaan kontruksi. Tanah berfungsi sebagai pondasi pendukung suatu kontruksi atau bahan dari suatu kontruksi itu sendiri seperti jalan raya, jembatan, bangunan gedung, dan yang lainnya. Jadi tanah itu selalu berperan pada setiap pekerjaan teknik sipil. Namun, pada kenyataannya pembangunan suatu kontruksi tidak selalu berada diatas tanah dasar yang relatif baik. Ada kalanya pembangunan suatu kontruksi dibangun di atas tanah yang kurang baik atau biasa disebut tanah lunak (*soft soil*). Oleh karena itu, sifat–sifat dan perilaku tanah menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dan pelaksanaan suatu pekerjaan kontruksi.

### 2.1.1 Klasifikasi Tanah

Secara umum, klasifikasi tanah adalah pengelompokkan berbagai jenis tanah ke dalam kelompok yang sesuai dengan sifat teknik dan karakteristiknya. Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem yang mengatur jenis-jenis tanah yang berbeda beda, tetapi mempunyai sifat–sifat yang serupa ke dalam kelompok–kelompok dan subkelompok.

Klasifikasi ini pada umumnya didasarkan sifat–sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran. Untuk menerangkan tentang tanah

berdasarkan ukuran–ukuran butirannya, beberapa organisasi telah mengembangkan batasan–batasan ukuran golongan jenis tanah (*soil separate size limits*) (Das, 1995). Adapun pengelompokkannya dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Pengelompokkan jenis tanah berdasarkan ukuran butir tanah

| Nama Golongan | Ukuran butiran (mm) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Kerikil *(Gravel)* | Pasir *(Sand)* | Lanau *(Silt)* | Lempung *(Clay)* |
| *Massachussetts Institue of Tecnology (MIT)* | > 2 | 2 – 0,06 | 0,06 – 0,002 | < 0,002 |
| *U.S Departement of Agriculture (USDA)* | > 2 | 2 – 0,05 | 0,05 – 0,002 | < 0,002 |
| *American Association of State Higway and Transportation Officially (AASHTO)* | 76,2 - 2 | 2 – 0,075 | 0,075 – 0,002 | < 0,002 |
| *Unifield Soil Classification System (USCS)* | 76,2 – 4,75 | 4,75 – 0,075 | Halus (yaitu lanau dan lempung) <0,0075 | |

(Das, 1995)

Selain itu, tanah juga dapat dikelompokkan konsistensi tanahnya berdasarkan hasil penyelidikan tanah di lapangan, salah satunya ialah berdasarkan uji s*tandart penetration Test* (N-SPT). Untuk mengelompokkan konsistensi tanah berdasarkan nilai SPT dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Pengelompokkan konsistensi tanah berdasarkan nilai SPT

| Cohesionless Soil | | Cohesive Soil | | |
|---|---|---|---|---|
| Penetration Resistance Ny (blows/ft) | Relative Density | Penetration (blows/ft) | Unconfined Consistency Resistance Compressive Strengh (tons/ft$^2$) | Relative Density |
| 0 - 4 | Very Loose | <2 | <0.25 | Very Soft |
| 4 – 10 | Loose | 2 – 4 | 0.25 – 0.50 | Soft |
| 10 – 30 | Medium | 4 – 8 | 0.50 – 1.00 | Medium |
| 30 – 50 | Dense | 8 – 15 | 1.00 – 2.00 | Stiff |
| >50 | Very Dense | 15 – 30 | 2.00 – 4.00 | Very Stiff |
| | | >30 | >4.00 | Hard |

(Das, 1995)

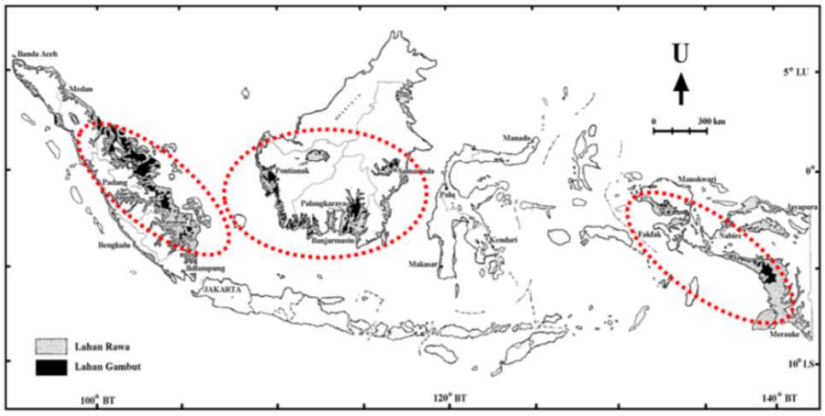
Jenis tanah juga dapat diklasifikasikan melalui hasil uji lab yang dilakukan untuk mendapatkan angka pori, kadar air kondisi jenuh, dan berat volume kering. Hasil uji lab yang dilakukan akan mendapatkan klasifikasi jenis tanah.

Tabel 2.3 Klasifikasi tanah berdasarkan angka pori, kadar air dan berat volume

| JENIS TANAH | ANGKA PORI e | KADAR AIR KONDISI JENUH (%) | BERAT VOLUME KERING, γd (kN/m3) |
|---|---|---|---|
| Pasir lepas dengan butiran seragam *(loose uniform sand)* | 0,8 | 30 | 14,5 |
| Pasir padat dengan butiran seragam *(dense uniform sand)* | 0,45 | 16 | 18 |
| Pasir berlanau yang lepas dengan butiran bersudut *(loose angular grained silty sand)* | 0,65 | 25 | 16 |
| Pasir berlanau yang padat dengan butiran bersudut *(dense angular grained silty sand)* | 0,4 | 15 | 19 |
| *Stiff clay* | 0,6 | 21 | 17 |
| *Soft clay* | 0,9 – 1,4 | 30 - 50 | 11,5 – 14,5 |
| *Soft organic clay* | 2,5 – 3,2 | 90 - 120 | 6 – 8 |
| *Peat* | 5 - 15 | 750 - 1500 | 9 – 12,5 |

(Das, 1995)

## 2.2 Tanah Gambut




Gambar 2.1 Sebaran lahan gambut di Indonesia
(Subagjo, 1998)

Gambut Indonesia merupakan jenis gambut tropis dengan luas area tanah gambut mencapai kurang lebih 15,96 juta hektar (Muhammad Noor, Masganti, Fahmuddin Agus, 2021). Lahan gambut Indonesia secara alami berada di Kawasan hutan rawa gambut, di wilayah yang luas terdapat di 3 pulau besar, yaitu Sumatera, Kalimantan dan Papua. Peta sebagaimana gambar 2.1 disusun berdasarkan kajian dan analisis data pada skala 1 : 250.000 yang menjadi informasi awal data sebaran rawa dan gambut di Indonesia. (Subagjo, 1998)

### 2.2.1 Pembentukan Tanah Gambut

Tanah gambut terbentuk oleh akumulasi bahan-bahan organik, yang bergantung kepada beberapa faktor, terutama iklim. Kecepatan akumulasi gambut pada daerah subtropis memerlukan waktu rata-rata 1500 tahun untuk akumulasi per satu meter tebal lapisan. Pada daerah tropis, termasuk Indonesia, kecepatan akumulasi lapisan gambut sebesar 3 kali lipat lebih cepat daripada kecepatan akumulasi pada daerah subtropics (Yulianto, 2017 in Don L. Anderson, C. B. Archambeau, 1964).

Akumulasi bahan-bahan organik pada daerah tropis disebabkan oleh sistem drainase yang tidak baik, yaitu disebabkan berkurangnya pasokan oksigen sebagai media pertumbuhan mikroba dekomposer. Di Asia Tenggara, proses awal pembentukan lapisan gambut adalah sejak 18.000 tahun yang lalu (Yulianto, 2017 in Van de Meene, 1984). Pada periode es mencair, paparan Sunda dan paparan Sahul tenggelam dimana permukaan air laut sangat tinggi. Hal ini menyebabkan material-material *klastik* berpindah melalui sungai dari daerah dataran tinggi ke dataran rendah. Hal ini menyebabkan tanggul alami terbentuk dan menghasilkan sistem drainase yang buruk, serta terbentuknya cekungan-cekungan, rawa-rawa, danau yang dangkal. Cekungan, rawa dan danau dangkal terisi oleh tumbuh-tumbuhan hutan, dimana akar-akarnya menyerap nutrisi dari tanah mineral, yaitu: lempung, lanau dan pasir. Kemudian, sisa-sisa tumbuhan yang tidak melapuk sempurna menghasilkan lapisan yang menambah jauh jarak permukaan dan tanah mineral tersebut. Bertambahnya lapisan sisa-sisa tumbuhan, disebut lapisan gambut, menghambat air banjir sungai yang membawa mineral untuk mencapai

level tumbuhan. Pertumbuhan lapisan gambut berkurang, sehingga hutan padang terbentuk, seperti yang terlihat saat ini, dimana kondisi hidrologi dan hidrokimiawinya hanya dipengaruhi oleh air hujan. Ketebalan lapisan gambut aterdalam, pada daerah cekungan/lembah sungai (*topogeneous peat*) di Pulau Sumatera berkisar 16 meter dan Kalimantan 20 meter. Umur rata-rata lapisan gambut cekungan/lembah sungai (*topogeneous peat*) antara 2800 – 4500 tahun.

### 2.2.2 Sifat Fisik dan Teknis Tanah Gambut

Sifat fisik tanah gambut yang berpengaruh terhadap perencanaan sebagai tanah dasar (pondasi) diantaranya adalah: kadar air, angka pori, koefisien rembesan, kadar serat, kandungan organik, dan kemampuan menyusut. Kemampuan tanah gambut untuk menyerap dan menyimpan air cukup tinggi sehingga kadar air tanah gambut dapat lebih besar dari 600%. Nilai angka pori tanah gambut yang berkisar 5-15 menyebabkan tanah gambut sangat sensitif terhadap beban yang bekerja diatasnya (mudah mampat). Nilai rembesan tanah gambut juga sangat besar menyerupai harga rembesan tanah pasir berkisar $2.10^{-2}$ – $1{,}2.10^{-6}$ cm/det. Penyusutan yang terjadi pada tanah gambut yang disebabkan oleh beberapa faktor dapat mencapai 50% dari volume total. Namun setelah terjadi penyusutan, kemampuan untuk menyerap air jauh berkurang. Kadar organik tanah gambut Indonesia berkisar antara 95%-99% (Mochtar, 1991, 1998, 1999, 2002). Kadar organik yang tinggi berpengaruh terhadap sifat fisik lainnya. Secara umum kadar organik yang tinggi akan menyebabkan kadar air, angka pori dan pemampatan yang tinggi pula. Sifat teknis tanah gambut yang paling menonjol adalah daya dukungnya yang rendah dan kemampumampatannya yang tinggi.

Sifat teknis tanah gambut yang paling menonjol adalah daya dukungnya yang rendah dan kemampumampatannya yang tinggi. Berbagai penyelidikan terhadap daya dukung tanah gambut menunjukkan bahwa daya dukungnya bahkan lebih *rendah* dari *soft clay* (Muhammad Afief Ma'ruf, Faisal Estu Yulianto, 2016) menyatakan bahwa nilai sudut geser dalam tanah gambut berserat sangat besar yaitu $> 50^0$; tetapi hal tersebut sangat dipengaruhi oleh serat yang ada. Nilai sudut geser dalam untuk tanah gambut berserat sebenarnya berkisar antara $27^0$ – $32^0$ (Komang

Sidhi, Aniko Helda Nuryanto, Daniel Hartanto, 2019 in Landva, 1982). Kemampuan tanah gambut yang tinggi untuk menyerap dan menyimpan air akan berpengaruh pada sifat teknis tanah gambut (Komang Sidhi, Aniko Helda Nuryanto, Daniel Hartanto, 2019 in Vautrain, 1976); semakin besar kadar air yang terkandung pada tanah gambut semakin kecil pula kekuatannya. Selain itu, tanah gambut mempunyai pemampatan yang tinggi (*high compressibility*) sehingga sangat sensitif terhadap beban yang bekerja diatasnya.

Karena perilaku tanah gambut tersebut, terutama untuk gambut berserat, banyak bangunan sipil yang berada diatasnya mengalami kerusakan. Kerusakan yang terjadi disebabkan besar dan tidak meratanya pemampatan yang terjadi. Pada konstruksi jalan raya, pemampatan akan lebih lama terjadi apabila tanah gambut memiliki lapisan yang sangat tebal (Yulianto, 2016).

### 2.2.3 Keterbatasan Konsolidasi Terzaghi pada Tanah Gambut

Tanah gambut memiliki permeabilitas yang tinggi, sehingga perilakunya lebih mengacu pada besarnya regangan yang terjadi. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan model *reologi* oleh Gibson dan Lo untuk menyelesaikan permasalahan tegangan-regangan dan waktu dari tanah gambut. Terdapat tiga alasan mendasar mengapa teori konsolidasi dari Terzaghi tidak dapat digunakan untuk memperkirakan pemampatan tanah gambut, yaitu :

1. Permeabilitas berkurang sangat cepat

   Tanah gambut terutama jenis *fibrous peat* mempunyai porositas yang tinggi, oleh karena itu pemampatan awal terjadi dan berlangsung secara cepat. Dengan demikian permeabilitasnya berkurang secara sangat cepat. Pada teori konsolidasi Terzaghi diasumsikan bahwa permeabilitas yang terjadi selama konsolidasi adalah konstan. Hal ini kurang tepat pada tanah gambut yang permeabilitasnya mengalami perubahan secara cepat terutama pada awal pembebanan.
2. Koefisien konsolidasi, $C_v$ konstan selama proses konsolidasi

   Koefisien konsolidasi merupakan parameter tanah yang mempengaruhi kecepatan kosolidasi. Nilai koefisien konsolidasi tergantung pada

permeabilitas *(k)* dan kompresibiltas tanah *($m_v$)*. Meskipun k maupun $m_v$ sama–sama mengecil dengan meningkatnya tegangan konsolidasi, namun persentasenya belum tentu sama. Umumnya nilai $C_v$ menurun t jam saat tegangan efektif mencapai tegangan prakonsolidasi. $C_v$ bervariasi terhadap kedalaman dan waktu konsolidasi (Duncan,1993).

3. Butiran tanah (gambut) kompresibel

   Pada teori konsolidasi Terzaghi, dinyatakan bahwa kerangka butir tanah adalah bahan yang tidak termampatkan sehingga hubungan antara angka pori dan tegangan vertikal efektif tidak dipengaruhi oleh waktu. Hasil uji laboratorium maupun pengamatan lapangan menunjukan penurunan tidak berhenti meskipun tekanan air pori ekses telah mencapai nol. Kompresi sekunder terus berlangsung setelah akhir konsolidasi primer (*End of Primary,* EOP). Sehingga jelas bahwa hubungan angka pori dan tegangan vertikal efektif dipengaruhi waktu, terutama pada lempung lunak dan gambut.

   Pada tanah gambut khususnya jenis *fibrous,* terjadi pemampatan pada serat akibat termampatnya serat-serat cellulose. Akibat pemampatan yang besar pada keadaan awal proses konsolidasi, menyebabkan perubahan yang berarti dari karakterisitik konsolidasi, konsekuensinya, diperlukan suatu modifikasi cara analisis konsolidasi (Furstenbener dkk, 1983).

### 2.2.4 Pemampatan dan Tipe Kurva Konsolidasi Tanah Gambut

Terdapat beberapa tipe kurva hubungan penurunan dengan waktu yang unik dan berbeda dengan penurunan dengan waktu yang unik serupa pada tanah lempung (Rahayu, 2019 in K.Y. Lo, 1961),

1. Type I

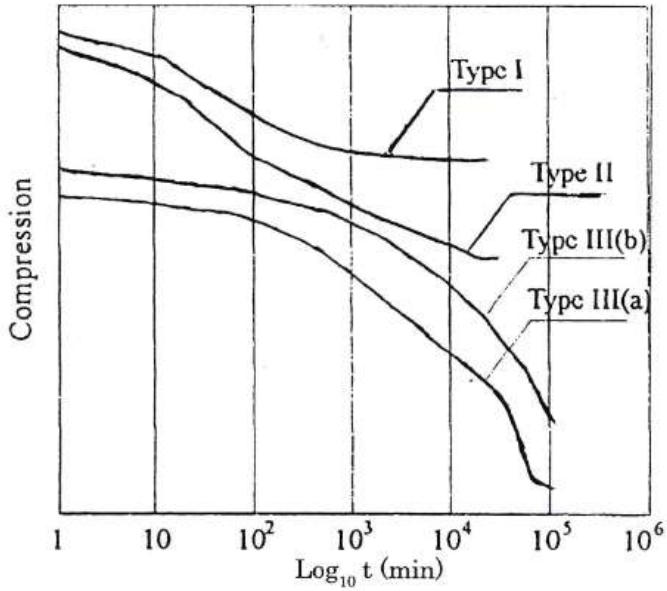
   Kurva yang mempunyai bentuk cekung yang bagus, kompresi sekunder berkurang dengan waktu. Selanjutnya kurva menjadi horizontal ketika penurunan maksimum telah tercapai.

2. Type II

   Karakteristik type II menunjukkan bagian lurus mengikuti pendekatan logaritmik untuk batas waktu yang cukup besar.

3. Type III

   Kecepatan tekanan sekunder meningkat dengan logaritma waktu. Selanjutnya menerus secara perlahan sampai selesai. Penurunan maksimum akan kurva tekanan pada periode yang panjang




Gambar 2.2 Grafik tipe kurva kompresi pada tanah gambut (Lo, 1961)

Pada kasus PPKA Seksi 3 ini kasus yang paling sering terjadi kurva konsolidasi yang paling sering terjadi adalah kurva tipe II.

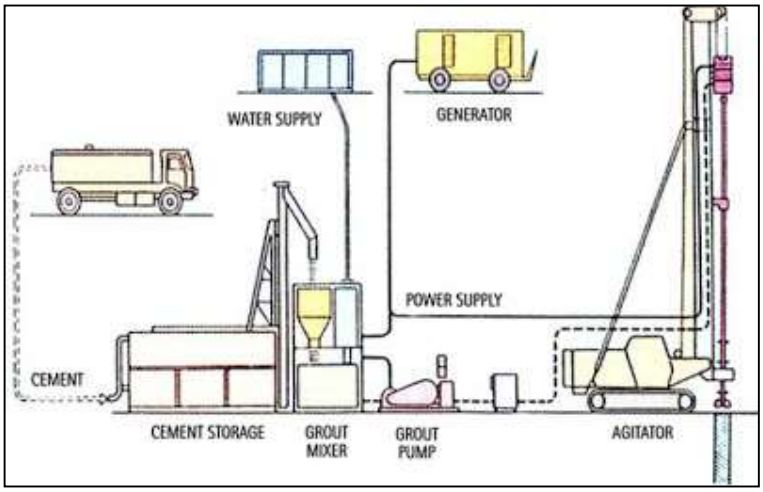
## 2.3 Alternatif Metode Perbaikan tanah

Terdapat beberapa alternatif metode perbaikan tanah yang akan dibahas pada penulisan ini,

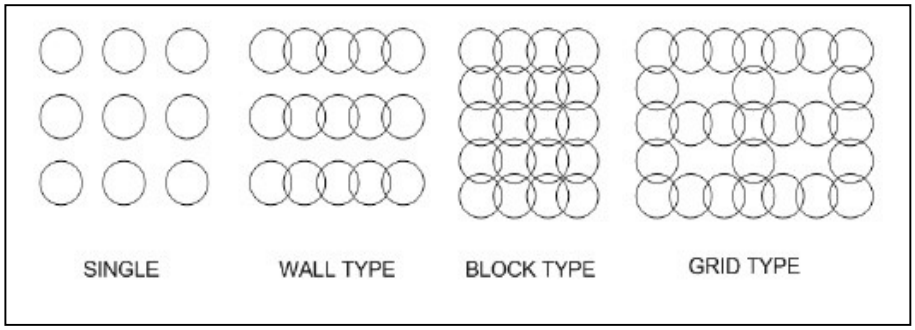
1. *Deep soil mixing*
2. *PVD preoading*
3. *Vacuum preloading*
4. *Stone Column*
5. Pondasi cakar ayam
6. Cerucuk matras beton (Cermaton)
7. *Pile slab*

### 2.3.1 *Deep Soil Mixing (DSM)*

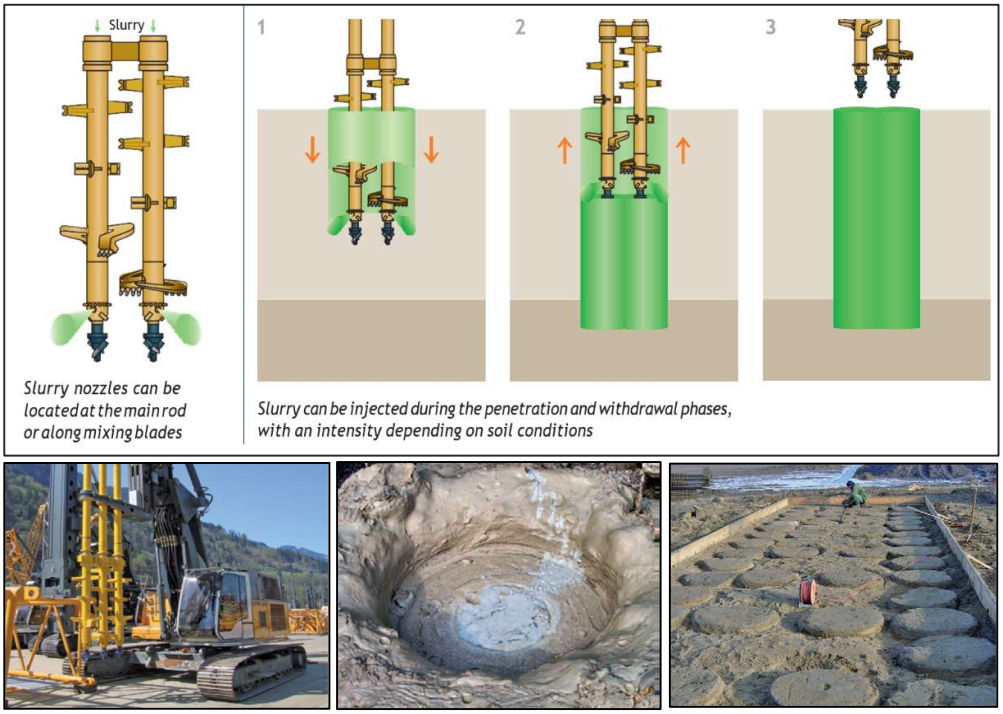
*Deep Soil Mixing (DSM)* merupakan metode perbaikan tanah yang pertama kali dikembangkan di Jepang dan Scandinavia. Pada perkembangannya, teknologi DSM digunakan sebagai metode perkuatan tanah lunak dan *permeable*. Secara umum metode DSM dilakukan dengan mencampurkan tanah dan semen atau *binder* (pengikat) lain, menghasilkan material baru yang biasa disebut sebagai *soil-mix* atau *soil-cement*. Campuran yang dihasilkan pada umumnya memiliki daya dukung lebih tinggi tinggi, serta sifat permeabilitas dan komprebilitas lebih rendah jika dibandingkan dengan tanah aslinya (Suroso, 2014).




Gambar 2.3 General proses *deep soil mixing*
(Atmadilaga, 2022)




Gambar 2.4 Pola Pemasangan dasar *deep soil mixing*
(Atmadilaga, 2022)




Gambar 2.5 Proses pelaksanaan *deep soil mixing*
(Keller Ground Engineering Pty. Ltd, 2002)

Metode ini dilakukan dengan material stabilisasi berupa *flys ash, blast-furnace slag* maupun sisa produksi sulpur telah diterapkan dan terus dikembangkan dengan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) diberbagai negara seperti Swedia, Finlandia, Jepang dan Amerika Serikat.

Secara umum ada dua jenis metode pada teknologi DSM berdasarkan jenis campuran. *Wet DSM* merupakan perbaikan tanah yang mencampurkan tanah asli dengan *binder* berupa *slurry* (bubur), sedangkan apabila *binder* yang digunakan dalam keadaan kering disebut *dry DSM.*

*Wet DSM* cocok digunakan pada perbaikan tanah lempung lunak, lanau, dan pasir halus yang memiliki kadar air rendah. Sedangkan untuk tanah berkadar air tinggi direkomendasikan menggunakan *dry DSM*. Selain itu metode DSM juga dapat digunakan pada tanah gambut atau lumpur, namun perlu adanya penyesuian material *binder* yang digunakan serta penyesuaian prosedur pelaksanaan (Keller Ground Engineering Pty. Ltd, 2002). Jika dibandingkan dengan metode perbaikan

tanah yang lain, metode DSM relatif lebih murah, bebas getaran, mengurangi waktu konstruksi, dan ramah lingkungan.

Stabilisasi pada gambut dengan menggunakan bahan kapur sangat tidak efektif jika dicampur langsung dengan tanah gambut. Hal ini disebabkan tanah gambut tidak mengandung *silica* yang dibutuhkan oleh kapur untuk membentuk $C_aS_iO_3$ yang berbentuk gel yang secara perlahan akan mengkristal menjadi ”*Calcium Silicate Hydrates”* (Yulianto, 2016). Metode stabilisasi tanah gambut dengan DSM juga telah diterapkan di Australia dengan bahan *admixture* berupa campuran semen dengan kapur tetapi stabilisasi dengan menggunakan semen-kapur tidak menghasilkan daya dukung yang diharapkan bahkan tidak berhasil (Keller Ground Engineering Pty. Ltd, 2002).

Berdasarkan hal tersebut, telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan sifat fisik dan teknis tanah gambut, salah satunya dengan mencampurkan abu sekam padi *(rice husk ash)* dan kapur *(lime)*. Penggunaan campuran abu sekam padi *(rice husk ash)* dan kapur *(lime)* sebagai bahan stabilisasi baru yang lebih ramah lingkungan (Yulianto, 2010). Hasil pengujian laboratorium dari Biro lingkungan PT. Petrokimia menunjukkan bahwa kandungan kimia terbesar adalah calsium carbonat ($CaCO_3$) sebesar 71.37 % seperti pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kandungan Kimia Kapur

| No. | Parameter | Result ( % ) |
|---|---|---|
| 1 | $CaCO_3$ | 71.37 |
| 2 | $CaSO_4\ 2H_20$ | 18.76 |
| 3 | $(NH)_2SO_4$ | 1.33 |
| 4 | $(NH_4)_2CO_3$ | 0 |
| 5 | $NH_3$ bebas | 0 |
| 6 | $H_2O$ | 18.10 |

(Yulianto, 2014)

Sedangkan kandungan kimia terbesar dari abu sekam padi adalah *silica dioksida* ($S_iO_2$) sebesar 77% seperti pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia Abu Sekam Padi

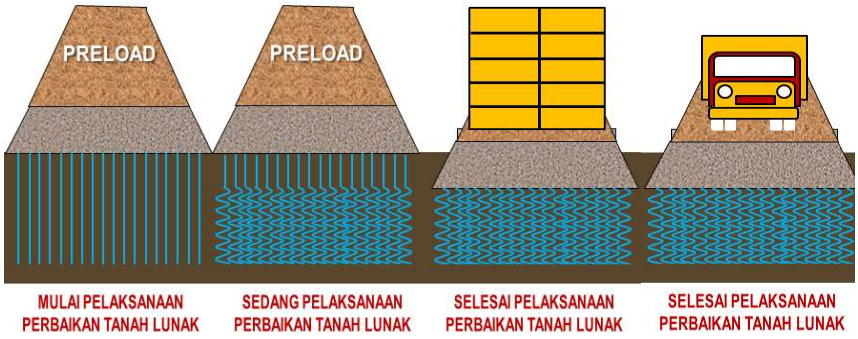
| No | Parameter Uji | Hasil (%) | Metode |
|---|---|---|---|
| 1 | SiO2 | 77,0 | Spektroskopi |
| 2 | P2O5 | 2,40 | Spektroskopi |
| 3 | Fe2O3 | 5,69 | Spektroskopi |
| 4 | CaO | 9,94 | Spektroskopi |
| 5 | K2O | 2,61 | Spektroskopi |

(Mochtar, Noor Endah, 2009)

Dari pengujian sifat fisik dan teknis yang dilakukan oleh Noor endah, dkk. (2009) terhadap beberapa campuran abu sekam padi dan kapur diketahui bahwa campuran 70% abu sekam padi + 30% kapur merupakan campuran yang memberikan hasil optimal untuk digunakan sebagai bahan *stabilizer* untuk tanah gambut. Menurut Igles & Metcalf (1992), penggunaan 10% *stabilizer* (70% abu sekam padi + 30% kapur) dapat meningkatkan sifat fisik tanah gambut, namun peningkatan ini sangat bergantung terhadap masa peram (Yulianto, 2010).

### 2.3.2 PVD *Preloading*

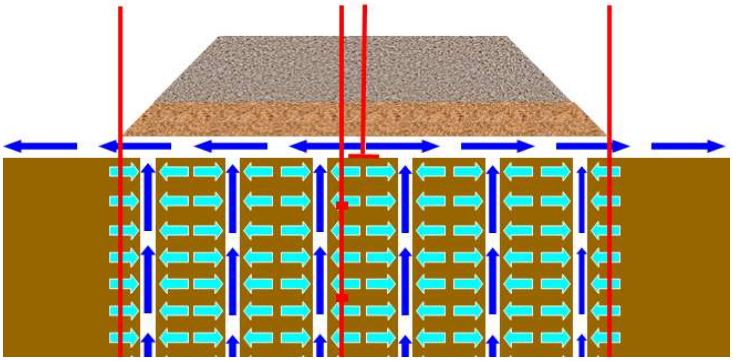
Pada metoda PVD *preloading,* air pori di dalam tanah dikeluarkan dengan cara dibebani timbunan tanah *(preload)* dan dipercepat dengan pengaliran air secara



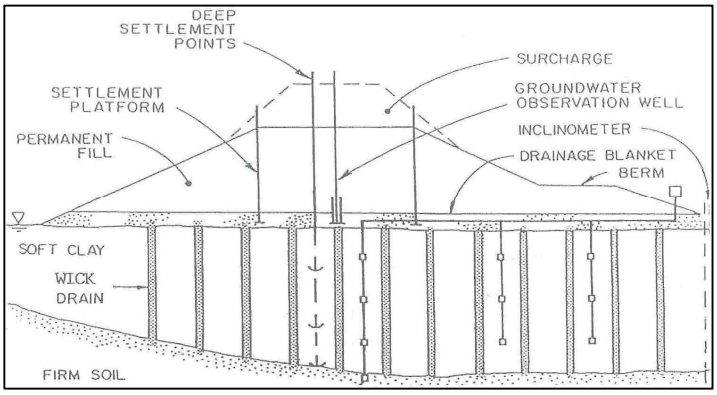

Gambar 2.6 Prinsip PVD Preloading
(PT. Teknindo Geosistem Unggul Teknologi, 2018)

vertikal *(vertical drain)* melalui PVD dan horizontal *(horizontal drain)* di permukaan dengan PHD.

Perbaikan tanah lempung lunak metoda *pre-loading* dengan PVD merupakan satu sistem perbaikan tanah yang terdiri dari pekerjaan *preload,* PVD, *horizontal drain* dan instrumen geoteknik seperti yang ditunjukan gambar 2.8 dibawah ini. *Preload* berfungsi untuk memampatkan tanah dasar. PVD berfungsi untuk mempercepat proses pemampatan tanah. *Horizontal drain* berfungsi untuk mengalirkan air pori dari PVD ke arah horisontal ke luar timbungan preload. Instrumen geoteknik berfungsi untuk memantau proses dan mengetahui kinerja hasil perbaikan tanah yang telah dilakukan.



Gambar 2.7 Sistem kerja *PVD Preloading*
(PT. Teknindo Geosistem Unggul Teknologi, 2018)

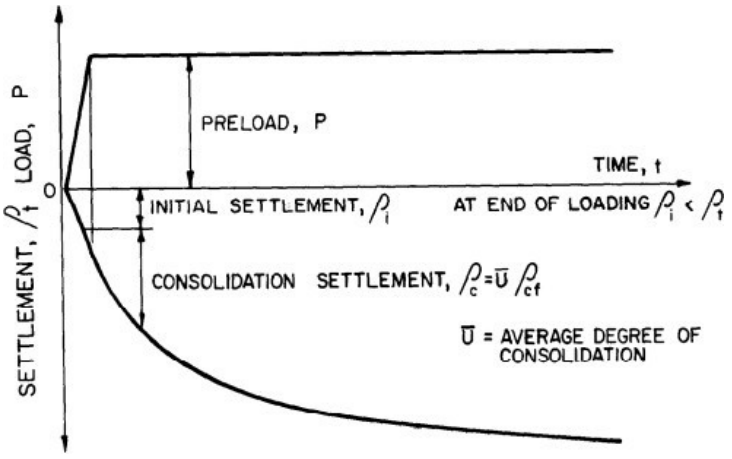



Gambar 2.8 *PVD Installation for a Highway Embankment*
(Elias et al., 2006)

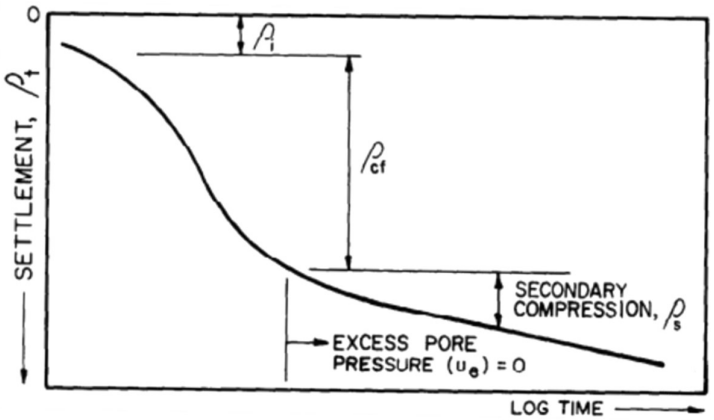
Penambahan beban di atas permukaan tanah lunak yang memiliki daya dukung yang rendah akan menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan yang besar serta berlangsung dalam jangka waktu yang lama, Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya keluarnya air (pemampatan konsolidasi/*consolidation settlement*) atau udara (Athaya Zhafirah, 2019).

*Prefabricate Vertical Drain* (*PVD*) adalah sistem drainase buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah. Sistem drainase ini mempunyai bentuk berupa sabuk berpenampang persegi panjang, terdiri dari bagian luar berupa penyaring yang terbuat dari bahan *synthetic/geotextile*, kertas atau goni dan bagian dalam yang berfungsi sebagai media aliran air yang terbuat dari plastik atau serabut organik. oleh karena pada tanah lunak umumnya mudah ditembus dengan *PVD*, sedangkan pada lapisan tanah yang kaku diperlukan pengeboran awal (*pre- drilling*) (Hardiyatmo, 2018).

Prinsip dasar preloading atau kompresi awal mengacu pada proses kompresi pondasi pada tanah dibawahnya berupa tegangan vertikal sebelum diberikan tegangan final yang permanen, jika tegangan temporer tersebut melebihi tegangan final maka kelebihan tegangan tersebut dapat dianggap sebagai *surcharges* (US_FHWA., 1986).




Gambar 2.9 Konsolidasi dan Preloading
(US_FHWA., 1986)




Gambar 2.10 Kurva konsolidasi
(US_FHWA., 1986)

Penyaluran vertikal (*vertical drain*) biasanya digunakan untuk memperbaiki tanah yang bergradasi halus dan jenuh. Teknik ini meliputi cara vertikal drain dari bahan pabrikasi, dengan grid tertentu ke dalam lapisan tanah. Pada saat tanah menerima pembebanan, maka vertikal drain akan berfungsi membantu proses evakuasi air pori ke permukaan, sehingga memungkinkan proses konsolidasi tanah berjalan dengan cepat. Biaya utama yang diperlukan pada penerapan metode ini adalah biaya untuk pemberian *preloading* di atas permukaan tanah (Darwis, 2017).

a. Penentuan tanah timbunan untuk *preloading*

Penentuan penambahan tinggi timbunan pada preloading system bertahap dimulai dengan menentukan tingggi kritis ($H_{cr}$) yang mampu diterima oleh tanah dasar. Berdasarkan penurunan rumus diatas maka besarnya nilai tinggi kritis dapat ditentukan dengan persamaan di bawah ini.

$$H_{cr} = \frac{2\ x\ C_u}{\gamma_t}$$

dimana :

$H_{cr}$ = tinggi timbunan kritis (m)

$C_u$ = kekuatan geser *undrained* (kg/cm$^{3)}$

$\gamma_t$ = berat volume tanah (t/m$^3$)

b. Perencanaan waktu konsolidasi dengan *vertical drain*

Penentuan waktu konsolidasi oleh Hansbo (1979) dapat dibuat dengan persamaan berikut, (Hardiyatmo, 2017)

$$t = \frac{D^2}{8C_h}\left(ln\left(\frac{D}{dw} - 3/4\right)\right) ln\frac{1}{1 - U_h}$$

dimana :

$t$ = waktu yang diperlukan untuk mencapai $U_h$

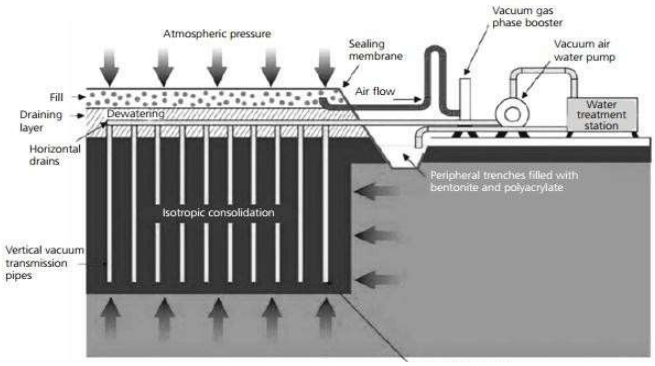
$D$ = diameter equivalen dari lingkaran tanah yang merupakan daerah pengaruh dari equivalen *Vertical Drain*

$C_h$ = koefisien konsolidasi tanah akibat aliran arah horizontal

$U_h$ = derajat konsolidasi tanah akibat aliran air arah horizontal

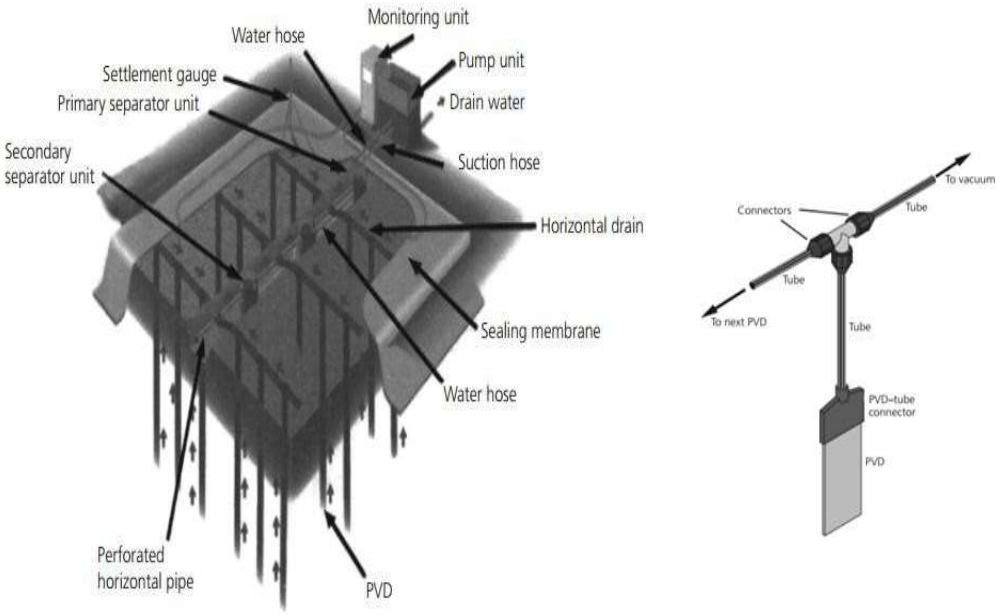
### 2.3.3 Vacuum Preloading

Pada kondisi tanah dasar berupa tanah lempung yang sangat lunak dengan kemampuan daya dukung yang relatif terbatas, seringkali dijumpai permasalahan berupa kelongsoran pada tanah dasar pada saat pengaplikasian prabeban, sehingga harus melakukan proses penimbunan secara bertahap sesuai dengan kemampuan daya dukung tanah dan seringkali membutuhkan waktu yang lama (Irsyam, 2012). Terkait dengan hal tersebut, pada tahun 1952 diperkenalkan suatu metode pengganti prabeban dengan cara meletakkan lembaran material kedap air di permukaan tanah




Gambar 2.11 Skema Konsolidasi Vakum Dengan Penutup Membran (O'Kelly, 2014)

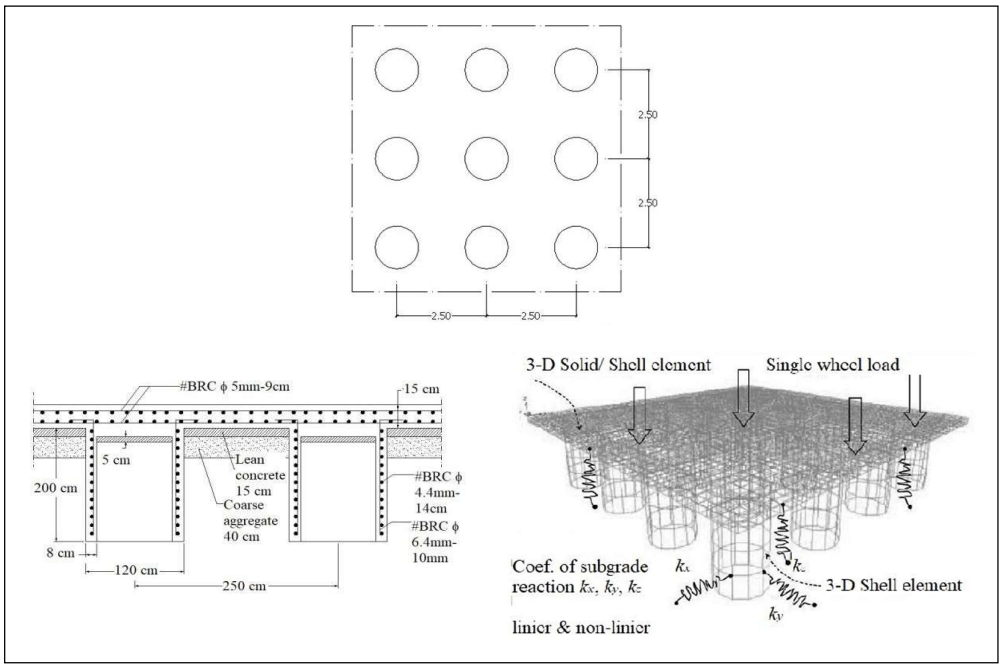
dan menyedot air dan udara di sisi dalam lembaran kedap air ini dengan menggunakan pompa vakum, yang dikenal dengan nama *vacuum consolidation* atau *vacuum preloading* (Indraratna, 2007).




Gambar 2.12 Skema *Vacuum Preloading*
(O'Kelly, 2014)

Dalam sistim ini drainase vertikal maupun horisontal terhubung dengan tepi saluran keliling dan tertutup oleh sistem membran. Saluran keliling diisi air atau larutan bentonite untuk menjaga penutupan yang sempurna dari membran di bagian tepi zona yang akan di vakum. Pompa vakum terhubung dengan sistem peralatan yang akan membuang air ke saluran tepi (Hardiyatmo, 2017).

### 2.3.4 Pondasi Cakar Ayam

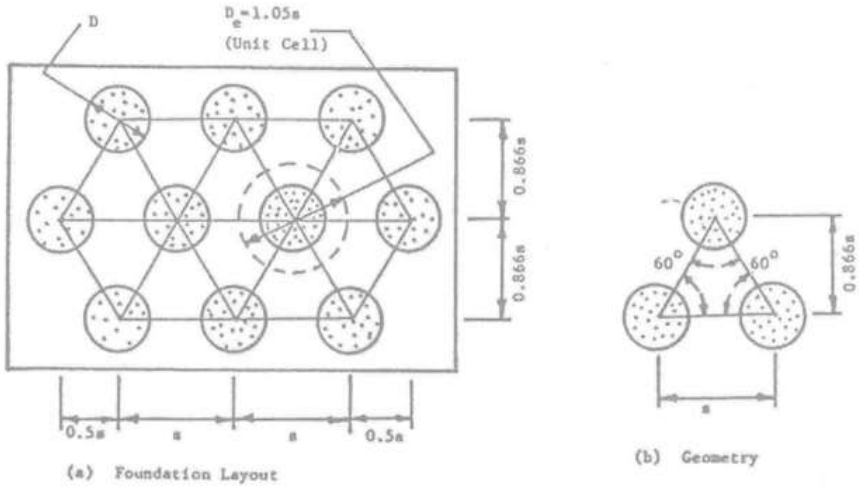



Gambar 2.13 Ilustrasi pondasi cakar ayam
(Adhitya Yoga Purnama, 2017)

Pondasi cakar ayam terdiri dari plat beton bertulang yang relatif tipis yang didukung oleh buis-buis beton bertulang yang dipasang vertikal dan disatukan secara monolit dengan plat beton pada jarak 200-250 cm. Tebal pelat beton berkisar antara 10-20 cm, sedang pipa-buis beton bertulang berdiameter 120 cm, tebal 8 cm dan panjang berkisar 150-250 cm. Buis-buis beton ini gunanya untuk pengaku pelat. Dalam mendukung beban bangunan, pelat buis beton dan tanah yang terkurung di dalam pondasi bekerjasama, sehingga menciptakan suatu sistem komposit yang di dalam cara bekerjanya secara keseluruhan. Telapak beton, pada pondasi cakar ayam sangat baik untuk beban yang merata. Sistem pondasi ini mampu mendukung beban 500-600 ton per kolom. Dalam hal ini, di bagian bawah kolom dibuatkan suatu telapak beton, untuk mengurangi tegangan geser pada plat beton. Untuk gedung berlantai 3-4 misalnya, sistem cakar ayam biayanya akan sama dengan pondasi tiang pancang 12 meter.

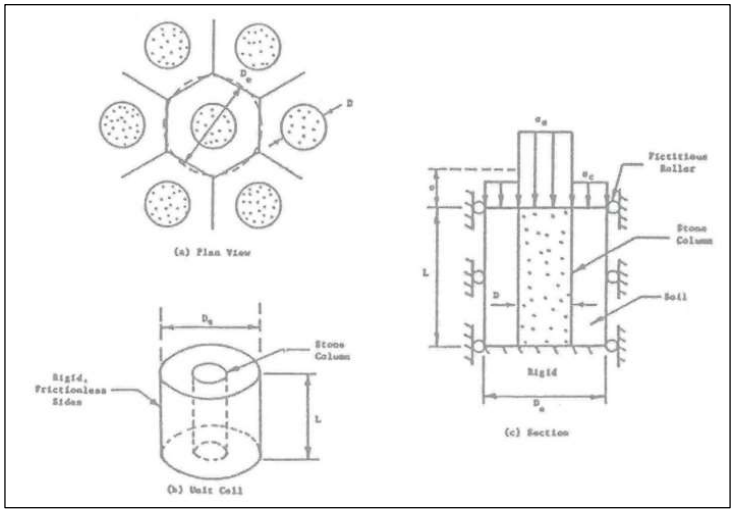
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pondasi cakar ayam yang ringan cocok untuk diimplementasikan pada tanah lumpur pasir dan *clay*. Ini karena semua besar penurunan berada di bawah batas aman, 25 mm. Tren positif juga menunjukkan bahwa ketika panjang pondasi cakar ayam meningkat, nilai penurunan juga semakin kecil. Tetapi implementasi belum cocok untuk diimplementasikan di tanah liat lunak karena penurunan yang terjadi masih sangat besar. (Ahmad Hakimi Mat Nora, 2015).

### 2.3.5 *Stone Column*




Gambar 2.14 *Stone Column Equilateral Triangular Pattern*
(Elias, 2006)

Salah satu metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan yaitu menggunakan *stone column*. *Stone column* adalah kolom-kolom vertikal dari kerikil yang dipadatkan di dalam tanah. Fungsi utama pemasangan *stone column* adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah yang lembek sehingga tanah lembek tersebut dapat menerima beban yang lebih besar dan penurunan (*settlement*) yang terjadi akan berkurang (Aisyah Putri, Muhardi, Ferry Fatnanta, 2017 dalam Nurtjahjaningtyas & Maliki, 2009).




Gambar 2.15 *Unit Cell Idealization*
(Elias, 2006)

Pemasangan kolom pada tanah akan mempengaruhi kepadatan dan kuat geser tanah di sekitar kolom. Satu kolom dan tanah lunak yang mengelilinginya disebut sebagai satu unit sel. Perbedaan pola dan jarak pemasangan kolom akan mempengaruhi bentuk unit sel sehingga akan mempengaruhi perbandingan luas area kolom dan tanah yang mengelilinginya (*area replacement ratio*). *Area replacement ratio* akan mempengaruhi distribusi tegangan yang terjadi pada kolom dan tanah yang mengelilinginya dan mempengaruhi kuat geser tanah tersebut.

**1. Material Pengisi**

Selain kerikil, penggunaan pasir, kapur, campuran kapur dengan semen, *sodium silika*, dan material kimia lainnya juga umum digunakan sebagai material pembuatan kolom. Campuran kapur dengan semen, *sodium silika*, ataupun material kimia lain akan menyebabkan terjadi reaksi *pozzolan* antara kolom dan tanah. Hal ini akan meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi indeks kompresibilitas tanah. Bahan lain yang juga digunakan sebagai material kolom adalah abu terbang dan abu dasar.

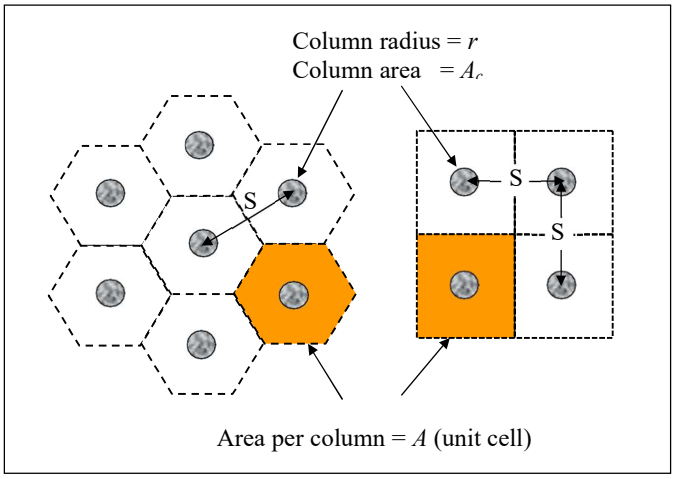
Penggunaan abu batubara dalam bidang konstruksi sudah banyak dilakukan. Abu terbang (*fly ash*) dapat digunakan sebagai pengganti portland cement, material konstruksi jalan, campuran grouting, material stabilisasi tanah,

dan pemanfaatan lainnya. Campuran *fly ash* pada tanah ekspansif dapat mengurangi sifat kembang susut tanah tersebut. Penambahan *fly ash* ke dalam tanah dapat menurunkan *spesific gravity (Gs)*, meningkatkan indeks plastisitas *(PI),* meningkatkan berat volume kering (*dry density*), menurunkan potensi pengembangan (*swelling potential*), dan menaikkan kekuatan tanah. (Aisyah Putri, Muhardi, Ferry Fatnanta, 2017 dalam Budi, Cristanto, & Setiawan, 2003).

Penggunaan abu terbang sebagai kolom untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif memberikan pengaruh berupa menurunnya pengembangan tanah, hal ini disebabkan karena *fly ash* memiliki sifat *pozzolanic* yaitu mengeras ketika bereaksi dengan air, sehingga tanah akan tertahan untuk tidak mengembang. Selain memberi pengaruh pada potensi pengembangan tanah, stabilisasi menggunakan kolom juga memberikan peningkatan daya dukung tanah (Putranto, Zaika, & Suryo, 2015).

Çelik & Çanakcı (2011) melakukan penelitian mengenai kuat geser tanah organik yang diperkuat menggunakan kolom pasir. Hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa rasio area kolom pasir terhadap tanah organik (*area replacement ratio*) merupakan faktor penting yang mempengaruhi kuat geser dari tanah organik yang distabilisasi.

## 2. Pengaruh Pola, Jarak dan Panjang Kolom




Gambar 2.16 *Typical column arrangements*
(Bryan A. McCabe, James A. McNeill, Jonathan A. Black, 2007)

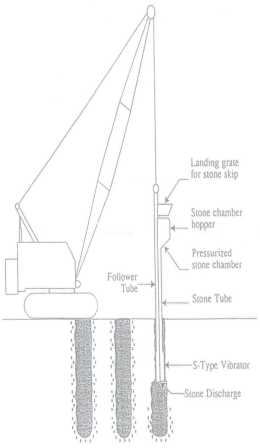
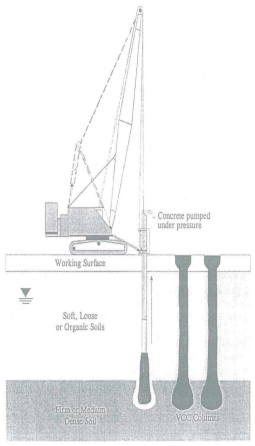
Anshorie, Zaika, & Munawir (2011) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi jarak dan panjang kolom stabilisasi tanah ekspansif terhadap daya dukung tanah. Diameter kolom yang digunakan adalah 3 cm. Variasi jarak antar kolom yaitu 1D, 1,25D, dan 1,5D, dan variasi panjang kolom ($D_f$) yaitu 1B, 2B, dan 3B. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa daya dukung tanah meningkat seiring dengan jarak antar kolom semakin rapat dan panjang kolom semakin panjang.

### *3.* Metode Pelaksanaan *Stone Column*

*Stone Column* adalah perkembangan alami dari pemadatan vibro dan aplikasi sistem vibro yang diperpanjang di luar aplikasi *densifikasi* tanah *granular* bersih yang relatif sempit.

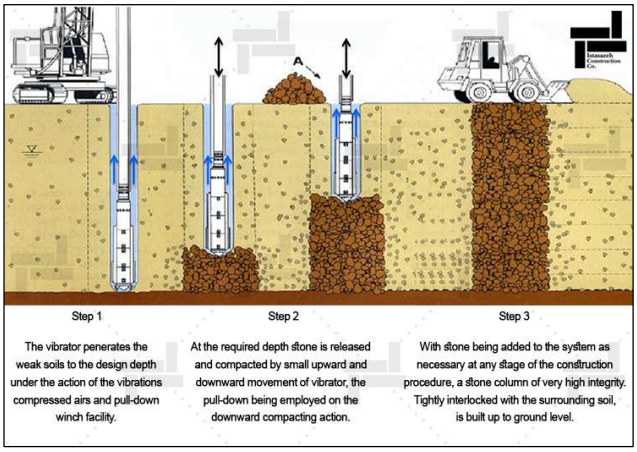
Tabel 2.6 Metode Pelaksanaan *Stone Column*

| Metode | Definisi |
|---|---|
| ***1. Vibro-replacement*** | Mengacu pada metode pemasangan basah di mana penyemprotan air digunakan untuk menyiram tanah keluar dari lubang yang tidak dilapisi untuk membantu penetrasi tanah oleh vibrator. Setelah lubang dibuat, tanah yang dihilangkan kemudian diganti dengan material pengurukan agregat yang diumpankan dari permukaan dan dipadatkan, digeser, di dasar probe.<br><br>Vibro Replacement menggunakan metode pemasangan basah yang menggantikan kantong tanah yang dalam dan sempit di tanah *in-situ* dengan kolom agregat batu.<br>Dalam metode ini, jet air bertekanan tinggi, yang terletak di ujung probe, digunakan untuk menggali lubang yang sempit dan terbuka (tanpa alas). Setelah lubang berkembang ke kedalaman desain, lubang dibilas beberapa kali dengan menaikkan dan menjatuhkan probe untuk menghilangkan lumpur dan pasir yang lepas di dasar lubang. Probe vibro ditarik dan sejumlah batu ditempatkan ke dalam lubang dari atas. Mode getaran probe diaktifkan dan dimasukkan ke dalam lubang untuk memadatkan pengangkatan batu. Probe tersebut ditarik kembali dan proses tersebut diulangi hingga terbentuk kolom batu ke permukaan tanah. Selama keseluruhan operasi, air terus menerus dipompa ke dalam lubang untuk mencegah keruntuhan dan untuk menjaga kebersihan agregat.<br>Metode ini paling cocok untuk lokasi dengan tanah lunak hingga keras dengan *undrained shear strenght* 200 hingga 1.000 psf dan tabel air tanah dangkal, dan di mana pencucian bor serta penahanan dan pembuangan limbah dapat ditangani secara praktis. |

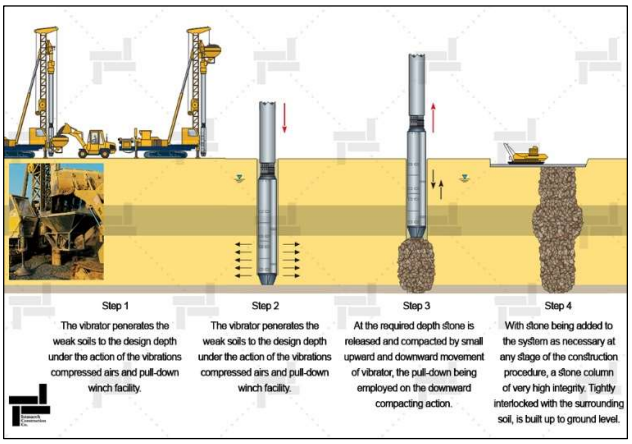
| | |
|---|---|
| ***2. Vibro-displacement***<br>  | Mengacu pada metode instalasi kering di mana hampir tidak ada tanah in-situ yang dibuang. Sebaliknya, tanah lunak tergeser oleh probe dan material pengurukan agregat (diumpankan di atas atau bawah lubang), ditekan dan dipadatkan menjadi tanah lunak, untuk membentuk kolom agregat.<br><br>Ketika dampak lingkungan hasil lebih kecil, stone column harus menggunakan metode vibro-displacement. Operasi adalah metode pemasangan kering di mana agregat batu dapat ditempatkan ke dalam lubang dari atas atau dari port agregat di bagian bawah probe. Meskipun bobot mati dan getaran probe, sebagai pengganti pengaliran air, digunakan untuk menggali lubang, pengaliran udara dan / atau pra-augering dapat juga digunakan untuk mencegah penyumbatan port agregat atau untuk membantu memajukan atau mengekstraksi probe. |
| ***3. Vibro – concrete column (VCC)***<br>  | Metode ini dapat menawarkan keuntungan perbaikan tanah yang diharapkan dari vibro-sistem, dengan karakteristik pembawa beban dari pondasi yang dalam.<br>Proses *Vibro Concrete Columns (VCC)* menggunakan vibrator umpan bawah yang dapat menembus tanah ke tingkat yang sesuai untuk bantalan. Beton dipompa melalui rakitan vibrator selama penarikan awal. Vibrator kemudian mengulang beton, memindahkannya ke tanah sekitarnya untuk membentuk dasar kolom berkapasitas tinggi dan diperbesar. Vibrator kemudian ditarik perlahan saat beton dipompa dan dipertahankan pada tekanan untuk membentuk poros beton kontinu hingga ke permukaan tanah. Di permukaan tanah, kolom beton sedikit menjamur untuk membantu pemindahan beban yang diterapkan ke dalam **Vibro Concrete Columns (VCC)** (lihat Gambar 14-14).<br>Pemasangan VCC adalah proses yang tidak berisik dan menyebabkan getaran minimal ke dalam tanah in-situ yang memungkinkan pemasangan yang berbatasan langsung dengan struktur yang ada. Karena ini adalah proses perpindahan kering, tidak ada pembusukan untuk dihilangkan dan tidak ada air yang memerlukan penahanan. |
| ***4. Geotextile Encased Columns (GEC)*** | **Geotextile Encased Columns (GEC)** terdiri dari penyisipan tabung geotekstil berkekuatan tinggi, mulus, dan kontinu ke dalam tanah lunak dengan mandrel. Tabung tersebut kemudian diisi dengan pasir atau kerikil halus untuk membentuk kolom dengan daya dukung yang tinggi. GEC biasanya memiliki diameter 30 inci. GEC dapat dipasang menggunakan metode replacement atau displacement.<br>▪ **Metode replacement** terdiri dari penggerak tiang pipa baja ujung terbuka ke lapisan bantalan. Tanah di dalam tiang diangkat dengan auger dan tabung geotekstil |

| | | |
|---|---|---|
| | | dimasukkan ke dalam tiang dan kemudian diisi dengan pasir atau kerikil halus.<br>▪ **Metode displacement** menggunakan pipa baja dengan dua flap dasar (tutup dekat kontak dengan permukaan tanah) dan digetarkan ke lapisan bantalan, menggusur tanah lunak saat pipa digetarkan ke kedalaman desain. Casing geotekstil dipasang dan diisi dengan pasir atau kerikil halus dan tiang pipa baja diekstraksi dengan getaran. Selama proses ekstraksi getaran ini, pasir atau kerikil di dalam geotekstil dipadatkan.<br><br>Menurut Metode Perbaikan Tanah, "Keuntungan utama GEC dibandingkan stone columns adalah bahwa mereka dapat digunakan di tanah lunak dengan *undrained shear strenght* serendah 25 psf. Geotekstil memberikan kendala lateral yang biasanya disediakan oleh tanah di sekitarnya untuk stone columns. GEC menyediakan drainase vertikal sementara, tetapi sangat baik, yang dapat mengakibatkan konstruksi yang sangat cepat, karena pembuangan tekanan air pori yang berlebihan. " |
| *5.* | ***Geopier® Columns*** | Geopier® Rammed Aggregate Pier TM (Geopiers) adalah varian dari stone columns, tetapi dengan membuat lubang dengan probe getar, lubang berdiameter 2 hingga 3 kaki dibor ke dalam tanah pondasi dan ditambahkan kerikil dan kemudian ditabrakkan ke dalam tanah pondasi (lihat Gambar di bawah). Geopier biasanya meluas hingga kedalaman 6 hingga 33 kaki. **Geopier** paling cocok untuk mendukung fondasi struktural yang ditempatkan di atas tanah kohesif yang relatif dangkal, lunak hingga kaku dengan *undrained shear strenght* mulai dari **300 hingga 4.000 psf** atau untuk pondasi yang ditempatkan di atas pasir dangkal, longgar hingga padat sedang berlumpur dan berlumpur.<br><br>Tanah harus stabil sebagai lubang terbuka, atau sebagai lubang yang tertutup sebagian, selama penempatan dan pemadatan timbunan kerikil. Kerikil ditempatkan di lift yang relatif tipis dengan pengangkatan pertama kerikil yang dipadatkan dengan palu hidrolik untuk membentuk bola lampu di bagian bawah piers, sehingga memberi tekanan pada tanah di bawah dan di sekitar dasar piers.<br>Proses ramming menggunakan tamper miring berenergi tinggi (250 hingga 650 kip-kaki per kaki) yang memadatkan kerikil dan memindahkannya secara lateral ke dalam dinding samping lubang. Tindakan ini meningkatkan kekuatan geser pada tanah sekitarnya, yang selanjutnya memperkuat massa tanah komposit yang distabilkan. |

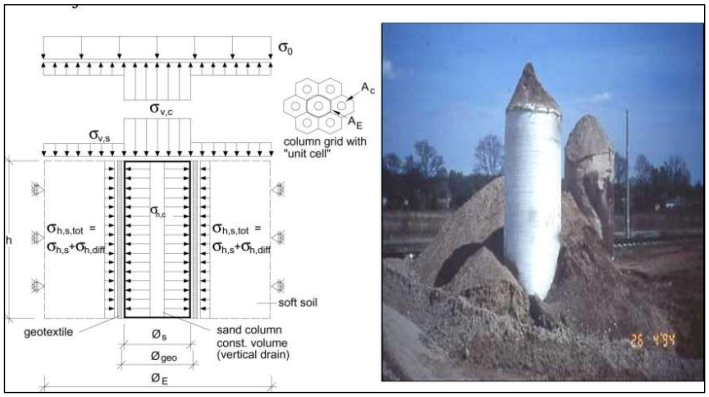
(Elias, 2006)




Gambar 2.18 *Vibro-displacement method*
(Istasazeh Service, 2020)




Gambar 2.17 *Vibro-replacement method*
(Istasazeh Service, 2020)




Gambar 2.19 *Geotextile Encased Columns*
(Dimiter Alexiew, Daniel Brokemper, Steve Lothspeich, 2012)

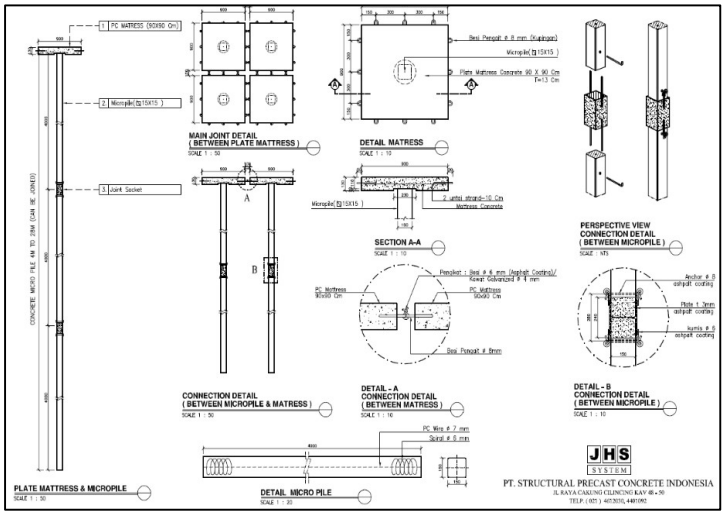
Kondisi tanah yang tidak cocok untuk *stone column* termasuk tanah yang memiliki lapisan tebal lempung yang sangat lunak atau sensitif dan bahan organik. Jika ketebalan lapisan tanah yang tidak cocok lebih dari diameter *stone column*, maka *stone column* mungkin tidak sesuai karena tanah yang sangat lunak tidak akan memberikan dukungan lateral yang memadai.

Selain itu, konstruksi *stone column* dapat terhambat oleh adanya lapisan penutup yang tebal dan padat, atau tanah dengan bongkahan batu besar, kerikil, atau penghalang lain yang mungkin memerlukan pengeboran awal sebelum pemasangan *stone column*.

*Stone column* dibangun dengan menggunakan instalasi *vibro-replacement* atau *vibro-displacement* dengan penempatan agregat batu menggunakan metode pengumpanan atas atau bawah (lihat gambar masing-masing).

### 2.3.6 Cerucuk Matras Beton

Merupakan inovasi terbaru yang dikembangkan dengan penggabungan sistem cerucuk dan matras beton untuk perkuatan tanah lunak pada tahun 1999. Sistem cermaton dikembangkan dari sistem tradisonal perkuatan tanah lunak di Indonesia, yaitu cerucuk dan galar kayu atau beton. Teknologi pracetak/ prategang digunakan untuk mensubstitusi cerucuk kayu menjadi cerucuk beton pracetak.




Gambar 2.20 Standar komponen cerucuk dan matras beton (JHS, 2017)

Cerucuk beton ini dapat disambung sampai kedalaman yang diinginkan. Matras beton pracetak digunakan untuk mensubstitusi galar kayu. Sistem ini telah diterapkan pada beberapa proyek perbaikan tanah lunak di Indonesia seperti perbaikan oprit Kali Sentiong Ancol {1999), apron Jalan Layang Paspati Bandung {2002), dan Perbaikan Kestabilan Lereng Kereta Api di Ciganea {2003}.

Dalam mendisain cerucuk dan matras beton, untuk cerucuk beton menggunakan ukuran 15 cm x 15 cm dengan bentuk persegi dan kedalamannya hanya bisa menembus nilai Nspt tidak lebih dari N ≤ 15.

### 2.3.7 Pile Slab

*Pile slab* merupakan struktur fondasi yang ditumpu oleh sistem kelompok tiang pancang dan diikat oleh *pile cap* yang digunakan untuk menahan dan yang mempunyai daya dukung rendah seperti pada tanah gambut (Misbahul Munir, 2018).

Daya dukung aksial pondasi tiang pancang dengan cara *static* dapat dilakukan dengan beberapa cara sebagai berikut:

1. Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal

   Daya dukung ultimate pondasi tiang $(Q_u)$ diperoleh dari gabungan daya dukung tahanan ujung $(Q_P)$ dan daya dukung tahanan gesek $(Q_S)$ dapat dihitung dengan persamaan berikut (Das, 1995).

   $$Q_u = Q_p + Q_s$$

   dimana :

   $Q_u$ = daya dukung ultimit (ton)

   $Q_p$ = daya dukung ujung (ton)

   $Q_s$ = daya dukung gesek (ton)

2. Daya Dukung Ujung

   Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung ujung tanah pasir, untuk faktor daya dukung tahanan ujung $N^*$ dan $N^*$ dapat dilihat pada gambar dengan persamaan (Das, 1995).

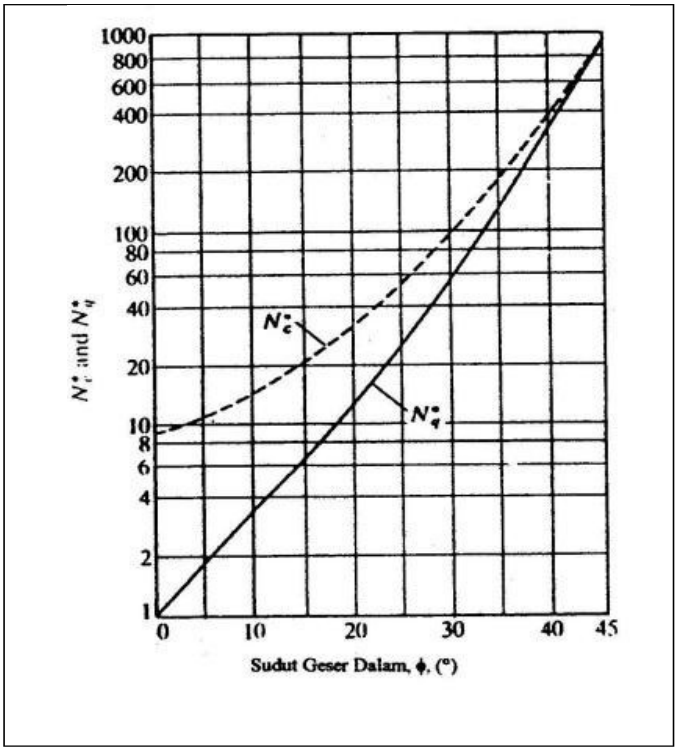
   $$Q_p = A_p . q_p = A_p . q' . N'_q$$

dimana :

$A_p$ = luas penampang tiang ($m^2$)

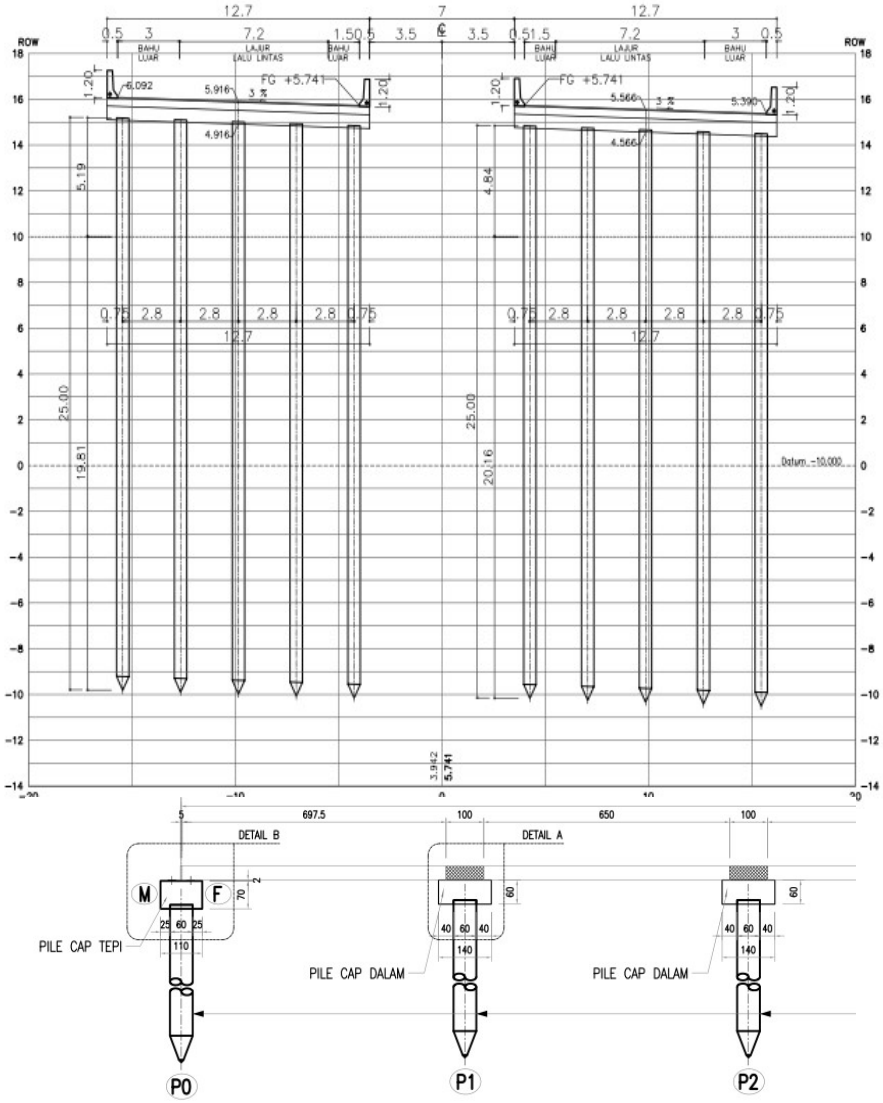
$q'$ = tegangan vertikal efektif ($ton/m^2$)

$N^*$ = faktor daya dukung ujung.




Gambar 2. 21 Faktor daya dukung tahanan ujung $N'_c$ *dan* $N'_q$

(Mayerhof, 1975 dalam Rahardjo, P. P., 2013)




Gambar 2.22 Jarak tipikal potongan melintang dan memanjang *Pile Slab* (Waskita Karya, 2019)

## 2.4 Kriteria Desain Jalan Tol

### 2.4.1 Kriteria desain geometrik

### 2.4.2 Kriteria desain hidrologi dan drainase

### 2.4.3 Kriteria desain struktur

### 2.4.4 Kriteria desain geoteknik

## 2.5 PLAXIS 2D

PLAXIS 2D adalah sebuah program komputer dua dimensi yang dibuat berdasarkan metode elemen hingga yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisa deformasi, penurunan, maupun stabilitas dalam rekayasa geoteknik. Hal ini dilengkapi dengan fitur untuk menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi menggunakan prosedur komputasi yang kuat dan secara teoritis.

Perkembangan program PLAXIS 2D dimulai pada tahun 1987 di Universitas Delft (*Technical University of Delft*) atas inisiatif dari Departemen Tenaga Kerjadan Pengelolaan Sumber Daya Air Belanda (*Dutch Department of Public Works and Water Management*). Tujuan awalnya adalah untuk menciptakan sebuah program komputer berdasarkan metode elemen hingga (FEM) 2D yang mudah digunakan untuk menganalisa tanggul-tanggul yang dibangun di atas tanah lunak di dataran rendah wilayah Holland.

Pada tahun-tahun berikutnya, program PLAXIS 2D dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat menganalisa dan menyelesaikan masalah-masalah yang lebih kompleks dalam seluruh aspek perencanaan geoteknik lainnya. Karena aktivitas yang terus berkembang, maka sebuah perusahaan bernama PLAXIS b.v. Kemudian didirikan pada tahun 1993. Pada tahun 1998, dirilis versi pertama PLAXIS untuk Windows.

Dalam program PLAXIS 2D terdapat dua tahap yang paling berpengaruh terhadap hasil keluaran, yaitu tahap pemodelan dan tahap perhitungan. Untuk tahap pemodelannya, program PLAXIS 2D menerapkan metode antar muka grafis yang

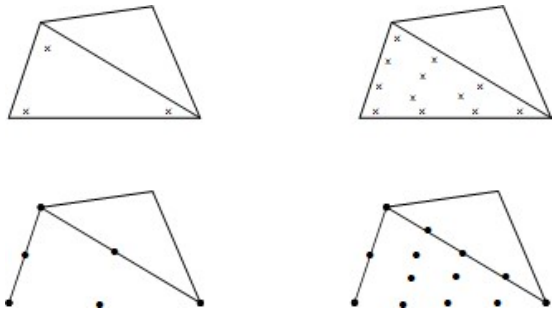
mudah digunakan sehingga pengguna dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang ingin dianalisa.

Untuk tahap perhitungannya, program PLAXIS 2D dapat dilakukan secara ini otomatis dengan berdasarkan kepada prosedur numerik. Sedangkan untuk hasil yang keluarannya, PLAXIS 2D dapat menampilkan data – data yang dibutuhkan guna untuk mendesain suatu proyek. Selain itu, terdapat juga menu *curve* yang dapat digunakan untuk membuat kurva dengan meninjau pada beberapa poin tertentu yang juga disebut dengan nodal.

Pada program PLAXIS 2D, ada dua cara dalam memodelkan struktur geoteknik, yaitu dengan *plane strain* dan *axisymmetry*. Model *plane strain* biasa digunakan untuk model geometri dengan penampang melintang yang cukup seragam, dengan kondisi tegangan dan pembebanan yang terjadi cukup panjang dalam arah tegak lurus terhadap penampang. Perpindahan dan regangan dalam arah tegak lurus terhadap penampangdiasumsikan tidak terjadi atau bernilai nol, akan tetapi tetap diperhitungkan sepenuhnya dalam analisa.

Sedangkan untuk model *axisymmetry* biasa digunakan untuk struktur geoteknik berbentuk lingkaran dengan bidang penampang radial yang cukup seragam dan kondisi pembebanan mengelilingi sumbu aksial. Untuk deformasi dan kondisi tegangan diasumsikan tersebar rata mengelilingi arah radial. Dalam model *axisymmetry* koordinat (x) menyatakan radius, sedangkan untuk koordinat (y) menyatakan sumbu simetris dalam arah aksial.

Elemen tanah pada program PLAXIS 2D dimodelkan berupa elemen segitiga, dimana elemen tersebut dibagi menjadi dua jenis yaitu elemen segitiga dengan 6 titik nodal dan elemen segitiga dengan 15 titik nodal. Hasil analisa elemen hingga dalam program PLAXIS 2D dengan menggunakan 15 titik nodal akan memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan hanya 6 titik nodal. Akan tetapi proses perhitungan dengan 15 titik nodal akan memakan waktu lebih lama karena banyaknya jumlah perhitungan yang dilakukan dibandingkan hanya dengan menggunakan 6 titik nodal. Perbedaan 6 titik nodal dengan 15 titik nodal dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.23 Perbedaan 6 titik nodal dengan 15 titik nodal
(atas *stress points*, bawah *nodes*)

Pada program PLAXIS 2D juga terdapat beberapa jenis pemodelan tanah. Adapun jenis pemodelan tanahnya ialah sebagai berikut:

1. Model *Mohr-Coulomb* (MC)

   Model *Mohr-Coulomb* merupakan model elastis-plastis yang terdiri dari lima buah parameter, yaitu $E$ dan $v$ untuk memodelkan elastisitas tanah; $\varphi$ dan $c$ untuk memodelkan plastisitas tanah dan $\psi$ sebagai sudut dilatansi. Model *Mohr-Coulomb* merupakan suatu pendekatan "ordo pertama" dari perilaku tanah atau batuan. Model ini disarankan untuk digunakan dalam analisis awal dari masalah yang dihadapi.

2. Model *Jointed-Rock* (JR)

   Model *Jointed-Rock* atau model batuan dengan kekar adalah sebuah model elastis plastis anisotropiss, yang dikembangkan khusus untuk memodelkan perilaku lapisan batuan yang mempunyai stratifikasi dan arah-arah kekar (*fault*) tertentu.

3. Model *Hardening Soil* (HS)

   Model *Hardening Soil* merupakan model tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku dari tanah. Seperti pada model *Mohr-Coulomb,* kondisi tegangan batas dideskripsikan oleh sudut geser ($\varphi$), kohesi ($c$), dan sudut dilatansi ($\psi$). Berbeda dengan model *Mohr-Coulomb*, model *Hardening Soil* mengikut sertakan modulus kekakuan yang bergantung pada tegangan. Hal ini berarti bahwa kekakuan akan semakin meningkat terhadap tegangan.

4. Model *Soft Soil Creep* (SSC)

   Model *Soft Soil Creep* merupakan model yang relatif baru yang telah dikembangkan untuk aplikasi masalah penurunan pada pondasi, timbunan dan lain- lain. Untuk masalah terowongan atau galian, model *Soft Soil Creep* tidak dapat menggantikan model *Mohr-Coulomb* yang sederhana. Seperti halnya pada model *Mohr-Coulomb*, kondisi awal tanah yang benar juga merupakan hal yang penting saat menggunakan model *Soft Soil Creep*.

5. Model *Soft Soil* (SS)

   Model *Soft Soil* merupakan jenis model *Cam-Clay* yang ditujukan khusus untuk analisis kompresi primer dari tanah lempungan yang terkonsolidasi normal. Meskipun kemampuan dari model ini berada di bawah model *Hardening Soil*, namun model *Soft Soil* tetap dipertahankan dalam versi 8 karena beberapa pengguna PLAXIS mungkin masih terbiasa dengan model ini dan masih ingin menggunakannya.

Selain itu, dalam memodelkan elemen tanah pada program PLAXIS 2D dapat dilakukan dalam dua kondisi. Adapun kedua kondisi tersebut ialah :

1. Kondisi *drained*

   Kondisi *drained* merupakan kondisi untuk tanah yang memiliki permeabilitas besar seperti tanah pasir, tanah yang mengalami pembebanan sangat lambat, serta untuk menstimulasikan perilaku tanah dalam jangka panjang. Kondisi *drained* pada program PLAXIS 2D digunakan untuk mengatur tidak ada kenaikan tekanan air pori (*pore water pressure*) pada material tanah.

2. Kondisi *undrained*

   Kondisi *undrained* merupakan kondisi untuk tanah yang memiliki permeabilitas kecil seperti tanah lempung sehingga ketika diberikan *excess pore water pressure* tidak langsung terdisipasi atau teralirkan. Kondisi *undrained* pada program PLAXIS 2D digunakan untuk mengatur timbulnya kenaikan tekanan air pori (*excess pore water pressure*) pada material tanah.

# BAB 3 METODE PENELITIAN

## 3.1 Metode Penelitian

Model penelitian ini merupakan abstraksi dari fenomena-fenomena yang sedang diteliti. Sesuai dengan judul yang penulis kemukakan yaitu "Optimalisasi Perbaikan Tanah Gambut Sebagai Pondasi Pada Konstruksi Jalan Tol". Maka secara sistematis untuk menggambarkan hubungan antara variable independent dengan variable dependent.

Dimana:
ξ = variabel yang berpengaruh terhadap Y tetapi tidak diteliti
X = variabel independen (bebas)
Y = variabel dependen (terikat)
Pyx = pengaruh variabel X terhadap Y

Gambar 3.1 Skema penelitian

Variabel independent (X) dalam penelitian ini adalah:

a. Data primer simulasi (X1) merupakan data hasil pemodelan dari data sekunder
b. List metode perbaikan tanah (X2)
c. *Composite method of soil improvement* (X3)

Variabel dependen (Y) dalam penelitian ini adalah daya dukung tanah.

## 3.2 Lokasi Penelitian

Dalam penelitian ini, jumlah data disesuaikan dengan kebutuhan pemodelan plaxis yang kemudian akan dibuatkan data kuantitatif dalam bentuk matriks yang secara teknis, waktu dan biaya menjadi tolak ukur penilaian atas metode yang dipakai dalam pemodelan.

Lokasi penelitian adalah pada Sta 167+600 – 177+600 merupakan bagian dari ruas tol PPKA yang bertanah gambut. Tol PPKA merupakan ruas tol yang

terbentang dan perbatasan Lampung – Sumatera Selatan sampai dengan kota Kayu Agung, Kabupaten Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan.

Gambar 3.2 Lokasi Penelitian
(Waskita Karya, 2019)

## 3.3 Metode Analisis Data

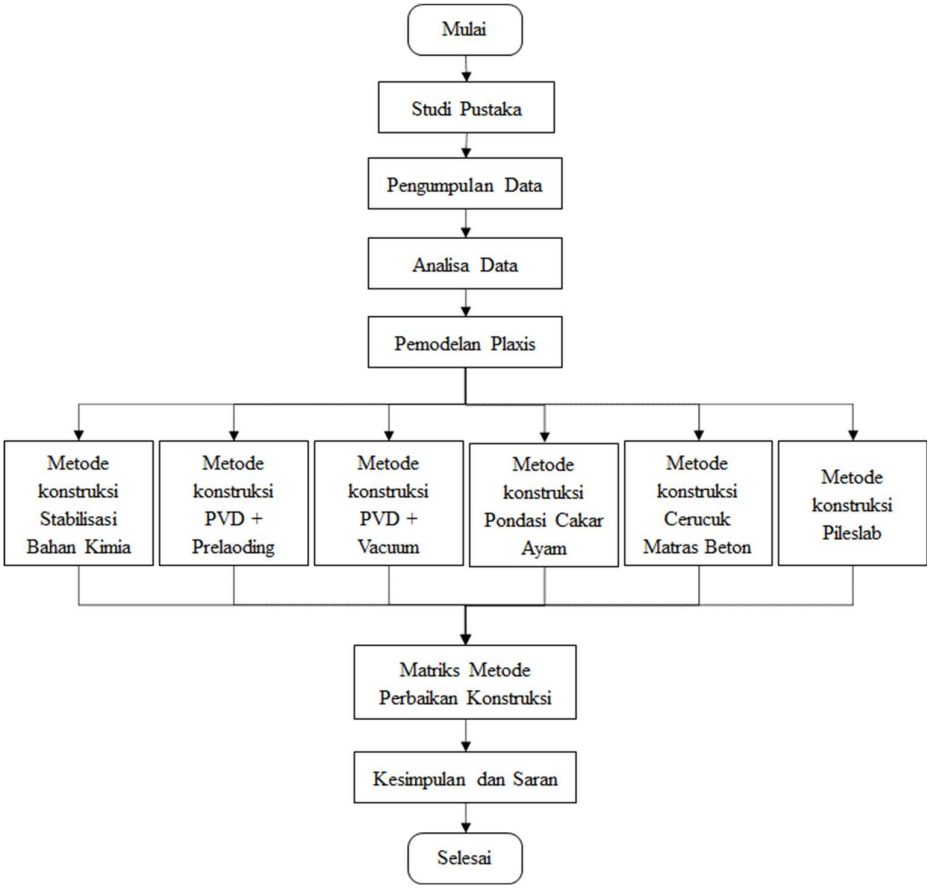
Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam bagan alir di bawah ini sebagaimana Gambar 3.3.

### 3.3.1 Studi Pustaka

Dalam tahapan ini dilakukan studi terhadap teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa studi sebelumnya yang berkaitan penelitian ini juga akan menjadi pertimbangan.

### 3.3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data berupa data sekunder dan data primer. Data sekunder berupa studi literatur dan studi penelitian terdahulu. Studi literatur yang dimaksud adalah mengumpulkan dan mempelajari literatur yang digunakan sebagai acuan dalam melakukan penelitian ini. Data primer diperoleh dengan pengambilan dan pengujian data langsung di lapangan. Data ini merupakan data utama yang dibutuhkan untuk penelitian ini.




Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian

Data yang digunakan untuk membuat karakterisasi sifat fisis dan teknis pada tanah gambut di Ogan Komering Ilir, Sumatera Selatan, terdiri atas data primer yang diperoleh dari hasil penyelidikan tanah pada proyek pembangunan jalan tol PPKA seksi 3 mulai STA 167+600 - 177+600, meliputi data pengeboran di lapangan sampai kedalaman tanah keras dan data hasil pengujian laboratorium. Data primer ini berasal dari dua periode pengujian yang berbeda. Pada periode pertama, hasil yang diperoleh menunjukkan keberadaan lapisan tanah gambut dengan ketebalan antara 6 – 8 meter. Walaupun sampel-sampel dalam tabung tersebut sudah dilindungi semaksimal mungkin, hasil dari parameter-parameter fisik maupun teknis memperlihatkan hasil yang konservatif atau *lower boundary condition*. Selanjutnya, penyelidikan gambut dilakukan pada periode kedua untuk memperkuat hasil analisis dari periode pertama. Pada periode ini, pengambilan sampel hanya terbatas pada lapisan gambut saja dengan menggunakan tempat

sampel yang lebih representatif untuk menampung serat-serat dan air yang terdapat pada lapisan gambut sehingga hasil analisis menunjukkan tingkat keyakinan yang lebih tinggi mengenai parameter-parameter tanah gambut.

### 3.3.3 Analisis Data

Data yang sudah diperoleh selanjutnya diintepretasikan dalam suatu informasi yang dibutuhkan. Data utama yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data bor dan pengujian di laboratoriumnya. Data tersebut dipetakan dan selanjutnya diterjemahkan untuk menjadi *input* dalam pemodelan *Plaxis 2D.*

### 3.3.4 Pemodelan Konstruksi

Dalam tahapan pemodelan plaxis ini divariasikan menggunakan 6 metode konstruksi, yaitu antara lain:

1. Metode Konstruksi Stabilisasi Bahan Kimia
2. Metode Konstruksi PVD Preloading
3. Metode Konstruksi Vacuum Preloading
4. Metode Konstruksi Cakar Ayam
5. Metode Konstruksi Cerucuk Matras Beton
6. Metode Konstruksi Pileslab

*Output* utama dalam pemodelan ini adalah untuk mengetahui stabilitas dan faktor keamanannya. Selain itu selanjutnya ditinjau juga dalam kemudahan pelaksanaan, waktu dan biaya.

### 3.3.5 Matriks Metode Konstruksi

Hasil yang diperoleh dalam pemodelan konstruksi tahap sebelumnya selanjutnya dibuat dalam bentuk matriks, sehingga akan diketahui metode mana yang paling optimal dalam pelaksanaan konstruksinya.

### 3.3.6 Kesimpulan dan Saran

Selanjutnya dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan penelitian dan pengujian yang telah dilakukan sesuai dengan tujuan penelitian ini. Penelitian ini tidak mutlak benar, untuk itu disampaikan saran-saran untuk tindak lanjut dari penelitian ini.

### 3.4 Zonasi Kajian

Didalam kajian ini menggunakan data tanah yang telah dilengkapi dengan data laboratorium yang dimana terdapat 6 titik lokasi yang masing – masing lokasi dapat mewakili kurang lebih 1 km dari total jarak untuk jalan tol seksi III Pematang Panggang – Kayu Agung sekitar 10 km dari sta 167+600 hingga sta 177+600.

Berikut adalah data tanah yang digunakan untuk kajian penentuan jenis perbaikan tanah pada lokasi PPKA seksi 3.

Tabel 3.1 Zonasi Kajian

| No | Kode | STA | Zonasi STA |
|---|---|---|---|
| 1 | BH.3.1 | 167+450 | 167+000 ~ 168+000 |
| 2 | B.H.3.2 | 168+400 | 168+000 ~ 169+000 |
| 3 | B.H.3.3 | 170+400 | 169+000 ~ 171+000 |
| 4 | B.H.3.4 | 171+300 | 171+000 ~ 172+000 |
| 5 | B.H.3.5 | 172+300 | 172+000 ~ 173+000 |
| 6 | B.H.3.6 | 173+300 | 173+000 ~ 177+600 |

(Multi Phi Beta, 2018)

Untuk selanjutnya dilapangan dilakukan bor inti kurang lebih per 100m untuk mengetahui kedalaman gambut dengan syarat kedalaman bor inti adalah minimum 40m dengan syarat tidak boleh berhenti sebelum menemukan nilai n-SPT ≥ 40 dengan minimal 3 kali pengulangan di nilai kisaran teresebut.

## 3.5 Hasil Soil Investigasi

Tabel 3.2 Resume Lapisan Gambut

| STA | Borlog | Tebal Gambut | STA | Borlog | Tebal Gambut |
|---|---|---|---|---|---|
| STA 167+450 | BH 3.1 | 6.5 m | STA 169+100 | BH 15 | 7 m |
| STA 167+600 | HB 1 | 7 m | STA 169 +200 | BH 16 | 7 m |
| STA 167+700 | HB 2 | 6 m | STA 169+300 | BH 17 | 7 m |
| STA 167+800 | HB 3 | 7 m | STA 169+400 | BH 18 | 7 m |
| STA 167+900 | HB 4 | 8 m | STA 169+550 | BH 19 | 8.25 m |
| STA 168+000 | HB 5 | 7 m | STA 169+600 | BH 20 | 7 m |
| STA 168+100 | HB 6 | 7 m | STA 169+700 | BH 21 | 7.25 m |
| STA 168+200 | HB 7 | 8 m | STA 169+800 | BH 22 | 7.25 m |
| STA 168+300 | BH 8 | 7 m | STA 170+400 | BH 3.3 | 7 m |
| STA 168+400 | BH 3.2 | 8 m | STA 171+300 | BH 3.4 | 6 m |
| STA 168+500 | BH 9 | 7 m | STA 172+300 | BH 3.5 | 7 m |
| STA 168+600 | BH 10 | 7 m | STA 173+300 | BH 3.6 | 6.5 m |
| STA 168+700 | BH 11 | 8 m | STA 174+300 | BH 3.7 | 8 m |
| STA 168+800 | BH 12 | 8 m | STA 174+750 | BH 3.8 | 8 m |
| STA 168+900 | BH 13 | 7 m | STA 175+650 | BH 3.9 | 7 m |
| STA 169+000 | BH 14 | 7 m | STA 177+450 | BH 3.10 | 1 m |

(Multi Phi Beta, 2018)

Lokasi PPKA Seksi-3 Sta 167+600 s/d Sta 177+600 merupakan daerah yang memiliki ketebalan gambut hingga kedalaman 8m.

Gambar 3.4 Core box BH 3.3 (0.00 – 5,00 m) dan (5,00 – 10,00 m)
(Multi Phi Beta, 2018)

### 3.5.1 Hasil Uji Laboratorium Kadar Organik

Berdasarkan uji kadar organik, tanah gambut ini memiliki kadar organik tinggi yaitu 59.61% - 81.32%. Hal ini menunjukkan bahwa tanah gambut tersebut memiliki tingkat pelapukan yang tinggi, dimana material gambut tersebut berasal

dari tumbuh-tumbuhan. Kondisi kadar organik yang tinggi pada tanah gambut ini didukung oleh kadar air yang sangat tinggi, yaitu antara 192.57% - 748.42%. Hal ini disebabkan oleh angka pori yang sangat besar.

Tabel 3.3 Hasil pengujian kadar organik

| Nomor Sampel | | BH-03.1 | BH-03.2 | BH-03.3 |
|---|---|---|---|---|
| Kedalaman | (m) | 03.00-03.50 | 03.00-03.50 | 03.00-03.50 |
| Kadar Air | (%) | 453.33 | 192.57 | 456.18 |
| Kadar Abu | (%) | 5.62 | 11.92 | 3.36 |
| Kadar Organik | (%) | 68.89 | 65.14 | 81.32 |

| Nomor Sampel | | BH-03.4 | BH-03.5 | BH-03.6 |
|---|---|---|---|---|
| Kedalaman | (m) | 03.00-03.50 | 03.00-03.50 | 03.00-03.50 |
| Kadar Air | (%) | 748.42 | 466.46 | 417.76 |
| Kadar Abu | (%) | 4.76 | 6.51 | 4.51 |
| Kadar Organik | (%) | 59.61 | 63.13 | 76.64 |

(Multi Phi Beta, 2018)

### 3.5.2 Hasil Uji Laboratorium *Properties Index*

Tabel 3.4 *Properties Index (1)*

| No | Location | Depth | Water Content | Unit Weight | Dry Density | Specific Gravity |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Kedalaman) | (kadar air) | (Berat isi) | (Berat isi Kering) | (berat Jenis) |
| | (Jenis contoh) | (m) | Wn | γn | γn | $G_s$ |
| | | | ( % ) | (gr/cm³) | (gr/cm³) | (gr/cm³) |
| 1 | BH-3.1 | 03.00-03.50 | 448.24 | 0.960 | 0.175 | 1.1267 |
| 2 | BH-3.2 | 03.00-03.50 | 192.54 | 1.003 | 0.343 | 1.1161 |
| 3 | BH-3.3 | 03.00-03.50 | 754.77 | 1.015 | 0.119 | 1.3275 |
| 4 | BH-3.4 | 03.00-03.50 | 410.23 | 0.952 | 0.187 | 1.3752 |
| 5 | BH-3.5 | 03.00-03.50 | 353.62 | 1.017 | 0.224 | 1.2724 |
| 6 | BH-3.6 | 05.00-05.55 | 469.82 | 0.985 | 0.173 | 1.0738 |

(Multi Phi Beta, 2018)

Tanah gambut ini memiliki berat isi yang sangat rendah, yaitu hampir sama dengan berat isi air. Berat isi tanah gambut ini adalah antara 0.95 – 1.02. Dengan berat isi yang sangat ringan, elemen material gambut bisa melayang di dalam air. Sedangkan dengan berat jenis tanah gambut, nilainya sangat rendah, yaitu antara 1.07 – 1.37.

Derajat kejenuhan menunjukkan 92.93% - 98.43%, yang berarti bahwa semua pori terisi air Adapun angka pori memperlihatkan nilai yang sangat besar 2.26 – 10.38, artinya volume pori jauh lebih besar daripada volume solid. Hal ini berbanding lurus dengan nilai porositas yaitu 69.28% – 91.05%.

Tabel 3.5 *Properties Index (2)*

| No | Location | Depth | Saturability | Void Ratio | Porosity | Organic Content |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (Kedalaman) | (Kejenuhan) | (Angka Pori) | (Kelengasan) | (Kadar Organik) |
| | (Jenis contoh) | (m) | Sr | e | n | |
| | | | (%) | - | (%) | (%) |
| 1 | BH-3.1 | 03.00-03.50 | 92.93 | 5.43 | 84.46 | 68.89 |
| 2 | BH-3.2 | 03.00-03.50 | 95.29 | 2.26 | 69.28 | 65.14 |
| 3 | BH-3.3 | 03.00-03.50 | 98.43 | 10.18 | 91.05 | 81.32 |
| 4 | BH-3.4 | 03.00-03.50 | 88.52 | 6.37 | 86.44 | 59.61 |
| 5 | BH-3.5 | 03.00-03.50 | 96.24 | 4.68 | 82.38 | 63.13 |
| 6 | BH-3.6 | 05.00-05.55 | 96.80 | 5.21 | 83.90 | 76.64 |

(Geoinves, 2018)

### 3.5.3 Hasil Uji *Compresibility Index*

Sifat kompresiblitas tanah gambut ini ditunjukkan oleh nilai indeks kompresi antar 0.32 – 2.55. Nilai tersebut mengindikasikan sifat pemampatan yang sangat tinggi dari material gambut. Adapun kofisisen konsolidasi adalah antara 1.52E-03 – 7.99E-04.

Tabel 3.6 *Compresibility Index*

| No | Location | Depth | Consolidation | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | (Kedalaman) | (konsolidasi) | | |
| | (Jenis contoh) | (m) | $e_0$ | $C_C$ | $C_V$ |
| | | | | | ($cm^2$/sec) |
| 1 | BH-3.1 | 03.00-03.50 | 5.3997 | 1.24 | 1.25E-03 |
| 2 | BH-3.2 | 03.00-03.50 | 2.2554 | 0.32 | 5.62E-03 |
| 3 | BH-3.3 | 03.00-03.50 | 10.1688 | 2.55 | 2.86E-04 |
| 4 | BH-3.4 | 03.00-03.50 | 6.0598 | 1.57 | 6.44E-04 |
| 5 | BH-3.5 | 03.00-03.50 | 4.6720 | 0.98 | 7.47E-04 |
| 6 | BH-3.6 | 05.00-05.55 | 6.0031 | 1.70 | 7.99E-04 |

(Multi Phi Beta, 2018)

### 3.5.4 Hasil Uji *Consolidation*

Tabel 3.7 *Summary* Konsolidasi

| STA | Coef. Of Consolidation ( Cv ) $Cm^2/sec$ | Rebound Index ( Cr ) | Compression Index ( Cc ) |
|---|---|---|---|
| 167+700 | 0.94 | 0.15 | 5.21 |
| 168+000 | 0.10 | 0.28 | 6.03 |
| 168+500 | 0.42 | 0.22 | 4.27 |
| 169+000 | 0.22 | 0.19 | 8.20 |
| 169+500 (2) | 0.38 | 0.29 | 9.50 |
| 169+500 (4) | 0.50 | 0.18 | 5.15 |
| 170+030 | 0.27 | 0.25 | 5.10 |
| 170+500 | 0.18 | 0.15 | 7.30 |
| 171+250 | 0.29 | 0.35 | 6.60 |
| 172+000 | 0.22 | 0.24 | 3.78 |
| 172+600 (2.5) | 0.46 | 1.91 | 6.40 |
| 172+600 | 0.51 | 0.36 | 5.00 |
| 173+000 | 0.34 | 0.25 | 5.81 |
| 173+600 | 1.04 | 0.22 | 3.24 |
| 174+100 | 0.77 | 0.05 | 5.27 |
| 174+600 | 0.47 | 0.22 | 8.92 |
| 175+000 | 0.22 | 5.91 | 6.10 |
| 175+550 | 0.50 | 0.36 | 5.28 |
| 176+100 | 0.67 | 0.28 | 5.84 |
| 176+600 | 0.23 | 0.79 | 8.50 |
| 177+400 | 0.41 | 0.11 | 9.60 |

(Geoinves, 2018)

### 3.5.5 Hasil Uji Gambut

Tabel 3.8 *Summary Test Peat From Chemical Laboratory*

| No | JENIS TEST | STA 167+700 4 m | STA 168+000 4 m | STA 168+500 4 m | STA 169+000 4 m | STA 169+500 2 m | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | pH | | | | | | |
| | pH (NaF) 1' | 6.5 | 6.1 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| | pH (NaF) 60' | 6.6 | 6.4 | 6.4 | 6.6 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| 2 | Bahan Organik : | | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C , Walkley & Black | 28.83 | 35.57 | 24.61 | 22.52 | 27.68 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | N , Kjeldahi | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C/N | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 3 | Extrak Air | | | | | | |
| | S | 13.7 | 29.9 | 35.9 | 29.1 | 24.3 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | Cl | 0.9 | 1.2 | 1.3 | 2.0 | 2.0 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 4 | Kadar Abu | 2.12 | 2.14 | 3.62 | 1.95 | 0.77 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 5 | Kadar Serat | | | | | | |
| | Tidak Digerus | 68.8 | 81.3 | 68.8 | 62.5 | 50.0 | |
| | Digerus | 37.5 | 62.5 | 56.3 | 37.5 | 31.3 | |
| 6 | Analisa Kimia, % Hilang Pijar | 98.49 | 97.77 | 96.11 | 98.32 | 99.07 | SNI 0449-2010 |

(Geoinves, 2018)

| No | JENIS TEST | STA 169+500 4 m | STA 170+030 4 m | STA 170+500 4 m | STA 171+250 4 m | STA 172+000 4 m | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | pH | | | | | | |
| | pH (NaF) 1' | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.4 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| | pH (NaF) 60' | 6.5 | 6.6 | 6.6 | 6.5 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| 2 | Bahan Organik : | | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C , Walkley & Black | 33.18 | 29.64 | 33.26 | 51.69 | 34.75 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | N , Kjeldahi | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C/N | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 3 | Extrak Air | | | | | | |
| | S | 17.7 | 30.2 | 18.7 | 8.8 | 31.0 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | Cl | 0.9 | 2.1 | 0.9 | 1.4 | 0.90 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 4 | Kadar Abu | 0.80 | 1.27 | 1.82 | 0.86 | 3.95 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 5 | Kadar Serat | | | | | | |
| | Tidak Digerus | 62.5 | 87.5 | 62.5 | 62.5 | 77.8 | |
| | Digerus | 50.0 | 62.5 | 37.5 | 56.3 | 55.6 | |
| 6 | Analisa Kimia, % Hilang Pijar | 99.24 | 99.1 | 98.96 | 99.42 | 96.97 | SNI 0449-2010 |

| No | JENIS TEST | STA 172+600 2.5 m | STA 172+600 4 m | STA 173+000 4 m | STA 173+600 4 m | STA 174+100 4 m | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | pH | | | | | | |
| | pH (NaF) 1' | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| | pH (NaF) 60' | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 6.8 | 6.6 | Ekstrak 1 : 5 |
| 2 | Bahan Organik : | | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C , Walkley & Black | 38.88 | 51.47 | 25.46 | 19.1 | 50.09 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | N , Kjeldahi | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C/N | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 3 | Extrak Air | | | | | | |
| | S | 13.9 | 7.9 | 57.8 | 71.4 | 13.2 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | Cl | 0.8 | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 0.2 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 4 | Kadar Abu | 1.12 | 1.57 | 1.27 | 1.41 | 3.39 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 5 | Kadar Serat | | | | | | |
| | Tidak Digerus | 75 | 62.5 | 77.8 | 87.5 | 62.5 | |
| | Digerus | 56.3 | 43.8 | 61.1 | 56.3 | 31.3 | |
| 6 | Analisa Kimia, % Hilang Pijar | 99.18 | 99.07 | 99.12 | 98.25 | 95.92 | SNI 0449-2010 |

| No | JENIS TEST | STA 174+600 4 m | STA 175+000 4 m | STA 175+550 4 m | STA 176+100 2.5 m | STA 176+600 4 m | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | pH | | | | | | |
| | pH (NaF) 1' | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | Ekstrak 1 : 5 |
| | pH (NaF) 60' | 6.6 | 6.6 | 6.7 | 6.6 | 6.5 | Ekstrak 1 : 5 |
| 2 | Bahan Organik : | | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C , Walkley & Black | 26.44 | 16.63 | 24.63 | 32.88 | 16.61 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | N , Kjeldahi | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C/N | - | - | - | - | - | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 3 | Extrak Air | | | | | | |
| | S | 45.4 | 49.9 | 14.8 | 16.2 | 47.4 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | Cl | 0.4 | 2.5 | 1.1 | 0.9 | 3.9 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 4 | Kadar Abu | 4.97 | 3 | 0.2 | 1.87 | 3.09 | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 5 | Kadar Serat | | | | | | |
| | Tidak Digerus | 66.7 | 62.5 | 75 | 62.5 | 66.7 | |
| | Digerus | 44.4 | 31.3 | 43.8 | 56.3 | 38.9 | |
| 6 | Analisa Kimia, % Hilang Pijar | 96.86 | 97.06 | 98.87 | 97.67 | 98.28 | SNI 0449-2010 |

(Geoinves, 2018)

| No | JENIS TEST | STA | STA | STA | STA | STA | KETERANGAN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 176+400 | | | | | |
| | | 4 m | | | | | |
| 1 | pH | | | | | | |
| | pH (NaF) 1' | 6.6 | | | | | Ekstrak 1 : 5 |
| | pH (NaF) 60' | 6.9 | | | | | Ekstrak 1 : 5 |
| 2 | Bahan Organik : | | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C , Walkley & Black | 16.04 | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | N , Kjeldahi | - | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | C/N | - | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 3 | Extrak Air | | | | | | |
| | S | 44.5 | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| | Cl | 1.8 | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 4 | Kadar Abu | 0.75 | | | | | Terhadap Contoh Kering 105° C |
| 5 | Kadar Serat | | | | | | |
| | Tidak Digerus | 62.5 | | | | | |
| | Digerus | 37.5 | | | | | |
| 6 | Analisa Kimia, % Hilang Pijar | 98.82 | | | | | SNI 0449-2010 |

(Geoinves, 2018)

## 3.6 Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah

Instrumen penelitian digunakan untuk mengukur nilai variabel yang diteliti. Dengan demikian jumlah instrumen yang akan digunakan untuk penelitian akan tergantung pada jumlah variabel yang diteliti.

Skala pengukuran merupakan kesepakatan yang digunakan sebagai acuan untuk menentukan optimal atau tidaknya suatu proses perbaikan tanah dan akan menghasilkan data kualitatif berbobot untuk masing masing pekerjaan perbaikan tanah. Dengan skala pengukuran ini, maka nilai variabel yang diukur dengan instrumen tertentu dapat dinyatakan dalam bentuk angka, sehingga akan lebih akurat, efisien dan komunikatif.

## 3.7 Tebal Gambut dan Tinggi Timbunan

Ketebalan gambut di Jalan Tol Pematang Panggang Kayu Agung seksi 3 berkisar 3 – 8m namun didominasi kedalaman gambut lebih dari 5m. Tabel 3.9 merupakan data tebal gambut dan tinggi elevasi *finish grade* dari tanah eksisting berdasarkan alinyemen vertikal Rencana Teknik Akhir.

Tabel 3.9 Tebal gambut per 100 m

| STA | Penyelidikan Tanah | Tebal Gambut ((m) | Tinggi Finish Grade dari Tanah Eksisting *(m)* |
|---|---|---|---|
| 167+400 | HAND BORING | 6 | 3.55 |
| | BOR INTI | - | - |
| 167+450 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 3.31 |
| 167+500 | HAND BORING | 3 | 3.59 |
| | BOR INTI | - | - |
| 167+600 | HAND BORING | 3 | 3.55 |
| | BOR INTI | - | - |
| 167+700 | HAND BORING | 2 | 3.05 |
| | BOR INTI | 6 | 3.05 |
| 167+800 | HAND BORING | 4 | 2.7 |
| | BOR INTI | 7 | 2.7 |
| 167+900 | HAND BORING | 7 | 2.18 |
| | BOR INTI | 4 | 2.18 |
| 167+950 | HAND BORING | - | 2.18 |
| | BOR INTI | 6 | 2.18 |
| 168+000 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 1.58 |
| 168+100 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 1.44 |
| 168+200 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 8 | 1.84 |
| 168+300 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.44 |

| STA | Penyelidikan Tanah | Tebal Gambut ((m) | Tinggi Finish Grade dari Tanah Eksisting (m) |
|---|---|---|---|
| 169+300 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.58 |
| 169+400 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 3 |
| 169+550 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 9 | 3.38 |
| 169+600 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 5.45 |
| 169+700 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 3.24 |
| 169+800 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | - |
| 169+900 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.61 |
| 170+000 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.8 |
| 170+100 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.31 |
| 170+200 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.75 |
| 170+300 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 2.58 |
| 170+400 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 3 |
| 170+500 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 7 | 3.27 |
| 170+600 | HAND BORING | - | - |
| | BOR INTI | 6 | 5.45 |

### 3.8 Rancangan Analisis

Hasil analisis data yang selanjutnya diolah dalam pemodelan dengan variasi beberapa metode konstruksi selanjutnya akan disusun dalam sebuah matriks dengan tinjauan antara lain:

- Daya Dukung
- Besar Penurunan
- Stabilitas
- Waktu Penurunan
- Waktu penyelesaian
- Kemudahan lapangan
- Biaya
- Lingkungan

### 3.9 Metodologi Matriks Penilaian

Instrumen penelitian digunakan untuk mengukur nilai variabel yang diteliti. Dengan demikian jumlah instrumen yang akan digunakan untuk penelitian akan tergantung pada jumlah variabel yang diteliti.

Skala pengukuran merupakan kesepakatan yang digunakan sebagai acuan untuk menentukan optimal atau tidaknya suatu proses perbaikan tanah dan akan menghasilkan data kualitatif berbobot untuk masing masing pekerjaan perbaikan tanah. Dengan skala pengukuran ini, maka nilai variabel yang diukur dengan instrumen tertentu dapat dinyatakan dalam bentuk angka, sehingga akan lebih akurat, efisien dan komunikatif.

Dalam penelitian ini digunakan pendekatan dengan metode skala Likert untuk mengukur sikap, pendapat dan persepsi seseorang atau sekelompok orang tentang fenomena. Variabel yang akan diukur dijabarkan menjadi indikator variabel. Kemudian indikator tersebut dijadikan sebagai titik tolak untuk menyusun item- item instrumen yang dapat berupa pernyataan atau pertanyaan. Jawaban setiap item instrumen yang menggunakan skala Likert mempunyai gradasi dari sangat positif sampai sangat negatif.

Tabel 3.10 Sistem Penilaian

| | Very poor | Poor | Good | Very good |
|---|---|---|---|---|
| ***Score*** | 10 | 10 - 30 | 30 - 70 | 70 - 100 |

# BAB 4 PEMBAHASAN

## 4.1 Analisis Pembahasan

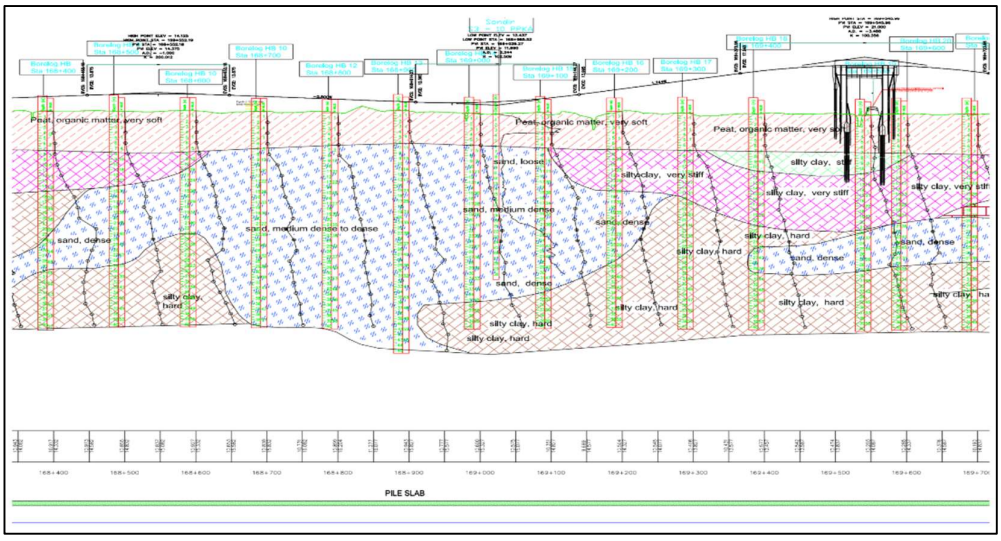
### 4.1.1 Data Analisis

Analisis untuk beberapa metode perbaikan tanah menggunakan *Plaxis 2D* diambil data dengan ketebalan gambut terbesar sepanjang Sta. 167+600 s/d Sta 177+600 sebagaimana ditunjukkan pada tabel 3.2 terdahulu. Dalam pembahasan ini, digunakan data bor log pada sta 169+500 dikarenakan dapat mewakili kondisi tanah seksi 3.

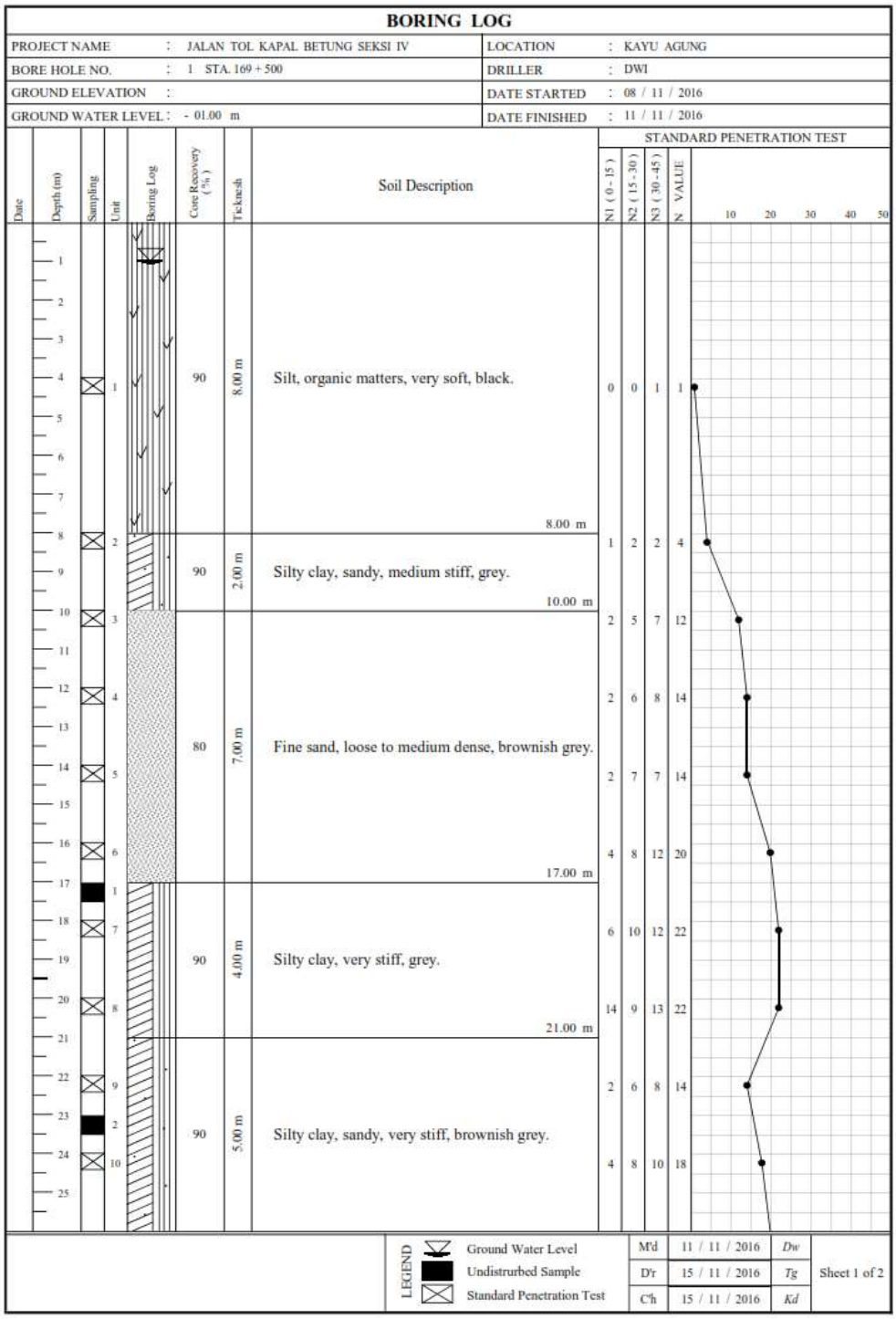
Tabel 4.1 Parameter tanah Sta. 169+500

| Layer | Soil Type | Depth (m) | | | Δh (m) | N Value | $c_u$ (kN/m$^2$) | c' (kN/m$^2$) | ϕ ($^0$) | ϕ' ($^0$) | $\sigma_v$' | OCR | $e_0$ | Cc | Cr | Cv (m$^2$/day) | $E_u$ (kN/m$^2$) | E' (kN/m$^2$) | mv (m$^2$/kN) | $\gamma_n$ (kN/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PEAT | 0 | - | 8 | 8 | 1 | 6 | 10 | 0.00 | 20.00 | 12 | 0.0 | 5.00 | 2.500 | 0.2500 | 2.16E-04 | 1500 | 300 | 3.33E-03 | 11.5 |
| 2 | CLAY | 8 | - | 10 | 2 | 4 | 24 | 10 | 0.00 | 20.00 | 22 | 1.0 | 0.43 | 0.200 | 0.0200 | 2.16E-04 | 6000 | 1500 | 6.67E-04 | 15.0 |
| 3 | SAND | 10 | - | 17 | 7 | 12 | 0.00 | 0 | 35.00 | 28.42 | 78 | 0.0 | 0.27 | 0.000 | 0.0000 | 8.60E-02 | 0 | 10000 | 0.00E+00 | 18.0 |
| 4 | CLAY | 17 | - | 22 | 5 | 20 | 120 | 10 | 0.00 | 20.00 | 113 | 1.0 | 0.70 | 0.034 | 0.0034 | 8.64E-02 | 30000 | 15000 | 6.67E-05 | 17.0 |
| 5 | CLAY | 22 | - | 24 | 2 | 14 | 84 | 10 | 0.00 | 20.00 | 125 | 1.0 | 0.60 | 0.057 | 0.0057 | 8.64E-02 | 21000 | 7500 | 1.33E-04 | 16.0 |
| 6 | CLAY | 24 | - | 28 | 4 | 18 | 108 | 10 | 0.00 | 20.00 | 149 | 1.0 | 0.67 | 0.040 | 0.0040 | 4.32E-04 | 27000 | 10000 | 1.00E-04 | 16.0 |
| 7 | SAND | 28 | - | 34 | 6 | 22 | 0.00 | 0 | 36.00 | 29.57 | 197 | 0.0 | 0.27 | 0.000 | 0.0000 | 8.60E-02 | 0 | 17000 | 0.00E+00 | 18.0 |
| 8 | CLAY | 34 | - | 36 | 2 | 38 | 228 | 10 | 0.00 | 20.00 | 211 | 1.0 | 1.01 | 0.001 | 0.0001 | 8.64E-04 | 57000 | 34200 | 2.92E-05 | 17.0 |
| 9 | CLAY | 36 | - | 42 | 6 | 40 | 240 | 10 | 0.00 | 20.00 | 253 | 1.0 | 1.04 | 0.001 | 0.0001 | 8.64E-04 | 60000 | 36000 | 2.78E-05 | 17.0 |
| 10 | CLAY | 42 | - | 46 | 4 | 60 | 360 | 10 | 0.00 | 20.00 | 281 | 1.0 | 1.38 | 0.001 | 0.0001 | 8.64E-04 | 90000 | 40000 | 2.50E-05 | 17.0 |

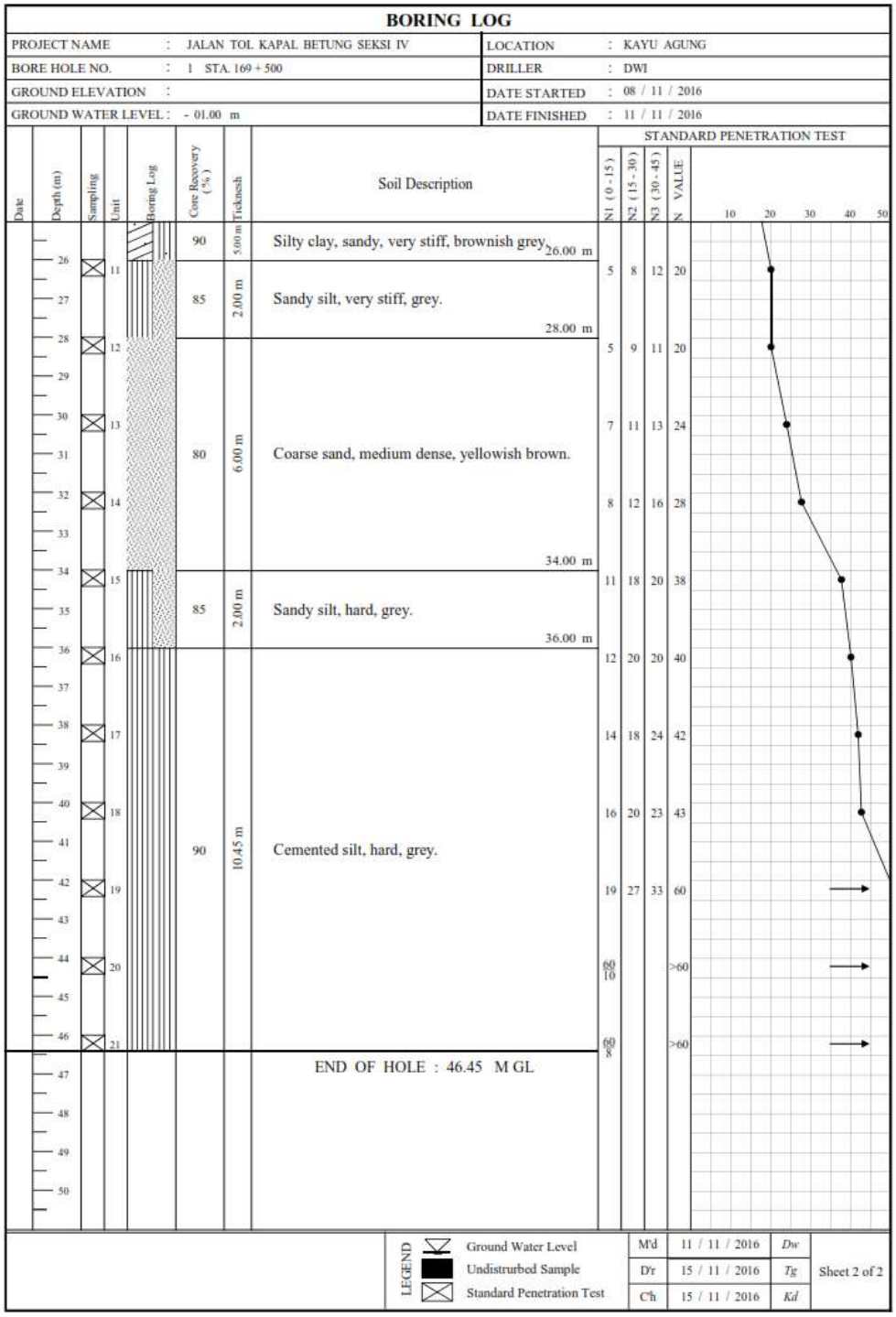
(Multi Phi Beta, 2018)




Gambar 4.1 Stratigrafi Stratigrafi STA 167+300 – 169+700
(Multi Phi Beta, 2018)



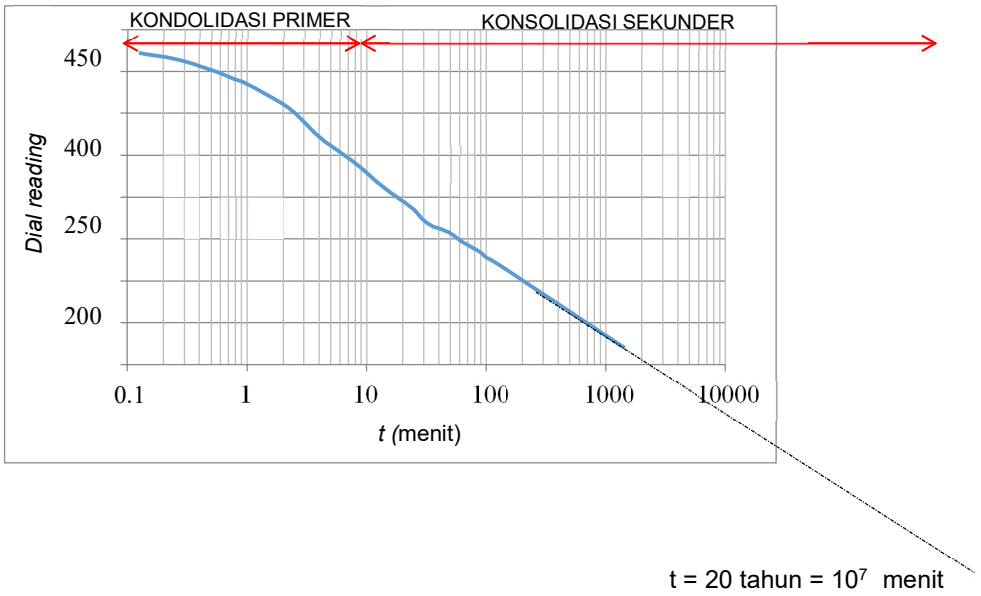

Gambar 4.2 Bor Log Sta 169+500 (kedalaman 0~25 m)
(Multi Phi Beta, 2018)




Gambar 4.3 Bor Log Sta. 169+500 (kedalaman 25 – 46,5 m)
(Multi Phi Beta, 2018)

### 4.1.2 Perhitungan Besar Penurunan Konsolidasi Primer dan Sekunder

Perhitungan besar penurunan konsolidasi tanah gambut dilakukan manual untuk mengetahui seberapa besar penurunan konsolidasi primer dan sekunder sebelum penanganan dengan metode perbaikan tanah. Diambil data random sebagai contoh perhitungan, yakni pada Sta 167+450, dimana tinggi timbunan adalah 4,205m, tebal lapisan gambut adalah 6,5m dan beban sebesar 0,125 kg/cm$^2$.




Gambar 4.4 Penurunan konsolidasi primer dan sekunder Sta. 167+450

Berdasarkan grafik di atas penurunan konsolidasi total yang terjadi akan sebesar 75% dari tebal gambut pada sta tersebut yaitu:

75% x 6.5 = 4.875m.

Untuk penurunan primer yang terjadi adalah sekitar 23% dari penurunan total:

23% x 4.875 = 1.12 m

dan penurunan sekunder yang terjadi adalah:

4.875 – 1.12 = 3.755 m.

Waktu penurunan konsolidasi sekunder tersebut di asumsikan terjadi selama masa layan jalan yaitu sekitar 20 tahun. Dapat dilihat bahwa penurunan sekunder lebih besar daripada penurunan primer pada tanah gambut.

Selanjutnya dengan langkah yang sama dilakukan perhitungan juga untuk semua sta., sebagaimana pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Perhitungan Penurunan Konsolidasi PPKA seksi 3

| No | Sta | Tebal Lapisan Gambut (m) | Tinggi timbunan (m) | Beban Tanah Timbunan (kPa) | Uji Konsolidasi | Tinggi Sample Awal Uji Konsolidasi (cm) | Penurunan Primer Hasil Konsolidasi uji lab (cm) | Prosentase penurunan primer pada tp = 10 menit (%) | Prosentase Konsolidasi Primer + Sekunder pada t = 20 tahun atau $10^7$ menit dilapangan dari tebal gambut (%) | Sc Total (m) | Sc Primer (m) | Sc Sekunder (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 167+450 | 6.5 | 4.205 | 75.7 | √ | 1.9 | 0.44 | 23 | 75 | 3.15 | 0.72 | 2.43 |
| 2 | 168+400 | 8 | 2.684 | 48.3 | √ | 1.9 | 0.23 | 12 | 75 | 2.01 | 0.25 | 1.77 |
| 3 | 169+500 | 8 | 8.939 | 160.9 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 170+400 | 7 | 3.302 | 59.4 | √ | 1.9 | 0.78 | 41 | 75 | 2.48 | 1.01 | 1.46 |
| 5 | 171+300 | 6 | 2.939 | 52.9 | √ | 1.9 | 0.43 | 23 | 75 | 2.20 | 0.50 | 1.71 |
| 6 | 172+300 | 7 | 6.962 | 125.3 | √ | 1.9 | 0.46 | 24 | 75 | 5.22 | 1.26 | 3.97 |
| 7 | 173+300 | 6.5 | 3.835 | 69.0 | √ | 1.9 | 0.37 | 20 | 75 | 2.88 | 0.56 | 2.31 |
| 8 | 174+300 | 8 | 4.474 | 80.5 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 174+750 | 8 | 5.136 | 92.4 | - | - | - | - | - | - | - | - |

## 4.2 Metode Konstruksi *Deep Soil Mixing*

*Deep Soil Mixing* (DSM) merupakan upaya stabilisasi tanah dalam dimana tanah dicampur dengan bahan additive pada lokasi tanah yang ingin diperbaiki.

### 4.2.1 Desain *Deep Soil Mixing*

Menurut *Federal Highway Adiministration Design Manual : Deep Mixing for Embankment and Foundation Support* adalah 0.2 ~ 0.4. Dalam analisis ini menggunakan area replacement ratio adalah 0.3.

Jarak memanjang *($S_{center}$)* dicoba menggunakan jarak memanjang = 1.5 m. Dengan menggunakan rumus area *replacement ratio* maka didapat diameter *cement column* = 0.8 m

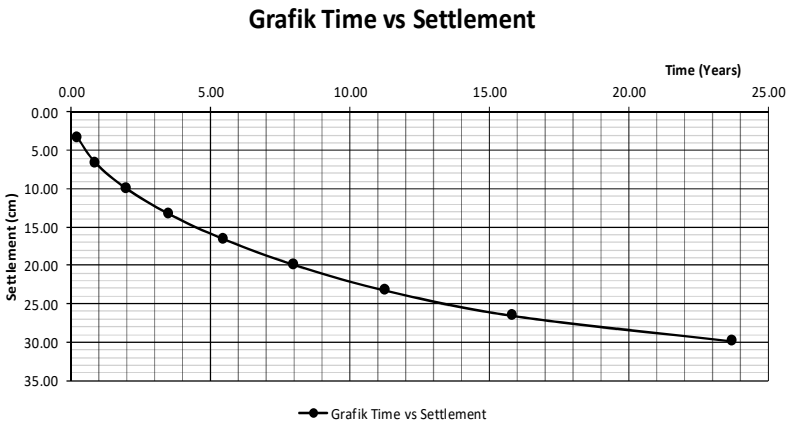
### 4.2.2 Analisa Besar dan Waktu Penurunan Deep Soil Mixing

Dari hasil analisa diperoleh besar penurunan kompresi adalah sebesar 7.6 cm dan penurunan konsolidasi adalah 35.4 cm waktu penurunannya adalah 23,72 tahun.

**Analisis Waktu Penurunan**

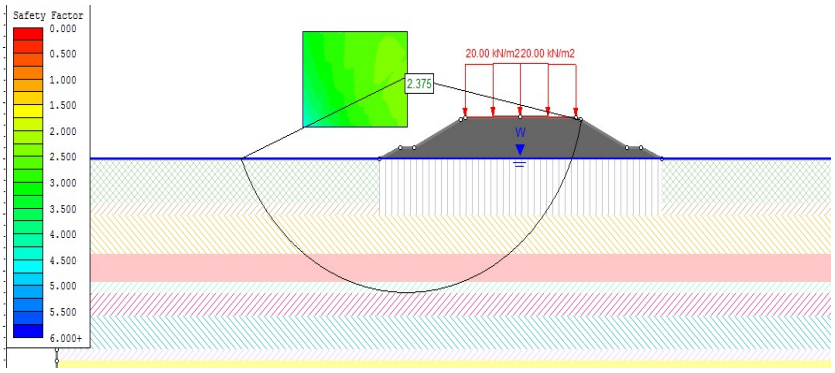
| $U_v$ (%) | Sc (cm) | $T_v$ | t (sec) | t (minute) | t (hours) | t (days) | t (years) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0.000 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00 | 0.00E+00 | 0.00 |
| 10 | 3.32 | 0.008 | 6.93E+06 | 1.15E+05 | 1924.23 | 8.02E+01 | 0.22 |
| 20 | 6.65 | 0.031 | 2.77E+07 | 4.62E+05 | 7696.90 | 3.21E+02 | 0.88 |
| 30 | 9.97 | 0.071 | 6.23E+07 | 1.04E+06 | 17318.03 | 7.22E+02 | 1.98 |
| 40 | 13.30 | 0.126 | 1.11E+08 | 1.85E+06 | 30787.61 | 1.28E+03 | 3.51 |
| 50 | 16.62 | 0.196 | 1.73E+08 | 2.89E+06 | 48105.64 | 2.00E+03 | 5.49 |
| 60 | 19.95 | 0.286 | 2.52E+08 | 4.21E+06 | 70138.12 | 2.92E+03 | 8.01 |
| 70 | 23.27 | 0.403 | 3.55E+08 | 5.92E+06 | 98697.24 | 4.11E+03 | 11.27 |
| 80 | 26.60 | 0.567 | 5.00E+08 | 8.34E+06 | 138949.06 | 5.79E+03 | 15.86 |
| 90 | 29.92 | 0.848 | 7.48E+08 | 1.25E+07 | 207760.00 | 8.66E+03 | 23.72 |

**Grafik Time vs Settlement**




Gambar 4.5 Analisa waktu konsolidasi metode *deep soil mixing*

### 4.2.3 Analisa Stabilitas *Deep Soil Mixing*




Gambar 4.6 Analisa stabilitas metode *deep soil mixing*

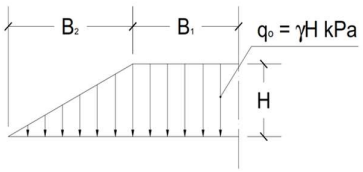
Berdasarkan hasil analisis untuk stabilitas, daya dukung dan penurunan menggunakan *deep soil mixing cement* adalah bisa dikatakan memenuhi syarat,

akan tetapi *deep soil mixing cement* atau metode perbaikan dengan menggunakan semen tidak dapat diterapkan dengan baik pada tanah Gambut dikarenakan sifat gambut yang memiliki kandungan organik.

## 4.3 Metode *PVD Preloading*

### 4.3.1 Analisa Penurunan Tanpa PVD

Untuk alternatif 1 menggunakan pvd + preloading data tanah pada STA 169+500 digunakan mewakili analisis untuk sta 167+600 s/d sta 175+650 yang gambutnya relatif dalam berkisar pada kedalaman 7 m hingga 8 m.




| | | | |
|---|---|---|---|
| $B_1$ : | 12.00 | m | |
| $B_2$ : | 16.80 | m | |
| H : | 7.00 | m | |
| γ : | 18.00 | kN/m$^3$ | |
| $q_o$ : | 126.00 | kPa | |

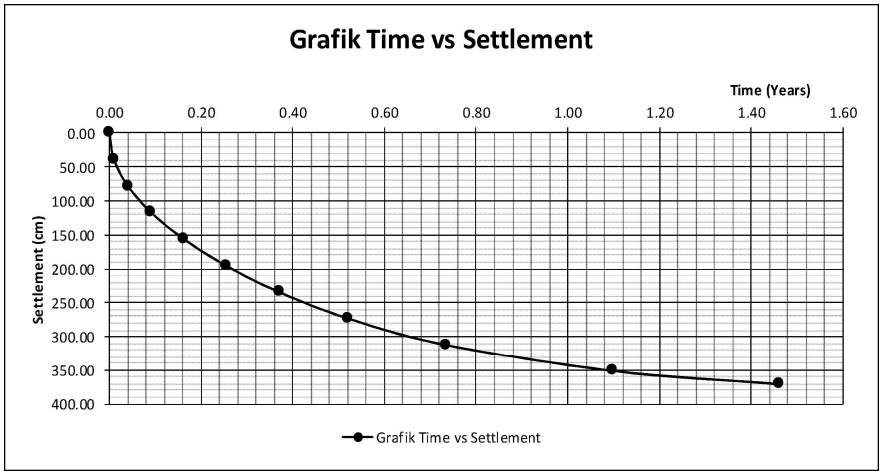
| Layer | Soil Type | Depth (m) | | | h (m) | z (m) | Δσ (kPa) | mv (m$^2$/kN) | σv' (kPa) | Cc | Cv (cm$^2$/sec) | e$_0$ | Sc (m) | Sc (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | PEAT | 0.00 | - | 8.00 | 8.00 | 4.00 | 125.46 | 5.56E-03 | 6.00 | 2.000 | 2.70E-02 | 5.00 | 3.58 | 357.50 |
| 2 | CLAY | 8.00 | - | 10.00 | 2.00 | 9.00 | 121.22 | 1.67E-04 | 17.00 | 0.200 | 6.00E-04 | 0.43 | 0.25 | 25.44 |
| 3 | SAND | 10.00 | - | 17.00 | 7.00 | 13.50 | 114.09 | 1.09E-04 | 50.00 | 0.000 | 9.19E+01 | 0.27 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | CLAY | 17.00 | - | 22.00 | 5.00 | 19.50 | 102.55 | 3.33E-05 | 93.00 | 0.034 | 3.00E-03 | 0.70 | 0.03 | 3.19 |
| 5 | CLAY | 22.00 | - | 24.00 | 2.00 | 23.00 | 95.78 | 4.76E-05 | 114.00 | 0.057 | 2.10E-03 | 0.60 | 0.02 | 1.89 |
| 6 | CLAY | 24.00 | - | 28.00 | 4.00 | 26.00 | 90.24 | 3.70E-05 | 132.00 | 0.040 | 2.70E-03 | 0.67 | 0.02 | 2.18 |
| 7 | SAND | 28.00 | - | 34.00 | 6.00 | 31.00 | 81.78 | 5.93E-05 | 168.00 | 0.000 | 1.69E+02 | 0.27 | 0.00 | 0.00 |
| 8 | CLAY | 34.00 | - | 36.00 | 2.00 | 35.00 | 75.75 | 1.75E-05 | 199.00 | 0.001 | 5.70E-03 | 1.01 | 0.00 | 0.00 |
| 9 | CLAY | 36.00 | - | 42.00 | 6.00 | 39.00 | 70.36 | 1.67E-05 | 227.00 | 0.001 | 6.00E-02 | 1.04 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | CLAY | 42.00 | - | 46.00 | 4.00 | 44.00 | 64.44 | 1.11E-05 | 262.00 | 0.001 | 9.00E-02 | 1.38 | 0.00 | 0.00 |
| | | | | | | | | | | | | ΣSc | 3.90 | 390.21 |

Gambar 4.7 Analisa penurunan tanpa PVD

Dengan ditimbun sebesar 7 m, penurunan yang terjadi terbesar adalah pada lapisan tanah gambut yaitu 3.57 m

Tabel 4.3 Perhitungan besar dan waktu penurunan

| $U_v$ (%) | Sc (cm) | $T_v$ | t (sec) | t (minute) | t (hours) | t (days) | t (years) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0.000 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00 | 0.00E+00 | 0.00 |
| 10 | 39.02 | 0.008 | 3.21E+05 | 5.35E+03 | 89.08 | 3.71E+00 | 0.01 |
| 20 | 78.04 | 0.031 | 1.28E+06 | 2.14E+04 | 356.34 | 1.48E+01 | 0.04 |
| 30 | 117.06 | 0.071 | 2.89E+06 | 4.81E+04 | 801.76 | 3.34E+01 | 0.09 |
| 40 | 156.08 | 0.126 | 5.13E+06 | 8.55E+04 | 1425.35 | 5.94E+01 | 0.16 |
| 50 | 195.11 | 0.196 | 8.02E+06 | 1.34E+05 | 2227.11 | 9.28E+01 | 0.25 |
| 60 | 234.13 | 0.286 | 1.17E+07 | 1.95E+05 | 3247.14 | 1.35E+02 | 0.37 |
| 70 | 273.15 | 0.403 | 1.64E+07 | 2.74E+05 | 4569.32 | 1.90E+02 | 0.52 |
| 80 | 312.17 | 0.567 | 2.32E+07 | 3.86E+05 | 6432.83 | 2.68E+02 | 0.73 |
| 90 | 351.19 | 0.848 | 3.46E+07 | 5.77E+05 | 9618.52 | 4.01E+02 | 1.10 |
| 95 | 370.70 | 1.129 | 4.61E+07 | 7.68E+05 | 12804.21 | 5.34E+02 | 1.46 |




Gambar 4.8 Grafik waktu konsolidasi tanpa PVD

Bisa dilihat, bahwa waktu penurunan pada 95% konsolidasi tanpa penanganan adalah selama 1.46 tahun. Hal tersebut terjadi sangat cepat dan untuk tanah gambut sangat sulit diprediksi waktu real penurunan yang terjadi dilapangan

### 4.3.2 Analisa Penurunan dengan PVD

Dengan menggunakan rumus dibawah,

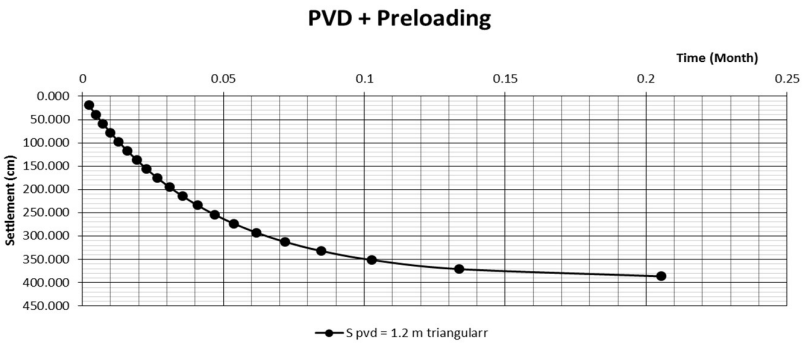
$$t = \frac{D^2}{8Ch}(\ln(D/dw - 3/4))\ln\frac{1}{1-U_h}$$

Kedalaman PVD yang digunakan hingga kedalaman 10 m.

*Vertical drain*
Dimensi :
*a* = 0,1
*b* = 0,0005
*dw* = 0,0525m
*Ch* = 5,40 E-6 m2/s

Tabel 4.4 Jarak Spasi Triangular

| U | Sc (cm) | Jarak | **1.2** | Jarak | 1.5 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | D | **1.26** | D | 1.575 |
| | | t | | t | |
| | | **detik** | **bulan** | **detik** | **bulan** |
| 0 | 0.000 | | | | |
| 5 | 19.511 | 5.93.E+03 | 0.002 | 9.94.E+03 | 0.004 |
| 10 | 39.021 | 1.22.E+04 | 0.005 | 2.04.E+04 | 0.008 |
| 15 | 58.532 | 1.88.E+04 | 0.007 | 3.15.E+04 | 0.012 |
| 20 | 78.042 | 2.58.E+04 | 0.010 | 4.33.E+04 | 0.017 |
| 25 | 97.553 | 3.33.E+04 | 0.013 | 5.58.E+04 | 0.022 |
| 30 | 117.063 | 4.12.E+04 | 0.016 | 6.91.E+04 | 0.027 |
| 35 | 136.574 | 4.98.E+04 | 0.019 | 8.35.E+04 | 0.032 |
| 40 | 156.084 | 5.91.E+04 | 0.023 | 9.90.E+04 | 0.038 |
| 45 | 175.595 | 6.91.E+04 | 0.027 | 1.16.E+05 | 0.045 |
| 50 | 195.105 | 8.01.E+04 | 0.031 | 1.34.E+05 | 0.052 |
| 55 | 214.616 | 9.23.E+04 | 0.036 | 1.55.E+05 | 0.060 |
| 60 | 234.126 | 1.06.E+05 | 0.041 | 1.78.E+05 | 0.069 |
| 65 | 253.637 | 1.21.E+05 | 0.047 | 2.04.E+05 | 0.079 |
| 70 | 273.147 | 1.39.E+05 | 0.054 | 2.33.E+05 | 0.090 |
| 75 | 292.658 | 1.60.E+05 | 0.062 | 2.69.E+05 | 0.104 |
| 80 | 312.168 | 1.86.E+05 | 0.072 | 3.12.E+05 | 0.120 |
| 85 | 331.679 | 2.19.E+05 | 0.085 | 3.68.E+05 | 0.142 |
| 90 | 351.189 | 2.66.E+05 | 0.103 | 4.46.E+05 | 0.172 |
| 95 | 370.700 | 3.46.E+05 | 0.134 | 5.81.E+05 | 0.224 |
| 99 | 386.308 | 5.32.E+05 | 0.205 | 8.93.E+05 | 0.344 |



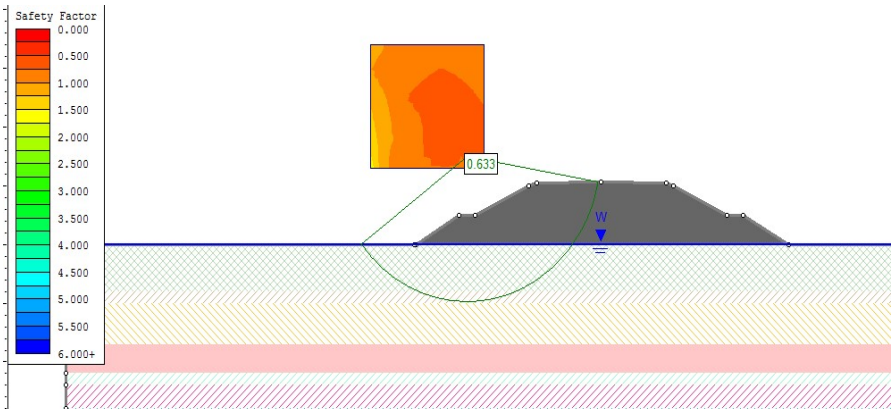

Gambar 4.9 Analisa waktu penurunan dengan PVD

Bisa dilihat diatas bahwa waktu penurunan yang terjadi pada U 95% sekitar 0.134 bulan atau kira kira 4 hari. Sedangkan waktu tersebut tidak dapat diterima mengingat untuk proses pemasangan PVD saja membutuhkan waktu yang cukup lama dan apabila jarak antar PVD diperbesar maka pengaruh tangkapan air oleh PVD menjadi tidak maksimal.

### 4.3.3 Analisa Stabilitas Lereng *PVD Preloading*

Untuk meninjau stabilitas PVD Preloading dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada saat konstruksi dan pada saat pasca konstruksi (layan).

**a. Stabilitas pada saat konstruksi**




Gambar 4.10 Analisa stabilitas PVD+preloading saat konstruksi

Stabilitas timbunan tahap konstruksi PVD+Preloading, FK = 0.633. Menurut RSNI 2 mengenai perbaikan tanah PVD pada saat ingin mencapai penurunan konsolidasi, beban harus dalam kondisi minimal 1.2 x beban layan. Beban lalu lintas dan perkerasan (asumsi Beban lalu lintas+perkerasan = 20 kPA) di konversi menjadi beban tanah. Maka dari itu tinggi timbunan konstruksi menjadi (asumsi $\Upsilon_{timbunan}$ = 17 kPa). Timbunan rencana adalah 7m.

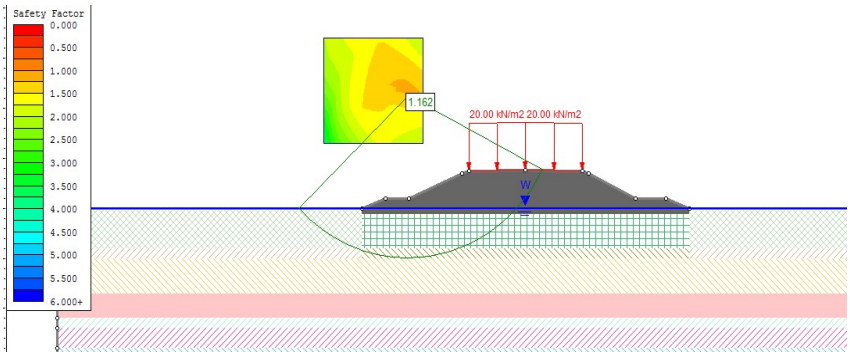
$H_{total}$ = ($H_{rencana}$ + beban lalu lintas +perkerasan / $\Upsilon_{timbunan}$) x 1.2

= (7 + 20 / 17) x 1.2

= ± 10 m

**b. Stabilitas pasca konstruksi**

Stabilitas timbunan pasca konstruksi PVD + Preloading, FK = 1.162.



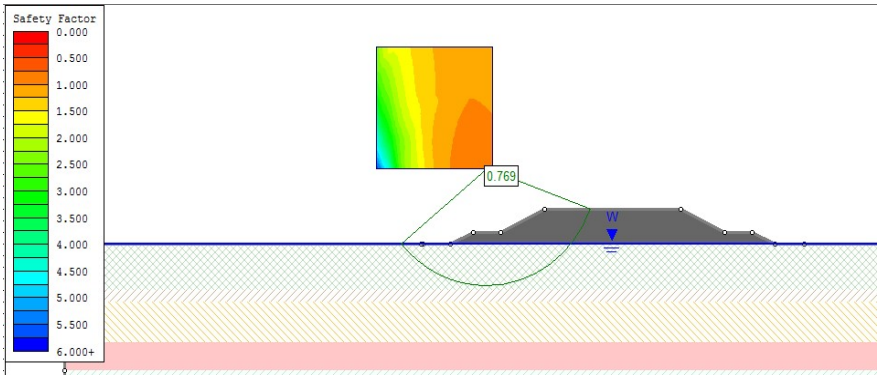

Gambar 4.11 Analisa stabilitas *PVD Preloading* pasca konstruksi

## 4.4 *Vacuum Preloading*

### 4.4.1 Analisa Stabilitas Lereng *Vacuum Preloading*

Untuk meninjau stabilitas *Vacuum Preloading* dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada saat konstruksi dan pada saat pasca konstruksi (layan).

**a. Stabilitas pada saat konstruksi**



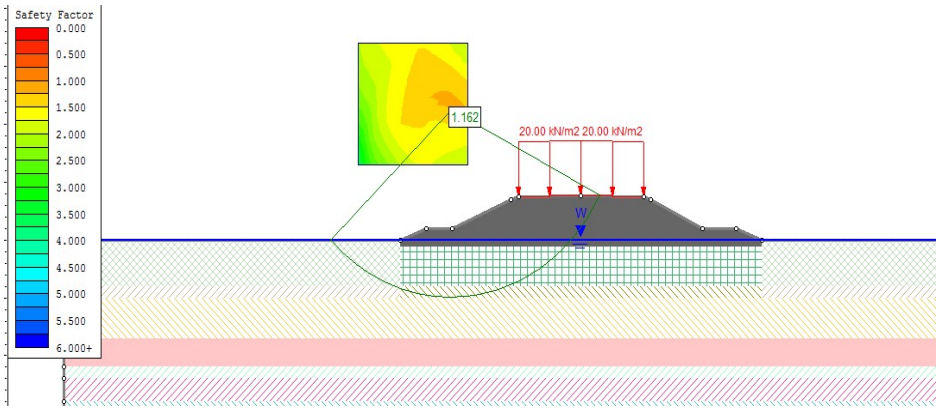

Gambar 4.12 Analisa stabilitas *Vacuum Preloading* saat konstruksi

Stabilitas timbunan tahap konstruksi *vacuum preloading*, FK = 0.769. Untuk beban layan yang dikonversi menjadi timbunan sama dengan *preloading* akan tetapi dengan menggunakan *vacuum* maka *suction* dari *vacuum* bisa dikatakan sama dengan beban sebesar 70 – 80 kPa. Hal itu dianggap sama dengan tinggi timbunan 4 sampai dengan 5 m. Maka timbunan yang digunakan pada saat konstruksi *vacuum preloading* adalah :

$H_{total} = H_{preloading} - 5m = 10\ m - 5m = 5\ m.$

**b. Stabilitas Pasca Konstruksi**

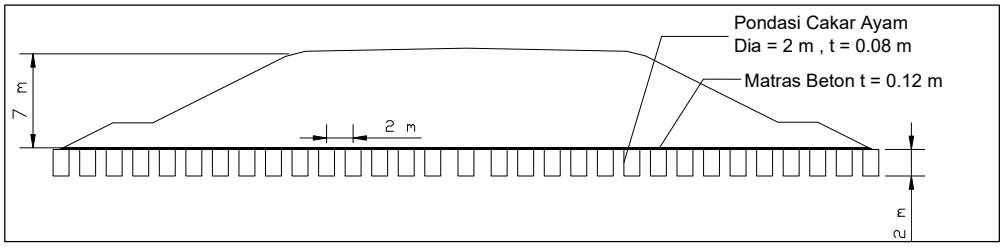
Stabilitas timbunan pasca konstruksi *Vacuum Preloading*, FK = 1.162.



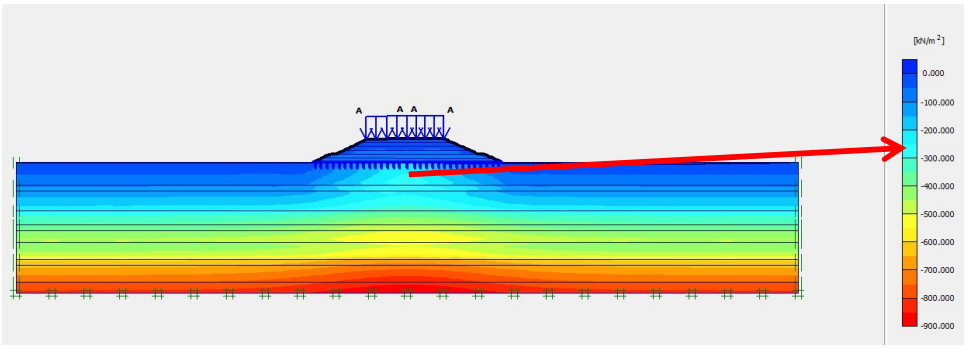

Gambar 4.13 Analisa stabilitas *Vacuum Preloading* pasca konstruksi

## 4.5 Pondasi Cakar Ayam

Berikut adalah dimensi yang digunakan untuk analisis perbaikan tanah dengan menggunakan pondasi cakar ayam. Tegangan beban yang terjadi = 250 kPa.



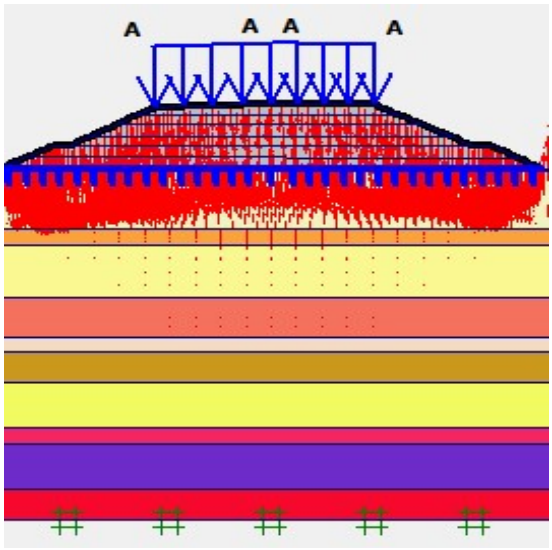

Gambar 4.14 Desain konstruksi cakar ayam




Gambar 4.15 Analisa penurunan metode pondasi cakar ayam

### 4.5.1 Analisa Penurunan Pondasi Cakar Ayam

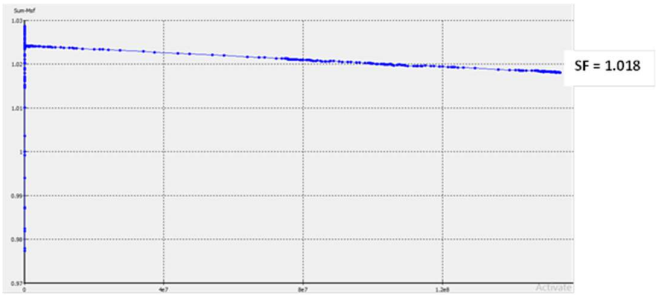
Dikarenakan penggunaan pondasi cakar ayam hanya 2 m maka gambut yang tersisa masih ada sekitar 6m. Berikut adalah penurunan konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder pada penggunaan pondasi cakar ayam.




Gambar 4.16 Analisa penurunan pondasi cakar ayam

Besar penurunan primer dan sekunder dengan menggunakan pondasi cakar ayam adalah 6.57 m. Untuk waktu penurunan primer maupun sekunder tidak jauh berbeda dengan penurunan tanpa menggunakan perkuatan. Waktu penurunan konsolidasi primer yaitu 1.46 tahun dan kompresi sekunder yaitu 20 tahun sesuai waktu layan jalan.

### 4.5.2 Analisa Stabilitas Lereng Pondasi Cakar Ayam

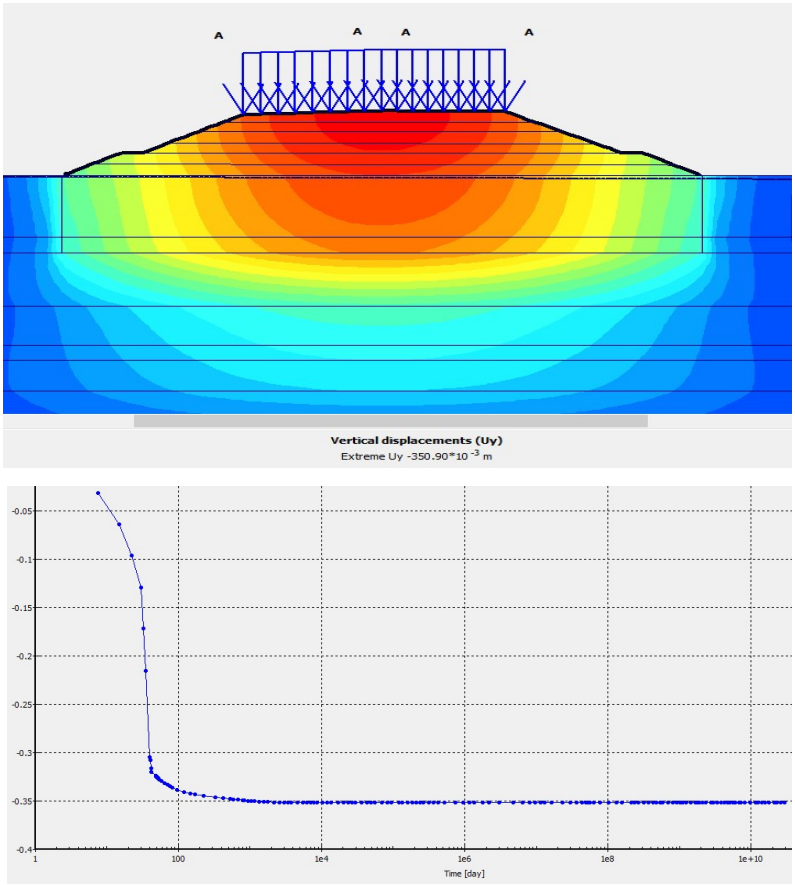



Gambar 4.17 *Safety factor* kestabilan pondasi cakar ayam

Qult = tegangan yang terjadi x MSF = 250 x 1.018 = 254.5 kPA

## 4.6 *Stone Column*

### 4.6.1 Analisa Penurunan *Stone Column*

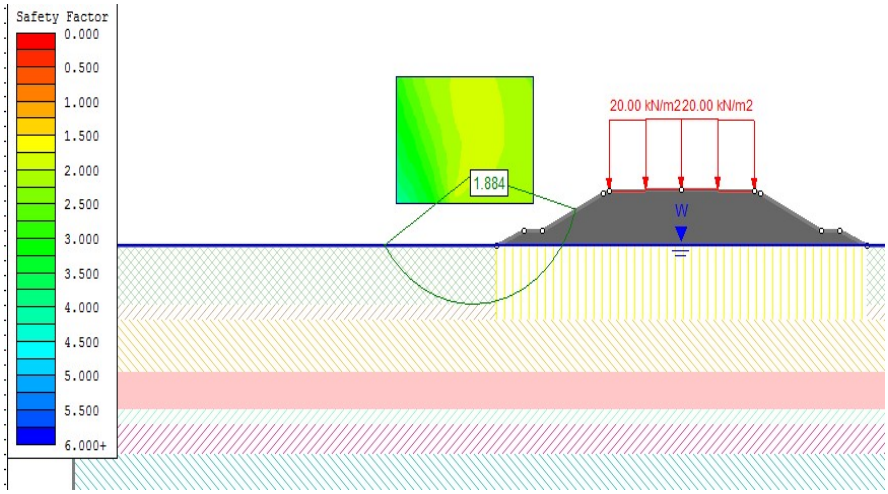



Gambar 4.18 Analisa penurunan metode *Stone column*

Besar penurunan total dibawah stone column adalah sebesar 35 cm dan waktu penurunan kurang lebih selama 100 hari. Waktu penurunan dipengaruhi oleh sifat *stone column* yang dapat mengalirakan air dikarenakan bersifat *drained*.

Besar penuruan diatas hanya berdasarkan analisis akan tetapi dilapangan mengingat tanah yang harus di tangani adalah gambut yang dalam maka, aplikasi *stone column* tidak akan maksimal dikarenakan material granular *stone column* akan bergerak ke segala arah dikarenakan tanah gambut tidak dapat menahan material tersebut.

### 4.6.2 Analisa Stabilitas *Stone Column*



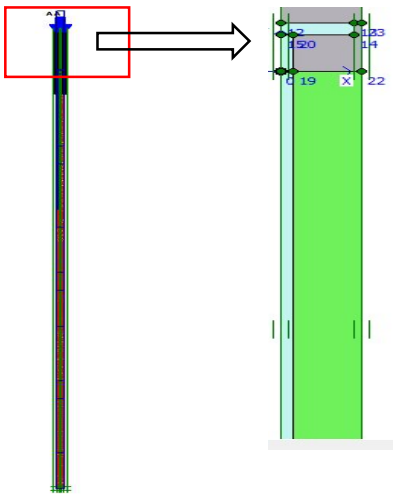

Gambar 4.19 Analisa kestabilan metode *stone column*

Stabilitas timbunan perkuatan *stone column*, FK = 1.884. Stabilitas timbunan dengan menggunakan perkuatan *stone column* diatas hanya berdasarkan analisis akan tetapi di lapangan mengingat tanah yang harus di tangani adalah gambut yang dalam maka aplikasi stone column tidak akan maksimal dikarenakan material *granular stone column* akan bergerak ke segala arah dikarenakan tanah gambut tidak dapat menahan material tersebut. Sehingga hasil dari analisis perencanaan akan sangat jauh berbeda pada saat di aplikasikan di lapangan.

## 4.7 Cerucuk Matras Beton

### 4.7.1 Pemodelan *Axisymmetry*

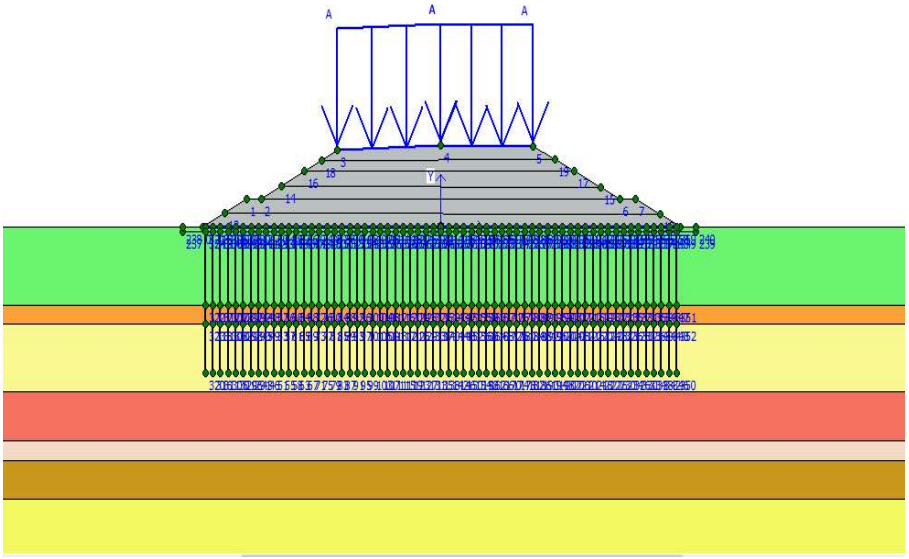
Untuk mengetahui berapa besar penurunan yang terjadi serta berapa lama waktu penurunannya pada disain pile slab dan cermaton dapat menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan *software Plaxis 2D*. Untuk analisis pada plaxis menggunakan 2 model yaitu model *plane strain* dan *axisymmetry*. Parameter tanah yang digunakan adalah menggunakan *mohr–coulomb* dan *hardening soil.*



Gambar 4.20 Desain metode cerucuk matras beton

Pada pemodelan menggunakan *axisymmetry* hanya dimodelkan untuk posisi titik kritis dari panjang bentang yang ditinjau. Jadi, hasil analisis penurunan dengan menggunakan model *axisymmetry* adalah penurunan terekstrem.

### 4.7.2 Pemodelan *Plane Strain*



Gambar 4.21 Pemodelan *plane strain* cerucuk matras beton

Timbunan yang digunakan :

Tinggi timbunan = 7m

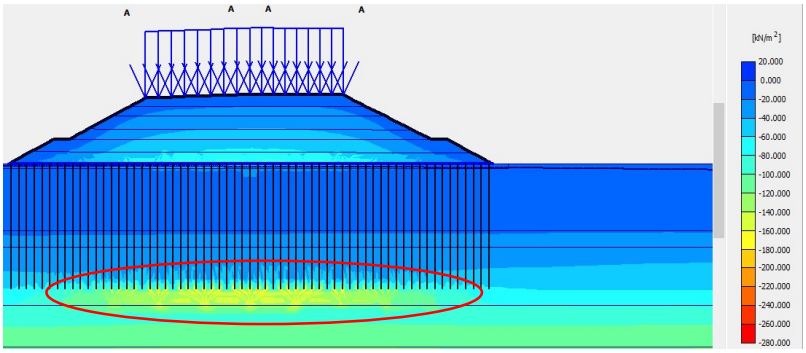
Beban surcharge = 15 kPa

Material yang digunakan :

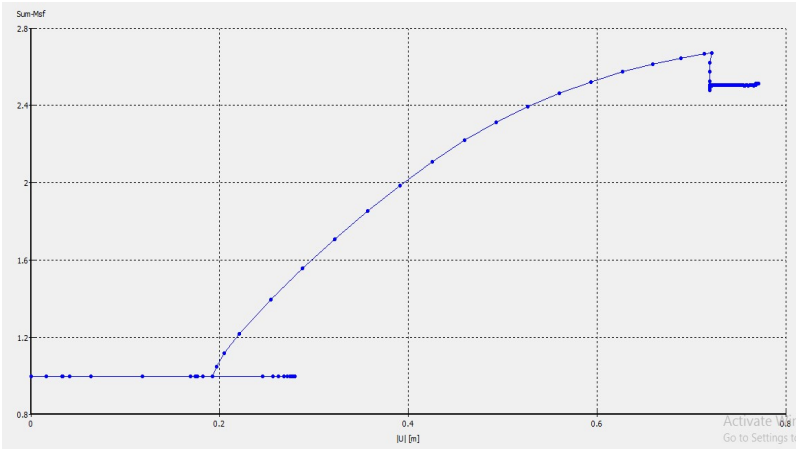
| **Matras Beton,** | | **Cerucuk beton** | |
|---|---|---|---|
| Tebal | = ± 13 cm | Dimensi | = 15cm x 15cm |
| Lebar | = 90 cm | Kedalaman | = 15m → Nspt ≤ 15 |
| Panjang | = 90 cm | Jarak as to as | = 1 m |
| Lebar seluruh alas timbunan | = 63 m | Jumlah per $m^2$ | = 4 buah |

### 4.7.3 Daya Dukung Cerucuk Matras Beton

Qult = distribusi beban x SF = 160 x 2.5 = 400 kPA. Stabilitas timbunan perkuatan cerucuk matras beton, FK = 2.5




Gambar 4.22 Daya dukung cerucuk matras beton

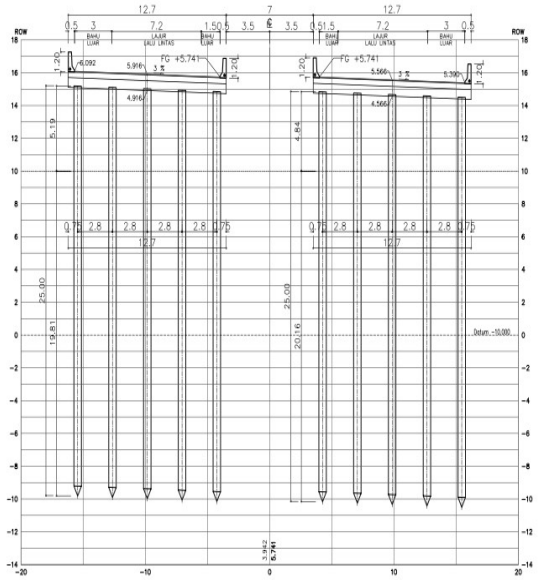



Gambar 4.23 *Safety factor* metode cerucuk matras beton

## 4.8 *Pile Slab*

Pada seksi III untuk Sta 167+450, 168+400, 169+500, 170+400, 171+300, 172+300, 173+300, 174+750, 175+650 menggunakan spun pile dengan diameter 60cm dengan target daya dukung ijin > 80t.

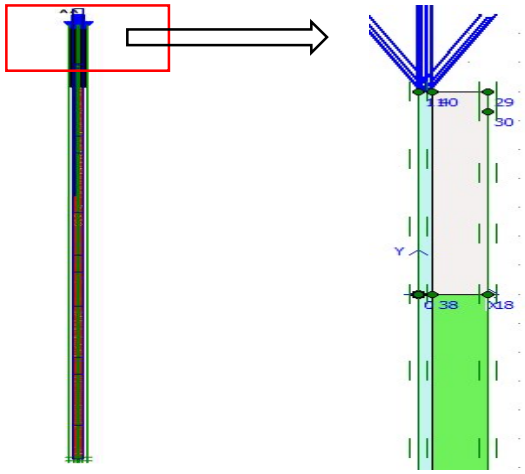
sedangkan untuk Sta 173+300 dikarenakan kedalaman gambut hingga 8m setelah itu pada kedalaman 12m tanah berupa lempung dengan nilai n-SPT mencapai 50 sehingga jika menggunakan spun pile diameter 60cm tidak akan mencapai daya dukung ijin >90t maka dari itu pada sta ini ditawarkan menggunakan bored pile ukuran 60cm dengan rasio tulangan 1.2%



Gambar 4.24 Desain metode pileslab

### 4.8.1 Pemodelan *Axisymmetry*

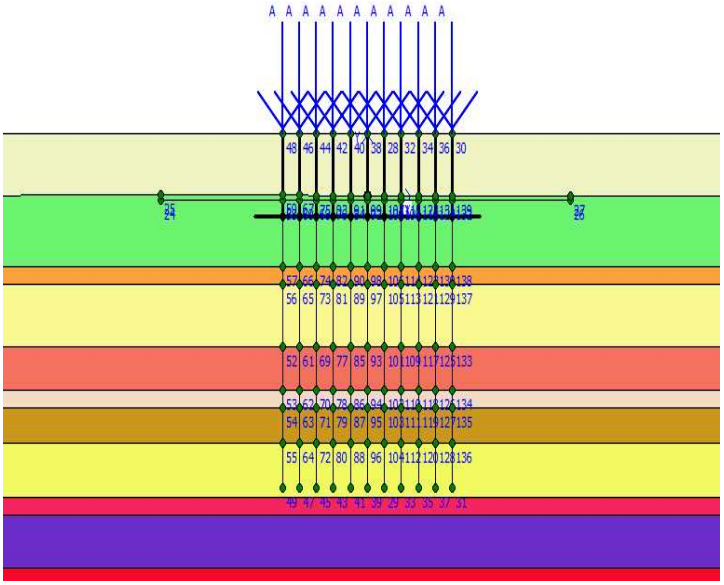
Untuk mengetahui berapa besar penurunan yang terjadi serta berapa lama waktu penurunannya pada disain *pile slab* dan cermaton dapat menggunakan metode elemen hingga dengan menggunakan *software Plaxis 2D*. Untuk analisis pada *plaxis* menggunakan 2 model yaitu model *plane strain* dan *axisymmetry*. Parameter tanah yang digunakan adalah menggunakan *mohr–coulomb* dan *hardening soil.*



Gambar 4.25 Pemodelan *axisymmetry* metode *pileslab*

Pada pemodelan menggunakan *axisymmetry* hanya dimodelkan untuk posisi titik kritis dari panjang bentang yang ditinjau. Jadi hasil analisis penurunan dengan menggunakan model *axisymmetry* adalah penurunan terekstrem.

### 4.8.2 Pemodelan *Plane Strain*



Gambar 4.26 Pemodelan *plane strain* metode *pileslab*

Data pile beton :

- Tinggi *free standing* = 7m
- Kedalaman tiang masuk ke tanah = 33m
- Total panjang tiang = 40m
- Jarak melintang = 2.8 m (as to as)
- Jarak memanjang = 7.5 (as to as)
- Beban per titik *pile* = 80 t
- Jumlah *pile* potongan melintang yang digunakan = 10 buah
- Jumlah *pile* per $m^2$ = 1 buah

### 4.8.3 Analisa Pemodelan *Pile Slab* Dan Cermaton

Tabel 4.5 Penurunan *mohr-coulomb soil model*

| No | Model | Soil Model | Penanganan | Kedalaman Pile (m) | Penurunan (m) | U, 90% (days) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Axisymmetry | MC | Tanpa Penanganan | - | 3.2 | 13560 |
| 2 | Axisymmetry | MC | Cerucuk+Matras | 15 | 0.234 | 1500 |
| 3 | Plane Strain | MC | Cerucuk+Matras | 15 | 0.29 | 199 |
| 4 | Axisymmetry | MC | Pile Slab | 33 | 0.0199 | 10 |
| 5 | Plane Strain | MC | Pile Slab | 33 | 0.00812 | 14 |

Tabel 4.6 Penurunan *hardening soil model*

| No | Model | Soil Model | Penanganan | Kedalaman Pile (m) | Penurunan (m) | U, 90% (days) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Axisymmetry | HS | Tanpa Penanganan | - | 5.43 | 11210 |
| 2 | Axisymmetry | HS | Cerucuk+Matras | 15 | 0.49 | 2457 |
| 3 | Plane Strain | HS | Cerucuk+Matras | 15 | 0.774 | 563 |
| 4 | Axisymmetry | HS | Pile Slab | 33 | 0.0166 | 9 |
| 5 | Plane Strain | HS | Pile Slab | 33 | 0.00612 | 0 |

# Tabel 4.7 Matriks metode perbaikan tanah

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **ASPEK PENILAIAN** | **METODA PERBAIKAN TANAH** | | | | | | | | | |
| | | **ALT-1** | | | **ALT-2** | **ALT-3** | **ALT-4** | **ALT-5** | | **ALT-6** | **ALT-7** |
| | | **DEEP SOIL MIXING + BAHAN KIMIA** | | | **PVD PRELOADING** | **VACUUM PRELOADING** | **PONDASI CAKAR AYAM** | **STONE COLUMN** | | **CERUCUK MATRAS BETON** | **PILE SLAB** |
| | | **DIFA SS** | **DEEP SOIL MIXING CEMENT** | **SEKAM + KAPUR** | | | | **VIBRO REPLACEMENT** | **GEOTEXTILE ENCASED COLUMNS (GEC)** | | |
| 1 | **Daya Dukung Ultimit** | Nilai *shear strength* yang dihasilkan dengan stabilisasi kimia (semen-kapur) pada tanah gambut menunjukkan nilai yang sangat rendah dikarenakan tanah gambut bersifat organik dan memiliki pH rendah sehingga bersifat korosif terhadap semen | Nilai *shear strength* yang dihasilkan dengan stabilisasi kimia (semen-kapur) pada tanah gambut menunjukkan nilai yang sangat rendah dikarenakan tanah gambut bersifat organik dan memiliki pH rendah sehingga bersifat korosif terhadap semen | Asumsi perilaku teknis hampir sama dengan GEC, dimana tidak mengandalkan *end-bearing*. Nilai daya dukung sangat bergantung pada umur peram termasuk diameter dan kedalaman *soil mixingnya*. Asumsi 50% dari nilai GEC | Tidak akan mencapai kekuatan tanah dasar yang diinginkan dikarenakan peningkatan shear strength tidak terjadi pada gambut | | daya dukung tanah dasar pada gambut kecil sehingga tidak kuat untuk menahan beban pondasi cakar ayam dan beban layan | Tidak cocok untuk digunakan pada tanah gambut yang lebih dari 5 m dikarenakan penurunan gambut adalah penurunan sekunder dan berlangsung seterusnya. | material granular yang dibungkus geotextile lebih monolit sehingga daya dukung lebih baik dibandingkan tanpa geotextile. Daya dukung bergantung pada pola, jarak, diameter dan panjang kolom batu. Diasumsikan daya dukungnya 70% lebih kecil daripada pile slab yang *end-bearing* | daya dukung dapat meningkat dikarenakan dapat menembus nilai N hingga Nspt = 15 | daya dukung tanah besar dikarenakan duduk ditanah keras |
| | *Value (kPa)* | 0 | 0 | 420 | 0 | 0 | 245,5 | 250,23 | 840 | 700 | 1200 |
| | *Scale* | 10 | 10 | 4 | 10 | 10 | 6 | 5 | 2 | 3 | 1 |
| | *Score* | 10 | 10 | 70 | 10 | 10 | 50 | 60 | 90 | 80 | 100 |
| 2 | **Besar Penurunan** | Penurunan yang terjadi masih sangat besar dan lama karena tidak berfungsinya bahan kimia (semen-kapur) pada tanah gambut | Hasil Plaxis menunjukkan relatif kecil penurunan yang terjadi sesuai analisis Plaxis (0,07+0,35 = 0,42m), namun mengingat mixing dengan kapur tidak akan terjadi kristalisasi (yang sulit diinformasikan ke plaxis), maka estimasi penurunan akan lebih besar 30% dari sekam + kapur | Perilaku penurunan dianggap sama dengan pondasi cakar ayam yang sifatnya floating | Hanya mengatasi penurunan konsolidasi primer dan untuk komopresi sekunder tidak bisa diatasi. Sedangkan pada gambut penurunan terbesar adalah pada kompresi sekunder | Hanya mengatasi penurunan konsolidasi primer dan untuk komopresi sekunder tidak bisa diatasi. Sedangkan pada gambut penurunan terbesar adalah pada kompresi sekunder | Penurunan yang terjadi masih sangat besar dikarenakan sistem pondasi cakar ayam adalah flaoting tidak mencapai tanah keras | Besar penuruan 35cm hanya berdasarkan analisis akan tetapi di lapangan mengingat tanah yang harus di tangani adalah gambut yang dalam maka, aplikasi stone column tidak akan maksimal dikarenakan material granular stone column akan bergerak ke segala arah dikarenakan tanah gambut tidak dapat menahan material tersebut. | Perilaku penurunan dianggap sama dengan vibro replacement | Meskipun ujung cerucuk beton bisa duduk di nilai N hingga Nspt = 15, akan tetapi penurunan yang terjadi masih diatas batas ijin penurunan dan itu terjadi pada saat beban timbunan diberikan. | Hampir tidak ada penurnan yang terjadi dikarenakan ujung pondasi duduk pada tanah keras |
| | *Value (m)* | 5,38 | 8,541 | 6,57 | 8 | 8 | 6,57 | 0,35 | 0,35 | 0,29 | 0 |
| | *Scale* | 5 | 10 | 6 | 8 | 8 | 6 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| | *Score* | 60 | 10 | 50 | 30 | 30 | 50 | 80 | 80 | 90 | 100 |
| 3 | **Stabilitas** | Stabilitas sangat tidak aman dikarenakan tidak berfungsinya bahan kimia (semen-kapur) pada tanah gambut | Faktor keamanan sesuai plaxis juga relatif baik, namun dengan alasan yang sama bahwa tidak terjadi kristalisasi, maka stabilitas diestimasikan tidak lebih baik dari sekam + kapur. Disamakan dengan PVD Preloding | Diambil FK = 2 | Shear Strength tidak meningkat sehingga stabilitas timbunan tidak aman | Shear Strength tidak meningkat sehingga stabilitas timbunan tidak aman | Stabilitas cukup aman dikarenakan tubuh timbunan berada diatas pelat beton yang kaku dan beban tersebar merata | Analisa plaxis cukup baik tetapi untuk gambut tidak akan sama karena kecenderungan material bergerak ke segala arah | Seharusnya lebih baik dari Vibro Replacement, bahkan mungkin mendekati pile slab atau sama dengan cermaton | Stabilitas aman dikarenakan tubuh timbunan berada diatas matras beton dengan bidang longsor dipotong oleh cerucuk beton yang jaraknya cukup rapat | tidak ada isu stabilitas timbunan |
| | *Value* | 0,908 | 1,162 | 2 | 1,162 | 1,162 | 1,018 | 1,884 | 2,5 | 2,5 | 3 |
| | *Scale* | 10 | 6 | 4 | 6 | 6 | 9 | 5 | 2 | 2 | 1 |
| | *Score* | 10 | 50 | 70 | 50 | 50 | 20 | 60 | 90 | 90 | 100 |
| 4 | **Waktu Penurunan** | Waktu penurunan sangat lama dikarenakan tidak berfungsinya bahan kimia (semen-kapur) pada tanah gambut | Waktu kompresi sekunder masih terus terjadi, bergantung pada waktu | Waktu kompresi sekunder masih terus terjadi, bergantung pada waktu | Waktu kompresi sekunder masih terus terjadi, bergantung pada waktu dan juga tahapan pembebanan akan memakan waktu dengan menunggu disipasi tekanan air pori ekses mencapai tegangan efektif | Waktu kompresi sekunder masih terus terjadi, bergantung pada waktu | Waktu konsolidasi primer dan kompresi sekunder masih terjadi | kurang dari 100 hari | asumsi sama dengan Vibro replacement | masih terjadi penurunan yang masih diatas batas ijin yaitu 2.5 cm | Tidak ada lagi penurunan dikarenakan pondasi berada tanah keras |
| | *Value (tahun)* | 21,46 | 23 | 21,46 | 21,46 | 21,46 | 21,46 | 0,2740 | 0,2740 | 4,1096 | 0 |
| | *Scale* | 5 | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 2 | 4 | 1 |
| | *Score* | 60 | 10 | 60 | 60 | 60 | 60 | 90 | 90 | 70 | 100 |
| 5 | **Perkiraan Waktu Penyelesaian *(crash program)*** | 2 bulan, material dan alat harus diatur dengan baik | 2,5 bulan, material dan alat harus diatur dengan baik | 3 sampai 4 bulan atau tergantung umur peramnya, diambil 100 hari | Estimasi waktu 12 bulan paling cepat mulai pengadaan material, instalasi PVD-PHD, timbunan, pencapaian derajat konsolidasi 90% sampai dengan remove surcharge | Estimasi waktu 6 bulan paling cepat mulai pengadaan material, instalasi PVD-PHD, pompa, timbunan, pencapaian derajat konsolidasi 90% | 3 bulan, perlu perencanaan yang baik | 2 bulan, tidak perlu prepare geotextile, perlu ada lokasi disposal sementara | 2,5 bulan, perlu ada lokasi disposal sementara | 3 bulan, hanya perlu adanya manajemen logistik yang baik mengingat jumlah material pancang sangat banyak dan akses yang sulit | 4 bulan, namun terkadang dihadapkan dengan kesulitan material dari sisi produksi, delivery sampai lokasi karena akses yang sulit. Dibutuhkan manajemen dan rencana kerja yang baik |
| | *Value (tahun)* | 0,1644 | 0,2055 | 0,2740 | 0,9863 | 0,4932 | 0,2466 | 0,1644 | 0,2055 | 0,2466 | 0,3288 |
| | *Scale* | 1 | 3 | 7 | 10 | 9 | 5 | 1 | 3 | 5 | 8 |
| | *Score* | 100 | 80 | 40 | 10 | 20 | 60 | 100 | 80 | 60 | 30 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **ASPEK PENILAIAN** | **METODA PERBAIKAN TANAH** | | | | | | | | | |
| | | **ALT-1** | | | **ALT-2** | **ALT-3** | **ALT-4** | **ALT-5** | | **ALT-6** | **ALT-7** |
| | | **DEEP SOIL MIXING + BAHAN KIMIA** | | | **PVD PRELOADING** | **VACUUM PRELOADING** | **PONDASI CAKAR AYAM** | **STONE COLUMN** | | **CERUCUK MATRAS BETON** | **PILE SLAB** |
| | | **DIFA SS** | **DEEP SOIL MIXING CEMENT** | **SEKAM + KAPUR** | | | | **VIBRO REPLACEMENT** | **GEOTEXTILE ENCASED COLUMNS (GEC)** | | |
| 5 | **Perkiraan Waktu Penyelesaian *(crash program)*** | 2 bulan, material dan alat harus diatur dengan baik | 2,5 bulan, material dan alat harus diatur dengan baik | 3 sampai 4 bulan atau tergantung umur peramnya, diambil 100 hari | Estimasi waktu 12 bulan paling cepat mulai pengadaan material, instalasi PVD-PHD, timbunan, pencapaian derajat konsolidasi 90% sampai dengan remove surcharge | Estimasi waktu 6 bulan paling cepat mulai pengadaan material, instalasi PVD-PHD, pompa, timbunan, pencapaian derajat konsolidasi 90% | 3 bulan, perlu perencanaan yang baik | 2 bulan, tidak perlu prepare geotextile, perlu ada lokasi disposal sementara | material granular yang dibungkus 2,5 bulan, perlu ada lokasi disposal sementara | 3 bulan, hanya perlu adanya manajemen logistik yang baik mengingat jumlah material pancang sangat banyak dan akses yang sulit | 4 bulan, namun terkadang dihadapkan dengan kesulitan material dari sisi produksi, delivery sampai lokasi karena akses yang sulit. Dibutuhkan manajemen dan rencana kerja yang baik |
| | *Value (tahun)* | 0,1644 | 0,2055 | 0,2740 | 0,9863 | 0,4932 | 0,2466 | 0,1644 | 0,2055 | 0,2466 | 0,3288 |
| | *Scale* | 1 | 3 | 7 | 10 | 9 | 5 | 1 | 3 | 5 | 8 |
| | *Score* | 100 | 80 | 40 | 10 | 20 | 60 | 100 | 80 | 60 | 30 |
| 6 | **Kemudahan Lapangan** | Material susah diperoleh; pelaksanaan relatif mudah;butuh ketelitian untuk memastikan mutu campuran | Material gampang diperoleh; pelaksanaan relatif mudah;butuh pengawasan untuk memastikan mutu campuran | Material gampang diperoleh; pelaksanaan relatif mudah;butuh pengawasan untuk memastikan mutu campuran | Material import; pelaksanaan bertahap tidak bisa paralel ;butuh akurasi dalam instalasi; butuh borrow untuk surcharge; resiko gagal tinggi; butuh expert | Material import; pelaksanaan bertahap tidak bisa paralel; butuh akurasi dalam instalasi; tingkat kegagalan tinggi; butuh expert | Material relatif mudah; pelaksanaan bertahap dan cukup sulit; tingkat kegagalan tinggi | Material cukup sulit; padat alat; perlu pengawasan ketat memastikan tingkat kepadatan; tingkat kegagalan moderat | Material cukup sulit; padat alat; perlu pengawasan ketat memastikan tingkat kepadatan; tingkat kegagalan moderat | Material cukup sulit dalam jumlah banyak; padat alat; pelaksanaan sequences; perlu pengawasan ; tingkat kegagalan moderat | Material cukup sulit dalam jumlah banyak; padat alat; pelaksanaan sequences; perlu pengawasan ; tingkat kegagalan moderat |
| | *Value* | 4 | 7 | 7 | 4 | 3 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| | *Scale* | 8 | 1 | 1 | 8 | 10 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| | *Score* | 30 | 100 | 100 | 30 | 10 | 70 | 80 | 70 | 70 | 70 |
| 7 | **Estimasi Biaya** | Asumsi 60% lebih murah PVD Preloading | Asumsi 20% lebih murah PVD Preloading | Asumsi 30% lebih murah PVD Preloading | Perhitungan biaya tahun 2019 | Perhitungan biaya tahun 2019 | Asumsi 10% lebih murah Cermaton | Perhitungan biaya tahun 2019 | Asumsi 5% lebih mahal dari Vibro Replacement | Perhitungan biaya tahun 2019 | Perhitungan biaya tahun 2019 |
| | *Value (IDR)* | 47.588.882.959 | 95.177.765.918 | 83.280.545.179 | 118.972.207.398 | 196.607.814.249 | 269.320.830.798 | 245.136.000.000 | 257.392.800.000 | 299.245.367.553 | 243.621.025.805 |
| | *Scale* | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | *Score* | 100 | 90 | 100 | 100 | 100 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 8 | **Lingkungan** | Kurang ramah lingkungan, flora dan fauna akan mati akibat bahan kimia | ramah lingkungan, mixing langsung dengan material tanah gambut, tidak perlu pendatangan material dari luar quarry di luar lokasi | ramah lingkungan, mixing langsung dengan material tanah gambut, tidak perlu pendatangan material dari luar quarry di luar lokasi | Relatif kurang ramah lingkungan, harus mendatangkan material borrow, sementara sumber material sulit diperoleh. Kurang ramah lingkungan, flora dan fauna akan mati akibat timbunan | Relatif kurang ramah lingkungan, harus mendatangkan material borrow sementara sumber material sulit diperoleh, meskipun tidak sebanyak PVD Preload,. | Relatif ramah lingkungan, karena tidak ada timbunan (tidak perlu borrow material) | Relatif ramah lingkungan, harus mendatangkan material granular, sementara sumber material sulit diperoleh. | Relatif ramah lingkungan, harus mendatangkan material granular, sementara sumber material sulit diperoleh. | Relatif ramah lingkungan, karena tidak ada timbunan (tidak perlu borrow material). Relatif ramah lingkungan, flora dan fauna hanya terganggu saat pemancangan | Relatif ramah lingkungan, karena tidak ada timbunan (tidak perlu borrow material). Relatif ramah lingkungan, flora dan fauna hanya terganggu saat pemancangan |
| | *Value* | 1 | 7 | 7 | 0 | 3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | *Scale* | 9 | 1 | 1 | 10 | 8 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | *Score* | 20 | 100 | 100 | 10 | 30 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | ***Total Score*** | **390** | **450** | **590** | **300** | **310** | **400** | **560** | **590** | **550** | **590** |
| | ***Ranking*** | **8** | **6** | **1** | **10** | **9** | **7** | **4** | **1** | **5** | **1** |

# BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1 Kesimpulan

1. Dari hasil analisis metode perbaikan tanah di lahan gambut dan melihat *scoring* maka disimpulkan metode *pile slab* merupakan alternative paling sesuai untuk penanganan masalah tanah gambut di lokasi jalan tol PPKA STA 167+600 – 177+600; disamping alternative *deep soil mixing* dengan penggunaan *stabilizer* sekam padi ditambah kapur dan *stone column* system GEC yang masing-masing secara *score* sama dengan *pile slab* dari 8 aspek penilaian yang dilakukan.
2. Sebagai dasar pengambilan keputusan untuk memilih metode perbaikan tanah yang paling optimum ke depan, terdapat beberapa aspek teknis yang bisa dijadikan pertimbangan jika dihadapkan dengan permasalahan gambut dalam ( > 5m) di Indonesia. Peningkatan daya dukung, besar dan waktu penurunan serta masalah stabilitas dijadikan aspek utama dalam pemilihan metode perbaikan tanah gambut.

## 5.2 Saran

1. Pile slab tidak seharusnya menjadi satu-satunya rujukan perbaikan tanah gambut. Metode stabilisasi dengan pencampuran 10% *stabilizer* (70% abu sekam padi + 30% kapur) dapat meningkatkan sifat fisik tanah gambut. Penggunaan *geotextile encased colums (GEC)* juga direkomendasikan sebagai metode perbaikan tanah gambut dalam. Namun hal tersebut kembali kepada kondisi yang dihadapi seperti lokasi, dan waktu pelaksanaan yang menjadi mandatori.
2. Diperlukan pembuktian lebih lanjut apakah penggunaan bahan *stabilizer* ini dapat efektif diaplikasikan di lapangan sebagaimana *pile slab* dan GEC yang sudah teruji.

# DAFTAR REFERENSI


Adhitya Yoga Purnama, A. R. H. C. H., 2017. Fuel Tank Foundation Improvement System On Sosft Soil Layer Based On 3D Numerical Simulation. *International Journal of Geomate, Jan. 2018,* Volume 14, pp. 13 - 19.

Afief Ma'ruf, M., 2012. *Pengaruh Air di Sekitar Area Lahan Gambut yang Distabilisasi Terhadap Sifat Fisik dan Sifat Teknis Tanah Gambut, Tesis Program Magister FTSP-Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya..* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Ahmad Hakimi Mat Nora, A. Y. F. P., 2015. Analysis of Lightwieght Concrete "Cakar Ayam" Foundation for Road Construction using Plaxis 3D Foundation Software. *Faculty of Civil and Env, Eng., University Tun Hussein on Malaysia (UTHM), Malaysia.*

Aisyah Putri, Muhardi, Ferry Fatnanta, 2017. Pengaruh Variasi Diameter Dan Jarak Kolom Campuran Abu Terbang Dan Abu Dasar Dengan Pola Segiempat Terhadap Daya DUkung Tanah Gambut. *Jom FTEKNIK Universitas Riau ,* Volume 4.

Asdak, C., 2007. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah ALiran Sungai.

ASTM, B. A., 1992. *Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing (D4427-92), ASTM, Section 4, VOlume 04.08 Soil and Rock.* Philadelphia: s.n.

Athaya Zhafirah, D. A., 2019. *Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan - Pemalang.* s.l.:s.n.

Atmadilaga, 2022. *https://atmadilaga27.blogspot.com/2011/12/deep-soil-mixing-dsm-metode.html.* [Online].

Bryan A. McCabe, James A. McNeill, Jonathan A. Black, 2007. *Ground Improvement Using The Vibro-Stone Column Technique.* Ireland West Region, The Geotechnical Society of Ireland.

B. S. N., 2017. *Persyaratan Perencanaan Geoteknik.* SNI 8460:2017 penyunt. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Darwis, M. S., 2017. *Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah.* Yogyakarta: s.n.

Das, B. M., 1988. *Mekanika Tanah 1.* s.l.:s.n.

Das, B. M., 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1.* Surabaya: Erlangga.

Dimiter Alexiew, Daniel Brokemper, Steve Lothspeich, 2012. *Geotextile Encased Columns (GEC): Load Capacity, Geotextile Selection and Pre-Design Graphs, January 24-26, 2005 | Austin, Texas, United States.* Austin, Texas, United States, American Society of Civil Engineers.

Don L. Anderson, C. B. Archambeau, 1964. The Anelasticity of the earth. *Journal of Geophysical Research (1896-1977),* 69(10), pp. 2071-2084.

Elias, V. W. J. W. J. L. R. C. J. a. B. R., 2006. *Ground Improvement Methods, Volumes I and II.* s.l.:FHWA NHI-06-019 and FHWA NHI-06-020, US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration,.

Geoinves, P., 2018. *FInal Report Laboratory Test, Proyek Tol Pematang Panggang Kayu Agung, Sumatera Selatan.* 1 ed. Jakarta: PT Geoinves.

GmbH, K. H., n.d. Deep Soil Mixing (DSM) Improvement of weak soils by the DSM method. In: s.l.:Keller Holding GmbH.

Hardiyatmo, H. C., 2017. *Metode Vacuum Preloading Sebagai Salah Satu Alternatif Solusi Pembangunan Timbunan Di Atas Tanah Lunak.* s.l.:s.n.

Hardiyatmo, H. C., 2018. *Mekanika Tanah 1.* Yogyakarta: UGM Press.

Indraratna, C. R. B., 2007. Analytical solution and design curves for vacuum assisted consolidation with both vertical and horizontal drainage. *Canadian Geotechnical Journal.*

Irsyam, A. S. M., 2012. Studi Aplikasi VAcuum Preloading Sebagai Metode Alternatif Percepatan Proses Konsolidasi Pada Tanah Lempung Lunak Jenuh Air; Trial GVS Pada Perumahan Pantai Indah Kapuk Jakarta. *Civil Engineering.*

Istasazeh Service, 2020. *en.istasazeh-co.com.* [Online] Available at: https://en.istasazeh-co.com/what-is-vibro-stone-column-or-vibro-compaction-method/ [Accessed February 2022].

JHS, 2017. *Cerucuk Matras Beton.* Jakarta: PT. Structural Precast Concrete Indonesia.

Komang Sidhi, Aniko Helda Nuryanto, Daniel Hartanto, 2019. *Kajian Karakteristik dan Kuat Geser Tanah Gambut dengan Penambahan Semen Tipe 1 Sebagai Bahan Perbaikan Tanah (Studi Kasus : Tanah RAwa Pening, Kabupaten Semarang).* Banda Aceh, Konferensi Nasional Teknik Sipil 13, Banda Aceh, 19 - 20 September 2019.

Lo, 1961. s.l.:s.n.

Ltd, K. G. E. P., 2002. Deep Soil Mixing (DSM) Improvement of work soils by the DSM . In: s.l.:s.n.

Misbahul Munir, Y. A. Y., 2018. Evaluasi Deformasi dan Stabilitas Struktur Tiang Pelat (Pile Slab) di Atas Tanah Gambut (Studi Kasus: Ruas Jalan Tol Pematang Panggang Kayu Agung, Provinsi Sumatera Selatan). *Jurnal online Institut Teknologi Nasional.*

Mochtar, Noor Endah, 2009. *Pemakaian Campuran Bahan Pozolan dan Kapur Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Gambut.* Surabaya, Laporan Penelitian Guru Besar.

Mochtar, 1991, 1998, 1999, 2002. In: s.l.:s.n.

Muhammad Afief Ma'ruf, Faisal Estu Yulianto, 2016. *Tanah Gambut Berserat : Solusi dan Permasalahannya Dalam Pembangunan Infrastruktur Yang Berwawasan Lingkungan.* Banjarmasin, Prosiding Seminar Nasional Geoteknik 2016, PS S1 Teknik Sipil Unlam, Banjarmasin, 1 Oktober 2016, ISBN : 978-602-6483-027.

Muhammad Noor, Masganti, Fahmuddin Agus, 2021. *Pembentukan dan Karakteristik Gambut Tropika Indonesia.* s.l.:Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.

Multi Phi Beta, P., 2018. *Kajian Geoteknik PPKA Seksi 3,* Sumatera Selatan: Multi Phi Beta, PT.

O'Kelly, H. G. B. C., 2014. Ground Improvement by Vacuum Consolidation. *Review Journal, 167(G14), 18.*

Rahardjo, P. P., 2013. *Manual Pondasi Tiang Edisi 4.* Bandung: Universitas Katolik Parahyangan - Geotechnical Engineering Center - Deep Foundation Institute.

Rahayu, T., 2019. *Analisis Pemampatan Sekunder Pada Tanah Gambut Jambi Dengan Metode Gibson-Lo.* Jakarta, Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jakarta.

Subagjo, 1998. *Sebaran Lahan Gambut & Rawa di Indonesia,* s.l.: s.n.

Suroso, A., 2014. Metode deep soil mixing. In: s.l.:s.n.

Teknologi, P. T. G. U., 2018. Metode Preloading dengan PVD. In: *Metode Perbaikan Tanah Lunak.* s.l.:s.n.

Terzaghi, K. & Peck, R. B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice.* USA: John Wiley and Sons, Inc.

US_FHWA., 1986. Prefabricated Vertical Drains. *Virginia USA : Turner Fairbank Highway Research Center.*

Waskita Karya, P., 2019. *Laporan Pembangunan Proyek Jalan Tol Pematang Panggang - Kayu Agung,* Sumatera Selatan: PT. Waskita Karya.

Yakin, 2013. s.l.:s.n.

Yulianto, F. E., 2014. Pengaruh Masa Peram Pada Tanah Gambut Berserat Yang DIstabilisasi Dengan Campuran Abu Sekam Padi (Rice Husk Ash) + Kapur (Lime). *Jurusan Teknik Sipil Universitas Madura, Pamekasan,* Volume 1, p. 3.

Yulianto, F. E., 2016. *Laboratory Model to Determine Efecive Zone to FIbrous Pet Soil Stabilized with Lime and Fly Ash.* Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh November.

Yulianto, F. E., 2017. Perilaku Tanah Gambut Berserat Permasalahan dan Solusinya. *Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Infrastruktur - I, Jurusan Teknik SIpil Universitas Jember.*

Yulianto, F. M. N. E., 2010. *Mixing of Rice Husk Ash (RHA) and Lime For Peat Stabilization.* Makassar, Proceedings of the First Makassar International Conference on Civil Engineering (MICCE2010).

Zulfan, J. & Kumala, Y. E., 2018. Efektivitas Krib Untuk Mengurangi Gerusan Di Tikungan Luar Sungai Bengawan Solo. *Jurnal Teknik Hidraulik,* Volume 9, pp. 115-126.