

**DISERTASI**

**STUDI EKSPERIMENTAL PERKUATAN TANAH LUNAK  
DENGAN GEOGRID KOLOM GRANULAR BUATAN**

***EXPERIMENTAL STUDY OF SOFT SOIL REINFORCEMENT  
WITH GEOGRID ARTIFICIAL GRANULAR COLUMN***

**DUHA AWALUDDIN KURNIATULLAH**

**P0800313403**



**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL**

**SEKOLAH PASCASARJANA**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2019**



LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI EKSPERIMENTAL PERKUATAN TANAH LUNAK  
DENGAN GEOGRID KOLOM GRANULAR BUATAN**

*Experimental Study of Soft Soil Reinforcement with Geogrid Artificial Granular Column*

Disusun dan diajukan oleh :

**DUHA AWALUDDIN KURNIATULLAH**

NPM. P0800313403

Telah diperbaiki dan memenuhi syarat untuk melaksanakan **Ujian Promosi Doktor**  
pada tanggal : .....

**Menyetujui :**

Komisi Penasehat,



**Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS, M.Eng**

Promotor



**Dr. Eng. Tri Harianto, MT**

Co-Promotor



**Dr. Ir. H. Nur Ali, MT**

Co-Promotor

**Mengetahui :**

Ketua Program Studi S3  
Teknik Sipil Universitas Hasanuddin



**Prof. Ir. Sakti Adi Adjisasma, MS.,M.Sc.Eng., Ph.D**



## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : **DUHA AWALUDDIN KURNIATULLAH**

No. Pokok Mahasiswa : P0800313403

Program Studi : S3 Teknik Sipil

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa disertasi yang berjudul “***Studi Eksperimental Perkuatan Tanah Lunak Dengan Geogrid Kolom Granular Buatan***” adalah karya ilmiah penulis sendiri dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun. Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam disertasi ini berasal dari penulis lain yang telah diberikan penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua kutipan, tulisan, pernyataan maupun informasi yang ada dalam disertasi ini menjadi tanggungjawab penulis sepenuhnya.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi disertasi ini adalah hasil karya orang lain, maka penulis bersedia untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkannya serta siap menerima sanksi atas perbuatan tersebut dengan segala resiko dan konsekwensinya.

Makassar, Mei 2019

Yang menyatakan

Duha Awaluddin Kurniatullah



## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, Tuhan semesta alam, karena atas rahmat, taufik, hidayah serta izin-Nya lah semua urusan dapat dimudahkan, khususnya dalam penyusunan Disertasi ini, yang berjudul, *“Studi Eksperimental Perkuatan Tanah Lunak Dengan Geogrid Kolom Granular Buatan.”*

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan disertasi ini. Khususnya kepada Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna Samang, MS, M.Eng** selaku Ketua Komisi Penasehat (promotor), serta Bapak **Dr. Eng. Tri Harianto, MT** dan Bapak **Dr. Ir. H. Nur Ali, MT** selaku anggota Komisi Penasehat (co-promotor), yang telah banyak membantu memberikan dorongan, bimbingan, nasehat serta arahnya, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Tidak lupa ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada dosen-dosen serta staf pengajar di lingkungan Pascasarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik UNHAS, juga rekan-rekan mahasiswa yang telah memberikan masukan, bahan diskusi serta literatur dalam memperkaya penyusunan disertasi ini.

Masukan, kritik, saran, serta koreksi dari semua pihak, demi penyempurnaan hasil penelitian ini, adalah menjadi harapan kami. Dan semoga dari hasil penelitian ini, dapat menjadi acuan dan pijakan untuk penyusunan disertasi, Amin Yaa Robbal ‘Aalamiin.

Makassar, Mei 2019



Duha Awaluddin Kurniatullah

## ABSTRAK

**DUHA AWALUDDIN KURNIATULLAH.** Studi Eksperimental Perkuatan Tanah Lunak Dengan Geogrid Kolom Granular Buatan. (dibimbing oleh Lawalenna Samang, Tri Harianto dan Nur Ali)

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi; karakteristik kekuatan material granular buatan tanah lunak stabilisasi semen, parameter desain elemen kolom granular buatan yang dibungkus geogrid dan kapasitas dukung model kolom granular buatan perkuatan tanah lunak. Material granular buatan terdiri dari prisma segitiga, kubus dan prisma segienam dengan volume yang sama, terbuat dari tanah lunak yang distabilisasi semen dengan metode *trial mix* untuk merepresentasikan kekuatan setara kriteria desain lapisan sub-base jalan. Uji elemen kolom granular buatan dan uji model perkuatan tanah lunak dengan sistem kolom granular buatan-geogrid dilakukan pada setiap variasi bentuk. Berdasarkan kriteria desain nilai CBR=20% untuk lapisan sub-base jalan, maka stabilisasi semen ditetapkan 12,5% yang berkesesuaian nilai kuat tekan  $q_u=400$  kN/m<sup>2</sup> dengan rasio air semen w/c sebesar 1,9. *Sub-grade* modulus elemen kolom berbagai bentuk granular  $E=1,58 \times 10^4 - 2,67 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup> dengan angka poisson  $\nu=0,29-0,33$ , granular bentuk prisma segienam menunjukkan performa kapasitas dan parameter desain yang lebih tinggi. Model perkuatan tanah lunak dengan kolom granular buatan-geogrid secara signifikan memperbaiki kapasitas dukung sistem pondasi tanah lunak dengan rasio peningkatan 28,5-33. Bentuk granular prisma segienam memiliki performa lebih baik dibandingkan tipe granular lainnya.

Kata kunci : tanah lunak, kolom granular buatan, modulus sub-grade, deformasi, kapasitas dukung



## ABSTRACT

**DUHA AWALUDDIN KURNIATULLAH.** *Experimental Study of Soft Soil Reinforcement with Geogrid Artificial Granular Column. (supervised by Lawalenna Samang, Tri Harianto and Nur Ali)*

*This research aim to investigate; strength characteristics of artificial granular material for soft soil cement stabilization, design parameters of artificial granular column elements encased geogrid, and bearing capacity of artificial granular column soft soil reinforcement models. Artificial granular material consisting of triangular prisms, cubes and hexagon prisms of the same volume, made from cement stabilized soft soil using the trial mix method to represent strength equivalent design criteria of road sub-base layer. Artificial granular column elements test and soft soil reinforcement models test with geogrid-made granular column systems were carried out in each shape variation. Based on design criteria CBR value=20% for road sub-base layer, then cement stabilization is set at 12.5% which corresponded to the value of  $q_u=400 \text{ kN/m}^2$  with cement water ratio  $w/c$  of 1.9. Sub-grade modulus column elements in various granular forms  $E=1.58 \times 10^4 - 2.67 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$  with poisson ratio  $\nu=0.29-0.33$ , granular hexagon prism shows higher capacity performance and design parameters. Soft soil reinforcement model with artificial granular columns-geogrid is significance improving bearing capacity of soft soil foundation systems with an increase ratio of 28.5-33; the granular hexagon prism shows capacity performance and design parameters higher than other granular types.*

**Keywords:** *soft soil, artificial granular column, sub-grade modulus, deformation, bearing capacity*

*26/2-2019*



# DAFTAR ISI

	Halaman
Prakata	i
Daftar Isi	ii
Daftar Gambar	iv
Daftar Tabel	vi
Daftar Notasi	vii
<b>BAB I Pendahuluan</b>	<b>1</b>
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Batasan Penelitian	3
E. Kegunaan Penelitian	4
F. Lingkup dan Batasan Penelitian	4
<b>BAB II Tinjauan Pustaka</b>	<b>5</b>
A. Isu Pembangunan pada Tanah Lunak	5
B. Karakteristik Tanah Lunak dan Kapasitas Dukung	7
C. Input Teknologi Perbaikan dan Perkuatan Tanah Lunak	12
D. Material Konstruksi Lokal	17
E. Perkuatan Tanah Dengan Teknik Kolom	18
a. Pembebanan Statik	21
b. Urutan Studi Penelitian Terdahulu	27
c. Berpikir	43



<b>BAB III Metodologi Penelitian</b>	44
A. Pengumpulan Data dan Sampel Tanah	44
B. Rancangan Penelitian	45
<b>BAB IV Hasil dan Pembahasan</b>	55
A. Karakteristik Fisis dan Mekanis Tanah Lunak Geogrid	55
B. Karakteristik Kekuatan Material Stabilisasi Tanah dan Kerikil Buatan	57
C. Parameter Elemen Kolom Granular Perkuatan Selimut Geogrid	64
D. Kapasitas Dukung Model Kolom Granular Perkuatan Geogrid Pada Tanah Lunak	66
E. Pola Deformasi Kapasitas Dukung Model Kolom Granular Buatan Pada Sistem Pondasi Tanah Lunak	68
F. Temuan Empirik	70
<b>BAB V Kesimpulan dan Saran</b>	71
A. Kesimpulan	71
B. Saran	72
<b>Daftar Pustaka</b>	73



## DAFTAR GAMBAR

			Halaman
Gambar	1.	Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal	11
Gambar	2.	Modulus reaksi tanah	18
Gambar	3.	Grafik hubungan beban (P) dengan deformasi (D)	24
Gambar	4.	Aplikasi Pembebanan Aksial Dengan Menggunakan Blok-blok Beton Bertumpuk (ASTM D 1143-98)	25
Gambar	5.	Grafik hubungan beban dengan penurunan Metode Butler dan Hoy	27
Gambar	6.	Kerangka Berfikir	43
Gambar	7.	Diagram Alir Penelitian	48
Gambar	8.	Sketsa Cetakan Kerikil Buatan	50
Gambar	9.	Sketsa Dimensi Kerikil Buatan	51
Gambar	10.	Sketsa pembebanan elemen kolom geogrid granular buatan	52
Gambar	11.	Sketsa pembebanan geogrid kolom granular buatan pada tanah lunak	54
Gambar	12.	Hubungan antara nilai $q_u$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) dan nilai CBR (%) terhadap prosentase penambahan semen	58
Gambar	13.	Korelasi antara nilai $q_u$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) dengan nilai CBR (%)	59
Gambar	14.	Hubungan antara WCR (w/c) dengan nilai CBR (%) dan $q_u$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	61
Gambar	15.	Hubungan jumlah pukulan dengan nilai CBR (%)	63
	16.	Hubungan berat isi kering dengan nilai CBR (%)	63
	17.	Hubungan antara pembebanan elemen kolom dengan regangan vertikal	65



Gambar	18.	Hubungan antara regangan horisontal dengan regangan vertikal pada elemen kolom	65
Gambar	19	Hubungan pembebanan perkuatan tanah dengan deformasi vertikal	67
Gambar	20	Pola deformasi kolom granular buatan bentuk (a) prisma segitiga (b) kubus ; (c) prisma segienam	69



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Definisi Kuat Geser Lempung Lunak	7
Tabel 2. Indikator Kuat Geser Tak Terdrainase Tanah Lempung Lunak	8
Tabel 3. Konsistensi Lempung dalam Bentuk Kekuatan Kompresif Bebas	9
Tabel 4. Identifikasi di Lapangan Terhadap Konsistensi Tanah	9
Tabel 5. Faktor-faktor bentuk menurut Terzaghi (1943)	10
Tabel 6. Jenis pengujian dan standar yang digunakan	49
Tabel 7. Indeks properties tanah	55
Tabel 8. Spesifikasi geogrid	56
Tabel 9. Kebutuhan semen untuk stabilisasi tanah berdasarkan PCA	60
Tabel 10. Hubungan jumlah pukulan dengan nilai CBR (%)	62
Tabel 11. Nilai kapasitas dukung, deformasi, modulus dan <i>poisson ratio</i> pada kolom 66	



## DAFTAR NOTASI

$A$	=	Luas penampang ( $\text{cm}^2$ )
$\sigma_H$	=	Tegangan horisontal ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
$\sigma_v$	=	Tegangan vertikal ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
$\epsilon_H$	=	Regangan horisontal
$\epsilon_v$	=	Regangan vertikal
$\delta_H$	=	Deformasi horisontal (cm)
$\delta_v$	=	Deformasi vertikal (cm)
$q_u$	=	Daya dukung tanah batas ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
$r$	=	Jarak radial (cm)
$\nu$	=	<i>Poisson ratio</i>
$\gamma$	=	Berat isi ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )
$\gamma_d$	=	Berat isi kering ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )
LL	=	Batas cair
PL	=	Batas plastis
IP	=	Indeks plastis
$w$	=	Kadar air (%)
$l_0$	=	Panjang mula-mula (cm)
$E$	=	Modulus elastisitas ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur, khususnya pembangunan infrastruktur dibidang transportasi, selalu menjadi prioritas utama dalam rangka membuka daerah-daerah yang masih terisolasi. Salah satu pembangunan infrastruktur yang terus dipacu dan dikembangkan adalah pembangunan infrastruktur jalan. Hal yang menjadi masalah utama pada pembangunan jalan adalah kondisi tanah dasar yang tidak memenuhi syarat dan kriteria yang diharapkan. Tanah dasar yang baik adalah menjadi komponen utama pada perletakan pondasi struktur bangunan, baik bangunan gedung, bangunan jalan maupun bangunan air. Spesifikasi tanah yang tidak memenuhi kriteria standar yang telah ditetapkan, akan menjadi resiko yang besar terjadinya suatu kegagalan struktur pondasi bangunan.

Tanah dasar (*sub-grade*) harus mempunyai kapasitas dukung yang baik serta mampu mempertahankan perubahan volume selama masa pelayanan, akibat beban yang bekerja di atasnya. Konstruksi *sub-grade* ini dipersiapkan secara khusus agar didapatkan pondasi yang stabil bagi perkerasan dengan cara memadatkan tanah material *sub-grade* menggunakan alat berat. Kekuatan utama sebuah konstruksi perkerasan jalan, adalah pada *sub-gradenya*.

Beberapa wilayah di Indonesia, mempunyai kondisi geografis yang sangat berbeda-beda. Pada daerah tersebut sangat sulit untuk mendapatkan material agregat alami, dan lokasi yang sama sekali tidak tersedia agregat alami sama sekali. Salah



satu daerah di Indonesia yang kondisinya seperti itu adalah Kabupaten Merauke. Kabupaten ini terletak di Provinsi Papua, sebelah Selatan dari ibu kota Provinsi Papua, Jayapura yang juga berbatasan langsung dengan negara Papua New Guinea (PNG). Secara umum, kondisi tanah yang ada diseluruh Kabupaten Merauke adalah tanah sangat lunak dan tidak berbatu sama sekali. Sehingga untuk keperluan pembangunan infrastruktur, agregat kasar yang digunakan adalah batu buatan atau batu yang didatangkan dari tempat lain, dengan menggunakan kapal laut.

Beberapa alternatif yang sering digunakan pada pelaksanaan pekerjaan perbaikan tanah untuk landasan struktur bangunan adalah dengan memanfaatkan cerucuk kayu yang ada disekitar area pekerjaan atau menggunakan metode *pile slab*. Kedua metode tersebut dianggap banyak kelemahannya. Penggunaan cerucuk kayu tentunya bertentangan dengan lingkungan hidup, terutama konsep pengembangan penghijauan yang dicanangkan oleh pemerintah, sedangkan *pile slab* adalah jenis konstruksi yang sangat mahal (tidak ekonomis) untuk digunakan.

Pada penelitian terdahulu, konsep perbaikan tanah dengan perkuatan kolom granular, biasanya diisi dengan isian pasir dan batu alam yang ada disekitar lokasi, atau campuran sirtu (pasir-batu). Penelitian yang akan dibuat ini adalah melakukan studi eksperimental perbaikan tanah lunak, dengan perkuatan menggunakan kolom granular yang diisi dengan kerikil buatan dan kolomnya diselubungi dengan geogrid. Konsep ini diharapkan dapat menjawab permasalahan perkuatan tanah lunak untuk pembangunan infrastruktur jalan di daerah-daerah yang sulit untuk mendapatkan agregat alami, seperti di Kabupaten Merauke, Provinsi Papua.



## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan diambil adalah :

1. Bagaimana karakteristik kekuatan material granular buatan tanah lunak, stabilisasi semen ?
2. Bagaimana parameter desain elemen kolom granular buatan yang dibungkus geogrid ?
3. Bagaimana kapasitas dukung model kolom granular buatan perkuatan tanah lunak ?

## C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengembangkan dan menemukan serta menginvestigasi karakteristik kekuatan material granular buatan tanah lunak, stabilisasi semen.
2. Mengembangkan dan menemukan serta menginvestigasi parameter desain elemen kolom granular buatan yang dibungkus geogrid.
3. Mengembangkan dan menemukan serta menginvestigasi kapasitas dukung model kolom granular buatan perkuatan tanah lunak.

## D. Batasan Penelitian

Batasan dari penelitian ini adalah :

1. Tidak melakukan pengujian *slacking durability* dan aberasi terhadap material kerikil buatan.

Pengujian CBR yang dilakukan terhadap material kerikil buatan adalah dalam kondisi tidak terendam (*unsoaked*).



### E. Kegunaan Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan menjadi inovasi dalam pengembangan kolom granular buatan tanah lunak stabilisasi semen yang secara praktis dapat diimplementasikan pada daerah terisolir dengan keterbatasan material granular lokal.

### F. Lingkup dan Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan efektif, terencana terukur dan tepat sasaran, maka penelitian ini hanya difokuskan pada jenis tanah lunak, yang dalam keadaan lepas (*loose*) dengan kategori *soft-clay*, yang dicampur dengan semen. Pengambilan sampel tanah, dilakukan dilokasi sekitar kampus Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Gowa. Kondisi tanah sampel tanah yang diambil, diharapkan dapat merepresentasi kondisi tanah lunak di daerah yang mengalami kelangkaan agregat kerikil alami.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Isu Pembangunan pada Tanah Lunak

Permasalahan utama dalam bidang konstruksi sipil umumnya berada pada lahan yang akan dibangun. Tanah harus mampu memikul beban dari setiap konstruksi teknik yang diletakkan pada tanpa kegagalan geser dan dengan penurunan yang dapat ditoleril untuk konstruksi tersebut (Bowles, 1988). Di beberapa kawasan yang memiliki lahan terbatas, banyak pembangunan infrastruktur baik berupa perumahan, perkantoran dan sejenisnya, yang dibangun di atas tanah lunak, karena tanah hanya itulah yang masih tersedia di daerah pinggiran perkotaan dengan harga relatif lebih murah. Tetapi mengingat kondisi karakteristik tanah lunak, maka biaya ekstra yang lebih besar juga diperlukan untuk pekerjaan perbaikan tanah dasar (*ground improvement*) agar tanah tersebut menjadi layak dan siap untuk didirikan bangunan. Salah satu masalah yang sering dihadapi dalam kasus tanah lunak adalah terjadinya *settlement*. Pemampatan tanah yang besar dapat menurunkan stabilitas struktur bangunan, bahkan apabila terjadi perbedaan penurunan (*differential settlement*) antar pondasi dapat mengakibatkan keruntuhan bahkan kegagalan dari struktur bangunan tersebut.

Pemampatan primer adalah pemampatan yang terjadi pada tanah akibat keluarnya air pori dari dalam pori tanah akibat adanya penambahan beban di permukaan tanah atau bisa diartikan sebagai perubahan tekanan air pori. Jadi setelah pemampatan primer, terjadi perubahan tegangan pori sedang pemampatan sekunder didefinisikan sebagai pemampatan yang terjadi setelah pemampatan primer



selesai, tanpa adanya perubahan air pori. Pemampatan sekunder ini merupakan penyesuaian bersifat plastis susunan butiran tanah. Pemampatan sekunder yang berlangsung merupakan pemampatan rangkak (*creep*) dari tanah karena perubahan matriks tanah secara lambat laun akibat adanya penambahan beban pada tanah seperti yang dijelaskan oleh (Das, Endah and Mochtar, 1995), bahwa setelah konsolidasi primer selesai, masih ada lagi pemampatan sekunder yang biasanya jarang orang memperhitungkan pemampatan ini. Padahal pemampatan masih cukup besar meskipun konsolidasi primer sudah selesai. Akibatnya terjadi beberapa masalah pada gedung yang dibangun di atasnya.

Kerusakan bangunan teknik sipil tidak hanya disebabkan oleh struktur bangunan, tetapi juga kondisi tanah dimana struktur bangunan diletakkan. Penyebab kerusakan tersebut adalah besarnya penurunan yang terjadi dan rendahnya daya dukung tanah, seperti pada tanah kohesif khususnya yang mengandung kadar air cukup tinggi. Oleh karena itu harus diperhatikan dengan seksama mengenai daya dukung dari tanah kohesif tersebut, apakah perlu adanya usaha perbaikan atau stabilitas tanah untuk mendapatkan sifat-sifat tanah yang diinginkan sehingga kegagalan konstruksi dapat dicegah. Menurut (Das, Endah and Mochtar, 1995), beberapa masalah utama yang timbul pada tanah sangat lunak antara lain daya dukung tanah yang sangat rendah dan tingkat penurunan tanah yang relatif besar. Banyak sekali metode yang telah dikembangkan guna meningkatkan karakteristik fisis dan mekanis dari tanah lunak. Salah satu cara yang dilakukan untuk meningkatkan karakteristik mekanisnya adalah dengan memberikan perkuatan tanah (*soil reinforcement*) berupa lembaran geosintetik yang dihamparkan di atas tanah lunak sebagai tanah dasar (Al-Huda, 2014)



## B. Karakteristik Tanah Lunak dan Kapasitas Dukung

Menurut buku Panduan Geoteknik I yang dikeluarkan oleh Departemen Permukiman dan Parsarana Wilayah (Anonim, 2002), penggunaan istilah “tanah lunak” berkaitan dengan tanah-tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir; tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi.

Tanah lunak terdiri dari 2 (dua) tipe, yang didasarkan atas bahan pembentuknya :

- a. Tanah lempung lunak (tanah inorganik) yang berasal dari pelapukan batuan yang diikuti oleh transportasi dan proses-proses lainnya.
- b. Gambut yang berasal dari bahan tumbuh-tumbuhan yang mengalami berbagai tingkat pembusukan.

Tanah jenis ini mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi, yang menyebabkan kuat geser yang rendah. Dalam rekayasa geoteknik istilah 'lunak' dan 'sangat lunak' khusus didefinisikan untuk lempung dengan kuat geser seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Definisi Kuat Geser Lempung Lunak

Konsistensi	Kuat geser (KN/m <sup>2</sup> )
Lunak	12,5 - 25
Sangat lunak	< 12,5

Sebagai indikasi dari kekuatan lempung tersebut, prosedur identifikasi lapangan pada Tabel 2, memberikan beberapa petunjuk.



**Tabel 2.** Indikator Kuat Geser Tak Terdrainase Tanah Lempung Lunak

Konsistensi	Indikasi lapangan
Lunak	Bisa dibentuk dengan mudah dengan jari tangan
Sangat lunak	Keluar di antara jari tangan jika diremas dalam kepalan tangan

Salah satu jenis tanah lunak, berdasarkan ukuran butirannya adalah tanah lempung. Suatu tanah dapat dikatakan sebagai tanah lempung bila ukuran butiran tanahnya lebih kecil dari 0,002 mm (2 mikron).

Sedangkan suatu tanah dapat juga dikatakan sebagai tanah lempung apabila partikel-partikel mineral yang dikandungnya dapat menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah ketika dicampur dengan air. Suatu tanah yang memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 2 mikron tetapi partikel-partikel mineral yang terkandung didalamnya tidak dapat menghasilkan sifat plastis pada tanah dapat dikatakan bukan sebagai tanah lempung (*non-clay soil*). Jadi definisi dari tanah lempung itu sendiri adalah suatu tanah yang memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 2 mikron (0,002 mm) dan mengandung partikel-partikel mineral lempung. (Das, Endah and Mochtar, 1995).

Konsistensi lempung dan tanah kohesif lainnya biasanya dinyatakan dengan istilah lunak, sedang, kaku, atau keras. Ukuran kuantitatif konsistensi yang paling langsung adalah beban persatuan luas dimana contoh tanah bebas (*unconfined*) berbentuk silinder atau prisma runtuh dalam uji pemampatan sederhana. Besaran ini dikenal sebagai kekuatan kompresif bebas (*unconfined compressive strength*) tanah. Nilai kekuatan kompresif yang berkaitan dengan aneka derajat konsistensi, beserta identifikasi lapangannya dapat dilihat pada tabel 3 dan tabel 4. (Terzaghi and Peck, 2006)



**Tabel 3.** Konsistensi Lempung dalam Bentuk Kekuatan Kompresif Bebas

Konsistensi	$Q_u$ tanah lempung (Kg/cm <sup>2</sup> )
Sangat lunak	< 0,25
Lunak	0,25 - 0,5
Sedang	0,5 - 1,0
Kaku	1,0 - 4,0
Sangat Kaku	2,0 - 4,0
Keras	> 4,0

(Terzaghi, K., dan R.B. Peck, 2006)

**Tabel 4.** Identifikasi di Lapangan Terhadap Konsistensi Tanah

Konsistensi	Identifikasi di lapangan
Sangat lunak	Meleleh diantara jari-jari tangan ketika diperas
Lunak	Dapat diremas dengan mudah
Sedang	Dapat diremas dengan tekanan jari yang kuat
Kaku	Tidak dapat diremas dengan jari, dapat digencet dengan ibu jari
Sangat Kaku	Dapat digencet dengan kuku ibu jari

(Terzaghi, K., dan R.B. Peck, 2006)

Menurut Terzaghi (1943) kapasitas/daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kekuatan tanah untuk menahan suatu beban yang bekerja padanya yang biasanya disalurkan melalui pondasi. Kapasitas/daya dukung tanah batas ( $q_u = q_{ult} = \textit{ultimate bearing capacity}$ ) adalah tekanan maksimum yang dapat diterima oleh tanah akibat beban yang bekerja tanpa menimbulkan kelongsoran geser pada tanah pendukung tepat di bawah dan sekeliling pondasi.

Secara umum, kapasitas daya dukung tanah dapat digambarkan untuk estimasi maksimum untuk pondasi dengan pembebanan vertikal terpusat sebagai



$$q_u = S_c d_c N_c + S_q d_q \cdot \gamma d N_q + S_\gamma d_\gamma \frac{1}{2} b N_\gamma$$

dimana  $S_c$ ,  $S_q$ , dan  $S_\gamma$  merupakan faktor-faktor bentuk dan  $d_c$ ,  $d_q$ , dan  $d_\gamma$  merupakan faktor-faktor kedalaman.

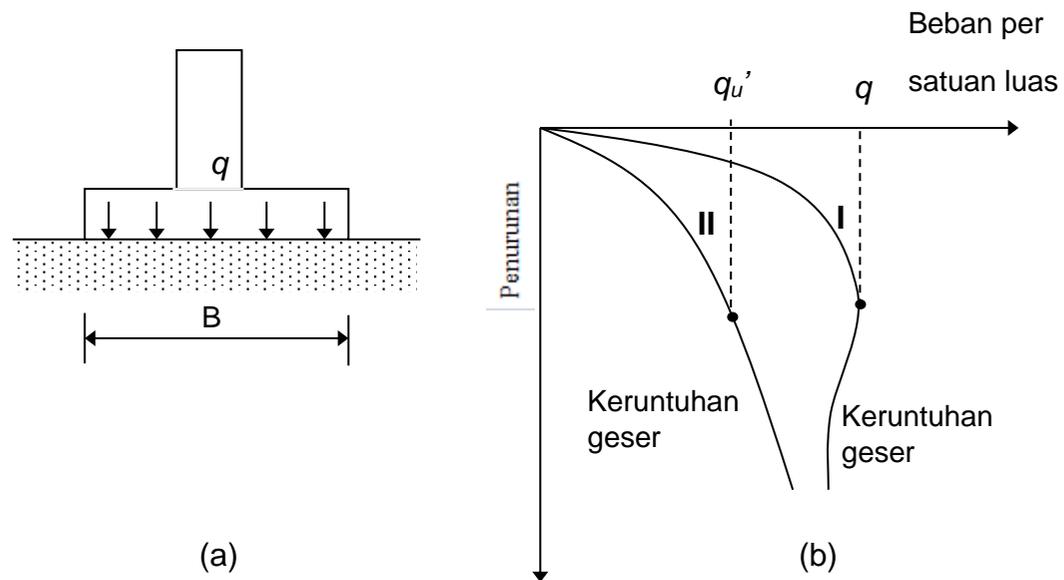
Tabel-tabel berikut ini memperlihatkan faktor-faktor bentuk dan kedalaman yang dikembangkan oleh Terzaghi (1943), Meyerhof (1963), Hansen (1970), dan Vesic (1973). Terzaghi hanya menggunakan faktor bentuk dengan kohesi dan lapisan tanpa mempertimbangkan faktor kedalaman.

**Tabel 5.** Faktor-faktor bentuk menurut Terzaghi (1943)

	Menerus	Melingkar	Persegi
$S_c$	1,0	1,3	1,3
$S_\gamma$	1,0	0,6	0,8

Konsep perhitungan daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilihat dalam model pondasi menerus dengan lebar ( $B$ ) yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat (tanah yang kaku) seperti pada **Gambar 1.a**. Apabila beban terbagi rata ( $q$ ) tersebut ditambah, maka penurunan pondasi akan bertambah pula. Bila besar beban terbagi rata  $q = q_u$  ( $q_u$  = daya dukung tanah batas) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban  $q$  lebih lanjut seperti **Gambar 1.b**. Hubungan antara beban dan penurunan ditunjukkan pada kurva I pada **Gambar 1.b**. Untuk keadaan ini,  $q_u$  didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah.





**Gambar 1.** Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal.

(a) Model pondasi

(b) Grafik hubungan antara beban dan penurunan

Proses keruntuhan tanah dasar terjadi dalam beberapa fase; pertama, tanah di bawah fondasi turun mengakibatkan terjadinya deformasi tanah pada arah vertikal dan horisontal ke bawah, penurunan yang terjadi sebanding dengan besar beban (selama beban yang bekerja cukup kecil), tanah dalam kondisi keseimbangan elastis, massa tanah di bawah fondasi mengalami kompresi mengakibatkan kenaikan kuat geser tanah sehingga kapasitas dukung bertambah; kedua, terbentuk baji tanah pada dasar fondasi dimana deformasi plastis tanah dimulai dari ujung tepi fondasi mengakibatkan zona plastis semakin berkembang seiring dengan penambahan beban, selanjutnya gerakan tanah arah lateral makin tampak ditandai oleh retakan lokal dan geseran tanah di sekeliling tepi fondasi, Kuat geser tanah sepenuhnya ang untuk menahan beban pada zona plastis; dan ketiga, deformasi tanah bertambah dan diikuti menggelembungnya tanah permukaan akibatnya

tanah mengalami keruntuhan, bidang runtuh berbentuk lengkungan dan garis yang disebut bidang geser radial dan bidang geser linier.

### C. Input Teknologi Perbaikan dan Perkuatan Tanah Lunak

Pergeseran yang ditimbulkan dari tanah lunak alami terjadi karena adanya kekuatan geser yang rendah dan kompresibilitas tinggi. Penggunaan timbunan tanah granular adalah salah satu teknik untuk meningkatkan kekuatan geser yang efektif. Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki pengaruh dari berbagai parameter pada daya dukung, *settlement* dan momen lentur *slab*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan timbunan granular di tanah lunak di bawah *rafting-slab*, akan mengurangi secara efektif terjadinya *settlement* dan tekukan. Peningkatan ini terus meningkat seiring dengan meningkatnya rasio luasan penampang dan panjang tiang, juga seiring dengan penurunan rasio jarak. (Elsawy and El-Garh, 2016)

Implementasi *pre-loading* dan perkuatan cerucuk bambu pada lahan gambut diharapkan dapat mengurangi kompresi dan dapat meningkatkan daya dukung tanah gambut. *Pre-loading* dapat diterapkan dengan menggunakan material timbunan yang dapat mempercepat proses kompresi. Sedangkan untuk meningkatkan kapasitas dukung pada timbunan dapat menggunakan kombinasi tulangan kisi dan tumpukan bambu. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan daya dukung yang signifikan, baik dilihat dari perilaku penurunan maupun defleksi yang terjadi pada tanah gambut dengan tiang bambu. (Maulana *et al.*, 2018)

Selain dengan cerucuk, struktur *pile-slab* pada pondasi rakit, juga dapat

... untuk menyalurkan beban ke tanah dasar. Pondasi rakit tiang pendek (*bed raft*) adalah sistem pondasi rakit bertiang yang dimodifikasi, yang mewakili ... si antara pondasi rakit dan pondasi tiang pancang, tetapi panjang tiang relatif



pendek. Konsep dasar dari sistem pondasi rakit tiang pendek, adalah mempertimbangkan adanya tekanan tanah pasif yang menyebabkan terjadinya kondisi kaku pada sistem *pile-slab*. Ini artinya pelat beton tipis mengapung di permukaan tanah, sementara *slab* berfungsi sebagai pengaku beton dan juga untuk mengurangi terjadinya *settlement*. Dalam penelitian ini, metode elemen hingga digunakan untuk mensimulasikan kinerja stabilitas pondasi terkait dengan penurunan yang terjadi pada sistem pondasi *short piled raft*. Sistem pondasi tiang rakit pendek dengan pelat beton 7,0 m x 7,0 m persegi diasumsikan dibangun di atas lahan gambut dengan ketebalan 3,5 m. Bahan sifat tiang dan rakit adalah konstan. Diameter luar pipa baja galvanis sebagai tiang pancang adalah 0,30 m; Ketebalan rakit dianggap konstan 0,15 m dan panjang tiang adalah 3,00 m, sedangkan jarak pile bervariasi dari 0,50 hingga 3,00 m. Beban titik bervariasi dari 0 hingga 100 kN dengan kenaikan 20 kN juga dianggap sebagai beban statis, yang bekerja pada bagian tengah lempengan beton. Optimasi dilakukan dengan membandingkan setiap hasil simulasi numerik. Jarak pancang optimal adalah 1,00 m dengan *settlement* minimum 30,11 mm di bawah beban 100 kN. (Suro, Bakar and Sulaeman, 2016)

Penggunaan *pile slab* ini menyebabkan terjadinya pemerataan pemampatan sehingga tidak terjadi *differential settlement*. Tetapi, walaupun secara struktur, penggunaan *pile slab* dapat mengurangi terjadinya *differential settlement*, biasanya para perencana, tidak merekomendasikan penggunaan *pile slab* untuk perkuatan tanah, karena dianggap sangat tidak efisien (*high cost*).

Metode lain yang digunakan untuk perbaikan dan perkuatan tanah yang saat ini banyak digunakan adalah perkuatan tanah dengan geosintetik. Menurut Modul 3-

lahan Kerusakan Jalan dan Perencanaan-Penanganannya sebagai Tanah (anonim, 2013), secara umum, geosintetik adalah suatu produk berbentuk lembaran yang terbuat dari bahan polimer lentur, digunakan dengan tanah, batuan,



atau material geoteknik lainnya, sebagai suatu kesatuan pekerjaan buatan manusia, struktur, maupun sistem (ASTM D 4439). Pada dasarnya, geosintetik terbagi menjadi dua yaitu tekstil dan jaring (web). Berdasarkan bahannya, kedua jenis geosintetik dibagi menurut bahan sintetik dan alami. Sebagian besar geosintetik terbuat dari polimer sintetik seperti polipropilena (PP), poliester (PET) atau polietilena (PE). Material polimer tersebut sangat tahan terhadap degradasi biologis dan kimiawi. Jenis lain yang jarang digunakan adalah poliamida (PA) atau nilon dan serat kaca. Bahan alami (seperti serat kapas, rami) juga dapat digunakan seperti geotekstil, terutama untuk aplikasi yang bersifat sementara.

Berdasarkan sifat permeabilitas, geosintetik terbagi menjadi kedap air dan lolos air. Geotekstil adalah jenis geosintetik yang lolos air yang berasal dari bahan tekstil. Geomembran merupakan jenis geosintetik kedap air yang biasa digunakan sebagai penghalang zat cair. Jenis geotekstil kemudian dibagi berdasarkan metode yang digunakan untuk mengkombinasikan filamen atau pita menjadi struktur lembaran. Jenis geotekstil yang utama adalah tak-teranyam (*non-woven*) dan teranyam (*woven*). Geotekstil teranyam terbuat dari monofilamen, multifilamen, fibrillated yarns atau dari potongan film dan pita. Proses penganyaman untuk geosintetik teranyam sama dengan pembuatan tekstil biasa. Geotekstil tak-teranyam dilakukan dengan teknologi canggih dimana serat polimer atau filamen didesak keluar dan dipuntir secara menerus, ditiup atau ditempatkan pada suatu sabuk berjalan. Kemudian massa filamen atau serat tersebut disatukan dengan proses mekanis dengan tusukan jarum-jarum kecil atau disatukan dengan panas dimana serat tersebut “dilas” oleh panas dan/atau tekanan pada titik kontak serat dengan massa tekstil tak-teranyam. Keuntungan yang dapat diambil dari penggunaan geotekstil

tanah lunak adalah konstruksinya sederhana sehingga mudah untuk  
akan, menghemat waktu pelaksanaan, menghemat biaya konstruksi.



Sedangkan kerugian dari penggunaan geotekstil adalah bahwa geotekstil tidak tahan terhadap sinar ultra violet. (Koerner, 2005).

Geogrid merupakan suatu contoh dari jenis geosintetik yang berbentuk jaring (web). Fungsi geogrid yang utama adalah sebagai perkuatan. Geogrid dibentuk oleh suatu jaring teratur dengan elemen-elemen tarik dan mempunyai bukaan berukuran tertentu sehingga saling mengunci (*interlock*) dengan bahan pengisi di sekelilingnya. Saat ini terdapat material yang secara teknis tidak dapat disebut tekstil, misalnya jaring, grid, net, jala (mesh) dan komposit. Geotekstil dan produk-produk tersebut, seperti net dan grid, dapat dikombinasikan dengan geomembran atau bahan sintetik lainnya untuk mendapatkan karakteristik terbaik dari setiap bahan. Produk tersebut dikenal sebagai geokomposit dan produk ini dapat berupa gabungan dari geotekstil-geonet, geotekstil-geogrid, geotekstil-geomembran, geomembran-geonet, dan bahkan struktur sel polimer tiga dimensi. Kombinasi bahan-bahan pembentuk geokomposit tersebut sangat banyak dan hampir tidak terbatas. Selain itu terdapat juga tipe-tipe geosintetik lain seperti *geosynthetic clay liner* maupun geopipa (Koerner, 2005).

Secara umum, geogrid adalah bahan *geosintetik* yang berfungsi sebagai perkuatan (*reinforcement*) dan stabilisasi (*stabilization*). *Geogrid* sendiri adalah inovasi yang dibuat untuk menutupi kekurangan pada *geotextile*. Terutama masalah kekakuan bahan dan mekanisme perkuatan. Suatu hal yang tidak dimiliki *geotextile*, tetapi *geogrid* dapat menyediakannya. Sebagai gambaran, terkait dengan kekakuan bahan, *geogrid* memiliki kekakuan bahan yang lebih tinggi dibandingkan *geotextile*. Berdasarkan bentuk bukaannya (*aperture*), maka geogrid bisa dibagi menjadi :

a. **Geogrid Uniaxial** adalah geogrid yang mempunyai bentuk bukaan tunggal

dalam satu segmen (ruas). Berfungsi sebagai material perkuatan pada sistem konstruksi dinding penahan tanah (*Retaining Wall*) dan perkuatan lereng (*Slope Reinforcement*).



- b. **Geogrid Biaxial** adalah geogrid yang mempunyai bukaan berbentuk persegi. Berfungsi sebagai stabilisasi tanah dasar. Seperti pada tanah dasar lunak (*soft clay* maupun tanah gambut). Metode kerjanya adalah *interlocking*, artinya mengunci agregat yang ada diatas geogrid sehingga lapisan agregat tersebut lebih kaku, dan mudah dilakukan pemadatan.
- c. **Geogrid Triaxial** adalah geogrid yang mempunyai bukaan berbentuk segitiga. Fungsinya sama dengan *biaxial* sebagai material stabilisasi tanah dasar lunak, hanya saja performanya lebih baik. Hal ini disebabkan bentuk bukaan segitiga lebih kaku sehingga penyebaran beban menjadi lebih merata.

Metode lain yang dapat digunakan digunakan dalam perbaikan dan perkuatan tanah adalah *Stone Column* atau kolom batu. Metode perbaikan tanah ini pertama kali dikembangkan di Eropa pada tahun 1930-an di Prancis dan mulai berkembang pesat pada akhir tahun 1950-an. Metode ini biasanya digunakan untuk perbaikan tanah kohesif lunak untuk menaikkan daya dukung tanah dan untuk mengurangi *settlements* atau penurunan tanah yang akan terjadi. Dengan perbaikan menggunakan teknik *stone column* ini, diharapkan tanah lempung dapat menghasilkan kapasitas daya dukung besar sehingga beban timbunan yang bekerja menjadi lebih besar, sehingga konsolidasi yang terjadi menjadi lebih cepat karena *stone column* sendiri juga dapat menjadi drainase tambahan untuk mengeluarkan air pori. Selain itu dengan *stone column* diharapkan pula penurunan yang terjadi akibat beban timbunan tersebut menjadi lebih kecil / berkurang.

Berbagai metode perbaikan tanah telah banyak dikembangkan. Salah satunya dengan metode perkuatan tanah sebagai alternatif pemecahan masalah penurunan dan daya dukung tanah yang rendah. *Stone column* merupakan salah satu metode perbaikan tanah baik pada tanah lempung maupun tanah berpasir.



Pada tanah lempung, penggunaan *stone column* dapat meningkatkan dan memperbaiki masalah daya dukung tanah dan penurunan yang terjadi. Sistem perbaikan tanah yang pernah dikembangkan adalah penggunaan *stone column* dimana kerikil atau pasir dimasukkan ke dalam tanah melalui lubang bor yang telah dibuat sebelumnya sambil dipadatkan.

#### D. Material Konstruksi Lokal

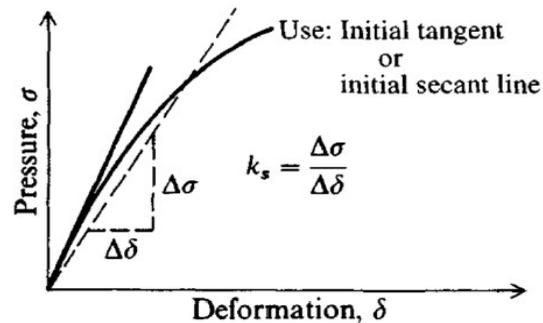
Secara umum pasir dan kerikil dari bahan lokal di Distrik Muting Merauke memiliki sifat agregat yang dapat digolongkan memenuhi sifat agregat standar, walaupun beberapa sifat agregatnya cenderung di bawah standar. Beton non struktur dari bahan lokal di Distrik Muting Merauke memiliki sifat-sifat yang baik sehingga dapat memenuhi sifat beton standar, namun kebutuhan semen/m<sup>3</sup> beton cenderung lebih banyak jika dibandingkan dengan beton normal. (Pasalli, 2014).

Modulus elastisitas suatu tanah adalah parameter tanah yang umum digunakan dalam estimasi penurunan dari beban statis atau dinamis. *Resilient Modulus* (MR) subgrade adalah parameter teknik penting untuk mekanistik desain perkerasan empiris. Dari hasil suatu penelitian, modulus elastisitas yang diturunkan dari uji CBR, nilainya lebih tinggi dari modulus elastisitas yang diperoleh dari uji UCT. Sebagai tambahan, dari uji UCT, semakin tinggi tegangan deviator siklik yang diterapkan pada sampel, semakin tinggi modulus elastisitas, tetapi tidak ada tren dalam hasil modulus *resilient*. (Eka Putri, V Kameswara Rao and Mannan, 2012)

Teori ini banyak dikembangkan untuk perhitungan tegangan-regangan pada pondasi fleksibel. Nilai  $K_s$  dapat ditentukan berdasarkan pengujian lapangan, uji laboratorium, persamaan empiris, dan nilai tabulasi. Uji lapangan menggunakan *plate load test*, uji laboratorium menggunakan uji konsolidasi dan uji



triaksial dan uji CBR. Sedangkan (Bowles, 1988), mengusulkan beberapa hubungan empiris dan beberapa nilai tabulasi untuk koefisien reaksi tanah.



**Gambar 2.** Modulus reaksi tanah

Parameter umum yang digunakan untuk menentukan besarnya penurunan vertikal (*settlement*) adalah modulus elastisitas tanah ( $E_s$ ). Sama dengan  $K_s$ , menentukan  $E_s$  juga dengan estimasi pengujian lapangan dan uji laboratorium, persamaan empiris, dan nilai tabulasi.

### E. Perkuatan Tanah Dengan Teknik Kolom

Perkuatan tanah (*soil reinforcement*) ini merupakan cara yang paling pesat berkembang dalam dua dekade akhir-akhir ini dan cara ini merupakan yang paling banyak dipelajari dan diminati orang. Menurut (Das, Endah and Mochtar, 1995), metode ini dapat dibagi menjadi 4 (empat) metode yaitu :

#### 1. Metode *Stone Column*

Pada metode ini, pada tanah yang lunak dipasang kolom-kolom dari batu atau kerikil yang dipadatkan berdiameter 0,6 – 1,0 meter dengan jarak tertentu.

Pemasangan *stone column* bisa dengan cara *vibroflotation* atau cara *pneumatic compaction*. *Stone column* tersebut berfungsi untuk meningkatkan



kekuatan geser tanah dan mengulangi *settlement*. Selain *stone column* juga umum dilaksanakan sand column yang dipasang dengan cara vibro-compozer sebagaimana telah dijelaskan didepan.

## 2. *Root Piles* atau *Micro Piles*

Ini adalah penggunaan tiang pancang kecil berdiameter 7,5 – 25 cm, yang umumnya dari beton dengan penulangan ditengah-tengah. Tiang-tiang *micro* ini dipasang sebagai group tiang atau tiang satu-satu secara vertikal dan miring. Fungsi tiang *micro* ini disamping memberikan tambahan dukungan terhadap pondasi juga sebagai pasak terhadap geseran pada bidang longsor geser sirkular. Di Indonesia sistem seperti ini lebih dikenal dengan sistem “cerucuk”, yaitu penggunaan tiang-tiang kayu/bambu sebagai pasak dalam tanah.

## 3. Paku-paku Tanah (*Soil Nailing*)

Cara ini terdiri dari sekelompok batang-batang dalam tanah serupa paku-paku dalam tanah. Batang-batang tersebut umumnya di-*grouting*-kan didalam tanah. *Soil nailing* ini hampir serupa dengan *rock bolt* pada batuan. Fungsi utamanya ialah memperkuat tanah dengan menyatukan massa tanah disuatu bagian tanah yang kurang stabil (misal pada talud dan lereng-lereng).

## 4. *Earth* (tanah yang diperkuat dengan bahan pengikat buatan)

*Reinforced earth* disini termasuk semua perkuatan-perkuatan tanah menggunakan bahan geosynthetic, bahan-bahan khusus dari metal, *ground anchor* dan perkuatan sistem *tie-back*. Yang termasuk bahan *geosynthetic* untuk perkuatan tanah (*soil reinforcement*) meliputi *geotextile*, *geogrid*, dan *geolinear elemen*.

*stone column* terutama untuk mendukung beban tekan dan geser. Disamping daya dukung tanah, *stone column* juga mengurangi *settlement* dari tanah



yang diperbaiki. Disamping itu *stone column* juga berfungsi seperti *vertical drain* untuk mempercepat waktu konsolidasi dari tanah yang *compressible* sehingga waktu pemampatan tanah dapat dipercepat. *Micro-piles* berfungsi sebagai penahan tarik, tekan dan lentur. *Micro-piles* juga diperuntukkan bagi peningkatan daya dukung dan menaikkan stabilitas tanah. Paku tanah terutama berguna untuk penahan tarik dan geser dan tujuan utama pada perbaikan tanah ialah meningkatkan stabilitas tanah. Perkuatan pada *reinforced earth* seperti bahan *geotextile* dan sejenisnya berfungsi terutama untuk penahan tarik. Bahan ini dapat meningkatkan daya dukung tanah dan memperkokoh stabilitas tanah. Besar settlement tanah umumnya tidak banyak berubah akibat adanya bahan *reinforcer* tersebut.

Sedangkan untuk metode perbaikan tanah (*soil improvement*) dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) metode, yaitu perbaikan sebelum konstruksi bangunan dilaksanakan dan perbaikan tanah setelah bangunan berdiri atau biasa disebut koreksi struktur tanah. (Chu *et al.*, 2012)

a. Metode perbaikan tanah dengan menggunakan teknik kolom

Prinsip dasar dari teknik ini adalah untuk meringankan beban pada tanah lunak tanpa mengubah struktur tanah secara substansial. Hal ini dicapai dengan memasang struktur kolom atau tumpukan gelembung pola grid ke lapisan bantalan (dasar), untuk transfer beban. Hampan tika terdiri dari bahan geotekstil atau geogrid yang dipasang pada bagian dasar. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan tegangan tanah, hasil dari redistribusi beban melalui kolom melengkung, yang (jika ada) distabilkan oleh geotekstil atau perkuatan dengan geogrid (efek membran) tambahan. Sebagai hasilnya, kompresibilitas tanah diperbaiki atau komposit dapat dikurangi sehingga daya dukung dan kekuatan tanah meningkat. Konsolidasi dari tanah lunak dapat juga dipercepat dan demikian landasan tanah setelah konstruksi, penurunan yang terjadi



dapat diminimalisasi. Kolom struktur bertindak sebagai drainase ke arah vertikal. Teknik kolom untuk perbaikan tanah juga dapat digunakan untuk pondasi tangki dan gudang.

b. Kolom batu dan tumpukan pemadatan pasir

Kolom Batu dan tumpukan padatan pasir (atau komposisi tumpukan) merupakan tipe teknik kolom paling dikenal untuk meningkatkan mutu tanah lunak. Banyak metode instalasi yang digunakan di seluruh dunia, sebagai contoh metode penggantian vibro dan metode komposer vibro. Metoda ini akan sulit dilakukan untuk koreksi terhadap sub-struktur bangunan di perkotaan, karena getaran vibro yang ditimbulkan akan menjadi gangguan yang cukup serius bagi lingkungan bangunan disekitarnya.

## F. Pengujian Pembebanan Statik

Pada prinsipnya prosedur pembebanan tiang ini dilakukan dengan cara memberikan beban vertikal yang diletakkan di atas kepala tiang, kemudian besarnya deformasi vertikal yang terjadi diukur dengan menggunakan arloji ukur yang dipasang pada tiang. Deformasi yang terjadi terdiri dari deformasi elastis dan plastis. Deformasi elastis adalah deformasi yang diakibatkan oleh pemendekan elastis dari tiang dan tanah, sedangkan deformasi plastis adalah deformasi yang diakibatkan runtuhnya tanah pendukung pada ujung atau sekitar tiang.

Metode seperti ini biasa disebut dengan pengujian pembebanan statik (*loading test*). Tujuan dilakukan percobaan pembebanan *vertical (compressive Loading test)* terhadap pondasi tiang adalah sebagai berikut :



Untuk mengetahui hubungan antara beban dan penurunan pondasi akibat beban rencana.

- Untuk menguji bawah pondasi tiang yang dilaksanakan mampu mendukung beban rencana dan membuktikan bahwa dalam pelaksanaan tidak terjadi kegagalan.
- Untuk menentukan daya dukung ultimate nyata (*real ultimate bearing capacity*) sebagai control dari hasil perhitungan berdasarkan formula statis maupun dinamis.
- Untuk mengetahui kemampuan elastisitas dari tanah, mutu beton dan mutu besi beton.

Uji pembebanan biasanya perlu dilakukan untuk kondisi-kondisi seperti berikut ini :

- a. Perhitungan analitis tidak memungkinkan untuk dilakukan karena keterbatasan informasi mengenai detail dan geometri struktur.
- b. Kinerja struktur yang sudah menurun karena adanya penurunan kualitas bahan, akibat serangan zat kimia, ataupun karena adanya kerusakan fisik yang dialami bagian-bagian struktur, akibat kebakaran, gempa, pembebanan yang berlebihan dan lain-lain.
- c. Tingkat keamanan struktur yang rendah akibat jeleknya kualitas pelaksanaan ataupun akibat adanya kesalahan pada perencanaan yang sebelumnya tidak terdeteksi.
- d. Struktur direncanakan dengan metode-metode yang non-standard, sehingga menimbulkan kekhawatiran mengenai tingkat keamanan struktur tersebut.
- e. Perubahan fungsi struktur, sehingga menimbulkan pembebanan tambahan yang belum diperhitungkan dalam perencanaan.
- f. Diperlukannya pembuktian mengenai kinerja suatu struktur yang baru saja

cor.

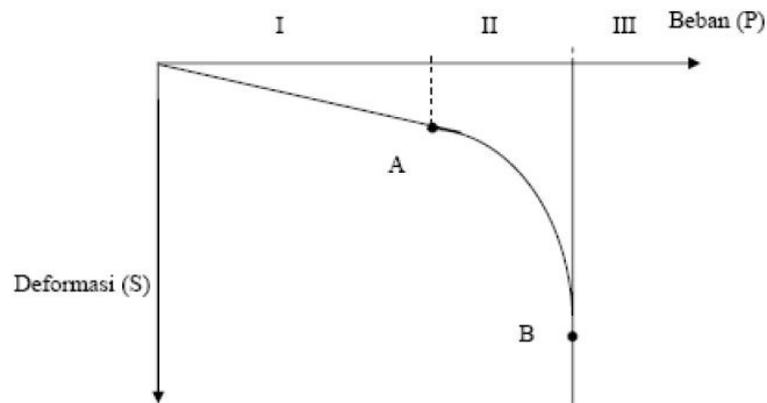


Interprestasi dari hasil benda uji pembebanan statik merupakan bagian yang cukup penting untuk mengetahui respon tiang pada selimut dan ujungnya serta besarnya daya dukung ultimitnya. Berbagai metode interprestasi perlu mendapat perhatian dalam hal nilai daya dukung ultimit yang diperoleh karena setiap metode dapat memberikan hasil yang berbeda. (*American Society Testing and Materials, ASTM D 1194-94*)

Pengujian hingga 150% dari beban kerja sering dilakukan pada tahap verifikasi daya dukung, tetapi untuk alasan lain misalnya untuk keperluan optimasi dan untuk control beban ultimit pada gempa kuat, seringkali diperlukan pengujian sebesar 250% hingga 300% dari beban kerja. Pengujian beban statik melibatkan pemberian beban statik dan pengukuran pergerakan tiang. Beban–beban umumnya diberikan secara bertahap dan penurunan tiang diamati. Umumnya definisi keruntuhan yang diterima dan dicatat untuk interprestasi lebih lanjut adalah bila di bawah suatu beban yang konstan, tiang terus-menerus mengalami penurunan. Pada umumnya beban runtuh tidak dicapai pada saat pengujian. (*American Society Testing and Materials, ASTM D 1143-98*)

Dengan demikian percobaan pembebanan tiang ini akan memberikan hasil yang cukup teliti jika diukur dengan teliti dan besarnya deformasi tersebut. Karena yang ingin diketahui adalah sampai beban berapa, lapisan pendukung akan mengalami keruntuhan total. Keruntuhan total akan terjadi pada suatu beban tertentu, dan akan mengalami perilaku penurunan terus menerus. Jika hubungan antara deformasi dan beban digambarkan dalam bentuk grafik maka terlihat bahwa grafik tersebut akan terdiri dari tiga bagian.





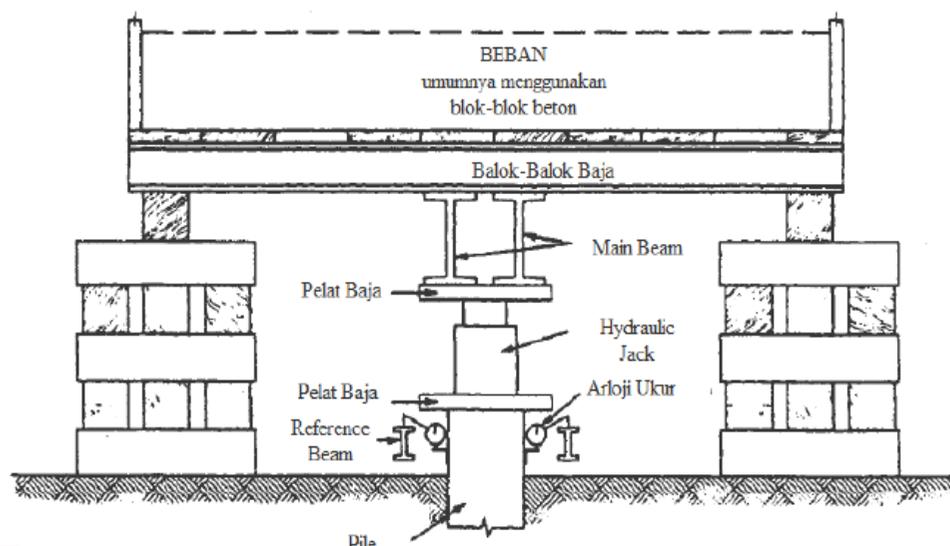
**Gambar 3.** Grafik hubungan beban (P) dengan deformasi (D)

- a. Pada daerah I, dimana sampai suatu beban tertentu bentuk grafik deformasi-beban merupakan garis lurus. Ini berarti, bahwa sampai beban tertentu besarnya penurunan sebanding dengan besarnya beban yang bekerja. Disini dapat diinterpretasikan, bahwa beban-beban yang bekerja sebagian besar dipakai untuk menimbulkan deformasi elastis, baik pada tiang itu sendiri maupun pada tanah pendukungnya. Deformasi elastis pada tiang merupakan pemendekan elastis, sedang pada lapisan pendukung merupakan proses konsolidasi. Pada point bearing pile, bentuk garis lurus ini lebih jelas dibandingkan pada *friction pile*.
- b. Pada daerah II, dimana bagian yang berbentuk lengkung parabolis (garis AB) terjadi jika penurunan yang terjadi tidak sebanding dengan besarnya beban yang bekerja. Disini penurunan merupakan fungsi dari waktu artinya jika suatu beban dibiarkan bekerja lebih lama, akan mengakibatkan deformasi yang lebih besar. Dengan kata lain keadaan ini dapat dijelaskan, bahwa pada bagian ini beban yang bekerja telah mengakibatkan terjadinya keruntuhan pada tanah pendukung.

pada daerah III, dimana bagian grafik yang curam terhadap garis vertikal, pada bagian ini terlihat, bahwa pada suatu beban tertentu yang besarnya

tetap, akan terjadi deformasi terus menerus atau makin lama makin besar. Beban dimana akan mengakibatkan terjadinya deformasi yang makin lama makin besar disebut beban maximum. Dari hasil percobaan tersebut, pembebanan tiang tidak dapat untuk menentukan besarnya penurunan akibat proses konsolidasi pada kelompok tiang tidak dapat untuk menentukan besarnya penurunan akibat proses konsolidasi pada kelompok tiang. Dalam lapisan tanah yang kohesif, besarnya penurunan akibat proses konsolidasi pada umumnya berlangsung dalam jangka waktu percobaan yang lebih singkat.

Salah satu uji pembebanan statik yang sering digunakan oleh para peneliti adalah pembebanan dengan menggunakan meja beban (*Kent Ledge System*), yaitu aplikasi pembebanan dengan menggunakan blok-blok beton yang diletakkan di atas rangka baja. Blok-blok beton ini dimaksudkan berfungsi sebagai beban kontra. Pemberian beban dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack* dan pembacaan beban dilakukan dengan memasang manometer. Penurunan kepala tiang diukur dengan menggunakan *dial gauge*, seperti pada gambar berikut :



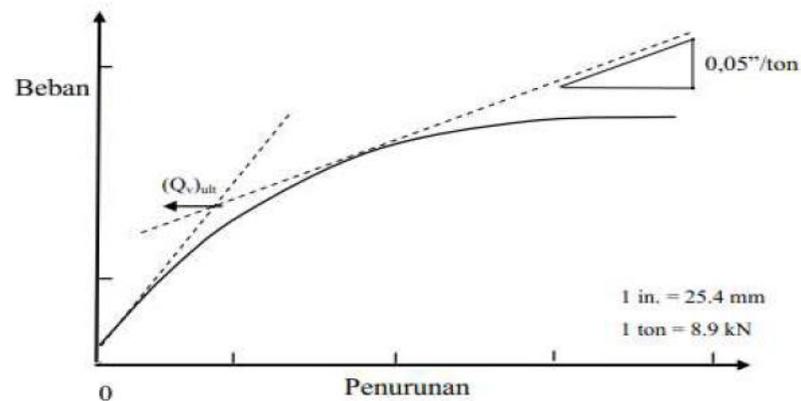
Gambar 4. Aplikasi Pembebanan Aksial Dengan Menggunakan Blok-blok Beton Bertumpuk (*ASTM D 1143-98*)

Metode uji pembebanan lain yang digunakan adalah metode *Loading Test*. Umumnya, tes beban dan penurunan di gambarkan dengan beban pada sisi x dan penurunan (*settlement*) pada sisi y, tetapi koordinat ini dapat berubah sesuai dengan referensi dari *engineer*. Plot gambar penurunan dapat gross yaitu berupa total dari pergerakan ujung tiang sampai tes pembebanan selesai, atau net yaitu jarak antara tiang secara permanen bergerak setelah pengangkatan tes beban. Data dari gambar ini dapat digunakan untuk menghitung keruntuhan beban sehingga dapat diketahui kapasitas beban ijin dari tiang tersebut.

Keruntuhan beban batas untuk pile didefinisikan bahwa beban dimana tiang mengalami anjlok atau terjadi penurunan yang sangat cepat dan berkelanjutan. Anjlok pada tiang mungkin disebabkan besarnya pergerakan tiang yang melebihi dari batas dari sistem tanah-tiang. Keruntuhan lainnya dapat didefinisikan penurunan melebihi batas yang diperhitungkan dimana pergerakan tiang mencapai 10% dari diameter tiang atau penurunan gross sebesar 38 mm dan penurunan net sebesar 19 mm terjadi jika beban yang diberikan dua kali beban rencana. (Prakash and Sharma, 2008). Dalam interpretasi pengujian beban aksial terdapat beberapa metode yang digunakan untuk menghitung beban ijin pada pondasi tiang tunggal.

Pada umumnya, kurva penurunan dengan beban saat garis digambarkan lurus merupakan bagian pencerminan yang benar terhadap garis elastis. Pada teori Fellenius (1980), penggunaan suatu garis pencerminan yang diusulkan kembali sebagai suatu garis tekanan elastis sehingga suatu garis bantu lurus awal di dalam gambar di bawah ini untuk menentukan kegagalan beban.





**Gambar 5.** Grafik hubungan beban dengan penurunan metode *Butler* dan *Hoy*  
 Sumber : *Pile Foundation in Engineering Practice, Prakash & Sharma*

### G. Penelusuran Studi Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan penggunaan dan pemanfaatan geogrid, diantaranya :

1. M. Gu, M. Zhao, L. Zhang and J. Han (2016), " *Effects of geogrid encasement on lateral and vertical deformations of stone columns in model tests*"

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki deformasi lateral dan vertikal pola kolom batu terbungkus dan mekanisme penguatan dari kolom yang dibungkus geogrid dengan panjang selubung yang berbeda beda. Selain itu, karakteristik tegangan-regangan diukur dan dianalisis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kapasitas dukung tanah lunak yang diperkuat dengan kolom batu yang terbungkus geogrid. Panjang efektif bungkus adalah tiga hingga empat kali diameter kolom batu berdasarkan pertimbangan kinerja/performa kolom dan efisiensi. Dibandingkan dengan solusi analitis

berdasarkan konsep sel unit kolom yang dibungkus penuh, uji eksperimental pada sel komposit dengan kolom terbungkus sebagian, yang memungkinkan adanya deformasi lateral kolom dan tanah serta selip di sepanjang permukaan



kolom-tanah (geogrid-tanah, kolom batu-geogrid, dan kolom-tanah batu jika kolom tidak terbungkus), menghasilkan penurunan yang lebih besar, terutama pada tekanan vertikal yang lebih tinggi. (Gu *et al.*, 2016)

2. Zornberg, Jorge G. (2007), "*New Concepts in Geosynthetic-Reinforced Soil*"

Teknik perkuatan tanah yang biasa dilakukan melibatkan penggunaan inklusi *geosynthetic continues*, seperti geogrid dan geotekstil. Pemanfaatan *Geosynthetics* dalam konstruksi perkuatan tanah, dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk estetika, kehandalan, teknik pelaksanaannya yang sederhana, kinerja seismik yang baik, dan kemampuan untuk mengurangi terjadinya deformasi yang besar tanpa merusak struktural tanah tersebut. Pada penelitiannya, mengaplikasi tanah konvensional yang diperkuat *geosynthetic*, yang terfokus pada kemajuan terbaru dalam teknologi perkuatan tanah. Contohnya termasuk kemajuan dalam desain perkuatan tanah, yaitu untuk pembebanan konvensional (misalnya validasi alat analisis), kemajuan dalam desain untuk pembebanan yang tidak konvensional (misalnya, abutment jembatan diperkuat), dan kemajuan dalam bahan yang digunakan sebagai perkuatan tanah (misalnya, polimer serat bala). (Zornberg, 2007)

3. Prasenjit Debnath, Ashim Kanti Dey (2017), "*Bearing Capacity of Geogrid Reinforced Sand Over Encased Stone Columns in Soft Clay*".

Kolom batu digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah lunak. Pada tanah yang sangat lunak, selubung yang melingkar pada kolom batu, bisa jadi tidak cukup untuk meningkatkan daya dukung beban yang dibutuhkan. Oleh karena

perlu ditentukan selubung vertikal yang sesuai, sehingga menghasilkan daya dukung yang lebih besar. Daya dukung tanah terhadap beban akan semakin meningkat dengan penambahan hamparan pasir di atas kolom batu. Penurunan



yang cukup besar dalam penonjolan kolom juga diteliti dengan ketentuan GRSB lebih dari VESC. Baik faktor peningkatan dan rasio konsentrasi stres VESC dengan GRSB menunjukkan tren meningkat dengan penurunan yang lebih kecil. Diperoleh hasil bahwa, panjang kolom batu dan kedalaman selubung yang optimal dari kelompok tiang VESC yang dipasang secara floating dengan GRSB adalah 6 kali dan sekitar 3 kali diameter kolom masing-masing. (Debnath and Dey, 2017)

4. Hemantkumar Ronad (2014), "*An Experimental Study of Square Footing Resting on Geogrid Reinforced Sand*".

Penelitian ini telah dilakukan upaya untuk mempelajari daya dukung peletakan persegi di atas hamparan tanah yang diperkuat pasir. Pengaruh parameter yang berbeda seperti kedalaman lapisan tulangan paling atas dari dasar pijakan model ( $u$ ), untuk kepadatan pasir yang berbeda ( $\gamma = 1,55, 1,65, \text{ dan } 1,75 \text{ gm/cc}$ ) pengujian telah dilakukan di luar. Tiga jumlah lapisan, telah diperbaiki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan geo-grid dapat meningkatkan kapasitas dukung dan meminimalkan penurunan, pada kedalaman selubung geogrid yang optimal. Kondisi ini dapat meningkatkan kepadatan tanah yang lebih tinggi sehingga kapasitas dukungnyapun meningkat. Oleh karena itu, untuk pemanfaatan dari geo-grid yang efektif, adalah pada kedalaman yang optimal ( $u = 0,33B$ ) dan menghasilkan kepadatan tanah yang lebih tinggi. (Ronad, 2015)

5. P. K. Kolay, S. Kumar, and D. Tiwari (2013), "*Improvement of Bearing Capacity of Shallow Foundation on Geogrid Reinforced Silty Clay and Sand*".

Penelitian ini menyelidiki peningkatan kapasitas daya dukung tanah lempung berlumpur dengan lapisan pasir tipis di bagian atas dan penempatannya geogrid

kedalaman berbeda. Hasil penelitian menunjukkan daya dukung meningkat signifikan dengan meningkatnya jumlah lapisan geogrid. Daya dukung



tanah meningkat rata-rata 16,67% menggunakan satu lapisan geogrid pada antar muka tanah dengan  $u / B$  sebesar 0,667 dan daya dukung meningkat rata-rata 33,33% saat menggunakan satu geogrid di tengah lapisan pasir dengan  $u / B$  sebesar 0,33. (Kolay, Kumar and Tiwari, 2013)

6. Sally Fahmi Kwa and Mohammed Yousif Fattah (2018), *“Ground Improvement Using Stone Column Construction Encased with Geogrid.”*

Studi eksperimental ini dilakukan untuk menyelidiki perilaku kolom batu yang dibungkus dengan geogrid. Tes dilakukan pada satu kolom batu yang dipasang (biasa dan terbungkus) untuk mengevaluasi efektivitas satu kolom tentang daya dukung dan penurunannya. Hasilnya menunjukkan bahwa kolom batu yang dibungkus dengan geogrid menghasilkan peningkatan daya dukung yang cukup signifikan dan penurunan kolom yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom batu tanpa geogrid. Dengan menggunakan geogrid, daya dukung akan meningkat 60% dibandingkan dengan tanpa geogrid dan kapasitas dukung beban meningkat sebesar 20% untuk penurunan 10 mm. Analisis numerik akan dilakukan dengan menggunakan PLAXIS 3D untuk memvalidasi hasil uji dan membuat perbandingan di antara keduanya. (Kwa and Fattah, 2018)

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan penggunaan semen untuk stabilisasi tanah dan hubungannya dengan water cement ratio terhadap nilai UCS maupun CBR, diantaranya :

1. Daniel Ribeiro, Raquel Néri, and Rafaela Cardoso (2016), *“Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages,”*

uran tanah-semen adalah material yang dibuat secara artifisial dengan stabilisasi untuk mendapatkan ikatan yang kuat antar butirannya. Jenis



bahan ini, banyak digunakan dalam beberapa aplikasi geoteknik seperti di trotoar lapisan dasar dalam infrastruktur transportasi. Dalam makalah ini, pasir lanau dicampur pada dosis 10% dan 13% dari semen Portland (berdasarkan berat tanah kering). Untuk menganalisa dampak dari kadar air pencetakan dalam *Unconfined Compressive Strength (UCS)* dari campuran melalui waktu, campuran disiapkan untuk air untuk rasio semen bervariasi antara 0,6 dan 2,0 dan diuji untuk periode pemeraman yang berbeda (3, 7, 14 dan 28 hari). Hasil tes UCS ditafsirkan mempertimbangkan adanya ikatan yang terjadi pada butiran-butiran tanah. Definisi parameter pengikat diadopsi bertujuan untuk mengukur peningkatan yang dicapai untuk berbagai kasus yang diselidiki dengan mempertimbangkan lama pemeraman. (Ribeiro, Néri and Cardoso, 2016)

2. S. Y. Liu a , D. W. Zhang a , Z. B. Liu a and Y. F. Deng (2008), " *Assessment of Unconfined Compressive Strength of Cement Stabilized Marine Clay.* "

Indikator dalam hal rasio kandungan air, yang didefinisikan sebagai rasio kadar air hingga batas cair tanah, disajikan dengan analisis statistik dari laboratorium dan data uji lapangan sebagai pedoman untuk pemilihan DJM atau CDM. Berdasarkan data uji laboratorium, model matematis yang berkaitan dengan penguatan kekuatan semen tanah liat stabil untuk variabel terkait dikembangkan. Indeks sederhana baru yang ditetapkan sebagai rasio air-semen total, yang didefinisikan sebagai rasio berat air dalam tanah-semen terhadap berat semen dalam keadaan kering, diusulkan untuk interpretasi data uji semen tanah. Metode yang diusulkan kemudian diverifikasi dengan data uji yang tersedia yang diterbitkan oleh peneliti lain yang berbeda. (Liu *et al.*, 2008)



3. Yong Feng (2015), *"Study on the Relationship between Strength and Water-Cement Ratio for the EPS Silt Light-Weight Soil Based on Gray Verhulst Model."*

Tanah campuran PS lanau adalah material pengisi sintetis berkualitas tinggi yang terbuat dari bahan busa dan lumpur yang terbuang. Hasil tes dan studi sebelumnya bahwa intensitas tanah ringan meningkat seiring meningkatnya rasio air abu-abu, dan ketika rasio air abu-abu mencapai nilai tertentu, kekuatan laju pertumbuhannya tidak besar. Oleh karena itu, penelitian tentang hubungan kekuatan dan rasio air-semen untuk memberikan parameter desain yang akurat dari partikel tanah. Menurut hasil penelitian yang ada, sejumlah sampel dibuat untuk mempelajari hubungan antara kekuatan dan rasio air-semen, kemudian kurva yang diperoleh, dianalisis. Dalam makalah ini, berdasarkan model Verhulst abu-abu, pengaturan variasi antara kekuatan dan rasio air yang ada. (Feng, 2015)

4. Vahid Toufigha, Mohammad Barzegari Dehajia and Khashayar Jafari (2018), *"Experimental Investigation of Stabilisation of Soils with Taftan Pozzolan."*

Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan tanah stabil meningkat hingga 30 kali dibandingkan dengan spesimen tanah. Perbandingan antara tanah yang distabilkan semen dan spesimen ASN menunjukkan bahwa kuat tekan spesimen geopolimer adalah 11% lebih tinggi dari semen, dan semen menghasilkan 300% lebih banyak karbondioksida daripada spesimen ASN. Selanjutnya, metode Taguchi digunakan untuk tentukan kondisi optimal untuk kekuatan tekan. Berdasarkan penyelidikan ini, pozzolan Taftan dapat dianggap sebagai bahan yang tepat untuk aplikasi karena sifatnya yang luar biasa. (Toufigh, Barzegari Dehaji and Jafari, 2018)



5. D.B. Eme, T.C Nwofor and S. Sule (2016), "*Correlation between the California Bearing Ratio (CBR) and Unconfined Compressive Strength (UCS) of Stabilized Sand-Cement of the Niger Delta.*"

CBR dan kekuatan tekan bebas dari pasir semen, diukur dalam sepuluh (10) spesimen CBR dan UCS yang disiapkan secara berbeda. Campuran pasir-semen disiapkan dengan mencampur 10,5 kg pasir dengan 5,5% berat semen dan kadar air 12%. Spesimen CBR disembuhkan selama 6 hari diikuti dengan 24 jam perendaman sementara spesimen UCS disembuhkan selama 7 hari. Spesimen CBR dan UCS diuji setelah periode pemeraman dan perendaman mereka dan memberikan nilai lebih dari 200% dan 2500 kpa pada masing-masing sampel. Data yang diperoleh menjadi sasaran analisis regresi untuk memeriksa korelasi antara keduanya.  $R^2$  yang diperoleh menunjukkan bahwa ada sedikit korelasi antara CBR dan UCS. (Eme, Nwofor and Sule, 2016)

Beberapa penelitian yang berhubungan dengan penggunaan pondasi kolom dengan isian batu, pasir maupun kolom semen diantaranya :

1. Lube, Gert ; Huppert, H.E ; Sparks, R.S.J ; Hallworth, M.A (2004), "*Axisymmetric Collapses of Granular Columns*".

Pengamatan eksperimental dari runtuhnya kolom, berawal dari pergerakan secara vertikal dari butiran kecil. Percobaan awal dilakukan terhadap biji-bijian kering, garam atau pasir, dengan beberapa percobaan tambahan menggunakan gula atau beras. Beberapa eksperimen dianalisis dengan menggunakan video berkecepatan tinggi. Ada tiga model aliran yang berbeda, tergantung pada nilai aspek rasio = hi

mana hi dan ri adalah ketinggian awal dan radius kolom granular masing-masing. Bentuk-bentuk yang berbeda dari perilaku aliran dijelaskan pada setiap



model. Hasil eksperimen utama untuk tingkat akhir deposit dan waktu untuk emplacement secara sistematis runtuh dengan cara kuantitatif independen dari setiap koefisien gesekan. Seiring dengan data kinematik untuk tingkat penyebaran depan kolom runtuh, ini menunjukkan bahwa efek gesekan antara butir individu dalam sebagian besar aliran bergerak hanya berperan dalam detik terakhir dari aliran, seperti datang, tiba, berhenti. Untuk  $a < 1,7$ , jari-jari *runout* akhir diukur,  $R^\infty$ , terkait dengan radius awal oleh  $R^\infty = r_i (1 + 1.24a)$ ; sedangkan untuk  $1,7 < a$  hubungan yang sesuai adalah  $R^\infty = r_i (1 + 1.6a^{1/2})$ . Waktu,  $t^\infty$ , diambil untuk biji-bijian untuk mencapai  $R^\infty$  diberikan oleh  $t^\infty = 3 (h_i / g)^{1/2} = 3 (r_i / g)^{1/2} a^{1/2}$ , di mana "g" adalah percepatan gravitasi. Wawasan dan kesimpulan yang diperoleh dari percobaan ini dapat diterapkan untuk berbagai industri dan partikel alami yang terkonsentrasi. Misalnya, pengamatan pengendapan cepat dari biji-bijian dapat membantu menjelaskan rincian dari emplasemen dari aliran piroklastik yang dihasilkan dari letusan eksplosif gunung berapi. (Lube *et al.*, 2004)

2. Thompson, Erica. L and Huppert, H. E (2007), " *Granular Column Collapses : Further Experimental Results*".

Pengamatan eksperimental ini akan disajikan, runtuhnya kolom statis pasir pada geometri axisymmetric secara dua dimensi. Percobaan dilakukan dengan menggunakan silinder dan tank persegi panjang 30 sampai 60 cm, dan rasio aspek penutup antara 0,5 dan 20, di mana aspek rasio didefinisikan sebagai rasio dari ketinggian awal sampai batas horizontal kolom. Posisi akhir dari butiran pasir dari berbagai titik awalnya pada permukaan luar dari kolom yang dipetakan. Untuk semua kolom axisymmetric titik *run-out* maksimum ditemukan berasal dari titik di

agian pecahan 0,74 hingga 0,03 dari ketinggian vertikal awal kolom, independen dari rasio aspek. Untuk kolom dua dimensi titik yang sesuai adalah hingga 0,07. Runtuhnya kolom pasir yang jenuh air, ke dalam air



menampilkan bentuk yang berbeda aliran, sehingga yang mengarah ke sana menjadi tidak ada gunanya. Dalam hal ini, daerah basal kolom awal dapat berakhir di wilayah terluar deposit akhir. Untuk runtuh di udara dan aspek rasio lebih besar dari 1, detail dari geometri awal yang relatif tidak signifikan dalam menentukan bentuk deposit akhir. Dari hasil ini dan penelitian sebelumnya, memiliki penerapan umum, bahkan dengan yang tidak simetris. (Thompson and Hupper, 2007)

3. Lube, Gert ; Huppert, H.E ; Sparks, R.S.J ; Freund, AHallworth (2011), “*Granular Column Collapses Down Rough, Inclined Channels*”.

Kami menyajikan hasil eksperimen untuk runtuhnya kolom persegi panjang pasir bawah kasar, cenderung, saluran paralel berdinding. Hasil untuk basal kemiringan  $\theta$  bervariasi antara  $4,2^\circ$  dan  $25^\circ$  dibandingkan dengan hasil sebelumnya untuk saluran horisontal. Teori air dangkal dapat berguna untuk dikombinasikan dengan skala hubungan yang diperoleh dengan analisis dimensi untuk menghasilkan fungsi analitis dari jarak run-out maksimum, tinggi maksimum deposito dan waktu untuk mencapai *run-out* maksimal. Sementara teori untuk memprediksi panjang maksimum deposit umumnya *over-estimates* terhadap waktu *run-out*. Arus inersia ditandai dengan antar muka internal yang bergerak memisahkan bagian yang mengalir dan statis lebih rendah. Dalam fase jatuh bebas awal runtuhnya daerah disetorkan (volume per unit lebar) di bawah antar muka internal bervariasi dengan akar kuadrat waktu, independen dari ketinggian awal kolom dan saluran kemiringan. Berikutnya, lateralis fase penyebaran tingkat deposisi berkurang dengan meningkatnya kecenderungan basal atau dengan menurunnya ketinggian awal. Tingkat deposisi lokal di setiap jarak tetap adalah konstan, tergantung pada

rasio kolom, kecenderungan saluran dan posisi membujur, tapi invarian terhadap kecepatan aliran dan kedalaman. Pada fase penyebaran lateral, profil aliran vertikal pada lapisan mengalir mengambil bentuk universal dan



independen dari kedalaman aliran dan kecepatan. Mereka dapat ditandai dengan perubahan laju geser sebagai fungsi dari saluran dengan skala panjang yang menggambarkan sebagian kecil dari kolom yang terlibat dalam aliran. (Lube *et al.*, 2011)

4. J Black, V Sivakumar, J D McKinley (2007), "*Performance of Clay Samples Reinforced with Vertical Granular Columns*".

Makalah ini melaporkan sebuah studi eksperimental dari sampel tanah liat kaolin lunak (100 mm dan 200 mm tinggi) yang diperkuat dengan kolom vertikal pasir dan diuji di bawah kondisi triaksial. Sampel diperkuat dengan baik, pada satu kolom pasir dengan diameter 32 mm atau tiga kolom pasir, masing-masing 20 mm diameter. Metode pengganti digunakan untuk membentuk kolom. Kolom dipasang di tanah liat hingga kedalaman 120 dan 200 mm. Tes juga dilakukan pada sampel yang tidak diperkuat dengan kolom pasir. Sampel dikompresi di bawah kedua kondisi dikeringkan dan *undrained*. Ditemukan bahwa kekuatan geser *undrained* dari sampel yang terpasang dengan kolom penuh mendalam lebih baik dibandingkan dengan sampel lipat. Dalam tes sepenuhnya terkuras, sampel diinstal dengan satu kolom diameter 32 mm ditunjukkan kinerja yang lebih baik daripada sampel dengan tiga kolom diameter 20 mm, meskipun rasio penggantian daerah dalam kasus tiga kolom diameter 20 mm lebih tinggi daripada dari kolom tunggal diameter 32 mm. Namun, kekuatan *undrained* bahan komposit tidak dipengaruhi oleh jumlah kolom. (Black, Sivakumar and McKinley, 2007)

5. M. R. Dheerendra Babu, Sitaram Nayak and R. Shivashankar (2013), "*A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns*".

batu telah banyak digunakan sebagai alternatif yang efektif untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung lunak dan endapan lanau lepas.



Peningkatan daya dukung tanah dengan kolom batu dapat tercapai dengan percepatan konsolidasi tanah yang lemah karena jalur drainase yang diperpendek, peningkatan daya dukung beban dan/atau pengurangan penurunan karena adanya bahan granular yang lebih kuat. Makalah ini membahas teknik, metode konstruksi kolom batu, mekanisme perilaku kolom batu di bawah beban dan filosofi desain terkait bersama dengan beberapa temuan praktis dari program penelitian terbaru. (Dheerendra Babu, Nayak and Shivashankar, 2013)

6. L. Vanel and E. Clément (2013), "*Pressure Screening and Fluctuations at The Bottom of a Granular Column*".

Penelitian ini, melakukan pengukuran yang tepat dan mereproduksi kekuatan pada tekanan statis di bagian bawah kolom granular. Kami membuat analisis kuantitatif pada tingkat kejenuhan tekanan saat tinggi kolom meningkat. Kepekaan terjadi pada pengukuran dengan fraksi kemas global dan terjadi pergeseran pada batas yang ditentukan. (Vanel and Clément, 1999)

7. Manita Das and Ashim Kanti Dey (2018), "*Prediction of Bearing Capacity of Stone Columns Placed in Soft Clay Using ANN Model*".

Tanah liat lunak menimbulkan kompresibilitas tinggi dan daya dukung rendah. Konstruksi kolom batu juga merupakan teknik perbaikan tanah yang biasanya diterapkan pada tanah liat lunak untuk meningkatkan daya dukung dan pengurangan kompresibilitas. Banyak teori dikembangkan untuk menentukan kaitannya dari tanah lunak yang diperkuat dengan kolom batu. Tetapi, sebagian besar teori tidak menunjukkan kecocokan dengan hasil pengamatan di lapangan.

al Neuron Network (ANN) adalah alat analitis yang dapat digunakan untuk prediksi beberapa perilaku tanah tertentu seperti daya dukung, penurunan, sarkan beberapa input properti seperti kerapatan, parameter kekuatan



geser, batal rasio, dan lain lain. Dalam penelitian ini, 90 data hasil uji tanah dikumpulkan dari literatur yang telah diterbitkan. Nilai prediksi ANN menunjukkan kecocokan yang sangat dekat bahkan lebih baik daripada teori yang ada. Kepekaan analisis ini dapat digunakan untuk penentuan daya dukung. (Das and Dey, 2018)

8. Devendra Rajput, Rakesh Kumar, P. K. Jain, Sareesh Chandrawanshi (2016), *"Load-Settlement Behaviour of Soft Soil Reinforced with Sand Piles"*.

Tanah gambut adalah tanah yang bermasalah, seringkali lunak di bawah basah kondisi dan memiliki kecenderungan membengkak dan menyusut dalam keadaan kering. Penelitian ini, menggunakan tangki uji persegi ukuran 255 mm x 255 mm. Tes dilakukan pada satu tumpukan dikelilingi oleh tumpukan serupa lainnya. Kandungan air pada tanah lunak, dijaga agar tetap konstan. Landasan peletakan uji disiapkan dalam bentuk model tangki uji. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah gambut hitam dan bahan isian tiang adalah pasir. Diameter kolom pasir 25,4 mm diadopsi. Tumpukan pasir dibangun dan tes dilakukan dilakukan pada tumpukan tunggal, dan ukuran pijakan yang efektif adalah bervariasi dengan rasio S/D mereka (yaitu 2, 2,5, 3) masing-masing dan juga rasio L/D tumpukan pasir (mis. 3, 5, 7) juga bervariasi. Berdasarkan penyelidikan rinci dicatat bahwa tumpukan pasir hitam lembut pada tanah gambut meningkatkan kapasitas dukung beban dan juga menyimpulkan bahwa jarak optimal untuk tumpukan batu adalah 2,5 kali diameter tumpukan pasir. Panjang tumpukan pasir yang optimal adalah diamati sebagai 5 kali diameternya untuk pengujian pijakan ditumpukan. Ini memberikan hasil yang lebih andal karena

annya kondisinya mirip dengan kondisi lapangan. (Rajput *et al.*, 2016)



9. Samang, L, Nur, H. S, Muhiddin, A.B (2012), *“Test Model for Bearing Capacity of Cement Grouted Sand Column of Group Type in Sandy Silt”*.

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kapasitas dukung kolom pasir grouting semen tipe group pada tanah lanau kepasiran serta penurunan yang terjadi akibat beban axial. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa pengujian tanpa perkuatan memberikan beban maksimum 17.5 kN dengan penurunan 50 mm. Perkuatan dengan spasi as kolom 12 cm beban maksimum 20 kN dengan penurunan 47 mm. Perkuatan dengan spasi as kolom 14 cm beban maksimum 22.5 kN dengan penurunan 46 mm sedang perkuatan dengan spasi as kolom 16 cm beban maksimum 25 kN dengan penurunan 32 mm. Dengan demikian perkuatan kolom pasir *grouting* semen tipe group pada tanah lanau kepasiran lebih signifikan mereduksi perpindahan secara vertikal (penurunan). Untuk mengevaluasi efektifitas dari kolom pasir grouting semen yang dapat mereduksi penurunan tanah digunakan Metode Elemen Hingga dengan program plaxis. Penurunan hasil uji laboratorium dan penurunan hasil analisa numerik plaxis memberikan hasil yang tidak jauh berbeda. (Nur, Samang and Muhiddin, 2012)

10. Wu, Cho-Sen and Hong, Yu-shan (2008) *“The Behavior of a Laminated Reinforced Granular Column”*.

Tulisan ini meneliti respon dari perkuatan kolom granular. Prosedur analitis berdasarkan pada hubungan normalisasi antara strain tanah volumetrik dan aksial yang digunakan untuk menganalisis ekspansi kolom. Metode analisis yang diverifikasi melalui uji triaksial laboratorium dilakukan pada kolom pasir yang diperkuat dengan empat lapisan lembar geotextile horisontal. Studi parametrik penguatan kekakuan, kekuatan penguatan, radius kolom granular dan jarak antar kolom diperkuat dilakukan untuk mengetahui pengaruh tulangan horisontal



pada kolom. Hasil analisis menunjukkan bahwa mekanisme interaktif pada antar muka tanah-inklusi dan perilaku mekanik inklusi secara signifikan mempengaruhi respon tegangan-regangan aksial kolom diperkuat. Karena kolom tertanam dalam tanah liat dikenakan terus meningkat membatasi tekanan dari tanah liat sekitarnya sebagai penetralan untuk ekspansi kolom, analisis menunjukkan bahwa kolom granular yang diperkuat tertanam dalam tanah liat menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam ketahanan aksial lebih kolom dimuat di bawah tekanan ruang konstan. (Wu and Hong, 2008)

11. Niroumand, H ; Kassim, K.A and Yah, C.S., (2011) *“Soil Improvement by Reinforced Stone Columns Based on Experimental Work”*.

Tujuan dari makalah penelitian ini adalah untuk memberikan review pada perbaikan tanah yang menggunakan perkuatan kolom batu dalam proyek-proyek rekayasa geoteknik. Ada fokus khusus tentang bagaimana kinerja dan mengevaluasi perbaikan tanah menggunakan perkuatan kolom batu untuk tujuan khusus. Hasil sebelumnya ditunjukkan bahwa tanah yang diperkuat dengan kolom batu secara signifikan dapat meningkatkan daya dukung dan tegangan pada tanah. (Niroumand, Kassim and Yah, 2011)

12. Tandel, Y.K , Solanki, C.H and Desai, A.K. (2012),. *“Reinforced granular column for deep soil stabilization: A review”*.

Tanah lunak memiliki masalah daya dukung yang rendah, jumlah yang berlebihan dan penyelesaian diferensial lateral menyebarkan. Untuk mengurangi masalah tersebut, teknik perbaikan tanah yang berbeda tersedia yaitu; saluran vertikal, kapur / kolom semen, batu (granular) kolom dan lain lain. Teknik perbaikan tanah

n kolom batu, menjadi sangat cocok. Selanjutnya untuk mencegah pembengkakan berlebihan, meremas batu ke dalam tanah lunak, kolom batu dapat digkus dengan *geosynthetic*. Keuntungan lain dari pembungkusan ini adalah



tanah dapat memikul beban yang lebih besar. Makalah ini mengidentifikasi perilaku tanah lunak yang diperkuat dengan kolom granular, serta memberikan rekomendasi yang tepat untuk pengembangan di masa depan. (Tandel, Solanke and Desai, 2012)

13. Tandel, Y.K , Solanki, C.H and Desai, A.K. (2012),. *“Reinforced Stone Coloumn : Remedial of Ordinary Stone Coloumn”*.

Perkuatan kolom batu adalah salah satu teknik perbaikan tanah untuk strata tanah yang terbukti kinerjanya baik, jadwal waktu pengerjaannya yang singkat, daya tahan yang lama, serta biaya yang rendah. Teknik ini mungkin tidak cocok untuk tanah lunak yang memiliki kekuatan geser undrained kurang dari atau sama 15 kPa karena menggebung berlebihan, dan juga tanah liat lunak diperas ke dalam rongga agregat. Dalam situasi ini, kekuatan dan kekakuan dari kolom batu dapat ditingkatkan dengan membungkus kolom batu individu dengan Geosynthetic yang sesuai. Penelitian ini mencoba untuk membuat model tes skala kecil untuk kondisi pembebanan serta waktu yang singkat di atas dasar kolom, dengan analisis khusus dari bantalan dan deformasi perilaku kolom pasir geotextile berlapis dengan beban statis. (Tandel, Solanki and Desai, 2012)

14. Marcio S. S. Almeida, Iman Hosseinpour, Mario Riccio, dan Dimiter Alexiew. (2015). *“Behavior of Geotextile-Encased Granular Columns Supporting Test Embankment on Soft Deposit”*.

Pada konsentrasi tekanan kolom terjadi perbedaan dalam penurunan antara bagian atas kolom yang terbungkus dan tanah lunak, menunjukkan bahwa penurunan diferensial meningkat ketika ketinggian tanggul meningkat seiring dengan peningkatan tekanan pori yang berlebih, ikut berkurang. Karena lengkungan tanah,



tegangan vertikal yang didukung oleh kolom terbungkus lebih dari dua kali lebih besar daripada yang ditransmisikan ke tanah lunak. (Almeida *et al.*, 2015)

15. Jodin Makinda, Lillian Gungat, N.S.V Kameswara Rao and Solomon Sulis. (2018). *“Compressibility Behaviour of Borneo Tropical Peat Stabilized with Lime-Sand Column”*.

Pada tes konsolidasi yang dilakukan pada kolom pasir kapur yang diperam selama 1 dan 3 hari dengan persentase kapur 3% dan 6%, menunjukkan bahwa kompresibilitas tanah gambut berkurang menggunakan periode pemeraman yang lebih lama, persentase kapur yang lebih tinggi, dan jumlah pasir yang lebih tinggi pada kolom. (Makinda *et al.*, 2018)

16. Hanifi Canakcia, Fatih Celika and Tuncer B. Edilb, (2017). *“Effect of Sand Column on Compressibility and Shear Strength Properties of Peat”*.

Pada pengujian kolom pasir pada kekuatan geser dan kompresibilitas gambut. Tiga rasio area yang berbeda digunakan untuk kompresibilitas dan kekuatan geser tes. Hasil tes konsolidasi pada kolom pasir di tanah gambut menunjukkan bahwa ketika rasio daerah meningkat karakteristik kompresibilitas gambut meningkat. Kekuatan geser tanah organik juga terpengaruh dari kolom pasir tersebut. (Canakci, Celik and Edil, 2017)

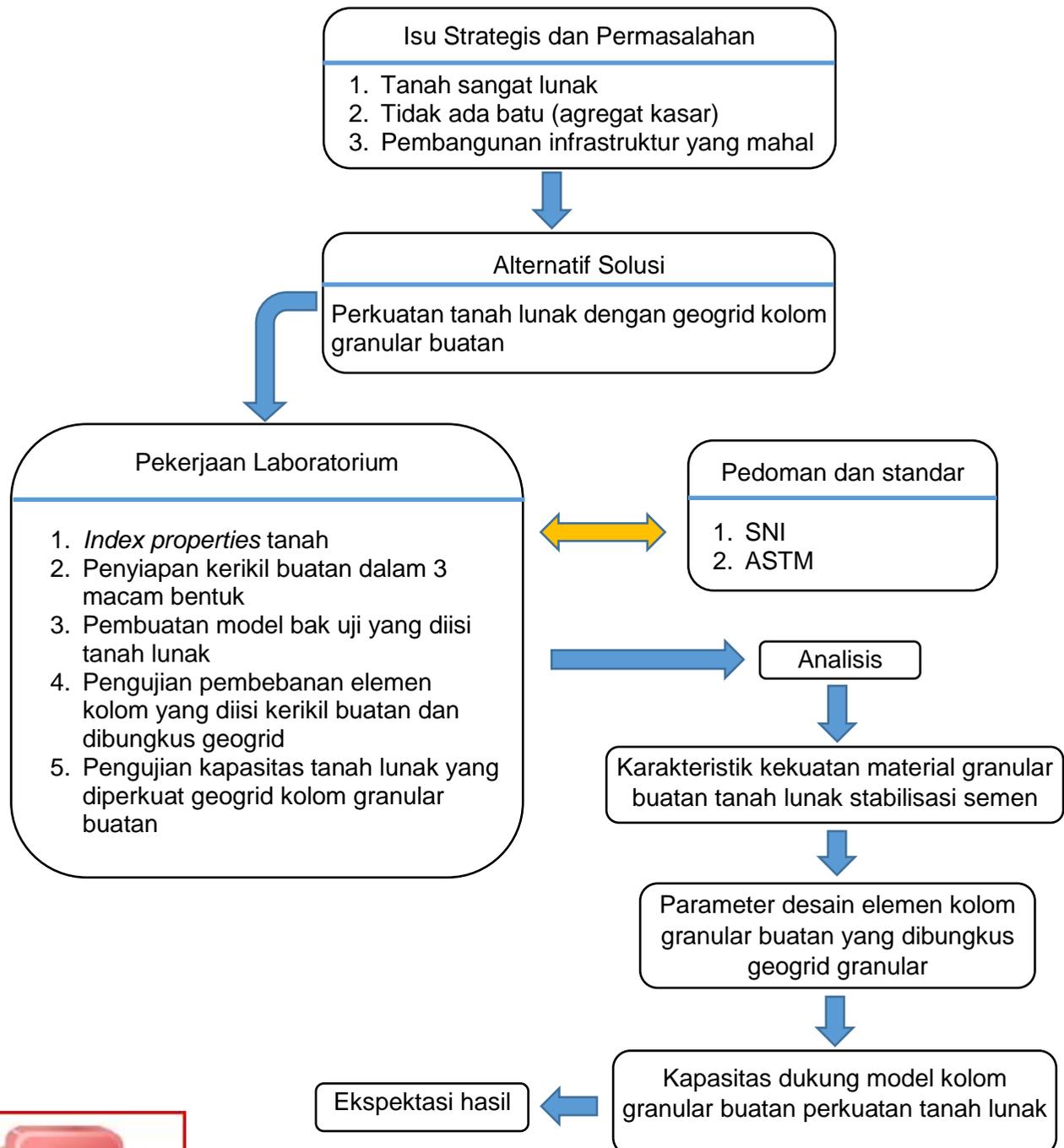
17. M. Ehsan Jorat, Stefan Kreiter, Tobias Mörz, Vicki Moon and Willem de Lange, (2013). *“Strength and Compressibility Characteristics of Peat Stabilized with Sand Columns”*.

Perbaikan tanah gambut dengan kolom pasir (granular) dapat meningkatkan kapasitas dukung sehingga berpengaruh pada kapasitas dukung yang lebih besar. Hal ini karena meningkatnya kekuatan geser dan sudut gesekan internal dari serat pasir tersebut. (Jorat *et al.*, 2013)



## H. Kerangka Berfikir

Berdasarkan beberapa uraian di atas, maka dapat dirumuskan kerangka berfikir pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Kerangka Berfikir