

DISERTASI

**UJI MODEL PERKUATAN TANAH MENGGUNAKAN
CERUCUK KAYU PADA DAERAH RAWAN LIKUIFAKSI**

***(Soil Reinforcement Model Test Using Timber
Pile at Liquefaction Area)***

**SUYADI
D013191015**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

**UJI MODEL PERKUATAN TANAH MENGGUNAKAN CERUCUK KAYU
PADA DAERAH RAWAN LIKUIFAKSI**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Doktor Teknik
Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan Diajukan Oleh

SUYADI

Kepada

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI**UJI MODEL PERKUATAN TANAH MENGGUNAKAN CERUCUK
KAYU PADA DAERAH RAWAN LIKUIFAKSI****SUYADI
D013191015**

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 23 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor**Prof. Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., MT**
NIP. 1972030920000331002

Co-Promotor

**Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D.**
NIP. 196007301986031003

Co-Promotor

**Dr. Eng. Ir. Ardy Arsvad, ST., M.Eng.Sc**
NIP. 197607072005011002Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM**
NIP. 197309262000121002Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil**Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT**
NIP. 197206192000122001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Suyadi

Nomor mahasiswa : D013191015

Program studi : Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul "Uji Model Perkuatan Tanah Menggunakan Cerucuk Kayu Pada Daerah Rawan Likuifaksi" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., M.T. sebagai Promotor, Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D sebagai co-promotor-1 dan Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc sebagai co-promotor-2. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding (The 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering, 1117 (2022), Halaman 1-6, dan DOI 10.1088/1755-1315/1117/1/012012 sebagai artikel dengan judul "Effect of eucalyptus pellita timber-pvd hybrid pile as a vertical drain on soft soil" dan di Jurnal Civil Engineering Journal (C.E.J), Vol 9, No 6 (2023), Hal. 1509-1521, dan Doi: 10.28991/CEJ-2023-09-06-016 sebagai artikel dengan judul "Soil Reinforcement Model Test Using Timber Pile at Liquefaction Area".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 4 Agustus 2023

Yang menyatakan



SUYADI

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Gagasan utama penguanaan tiang pancang mikro pada daerah rawan likuifaksi adalah Pemanfaatan cerucuk kayu Eucalyptus Pellita digunakan sebagai alternatif tiang mikro untuk meningkatkan daya dukung tanah. Hal ini dikarenakan Indonesia merupakan negara tropis yang terancam oleh berbagai macam bencana, seperti gempa bumi dan bahaya tanah bergerak (likuifaksi). Sehingga penggunaan cerucuk kayu Eucalyptus dapat digunakan sebagai inovasi penanganan tanah berpasir lepas di daerah yang berpotensi terjadi likuifaksi.

Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., M.T. sebagai Promotor, Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D sebagai co-promotor-1 dan Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST., M.Eng.Sc sebagai co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng., Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M.Si., M.Eng., Prof. Dr. Ir. Rachman Djamaluddin, MT., dan Dr.Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT., sebagai komisi tim penguji.
3. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Kepada LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan), Kementerian Keuangan, Republik Indonesia, saya mengucapkan terima kasih atas beasiswa Program Doktor Dalam Negeri yang diberikan selama menempuh program pendidikan doktor.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasinya selama saya

menempuh pendidikan. Terkhusus untuk isteri tercinta Dwi Desi Nariyati dan ananda Maheera Gendhis Rahajening, terima kasih banyak atas do'a, dukungan, kesabaran dan pengorbanannya. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada kakanda dan dindaku atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Gowa, Agustus 2023

SUYADI

ABSTRAK

SUYADI. Uji Model Perkuatan Tanah Menggunakan Cerucuk Kayu Pada Daerah Rawan Likuifaksi (dibimbing oleh **Tri Harianto, Achmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad**).

Indonesia dikenal sebagai negara tropis yang memiliki ancaman banyak bencana seperti gempa bumi dan bahaya ikutan (collateral hazard) lain (likuifaksi). Beberapa metode penanganan untuk tanah pasir yang terjadi likuifaksi adalah dengan meningkatkan daya dukung tanah. Sehingga pengujian penggunaan Cerucuk kayu eucalyptus pellita sebagai suatu inovasi dalam rekayasa perbaikan dan perkuatan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi diharapkan mampu meningkatkan daya dukung dan penggunaan perkuatan cerucuk kayu adalah salah satu metode penanganannya. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh peningkatan daya dukung tanah akibat penggunaan cerucuk kayu sebagai material perkuatan tanah pasir yang berpotensi likuifaksi. Metode pengujian yang digunakan yaitu uji Laboratorium dengan melakukan pengujian sifat fisis dan mekanis material, kemudian dilanjutkan uji model perkuatan tanah pada tanah pasir lepas dengan kepadatan relative 40% dengan baban sesismik selama 37 detik, dengan percepatan $PGA=0.3g$ Frekuensi 0.78 Hz. Hasil pengujian menunjukkan perkuatan cerucuk kayu dapat memberikan daya dukung tambahan dan mampu mereduksi penurunan sebesar 69.54 %. Sedangkan untuk uji model perkuatan cerucuk + PVD *Hybrid pile* mampu mereduksi penurunan lebih besar yaitu 96.08% jika dibandingkan dengan sampel uji model tanpa perkuatan. Sehingga dari hasil uji model memverifikasi keefektifan penggunaan cerucuk kayu sebagai bahan perkuatan tanah dan Prefabricated Vertical Drainage sebagai perbaikan drainase dalam tanah dibandingkan dengan uji model tanpa perkuatan, karena semua cincin drainase berhasil mengontrol nilai tekanan air pori berlebih. Selain itu, keberadaan tiang pancang Hybrid juga berfungsi sebagai penguat geser pada tanah yang mengalami likuifaksi, yang akan mengurangi penurunan struktur.

Keywords: Likuifaksi, Cerucuk kayu, Tanah pasir, *Hybrid pile*

SUYADI. Soil Reinforcement Model Test Using Timber Pile at Liquefaction Area (supervised by **Tri Harianto, Achmad Bakri Muhiddin, Ardy Arsyad**).

Indonesia is known as a tropical country with many disasters such as earthquakes and other collateral hazards (liquefaction). Some of the treatment methods for sandy soil that occurs liquefaction is to increase the bearing capacity of the soil. So that testing the use of eucalyptus pellita timber pile as an innovation in engineering repair and reinforcement of soils that have the liquefaction potential is expected to increase bearing capacity and the use of timber pile reinforcement is one method of handling it. The purpose of this study was to determine the effect of increasing the bearing capacity of the soil due to the use of timber piles as a reinforcement material for potentially liquefiable sand soils. The test method used is Laboratory test by testing the physical and mechanical properties of the material, then continued with the soil percutaneous model test on loose sand soil with a relative density of 40% with a seismic load for 37 seconds, with acceleration $PGA = 0.3g$ Frequency 0.78 Hz. The test results show that the reinforcement of timber pile can provide additional carrying capacity and can reduce the settlement by 69.54%. Whereas for the test of the pile reinforcement model + PVD (Hybrid pile) was able to reduce the more significant settlement of 96.08% compared to the sample test model without reinforcement. So that the results of the model test verified the effectiveness of using timber pile as a soil reinforcement material and Prefabricated Vertical Drainage as a drainage improvement in the soil compared to the model test without reinforcement because all drainage rings managed to control excess pore water pressure values. In addition, the presence of Hybrid piles also serves as a shear reinforcement of the liquefied soil, which will reduce structural settlement.

Keywords: Liquefaction, Timber pile, Sandy soil, *Hybrid pile*.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN DISERTASI	ii
PERSUTUJUAN DISERTASI	iii
PENYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian	6
E. Batasan Masalah	7
F. Sistematika Penulisan	7

BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Isu Strategis Penanganan Daerah Potensi Likufaksi	9
B. Likuifaksi	13
1. Proses peristiwa likuifaksi	17
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi likuifaksi	20
3. Mekanisme naiknya tekanan air pori	26
4. Evaluasi likuifaksi dan masalah yang ditimbulkan	28
5. Parameter likuifaksi	30
C. Kayu	31
1. Bagian - bagian kayu	32
2. Karakteristik kayu	33
3. Klasifikasi mutu kayu	35
4. Klasifikasi kekuatan kayu	37
5. Cerucuk kayu	37
D. Prefabricated vertical drain (PVD)	39
E. Landasan Teori Perbaikan Tanah Pasir Lepas	41
F. Matriks Studi Terdahulu	44
G. Kerangka Pikir Penelitian	52
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	54
A. Waktu dan Tempat Pnelitian	54
B. Bahan dan Alat	54
C. Pelaksanaan Penelitian	60
D. Rancangan Uji Pemodelan	63

E. Mekanisme Perkuatan Cerucuk kayu pada tanah potensi likuifaksi	70
F. Analisis Data Penelitian	78
G. Definisi Operasional Variabel Penelitian	80
H. Bagan Alir Penelitian	81
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	82
A. Karakteristik kayu.	82
1. Kadar air dan berat jenis kayu	82
2. Kuat tekan kayu.	83
3. Kuat tarik kayu	84
4. Kuat geser kayu	86
5. Kuat lentur kayu	86
B. Karakteristik Tanah	88
1. Tanah lempung lunak	88
2. Tanah pasir potensi likuifaksi	89
3. Tanah Embakment	92
C. Material <i>Prefabricated Vertical Drain (PVD)</i>	93
D. Kinerja Cerucuk Kayu Eucalyptus Pelitta+PVD (<i>Hybrid Pile</i>) Sebagai Bahan Perkuatan	93
E. Analisis Parameter Data Uji Hasil Penelitian	99
1. Perubahan kepadatan relatif (Dr)	99
2. Pengujian <i>Hand Cone Penetrometer (HCP)</i>	103
3. Tekanan air pori (u)	106

4. Penurunan tanah	114
F. Temuan Empirik Penelitian	121
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	122
A. Kesimpulan	122
B. Saran	123
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1	Histori kejadian likuifaksi di Indonesia	11
2	Kekuatan kayu menurut Jenis pengelompokannya	37
3	Persyaratan cerucuk kayu	38
4	Matriks penelitian terdahulu	47
5	Daftar alat-alat dan gambar pengujian	58
6	Syarat, bentuk dan ukuran benda uji kayu	61
7	Parameter uji dan standar pengujian fisik dan mekanik kayu	62
8	Parameter uji dan standar pengujian fisik dan mekanik tanah.	63
9	Rekapitulasi Hasil pengujian kadar air dan berat jenis kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	83
10	Rekapitulasi Hasil pengujian kuat tekan kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	83
11	Rekapitulasi Hasil pengujian kuat tarik kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	85
12	Rekapitulasi Hasil pengujian kuat geser kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	86
13	Rekapitulasi Hasil pengujian kuat lentur kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	87
14	Rekapitulasi Hasil pengujian cerucuk kayu <i>Eucalyptus pelitta</i>	87
15	Data teknik tanah uji preloading	89
16	Data teknik tanah pasir	90

17	Rekapitulasi Kepadatan Relatif (Dr) pasir Galesong	91
18	Data teknik tanah untuk embakment	92
19	Rekapitulasi uji karakteristik Prefabricated Vertical Drain (PVD)	93
20	Rekapitulasi perbandingan penurunan ketiga sampel pada akhir pembebanan	95
21	Hasil pengujian <i>Hand Cone Penetrometer (HCP)</i> uji preloading	98
22	Data hasil perubahan Kerapan relatif (Dr) PGA=0.3g	99
23	Nilai rasio perubahan peningkatan kepadatan relatif akibat perubahan percepatan beban seismik	102
24	Hasil pengujian <i>Hand Cone Penetrometer (HCP)</i> percepatan PGA =0.3 g.	105
25	Nilai uji HCP akibat perubahan percepatan beban seismik	106
26	Rekapitulasi Perubahan Tegangan air pori akibat PGA=0.3 g	110
27	Rekapitulasi Perubahan perbandingan penurunan ketiga uji model.	120

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Peta zona kerentanan likuifaksi di Indonesia	12
2	Proses terjadinya likuifaksi	18
3	Kondisi tanah saat terjadi likuifaksi	19
4	Kurva distribusi ukuran butir tanah yang rentan terhadap likuifaksi (Tsuchida, 1970)	23
5	Gradasi butiran berdasarkan kurva analisa saringan	25
6	Skema naiknya tekanan air pori akibat beban siklik (Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes, Seed & Idriss, 1982)	27
7	Struktur bagian dalam kayu	32
8	Penentuan diameter equivalen PVD dan pengaturan jarak drainase vertikal	40
9	Jenis-jenis metode perbaikan tanah	43
10	Matriks penelitian yang sejenis (<i>Research Mapping</i>)	46
11	Skema kerangka pikir penelitian	52
12	Alur berdasarkan kerangka pikir penelitian	53
13	Lokasi pengambilan sampel kayu	55
14	Pasir pantai galesong Kab.Takalar, Sulawesi Selatan.	56
15	Lokasi pengambilan sampel tanah/pasir.	56
16	Skema model pengujian preloading <i>Hybrid pile</i>	65
17	Model dan jarak pemasangan <i>Hybrid pile</i> .	65
18	Skema pemasangan instrumen alat uji model	67

19	Skema uji model tanpa perkuatan	67
20	Skema uji model perkuatan cerucuk kayu	68
21	Skema uji model perkuatan cerucuk kayu+PVD (<i>Hybrid pile</i>)	68
22	Skema jarak pemasangan cerucuk kayu	69
23	Tampak atas model uji	69
24	Model pengujian tanpa perkuatan	72
25	(a). Cerucuk kayu, (b). Jarak pemasangan (c). Pola pemasangan	73
26	Uji model perkuatan cerucuk kayu	74
27	a). Cerucuk kayu, (b). PVD, (c). Kawat ikat dan (d). Hybrid pile	75
28	Pola pemasangan Model cerucuk kayu +PVD	75
29	Uji model perkuatan cerucuk kayu + PVD (Hbrid pile)	76
30	Instrument alat pengukur dalam uji model	77
31	Kerangka analisis data penelitian	79
32	Bagan air penelitian	81
33	Grafik pengujian kuat tekan sejajar serat	84
34	Grafik pengujian kuat tekan tegak lurus serat	84
35	Grafik pengujian kuat tarik sejajar serat	85
36	Grafik pengujian kuat tarik tegak lurus serat	85
37	Grafik pengujian kuat geser kayu	86
38	Grafik pengujian kuat lentur kayu	87
39	Kurva Distribusi Ukuran Butir Tanah yang Rentan Terhadap Likuifaksi (Tsuchida, 1970)	90

40	(a). Model tanpa perkuatan, (b). Model perkuatan cerucuk kayu dan (c). Model perkuatan Hybrid pile.	94
41	Model dan pemasangan peralatan pengujian	94
42	Grafik perbandingan penurunan dari tiga sampel uji.	96
43	Diagram hasil pengujian HCP sebelum dan setelah uji preloading	98
44	Diagram perubahan Kepadatan relatif sebelum dan setelah pengujian PGA = 0.3g.	99
45	Uji model Tanpa perkuatan	101
46	Uji model perkuatan cerucuk kayu.	101
47	Uji model perkuatan cerucuk kayu.+ PVD	101
48	Grafik rasio kepadatan relatif uji model hybrid pile akibat beban seismik PGA=0.3g, PGA=0.4g dan PGA=0.5g terhadap kepadatan relative sebelum pengujian.	103
49	Titik pengujian <i>Hand Cone Penetrometer (HCP)</i>	103
50	Grafik hubungan perubahan peningkatan daya dukung terhadap kedalaman	105
51	Grafik hubungan perubahan peningkatan daya dukung terhadap kedalaman akibat percepatan beban seismik	106
52	Variasi perubahan Tekanan air pori akibat PGA = 0.3g.	107
53	Grafik rasio tekanan air pori (r_u) terhadap waktu untuk ketiga uji model, PGA = 0.3g.	111
54	Grafik rasio tekanan air pori (r_u) terhadap waktu untuk perubahan percepatan untuk perkuatan cerucuk kayu+PVD (<i>Hybrid pile</i>)	112
55	Rasio perbandingan antara u terhadap σ'_v pada kedalaman 1cm yang terjadi akibat beban seismik PGA = 0.3g	113
56	Rasio perbandingan antara u terhadap σ'_v pada kedalaman 17cm yang terjadi akibat beban seismik PGA = 0.3g	114

57	Kontur perubahan elevasi uji model tanpa perkuatan	115
58	Tampak 3D perubahan uji model tanpa perkuatan	115
59	Tampak Kondisi uji model tanpa perkuatan	115
60	Kontur perubahan elevasi uji model perkuatan cerucuk kayu	116
61	Tampak 3D perubahan uji model perkuatan cerucuk kayu	116
62	Tampak Kondisi uji model perkuatan cerucuk kayu	116
63	Kontur perubahan elevasi uji model perkuatan cerucuk kayu + PVD	117
64	Tampak 3D perubahan uji model perkuatan cerucuk kayu + PVD	117
65	Tampak Kondisi uji model perkuatan cerucuk kayu + PVD	117
66	Grafik perbandingan penurunan, tanpa perkuatan dengan perkuatan cerucuk kayu dan perkuatan cerucuk kayu+PVD. PGA = 0.3g	118
67	Grafik penurunan perkuatan cerucuk kayu+PVD (<i>Hybrid pile</i>) akibat perubahan percepatan.	119

DAFTAR LAMPIRAN

nomor		halaman
1	Hasi uji Karak teristik fisik dan mekanis PVD CT-D822	1

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	=	Arti dan Keterangan
<i>AASHTO</i>	=	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	=	American society for testing and materials
<i>CH</i>	=	<i>Inorganic clays of high plasticity, fat clays</i>
CPT	=	Cone penetrometer test
C_u	=	Koefisien keseragaman
C_c	=	Koefisien kelengkungan
D_{10}	=	Diameter saringan ketika lolos 10%
D_{30}	=	Diameter saringan ketika lolos 30%
D_{60}	=	Diameter saringan ketika lolos 60%
D_r	=	Kepadatan relatif
e	=	Angka pori tanah
e_{\min}	=	Angka pori tanah minimum
e_{\max}	=	Angka pori tanah maksimum
g	=	Gravitasi
H	=	Tinggi muka air diukur dari permukaan tanah (m)
HA	=	Jarak antara titik A dengan muka air (m)
HCP	=	Hand cone penetrometer
Mpa	=	Megapascal

Mm	=	Mili meter
N	=	Beban siklik
PGA	=	Peak ground acceleration
PVD	=	Prefabricated vertical drains
PGA	=	Peak ground acceleration
PKKI	=	Peraturan konstruksi kayu indonesia
r_u	=	Rasio tekanan air pori
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
SPT	=	Unified soil classification system
USCS	=	Standard penetration test
σ'	=	Tegangan efektif tanah (t/m ²)
σ	=	Tegangan total (t/m ²)
u	=	Tekanan air pori (t/m ²)
Z	=	Kedalaman
γ_w	=	berat volume air (t/m ³)
γ_{sat}	=	Berat volume tanah jenuh air
γ_d	=	Berat volume tanah tanah asli dilapangan
$\gamma_{d \min}$	=	Berat volume kering tanah dalam keadaan paling lepas
$\gamma_{d \max}$	=	Berat volume kering tanah dalam keadaan paling padat
Δu	=	Tekanan pori meningkat

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara tropis yang memiliki ancaman bencana yang disebabkan kondisi alamnya. Kondisi Indonesia yang berada di daerah pertemuan lempeng-lempeng besar dunia yang menyebabkan Indonesia rentan terhadap berbagai potensi bencana alam. Bencana gempa bumi, letusan gunung berapi, tsunami dan gerakan tanah terjadi silih berganti di berbagai wilayah Indonesia dari tahun ke tahun. Disamping itu adanya bahaya ikutan (*collateral hazard*) lain seperti likuifaksi. Likuifaksi merupakan suatu ancaman bahaya yang menyertai gempa bumi terutama pada kejadian gempa bumi dengan magnitudo yang relative besar.

Likuifaksi adalah fenomena hilangnya kekuatan pada lapisan tanah akibat beban guncangan gempa. Hilangnya pada lapisan tanah utamanya yang berperan sebagai lapisan tanah pondasi menyebabkan menurunnya daya dukung pondasi secara cepat sehingga menimbulkan kegagalan pondasi atau kerusakan infrastuktur yang berada di atasnya. Disamping itu, fenomena likufaksi dapat pula memicu pergerakan tanah dalam mekanisme yang kompleks sehingga tingkat ancaman bahaya lebih tinggi terhadap keberadaan masyarakat dan infrastuktur. Likuifaksi yang terjadi pada suatu daerah dapat memberikan efek kerusakan di permukaan mulai yang

bersifat setempat maupun secara luas/massif. Sehingga hal ini menjadi perhatian khusus bagi kita semua dan diperlukan suatu penelitian khusus mengenai bahaya gempa ini.

Peristiwa likuifaksi ini telah dibuktikan melalui sejarah yang telah terjadi di dunia, seperti pada gempa di Niagata, Jepang pada tahun 1964 dan di Palu, Indonesia pada tahun 2018. Melihat potensi kerusakan yang ditimbulkan oleh likuifaksi sangat besar bagi kita, para ahli mulai mengembangkan beberapa metode praktis untuk menganalisa potensi likuifaksi dari tanah. Terdapat beberapa metode analisa likuifaksi yang telah ada, salah satunya adalah metode analisa menggunakan data pengujian lapangan, seperti uji CPT (*cone penetration test*), uji standar penetrasi, uji boring SPT (*standard penetration test*) dan uji swedish. Selain itu analisa potensi likuifaksi juga dapat dilakukan berdasarkan uji di laboratorium seperti uji sifat fisik dan sifat mekanis. Dari sekian banyak metode yang ada, metode menggunakan data uji SPT dan CPT merupakan metode yang sering digunakan oleh para ahli, seperti Seed dan Idriss (1971), Tatsuoka (1980), Tokimatsu dan Yoshimi (1983).

Beberapa metode penanganan untuk daerah rawan likuifaksi mulai dilakukan baik dalam bentuk desain pondasi yang akan digunakan pada bangunan maupun penanganan dengan cara meningkatkan daya dukung tanahnya. Seperti *Evaluation of stone columns versus liquefaction phenomenon* Arsalan Salahi, et al (2015), *Centrifuge modelling of inclined micro-piles for liquefaction remediation of existing buildings*. Helen Mitrani

and S.P.G. Madabhushi, (2008). *Improvement of loose sandy soil deposits using micropiles* Reza Ziaie Moayed, et al (2012). *Experimental study on mitigation of liquefaction-induced vertical ground displacement by using gravel and geosynthetics* Hendra Setiawan, et al (2018). Dari beberapa metode penelitian tersebut yang sudah dilakukan ada beberapa hal yang dapat dilakukan untuk meningkatkan daya dukung tanah yang berpotensi likuifaksi yaitu dengan menggunakan *micro pile*.

Penggunaan *micro pile* sendiri di Indonesia dilakukan dengan pemanfaatan cerucuk kayu hal ini dilakukan karena memanfaatkan material lokal dapat dilakukan di beberapa wilayah dan kesediaan material tersebut sangat melimpah, sehingga ini bisa menjadi alternatif dalam penanganan pada kawasan yang kondisi tanahnya berpotensi terjadi likuifaksi. Kajian dan penelitian mengenai penggunaan cerucuk kayu sendiri sebagai bahan perkuatan tanah lunak pernah dilakukan yaitu studi deformasi perkuatan tanah lunak dengan cerucuk miring Tri Harianto, et al (2015), diperoleh hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa penggunaan cerucuk kayu miring mampu mereduksi penurunan pada tanah hingga sebesar 33,2%. Kemudian Y. Sandyutama, et al (2015), melakukan penelitian yang berjudul *Full scale model test of consolidation acceleration on soft soil deposition with combination of timber pile and pvd (hybrid pile)* menunjukkan bahwa tiang *hybrid pile* efektif meningkatkan stabilitas dan waktu konsolidasi. Penyelesaian konsolidasi tiang pancang *hybrid* ditemukan relatif lebih cepat dibandingkan dengan perkuatan tiang konvensional. Serta penelitian

perkuatan lereng badan jalan dengan tipe *mikro root pile* pada deposit tanah lunak. Ahmad Gasruddin, et al (2016). Menunjukkan bahwa penurunan dan deformasi yang terjadi dengan adanya perkuatan cerucuk dapat mereduksi penurunan yang terjadi akibat adanya pembebanan sebesar 23.16% dibawah embankment jalan.

Penggunaan kayu *Eucalyptus Pellita* sebagai material cerucuk saat ini banyak digunakan di kawasan Merauke yang khususnya memiliki daya dukung tanah cukup rendah dan kesediaan material kayu masih cukup banyak. Kayu merupakan bahan baku yang fleksibel, serbaguna, dan salah satu bahan baku konstruksi yang berkelanjutan. Kayu telah digunakan sebagai bahan bangunan baik secara struktural maupun non-struktural. Cerucuk kayu *eucalyptus pellita* sebagai material bahan konstruksi suatu terobosan baru dalam rekayasa perbaikan dan perkuatan tanah. Kayu eucalyptus *pellita* saat ini sedang dikembangkan. Tanaman *Eucalyptus pellita* 1994 Daerah penyebaran alami *Eucalyptus pellita* sebagian besar tumbuh di Australia dan pulau sekitarnya termasuk Papua. Tanaman Eukaliptus merupakan salah satu jenis tanaman hutan yang diprioritaskan untuk dikembangkan dalam program Hutan Tanaman Industri (HTI). penelitian mengenai uji kualitas eucalyptus *pellita* untuk sifat dasar kayu sudah dikembangkan oleh beberapa negara, seperti China, Brazil dan Indonesia. Siti Fatimah, et al (2013).

Ada beberapa metode pengawatan kayu digunakan untuk menghindarinya baik secara alami dengan melakukan perendaman

ataupun dengan cara kimiawi. Penelitian tentang Perlindungan dan Pengawetan Kayu ini terdiri dari 19 makalah yang mewakili berbagai aspek yang terkait dengan bidang ini dan memberikan contoh-contoh terkini dari kegiatan penelitian yang dapat diamati di seluruh dunia. Brischke (2020). Atas dasar pertimbangan dengan adanya beberapa teori dan hal tersebut maka peneliti akan melakukan penelitian lanjut di laboratorium dengan tema mengenai “*Model Perkuatan Dengan Cerucuk Kayu Pada Tanah Yang Berpotensi Likuifaksi*”.

B. Rumusan Masalah

Masalah yang dikaji dalam penelitian ini dijabarkan dalam rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik fisik, mekanis kayu *Eucalyptus pelitta* dan tanah yang berpotensi likuifaksi?
2. Bagaimana kapasitas dukung sistem cerucuk kayu dan cerucuk kayu - PVD (*Hybrid pile*) pada lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi?
3. Bagaimana kinerja cerucuk kayu dan cerucuk kayu - PVD (*Hybrid pile*) menerima beban seismic sebagai perkuatan pada tanah yang berpotensi likuifaksi?

C. Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk memperkaya wawasan tentang pemanfaatan material lokal sebagai bahan konstruksi. Sehingga diharapkan semakin luasnya kemungkinan pemanfaatan material lokal

digunakan untuk perkuatan tanah yang berpotensi likuifaksi terutama bagi kegunaan di lapangan. Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penggunaan cerucuk kayu pada tanah yang berpotensi likuifaksi. Secara rinci penelitian ini mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Mengevaluasi karakteristik fisik, mekanis *Eucalyptus pelitta* dan tanah yang berpotensi likuifaksi.
2. Menganalisis kekuatan kapasitas dukung sistem cerucuk kayu dan cerucuk kayu + PVD (*Hybrid pile*) pada lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi.
3. Menemukan desain struktur cerucuk kayu dan cerucuk kayu + PVD (*Hybrid pile*) sebagai perkuatan pada tanah yang berpotensi likuifaksi.

D. Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian yang dilakukan diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat diperoleh gambaran kekuatan kayu *Eucalyptus pelitta* sebagai bahan cerucuk kayu dalam usaha peningkatan daya dukung tanah berpotensi likuifaksi serta dapat memberikan kontribusi mendasar pada bidang ilmu geoteknik.
2. Dapat dijadikan referensi atau acuan bagi para peneliti dan praktisi yang tertarik dalam pengembangan kayu *Eucalyptus pelitta* sebagai bahan

material cerucuk kayu guna peningkatan perkuatan pada lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi.

3. Dapat digunakan pada perencanaan pada daerah yang mempunyai lapisan tanah berpotensi likuifaksi.

E. Batasan Masalah

Penelitian ini mencakup pengujian eksperimental laboratorium dengan pemanfaatan cerucuk kayu sebagai bahan perkuatan pada tanah berpotensi likuifaksi. Dimana dalam penelitian ini meliputi uji sifat fisik, dan mekanik, serta uji model fisik penggunaan cerucuk kayu sebagai bahan perkuatan pada tanah yang berpotensi likuifaksi. Analisis model penelitian dibatasi sampai pada pengukuran dan deformasi vertikal, horisontal dan peningkatan air pori. Sehingga untuk menyederhanakan proses penelitian, maka dalam pelaksanaannya dilakukan beberapa batasan dan asumsi, di antaranya adalah:

1. Tanah yang diteliti adalah tanah yang berasal dari jenis pasir pantai.
2. Kayu yang digunakan adalah jenis kayu *Eucalyptus pelitta*.
3. Uji Model yang dilakukan adalah model uji di laboratorium.
4. Tidak meninjau efek boundary terhadap dinding bak uji pada saat pengujian model.

F. Sistematika Penulisan

Gambaran umum mengenai isi penelitian ini, dapat dituliskan secara singkat sebagai berikut :

1. BAB I Pendahuluan

Dijelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah menjelaskan permasalahan yang diamati dan dilaksanakan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup batasan dalam penulisan serta sistematika penulisan tentang pengenalan isi per bab dalam penulisan ini.

2. BAB II Tinjauan Pustaka

Memaparkan teori dasar tentang sifat fisik, mekanis, klasifikasi, karakteristik dan microstruktur kayu *Eucalyptus pelitta* dan jenis tanah yang berpotensi likuifaksi, serta beberapa studi tentang penanganan pada permasalahan likuifaksi dan gambaran kerangka pikir penulisan.

3. BAB III Metodologi Penelitian

Menerangkan teknis penelitian yang dilakukan menguraikan tentang urutan kerja dan tata cara kerja penelitian mulai dari pengambilan contoh kayu dan tanah dan uji model laboratorium.

4. BAB IV Hasil dan Pembahasan

Menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian yang dilaksanakan sesuai dengan metodologi penelitian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

5. BAB V Kesimpulan dan Saran

Menerangkan tentang kesimpulan dari capaian yang dihasilkan sebagai suatu rujukan dalam bidang akademik dan bidang rekayasa serta memberikan saran dalam riset yang bersifat berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Strategis Penanganan Daerah Potensi Likufaksi

Permasalahan yang terjadi akibat gempa bumi adalah potensi terjadinya likuifaksi. Menurut Andhika Prasetia (2018) Banyak kejadian likuifaksi yang pernah terjadi di beberapa negara diantaranya:

1. Gempa di San Francisco, California, AS, tahun 1906, dengan Gempa bumi berkekuatan magnitudo 7,9 di San Francisco Sebagian besar kerusakan yang terjadi selama dan segera setelah gempa 1906 terkait dengan likuifaksi.
2. Gempa Loma Prieta, California, AS, tahun 1989. Terjadi pada Central Coast California pada 17 Oktober di 05:04 waktu setempat. Dengan besarnya magnitudo 6.9 dan terjadi likuifaksi dan menyebabkan 63 kematian dan 3.757 luka-luka.
3. Gempa Hanshin-Awaji, Jepang, tahun 1995 pernah terjadi gempa besar di Hanshin-Awaji, Gempa bermagnitudo 7,2 berlangsung selama 20 detik, gempa mengakibatkan kerusakan besar kota Kobe yang terletak sekitar 20 kilometer dari pusat gempa, karena terjadi likuifaksi. Bencana memakan korban jiwa sebanyak 6.433 orang.
4. Gempa Canterbury, Selandia Baru, pada 2010 atau yang juga dikenal gempa bumi Christchurch merupakan gempa berkekuatan magnitudo 7,1 yang mengguncang Pulau Selatan, Selandia Baru,

pada 4 September 2010. Gempa tersebut telah merusak fasilitas umum terutama yang berada di kota Christchurch akibat fenomena likuifaksi.

5. Niigata, Jepang Dikutip dari USGS, peristiwa di Niigata (1964) merupakan salah satu likuifaksi yang paling terkenal. Akibatnya, bangunan apartemen amblas.
6. Christchurch, Selandia Baru Gempa bermagnitudo 6,3 terjadi pada tanggal 25 Februari 2011 yang mengakibatkan likuifaksi dan akibatnya sejumlah bangunan rusak.
7. Pohang, Korea Selatan Fenomena ini terjadi tanggal 15 November 2017. Pemerintah Korea Selatan menyebutkan likuifaksi yang terjadi tidak menimbulkan kerusakan signifikan di Pohang.

Dan untuk di Indonesia sendiri kejadian likuifaksi dengan dampak terparah dengan korban terbanyak yaitu Gempa bermagnitudo 7,4 di Sulawesi Tengah, Jumat 28 September 2018. Rumah dan pohon amblas akibat likuifaksi. Termasuk rumah yang ada di perumahan Balaroa ini kondisinya amblas dan menyebabkan bangunan rubuh, hanyut dan sebagainya, ada empat lokasi yang mengalami likuifaksi. Kebanyakan di Kabupaten Sigi. Masih banyak lagi kejadian likuifaksi yang terjadi di Indonesia dan tercatat oleh dalam Tabel 1. Histori kejadian likuifaksi di Indonesia oleh Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2019) ada sebanyak 37 kejadian yang terjadi dari tahun 1967 s/d 2018.

Tabel.1 Histori kejadian likuifaksi di Indonesia

NO.	PROVINSI	NAMA GEMPABUMI	TANGGAL KEJADIAN	PUSAT GEMPABUMI		KEDALAMAN (KM)	MAGNITUDO	SKALA INTENSITAS MMI	KETERANGAN
				BUJUR	LINTANG				
1	Aceh	Lhok Seumawe, Sigi	4-Dec-1967	97,3° BT	5,3° LU	50	M6,2	VIII	Likuifaksi di Lhok Seumawe
2	Sumatera Utara	Tarutung	27-Apr-1987	98,8° BT	2,1° LU	30	M6,6	VII	Likuifaksi di Tarutung
3	Gorontalo	Gorontalo	18-Apr-1990	122,48° BT	1,12° LU	26	M6,2	IX	Likuifaksi di Gorontalo
4	Aceh	Blangkajeren	15-Nov-1990	97,457° BT	3,908° LU	33	M6,8	VIII	Likuifaksi di Blangkajeren
5	Nusa Tenggara Timur	Alor	7-Apr-1991	126,36° BT	10,23° LS	33	M6,9	VIII	Likuifaksi di P. Alor
6	Nusa Tenggara Timur	Flores	12-Dec-1992	122,34° BT	8,36° LS	35	M7,5	VIII	Likuifaksi di pantai utara P. Flores
7	Lampung	Liwa	15-Feb-1994	104,302° BT	4,967° LS	20	M7,0	IX	Likuifaksi di Liwa
8	Maluku Utara	P. Obi	10-Aug-1994	127,522° BT	1,222° LS	31	M6,3	VI	Likuifaksi di Desa Sambiki, P. Obi.
9	Sulawesi Tengah	Parigi	20-May-1995	120,25° BT	1,06° LS	33	M5,8	VII	Likuifaksi di Sausu-trans, Mekarsari, Balingi, Totai, dan Torue.
10	Jambi	Kerinci	10-Jul-1995	101,3° BT	2,1° LS	33	M7,0	IX	Likuifaksi di Kec. Sitingau Laut.
11	Papua	Blak	17-Feb-1996	136,225° BT	0,917° LS	32	M8,2	VIII	Likuifaksi di desa Bosnik, Warsa, Aman, Sawai & Wasari.
12	Bengkulu	Bengkulu	6-Apr-2000	102,047° BT	4,734° LS	33	M7,9	IX	Likuifaksi di kota Bengkulu
13	Papua Barat	Ranski	10-Oct-2002	134,165° BT	1,707° LS	10	M7,6	VIII	Likuifaksi di Ranski
14	Nusa Tenggara Timur	Manggarai	25-Mar-2003	120,7° BT	8,19° LS	33	M6,5	VI	Likuifaksi di Manggarai
15	Papua	Nabire	2-Jun-2004	135,52° BT	3,601° LS	25	M7,0	VIII	Likuifaksi di desa Sanoba, Kab. Nabire
16	Papua	Nabire	11-Jun-2004	135,30° BT	3,579° LS	10	M7,0	VIII	Likuifaksi di desa Kimi, Kab. Nabire
17	Nusa Tenggara Timur	Alor	11-Dec-2004	124,79° BT	8,137° LS	10	M7,5	IX	Likuifaksi di Air Mancur P. Alor
18	Sulawesi Tengah	Palolo-Donggala	24-Jan-2005	119,99° BT	1,03° LS	30	M6,2	VII	Likuifaksi di desa Sintuwu, kec. Palolo, Donggala
19	Sumatera Utara	Gunung Stoli	28-Mar-2005	97,01° BT	2,07° LU	30	M8,7	IX	Likuifaksi di Gunung Stoli
20	Maluku	P. Buru	14-Mar-2006	127,211° BT	3,596° LS	30	M6,7	VI	Likuifaksi di Desa Pela & Waimorat
21	Yogyakarta	Bantul	27-May-2006	110,379° BT	7,898° LS	17	M6,2	VIII	Likuifaksi di Bantul, Sieman, Klaten
22	Sumatera Barat	Solok	3-Jul-2007	100,498° BT	0,536° LS	20	M6,3	VII	Likuifaksi di Solok.
23	Bengkulu	Bengkulu	9-Dec-2007	101,382° BT	4,517° LS	30	M8,4	VI	Likuifaksi di Bengkulu, Seblat.
24	Sumatera Barat	Pesisir Selatan	13-Sep-2007	100,964° BT	2,525° LS	10	M7,9	VII	Likuifaksi di Pesisir Selatan.
25	Gorontalo	Gorontalo	17-Nov-2008	122,18° BT	1,41° LU	10	M7,7	VIII	Likuifaksi di Molangato.
26	Papua Barat	Manokwari	1-Apr-2009	133,38° BT	0,88° LS	10	M7,6	VII	Likuifaksi di Kordakel.
27	Sumatera Barat	Padang Pariaman	30-Sep-2009	99,961° BT	0,789° LS	80	M7,9	VIII	Likuifaksi di Padang Pariaman, Kota Padang.
28	Papua	Serui	16-Jun-2010	136,59° BT	2,17° LS	10	M7,1	VIII	Likuifaksi di Aliri, Distrik Angkaisera, Kab. Yapen.
29	Maluku Utara	P. Obi	14-Mar-2010	128,20° BT	1,58° LS	56	M7,0	VII	Likuifaksi di Desa Kelo, P. Obi.
30	Sulawesi Tenggara	Kendari	25-Apr-2011	122,82° BT	4,40° LS	18	M6,0	VI	Likuifaksi di Kecamatan Moramo
31	Papua Barat	Sorong	25-Sep-2015	131,27° BT	0,59° LS	10	M6,8	VI	Likuifaksi di Kota Sorong.
32	Kalimantan Utara	Tarakan	21-Dec-2015	117,67° BT	3,61° LU	40	M6,1	V	Likuifaksi di Tarakan
33	Aceh	Pidie Jaya	12-Jul-2016	96,24° BT	5,25° LU	15	M6,5	VIII	Likuifaksi di Pidie Jaya
34	Sulawesi Tengah	Lembah Napu, Poso	29-May-2017	120,48° BT	1,28° LS	11	M6,6	VI	Likuifaksi di lembah Napu.
35	Nusa Tenggara Barat	Lombok Utara	8-May-2018	116,48° BT	8,37° LS	15	M7,0	VIII	Likuifaksi di Lombok Utara.
36	Nusa Tenggara Barat	Lombok Timur	19-Aug-2018	116,626° BT	8,324° LS	25	M7,0	VIII	Likuifaksi di Lombok Timur.
37	Sulawesi Tengah	Pasigala	28-Sep-2018	119,85° BT	0,18° LS	10	M7,5	IX	Likuifaksi di Palu, Sigi, Donggala dan Parigi Mountong Flow likuifaksi di Balaroa, Petobo, Sbalaya

Sumber. Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2019

Dari semua kejadian tersebut maka likuifaksi merupakan kejadian alam yang harus diwaspadai dan perlu untuk di antisipasi. Untuk di Indonesia sendiri hampir di semua daerah memiliki potensi tersebut dan ini dimuat dalam Peta Zona Kerentanan Likuifaksi Di Indonesia yang diterbitkan oleh Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2019) yang termuat dalam Gambar 1.



Sumber. Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2019

Gambar 1. Peta Zona Kerentanan Likuifaksi Di Indonesia.

Menurut kajian dari Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2019), potensi zona likuifaksi di indesia dibedakan menjadi 3 kelompok yaitu:

1. Potensi zona likuifaksi tinggi.

Zona yang dapat mengalami likuifaksi secara merata dan struktur tanah menjadi rusak parah sehingga hancur. Tipe kerusakan struktur tanah yang terjadi berupa likuifaksi aliran (*flow liquefaction*), yaitu likuifaksi yang bersifat mengalir dan dapat menyebabkan gerakan aliran tanah. Pergeseran lateral (*lateral displacement*), Likuifaksi yang menyebabkan tanah bergeser yang pada umumnya dapat mencapai 0.3 m atau lebih dengan kemiringan landai (<8%). Penurunan tanah (*Vertical Displacement*) permukaan, likuifaksi yang menyebabkan penurunan tanah yang pada umumnya dapat mencapai penurunan

0,1m atau lebih. Semburan pasir (*sand boil*), yaitu likuifaksi yang mengakibatkan adanya semburan pasir secara merata dalam satu kawasan.

2. Potensi zona likuifaksi sedang.

Zona yang dapat mengalami likuifaksi secara tidak merata dan struktur tanah umumnya rusak, dan tipe kerusakan berupa pergeseran lateral (*lateral displacement*), penurunan tanah (*vertical displacement*) permukaan dan semburan pasir (*sand boil*).

3. Potensi zona likuifaksi rendah.

Zona yang jarang mengalami likuifaksi dan pada umumnya likuifaksi yang terjadi berupa titik-titik semburan pasir dan sedikit menimbulkan kerusakan pada struktur tanah.

B. Likufaksi

Likuifaksi adalah fenomena hilangnya kekuatan pada lapisan tanah akibat beban guncangan gempa. Hilangnya pada lapisan tanah utamanya yang berperan sebagai lapisan tanah pondasi menyebabkan menurunnya daya dukung pondasi secara cepat sehingga menimbulkan kegagalan pondasi atau kerusakan infrastuktur yang berada di atasnya. Disamping itu, fenomena likufaksi dapat pula memicu pergerakan tanah dalam mekanisme yang kompleks sehingga tingkat ancaman bahaya lebih tinggi terhadap keberadaan masyarakat dan infrastuktur.

Likuifaksi yang terjadi pada suatu daerah dapat memberikan efek kerusakan di permukaan baik yang bersifat setempat maupun secara luas/massif. Likuifaksi didefinisikan sebagai transformasi material granular dari bentuk solid menjadi cair sebagai akibat dari naiknya tekanan air pori dan kehilangan tegangan efektif (Marcuson, 1978). Naiknya tekanan air pori ini disebabkan oleh kecenderungan dari material berbutir untuk menjadi padat akibat *cyclic shear deformations*. Perubahan dalam bentuk ini secara umum dapat dengan mudah terjadi pada tanah granular dengan tipe pengaliran yang buruk pada kepadatan lepas sampai sedang seperti pasir kelanauan atau pasir dan kerikil yang tersusun atas impermeabel sedimen. Berkurangnya volume lapisan tanah pada saat likuifaksi terjadi dapat memperbesar *cyclic deformation* yang terjadi. Jika lapisan tanah tersebut merupakan material lepas, maka perubahan ini akan disertai dengan hilangnya kekuatan geser tanah, yang dapat memicu terjadinya *shear deformation*. Pada tipikal tanah dengan tingkat kepadatan sedang sampai lepas, likuifaksi dapat mengawali terjadinya kehilangan sementara dan meningkatnya regangan geser siklik, namun memiliki kecenderungan berdilatasi selama pergeseran menghalangi terjadinya kehilangan kekuatan tanah dan meluasnya deformasi yang terjadi.

Menurut Day (2002) gempa bumi dapat mengakibatkan *secondary effect* atau proses non-tektonik dipermukaan yang berhubungan langsung dengan gempa bumi. Salah satu efek sekunder ini adalah terjadinya fenomena pencairan tanah akibat beban siklik atau yang dikenal dengan

istilah likuifaksi. Peristiwa likuifaksi pada umumnya terjadi pada konsistensi tanah granular jenuh (*saturated*) yang lepas sampai sedang dengan sifat drainase dalam tanah. Endapan atau deposit tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi ketika diberikan beban siklik adalah pasir halus (*sand*), pasir berlumpur (*silty sand*), dan pasir lepas (*loose sand*). Karena hanya terjadi di tanah yang jenuh, likuifaksi umumnya terjadi di dekat sungai, teluk, atau badan air lainnya (Kramer 1996).

Proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air akan menjadi cair akibat tekanan air pori yang meningkat hingga ke titik sama besar dengan tegangan total akibat adanya beban siklik sehingga tegangan efektif tanah akan berkurang hingga sama dengan nol. Hal ini menunjukkan bahwa likuifaksi merupakan fenomena suatu tanah kehilangan banyak kekuatan (*strength*) dan kekakuan (*stiffness*) dalam waktu yang singkat. Saat terjadi gempa, gaya geser yang ditimbulkan mengakibatkan pasir bereaksi sehingga tekanan air pori meningkat. Akibat getaran siklik yang terjadi dalam waktu singkat ini, tanah kehilangan banyak kekuatan atau kekakuannya sehingga tidak dapat mendukung struktur di atasnya dan menjaga untuk tetap stabil.

Pasir dengan kepadatan lepas sampai sedang dan pasir berlumpur yang jenuh air cenderung bereaksi dengan beban siklik, sehingga tanah kehilangan kuat geser akibat menurunnya tegangan efektif seiring dengan meningkatnya tegangan air pori dan untuk kondisi tanah pada saat terjadi likuifaksi dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.1.

$$\sigma' = \sigma - u \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

σ' = tegangan efektif tanah (t/m²)

σ = tegangan total (t/m²)

u = tekanan air pori (t/m²)

Menurut Das (1995) tegangan total dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$\sigma = (H \cdot \gamma_w) + (HA - H) \cdot \gamma_{sat} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

σ = tegangan total pada titik A (t/m²)

H = tinggi muka air diukur dari permukaan tanah (m)

HA = jarak antara titik A dengan muka air (m)

γ_w = berat volume air (t/m³)

γ_{sat} = berat volume tanah jenuh air (t/m³)

Sedangkan nilai rasio tekanan air pori tanah dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$u = HA \cdot \gamma_w \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

HA = jarak antara titik A dengan muka air

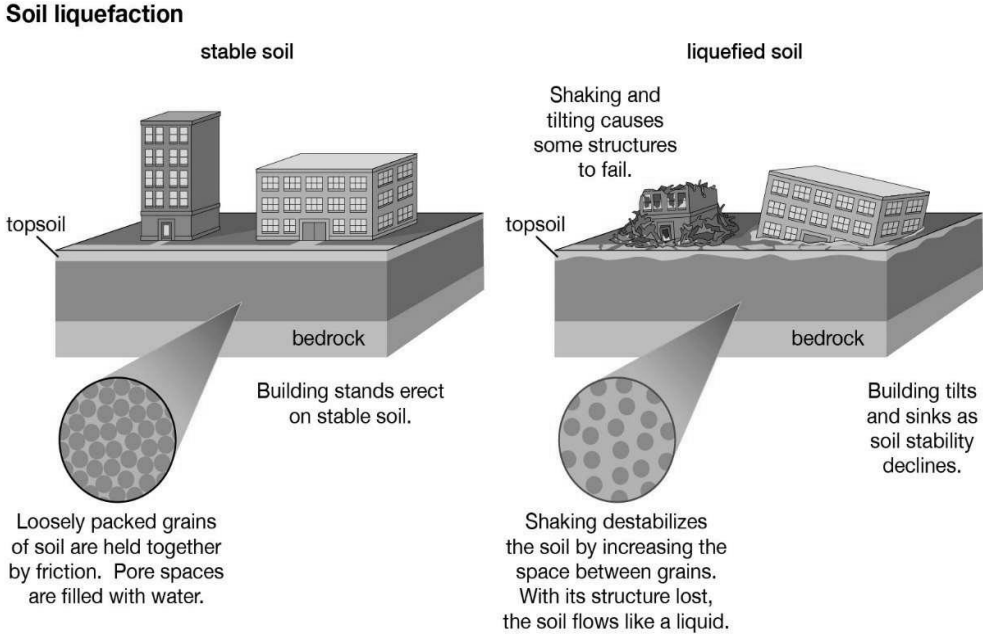
γ_w = berat volume air (10 kN/m³)

Peningkatan tekanan air pori menyebabkan aliran air naik ke permukaan tanah dalam bentuk semburan lumpur atau pasir. Untuk

keadaan likuifaksi ini, tegangan efektif tanah menjadi sama dengan nol dan partikel tanah saling melepaskan seolah-olah mengambang di air. Struktur yang berada di atas endapan tanah pasir yang terlikuifaksi saat gempa bumi akan tenggelam atau jatuh dan saluran yang terkubur akan mengapung ke permukaan.

1. Proses peristiwa likuifaksi

Proses peristiwa likuifaksi atau deposit tanah pasir yang mempunyai muka air tanah di bawah permukaan rentan mengalami likuifaksi. Selama gempa bumi, tegangan geser siklik yang disebabkan oleh rambatan gelombang geser menyebabkan pasir lepas bereaksi dan menghasilkan tekanan air pori yang meningkat. Akibat gelombang siklik yang terjadi begitu cepat, air pada tanah tidak mampu keluar. Meningkatnya tekanan air pori menyebabkan aliran air ke atas permukaan berupa semburan lumpur atau pasir. Tekanan air pori meningkat karena tanah yang bergerak mengakibatkan air mengalir ke atas dan mengubah pasir dari fase padat menjadi fase cair disebut likuifaksi (Day, 2002). Pasir dengan kepadatan sedang sampai lepas dan memiliki elevasi muka air tanah yang tinggi, saat tidak ada getaran tanah akan stabil karena partikel tanah pasir saling mengunci (*interlocking*). Ketika terjadi gempa, volume tanah cenderung menyusut dan mengakibatkan peningkatan pada tekanan air pori sehingga kuat geser efektif tanah akan menurun. Pasir yang jenuh air akan mengisi ruang antar partikel sehingga kekuatan *interlocking* antara partikel hilang seperti pada Gambar 2.

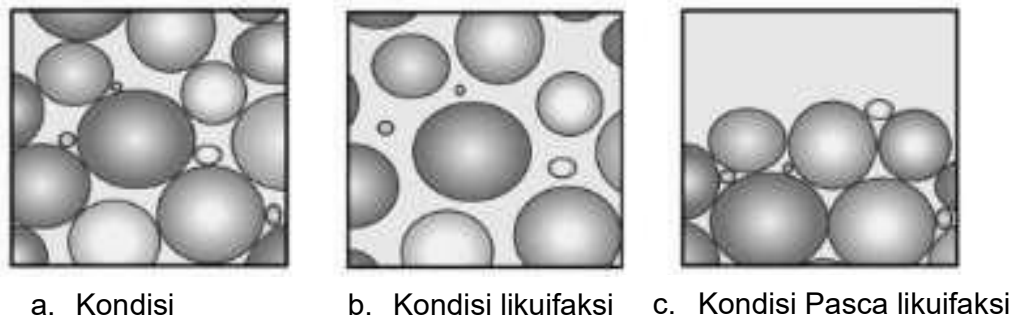


(Sumber: Encylopedia Britannica, Inc. 2012)

Gambar 2. Proses Terjadinya Likuifaksi

Ishihara (1985) mengemukakan bahwa pada saat keadaan likuifaksi, tegangan efektif tanah sama dengan nol. Hal ini diakibatkan karena tekanan air pori meningkat hingga ke titik saat tegangan air pori sama besar dengan tegangan tanah. Karena kehilangan kuat geser tanah, partikel-partikel pasir yang mengunci saling melepaskan dan seolah-olah partikel pasir mengembang di air. Setelah terjadi likuifaksi, tekanan air pori berlebih akan mulai terdisipasi. Lamanya waktu tanah tetap dalam keadaan cair bergantung pada 2 faktor utama, yaitu durasi getaran akibat gempa bumi dan kondisi drainase dari tanah yang terlikuifaksi. Semakin lama dan kuat tegangan geser siklik akibat gempa, semakin lama likuifaksi terjadi. Ketika proses likuifaksi selesai, tanah dapat kembali memadat, ambles,

atau kemungkinan tidak sempat untuk memadat. Dimana kondisi tanah saat proses terjadinya likuifaksi tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Kondisi Tanah Saat Terjadi Likuifaksi

Untuk memahami proses terjadinya likuifaksi, perlu kita pahami terlebih dahulu bahwa suatu endapan tanah terdiri dari partikel-partikel. Jika kita perhatikan setiap partikel tersebut letaknya saling berdekatan, sehingga setiap partikel memiliki kontak dengan partikel yang lain. Dengan adanya kontak antar partikel tersebut, tanah menjadi memiliki suatu kekuatan untuk memikul beban di atasnya, sebab kondisi seperti ini menjadikan beban yang berada di atas tanah akan dipikul secara bersamaan oleh seluruh partikel. Akhirnya beban tersebut akan disalurkan ke lapisan batuan dasar di bagian bawah lapisan tanah tersebut.

Pada kondisi tanah normal tampak bahwa banyak rongga antar partikel tanah yang dipenuhi air. Pada kondisi normal, air tersebut memiliki tekanan air pori yang relatif rendah. Pada saat menerima tekanan dari getaran secara tiba-tiba, air tersebut akan terdesak sehingga ia akan menaikkan tekanannya untuk dapat mencari jalan keluar. Namun pada saat

terjadinya gempa, air tersebut tidak memiliki cukup waktu untuk berdisipasi keluar dari tanah melalui rongga-rongga tanah, sehingga sebagai gantinya air tersebut mendorong partikel-partikel tanah sehingga beberapa partikel tanah sebelumnya berhubungan menjadi menjauh dan akhirnya partikel tanah tidak dapat mendistribusikan beban lagi dengan maksimal pada saat itulah tanah dalam kondisi likuifaksi dan pada kondisi seperti ini, sebagian besar beban dipikul oleh air. Sehingga pemikulan beban pada tanah tersebut menjadi tidak stabil. (Enden Mina. et al. 2018)

2. Faktor-faktor yang mempengaruhi likuifaksi

Ada banyak faktor yang dapat menyebabkan tanah mengalami proses likuifaksi. Berdasarkan hasil uji laboratorium serta observasi dan studi lapangan, Menurut Day (2002) faktor-faktor tersebut diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Intensitas, durasi, dan karakteristik gempa bumi

Tanah akan mengalami likuifaksi apabila tanah tersebut diberikan getaran. Karakteristik gerakan tanah seperti percepatan dan durasi gempa dapat menentukan regangan geser yang menyebabkan reaksi antar partikel tanah dan peningkatan tekanan air pori berlebih sehingga terjadi likuifaksi. Potensi likuifaksi meningkat seiring intensitas gempa dan lamanya guncangan terjadi. Gempa bumi yang memiliki kekuatan tertinggi akan menghasilkan percepatan tanah maksimum pada tanah dasar atau *Peak Ground Acceleration* (PGA).

b. Muka air tanah

Kondisi yang paling rentan untuk likuifaksi adalah permukaan yang dekat dengan muka air tanah. Hal ini disebabkan karena tanah tidak jenuh yang terletak di atas permukaan air tanah tidak akan mengalami likuifaksi.

c. Jenis tanah

Ishihara (1985) menyatakan bahwa peristiwa likuifaksi yang pernah terjadi selama gempa bumi telah ditemukan dalam endapan yang terdiri dari pasir halus sampai sedang dan pasir yang mengandung rasio plastisitas yang rendah. Dengan demikian, jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah non-plastis (non-koheksi). Diperkirakan tanah non-koheksi yang rentan terhadap likuifaksi adalah pasir bersih (*clean sands*), pasir berlumpur non-plastis (*non-plastic silty sands*), lumpur non-plastis (*non-plastic silt*) dan kerikil (*gravel*).

d. Kepadatan relatif (*Dr*)

Istilah kepadatan relatif (*relative density*) umumnya dipakai untuk menunjukkan tingkat kepadatan dari tanah berbutir (*granular soil*) di lapangan. Kepadatan relatif didefinisikan dalam persamaan 2.4

$$Dr = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{Min}} \times 100 \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

Dr = Kepadatan relatif

e = Angka pori tanah

e_{min} = Angka pori tanah dalam keadaan paling padat

e_{maks} = Angka pori tanah dalam keadaan paling lepas

Kepadatan relatif juga dapat dinyatakan dengan istilah berat volume kering maksimum dan minimum yang mungkin yaitu persamaan 2.5.

$$Dr = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(Min)}}{\gamma_{d(Max)} - \gamma_{d(Min)}} \right] \times \left[\frac{\gamma_{d(Max)}}{\gamma_d} \right] \frac{\gamma_{d(Max)}}{\gamma_d} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

Dr = Kepadatan relatif dinyatakan dalam persen

γ_d = Berat volume tanah tanah aslidilapangan (pada angka pori e)

$\gamma_{d \min}$ = Berat volume kering tanah dalam keadaan yang paling lepas (pada angka pori maksimum, e_{maks})

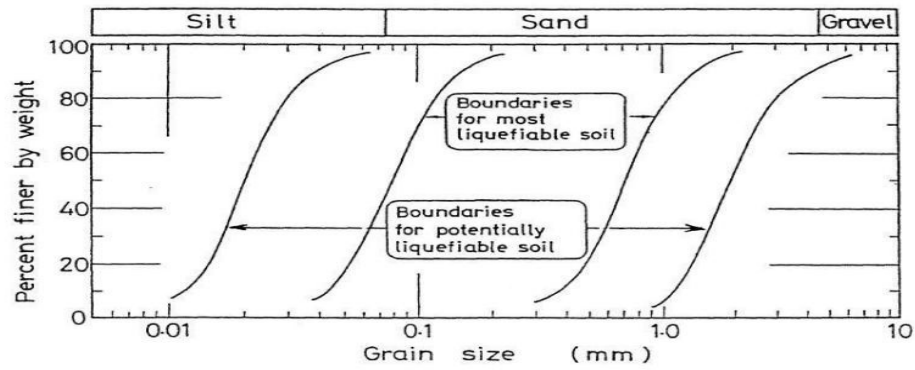
$\gamma_{d \max}$ = Berat Berat volume kering tanah dalam keadaan yang paling lepas (pada angka pori Minimum, e_{min})

e. Gradasi dan analisis butiran tanah

Jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah pasir lepas sampai medium yang jenuh. Tanah yang memiliki gradasi seragam (*uniformly graded soil*) cenderung tidak stabil dan lebih rentan terhadap likuifaksi daripada tanah yang bergradasi baik (*well-graded soil*). Tanah dengan gradasi baik memiliki partikel yang saling mengisi rongga dan mengurangi potensi kontraksi tanah sehingga menghasilkan tekanan air pori yang lebih sedikit selama gempa bumi. Selain itu, gradasi tanah pada D50 yang memiliki ukuran butir 0,15mm hingga 0,35mm berpotensi mengalami likuifaksi.

Tsuchida (1970) meringkas hasil analisis saringan pada sejumlah tanah yang diketahui telah terlikuifaksi dan yang tidak terlikuifaksi

selama gempa bumi. Kurva ukuran butir yang memisahkan tanah yang dapat terlikuifaksi dan tidak ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva Distribusi Ukuran Butir Tanah yang Rentan Terhadap Likuifaksi (Tsuchida, 1970)

Terdapat 3 parameter dasar yang dapat ditentukan dari kurva distribusi ukuran butir dan hasilnya dapat mengklasifikasikan tanah berdasarkan bentuk butiran. Parameter tersebut antara lain adalah sebagai berikut:

- 1) Ukuran efektif (*effective size*) adalah ukuran butiran yang bersesuaian dengan 10% lolos saringan (D_{10}).
- 2) Koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*, C_u) dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.6.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

C_u = Koefisien keseragaman

D_{60} = Diameter saringan ketika lolos 60%

D_{10} = Diameter saringan ketika lolos 10%

3) Koefisien kelengkungan (*coefficient of curvature*, Cc) dinyatakan dalam Persamaan 2.6.

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

Cc = Koefisien kelengkungan

D₃₀ = Diameter saringan ketika lolos 30%

D₆₀ = Diameter saringan ketika lolos 60%

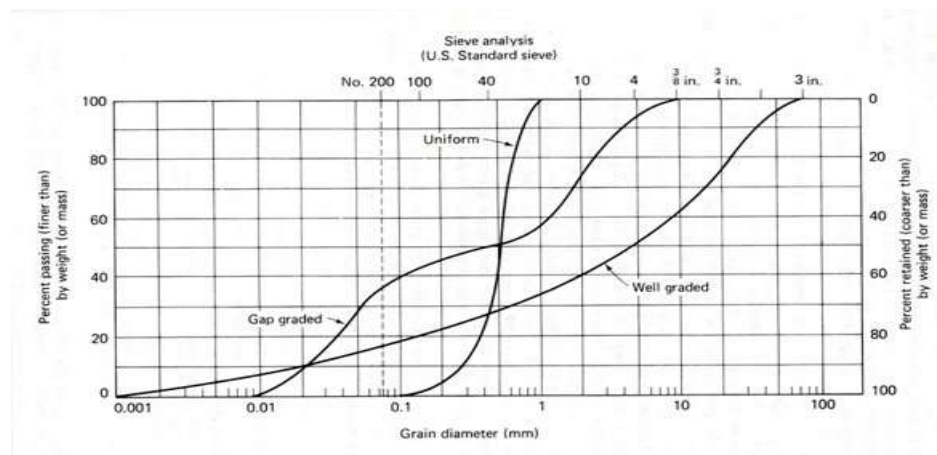
D₁₀ = Diameter saringan ketika lolos 10%

Klasifikasi tanah berbutir kasar dapat dilakukan dengan uji analisa saringan. Secara sederhana dari analisa saringan kita dapat menentukan jenis tanah berdasarkan ukuran butiran. Dari beberapa standar yang ada, tanah pasir adalah tanah dengan ukuran butiran 4.75 mm sampai 0.75 mm, atau butiran yang lolos saringan no. 4 sampai no. 200, sedangkan kerikil engan ukuran butiran >4.75mm. Dari ASTM D2487-93 dan USCS jenis pasir dibagi lagi yaitu:

- 1) Pasir kasar : ukuran butiran 4,75 mm sampai 2 mm
- 2) Pasir menengah : ukuran butiran 2 mm sampai 0,425 mm
- 3) Pasir halus : ukuran butiran 0,425 mm sampai 0,075 mm

Dari uji analisa saringan juga akan didapatkan parameter dasar untuk mengklasifikasikan tanah yaitu nilai ukuran efektif butiran, koefisien keseragaman dan koefisien gradasi. Nilai Cu (koefisien keseragaman) dan nilai Cc (koefisien gradasi) menentukan jenis tanah bergradasi baik maupun bergradasi buruk.

Koefisien keseragaman adalah koefisien yang menunjukkan kemiringan kurva atau menunjukkan sifat seragam tanah pasir. Semakin besar nilai koefisien keseragaman semakin landai kurva distribusi, semakin besar rentang distribusinya. Semakin kecil nilai koefisien keseragaman semakin curam kurva distribusi, yang artinya semakin kecil rentang distribusinya. Tanah berbutir kasar didefinisikan bergradasi baik jika tidak ada ukuran butiran yang menyolok dalam suatu rentang distribusi. Sedangkan tanah bergradasi buruk didefinisikan jika ukuran butirannya seragam dan jika terjadi loncatan ukuran butiran tanah atau disebut juga bergradasi senjang. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Gradasi Butiran berdasarkan kurva Analisa Saringan

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa kurva II dan III adalah tanah dengan gradasi buruk, dengan kurva II sebagai tanah dengan gradasi seragam, kurva III dengan gradasi senjang. Sedangkan kurva I menunjukkan tanah bergradasi baik. Selain itu, menurut standar yang

ada berikut klasifikasi tanah berdasarkan nilai C_u (koefisien keseragaman). Apabila tanah memiliki nilai C_u sama dengan 1 maka tanah hanya memiliki 1 ukuran butir, apabila nilai C_u antara 2 sampai 3 maka tanah memiliki gradasi buruk, dan nilai C_u lebih besar dari 6 maka tanah memiliki gradasi baik.

f. Kondisi drainase dan dimensi deposit atau endapan

Jika tekanan air pori berlebih dapat dengan cepat akan terdisipasi, maka kemungkinan tidak akan terjadi likuifaksi. Oleh karena itu, drainase dengan kerikil permabel atau lapisan kerikil dapat mengurangi potensi terjadinya likuifaksi. Selain itu, endapan alami yang terbentuk di danau, sungai, atau lautan cenderung membentuk lapisan konsistensi tanah lepas dan terjadi segregasi sehingga lebih rentan terhadap likuifaksi. Tanah yang sangat rentan terhadap likuifaksi terbentuk di lingkungan pengendapan *lacustrine*, *alluvial*, dan *marine*.

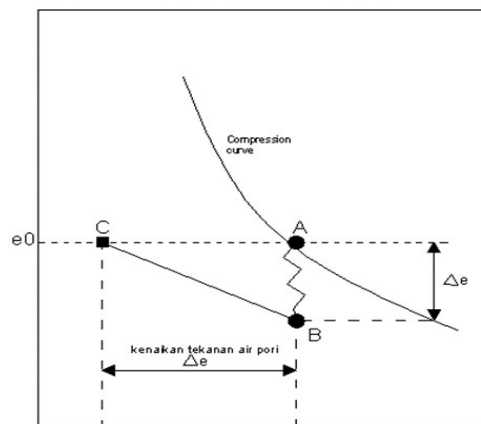
g. Historis lingkungan

Menurut Finn et al. (1970) dan Seed et al. (1975), historis lingkungan tanah dapat mempengaruhi potensi likuifaksi. Misalnya, tanah yang sudah lama mengendap telah mengalami guncangan seismik akan meningkatkan ketahanan likuifaksi dibandingkan dengan tanah baru yang sama dan memiliki kepadatan identik.

3. Mekanisme naiknya tekanan air pori

Akibat dari beban siklik, tanah mengalami konsolidasi dimana air keluar meninggalkan pori sehingga menimbulkan pengurangan volume

tanah dan permukaan air tanah menjadi lebih tinggi. Hal ini menyebabkan tekanan air pori meningkat, sebaliknya tegangan efektif tanah berkurang dengan demikian kekuatan geser juga berkurang dan dengan demikian kekuatan geser tanah juga berkurang. Hal ini dapat dijelaskan dengan Gambar 6.



Gambar 6. Skema Naiknya tekanan air pori akibat beban siklik (*Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquakes, Seed & Idriss, 1982*)

Pada keadaan awal sebelum diberi beban siklik, tanah berpasir yang mempunyai tegangan σ'_0 dan void ratio (angka pori) e_0 (titik A). Setelah diberi beban siklik struktur tanah pasir tersebut akan cenderung memadat (volume pori berkurang) yang berarti void ratio mengecil (titik B). Akibat tekanan air pori meningkat dan tegangan efektif menurun berdasarkan "rebound characteristic" tanah, penurunan tegangan efektif tanah ini akan menimbulkan penambahan pada volume tanah. Sampai pada proses ini air dianggap belum mengalami dissipasi (keluarnya air meninggalkan pori). Penambahan volume tanah tadi adalah sedemikian rupa sehingga void ratio

kembali mencapai e_0 (titik C). Hal ini berarti pengurangan volume akibat beban siklik dan penambahan volume akibat tegangan efektif yang berkurang adalah seimbang. Lebih lanjut beban siklik yang berkepanjangan akan terus mengurangi harga tegangan efektif dan bahkan naiknya permukaan air akan sampai menimbulkan dissipasi pada permukaan tanah, yang akan mengakibatkan volume total berkurang, sehingga harga void ratio sebesar e_0 tidak mungkin tercapai lagi, dan selanjutnya hal ini akan menimbulkan penurunan pada permukaan tanah.

4. Evaluasi likuifaksi dan masalah yang ditimbulkan.

Potensi likuifaksi pada suatu deposit tanah akan ditentukan oleh kombinasi beberapa komponen, antara lain :

- a. Indeks propertis tanah seperti modulus dinamis, karakteristik kelembaban, berat volume, gradasi butiran, kepadatan relatif, dan struktur tanah itu sendiri.
- b. Faktor lingkungan seperti jenis formasi tanah, sejarah seismic dan geologi, level muka air tanah, dan tegangan efektif tanah.
- c. Karakteristik gempa seperti intensitas guncangan pada tanah dan lama guncangan yang terjadi.

Dari beberapa faktor yang telah disebutkan diatas, tidak semua dari faktor tersebut dapat ditentukan besarnya secara langsung, akan tetapi dampak yang muncul dari ketiga faktor tersebut dapat digunakan atau masukan kedalam prosedur evaluasi potensi likuifaksi yaitu dengan melakukan uji beban siklik pada sampel tanah atau bisa dengan cara

pengukuran karakteristik likuifaksi pada tanah menggunakan beberapa prosedur pengujian di lapangan. Pada dasarnya, prosedur standar evaluasi likuifaksi antara lain:

- a. Menentukan besaran tegangan siklik yang muncul akibat pergerakan tanah pada saat gempa bumi, pada setiap kedalaman deposit tanah dan mengkonversi bentuk tegangan yang tidak beraturan tersebut sehingga memiliki besaran yang sama dalam bentuk tegangan siklik. Dengan kata lain, intensitas guncangan, lama guncangan, dan variasi guncangan yang terjadi akibat tegangan pada setiap kedalaman diubah menjadi suatu besaran yang dapat dihitung. Penentuan besaran siklik yang terjadi dapat dilakukan dengan cara menganalisa respon tanah terhadap tegangan yang terjadi.
- b. Menentukan besaran tegangan siklik dengan cara uji pembebanan di laboratorium yang diwakili oleh sampel tak terganggu yang dilakukan dengan variasi tekanan bebas yang telah ditentukan atau dengan cara mengkolerasikan propertis tanah dengan karakteristik di lapangan.
- c. Membandingkan antara tegangan geser yang terjadi akibat gempa bumi dengan hal-hal yang dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi untuk menentukan apakah deposit tanah berada dalam zona likuifaksi atau tidak.

Sebagaimana yang telah dijelaskan bahwa perilaku likuifaksi pada tanah bersifat merusak dan menimbulkan dampak negatif yang besar

terhadap stabilitas tanah dan bangunan di atasnya. Adapun dampak yang ditimbulkan dari perilaku likuifaksi adalah:

- a. Terjadinya penurunan hingga 5% dari ketebalan lapisan tanah yang terlikuifaksi.
- b. Terjadinya kehilangan daya dukung tanah lateral.
- c. Terjadinya kehilangan daya dukung tanah.
- d. Terjadinya pengapungan struktur yang dibenamkan dalam tanah.
- e. Meningkatkan tekanan tanah lateral tanah yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur penahan tekanan lateral tanah, seperti *quay walls*.
- f. Terjadinya lateral spreading (*limited lateral movements*).
- g. Terjadinya lateral flow (*extensive lateral movements*).

5. Parameter likuifaksi

Parameter likuifaksi merupakan parameter yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan kriteria likuifaksi yang terjadi pada deposit tanah. Dimana dalam hal ini, perilaku likuifaksi pada tanah dipengaruhi oleh 2 parameter utama yaitu kepadatan relatif (D_r) dan percepatan tanah maksimum dan gravitasi (a_{max}/g). Ada beberapa tahapan untuk menentukan daerah di kondisi lapangan yang terlikuifaksi akibat pengaruh beban siklik:

- a. Menentukan jenis (permodelan) gempa yang terjadi
- b. Menentukan waktu terjadinya tegangan geser yang dipengaruhi oleh gempa bumi pada kedalaman tertentu terhadap setiap lapisan pasir.

- c. Mengubah waktu terjadinya tegangan geser ini kedalam jumlah beban siklik (N).
- d. Menggunakan hasil dari uji laboratorium, untuk menentukan magnitude atau jumlah beban siklik yang diperlukan agar terjadinya likuifaksi di lapangan berdasarkan kedalaman tertentu.

C. KAYU

Kayu adalah bahan yang kita dapatkan dari tumbuh-tumbuhan (pohon-pohonan/trees) dan termasuk vegetasi alam. Kayu mempunyai 4 unsur esensial antara lain:

- a. Selulosa, unsur ini merupakan komponen terbesar pada kayu, meliputi 70% berat kayu.
- b. Lignin, merupakan komponen pembentuk kayu yang meliputi 18% - 28% dari berat kayu. Komponen tersebut berfungsi sebagai pengikat satuan struktural kayu dan memberikan sifat keteguhan kepada kayu.
- c. Bahan-bahan ekstrasi, komponen ini yang memberikan sifat pada kayu, seperti: bau, warna, rasa, dan keawetan. Selain itu, karena adanya bahan ekstrasi ini, maka kayu bisa didapatkan hasil yang lain misalnya: tannin, zat warna, minyak, getah, lemak, malam, dan lain sebagainya.
- d. Mineral pembentuk abu, komponen ini tertinggal setelah lignin & selulosa terbakar habis. Banyaknya komponen ini 0.2%-1% dari berat kayu.

1. Bagian-bagian kayu

Kayu terdiri atas beberapa bagian yang tersusun menjadi 7 bagian seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Struktur bagian dalam kayu

- Kulit luar, lapisan yang berada paling luar dalam keadaan kering berfungsi sebagai pelindung bagian yang lebih dalam pada kayu.
- Kulit dalam, lapisan yang berada di sebelah dalam kulit luar yang bersifat basah dan lunak, berfungsi mengangkut bahan makanan dari daun ke bagian lain.
- Kayu gubal, berfungsi sebagai pengangkut air berikut zat bahan makanan ke bagian-bagian pohon yang lain.
- Kayu teras, berasal dari kayu gubal, biasanya bagian-bagian sel yang sudah tua dan kosong ini terisi zat-zat lain yang berupa zat ekstrasi.

- e. Cambium, lapisan yang berada di sebelah kulit, jaringan ini ke dalam membentuk kayu baru, sedangkan ke luar membentuk sel-sel jangat (kulit).
- f. Garis/Jari-jari teras, jari-jari retakan yang timbul akibat penyusutan pada waktu pengeringan yang tidak teratur.
- g. Galih/hati, bagian ini mempunyai umur paling tua, karena galih (hati) ini ada dari sejak permulaan kayu itu tumbuh.

2. Karakteristik kayu

Kayu berasal dari berbagai jenis pohon yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Bahkan kayu yang berasal dari satu pohon memiliki karakteristik yang agak berbeda, jika dibandingkan dengan bagian ujung dan pangkalnya. Dalam hubungan itu maka ada baiknya jika karakteristik kayu tersebut diketahui terlebih dahulu, sebelum kayu dipergunakan sebagai bahan bangunan, industri kayu maupun untuk pembuatan perabot.

Karakteristik dimaksud antara lain yang bersangkutan dengan karakteristik anatomi kayu, karakteristik fisik, karakteristik mekanik dan karakteristik kimianya.

a. Karakteristik sifat fisik kayu

Yang termasuk sifat fisika kayu ini antara lain adalah: kadar air kayu, penyusutan atau perubahan dimensi kayu, berat jenis kayu, sifat elektrisnya, sifat-sifat resonansi dan akustiknya, daya apung dan layang,

sifat energi dan sebagainya. Akan tetapi yang dianggap mendasar sifat fisik pada kayu yaitu:

- 1) Kadar Air Kayu yaitu banyaknya air dalam sepotong kayu yang dinyatakan secara kuantitatif dalam persen terhadap berat kering tanurnya.
- 2) Perubahan dimensi kayu, kondisi kayu sangat ditentukan oleh kandungan air didalam kayu tersebut. Kandungan air kayu dapat berkurang dapat pula bertambah.
- 3) Berat jenis kayu, adalah nilai perbandingan berat suatu kayu terhadap volume air/akuades yang sama dengan kayu tersebut.

b. Karakteristik mekanis kayu

Karakteristik mekanis atau kekuatan kayu adalah kemampuan kayu untuk menahan beban dari luar. Yang dimaksud dengan beban dari luar adalah gaya-gaya di luar benda yang mempunyai kecenderungan untuk mengubah bentuk dan besarnya benda. Kekuatan kayu memegang peranan penting dalam penggunaan kayu sebagai bahan bangunan, industri perabot dan penggunaan lain. Karakteristik mekanis kayu antara lain kekuatan tarik, kekuatan tekan, kekuatan lentur, kekuatan geser, kompresi, kuat belah, keuletan kayu dan kekerasan kayu.

c. Karakteristik kimia kayu

Komponen kimia di dalam kayu, mempunyai arti yang penting, karena menentukan kegunaan sesuatu jenis kayu. Juga dengan

mengetahuinya, kita dapat membedakan jenis-jenis kayu. Susunan kimia kayu di gunakan sebagai pengenalan ketahanan kayu terhadap serangan makhluk perusak kayu.

Di samping sekian banyak karakteristik kayu yang berbeda satu sama lain, ada beberapa karakteristik umum yang terdapat pada semua kayu yaitu:

- a. Semua batang pohon mempunyai pengaturan vertikal dan sifat simetri radikal.
- b. Kayu tersusun dari sel-sel yang memiliki tipe bermacam-macam dan susunan dinding selnya terdiri dari senyawa-senyawa kimia berupa selulosa dan hemiselulosa (unsur karbohidrat) serta berupa lignin.
- c. Semua kayu bersifat anisotropik, yaitu memperlihatkan sifat-sifat yang berlainan jika diuji menurut tiga arah utamanya (longitudinal, tangensial dan radial).
- d. Kayu merupakan suatu bahan yang bersifat higroskopik, yaitu dapat kehilangan atau dapat bertambah kelembapannya akibat perubahan kelembaban dan suhu udara di sekitarnya.

3. Klasifikasi mutu kayu

Klasifikasi mutu kayu merupakan penggolongan kayu secara visual terkait dengan kualitas muka kayu, seperti: cacat, pola serat, dan kelurusan batang, serta kadar air kayu.

Menurut Ariestadi (2008), terdapat 3 (tiga) macam mutu kayu dalam perdagangan, yaitu: mutu A, mutu B dan mutu C. Kayu mutu C adalah kayu

yang tidak termasuk dalam golongan kayu mutu A dan mutu B. Menurut Peraturan Konstruksi Kayu Indonesia (PKKI) 1961, kayu mutu A dan mutu B harus memenuhi syarat sebagai berikut:

a. Syarat kayu mutu A:

- 1) Kayu harus kering udara (kadar air $\leq 15\%$).
- 2) Besar mata kayu tidak melebihi $1/6$ lebar muka kayu, atau tidak boleh lebih besar dari 3,5 cm.
- 3) Kayu tidak boleh mengandung kayu gubal (wanvlak) yang lebih besar dari $1/10$ lebar muka kayu.
- 4) Miring arah serat Tangen maksimum $1/10$.
- 5) Retak arah radial tidak boleh lebih besar dari $1/4$ tebal kayu dan retak arah lingkaran tumbuh tidak boleh lebih besar dari $1/5$ tebal kayu.

b. Syarat kayu mutu B:

- 1) Kayu kering udara dengan kadar air $15\% - 30\%$.
- 2) Besar mata kayu tidak melebihi $1/4$ lebar muka kayu, atau tidak boleh lebih besar dari 5 cm.
- 3) Kayu tidak boleh mengandung kayu gubal (wanvlak) yang lebih besar dari $1/10$ lebar muka kayu.
- 4) Miring arah serat Tangen maksimum $1/7$.
- 5) Retak arah radial tidak boleh lebih besar dari $1/3$ tebal kayu dan retak arah lingkaran tumbuh tidak boleh lebih besar dari $1/4$ tebal kayu.

4. Klasifikasi kekuatan kayu

Klasifikasi kekuatan kayu didasarkan pada kekuatan lentur dan kekuatan tekan pada keadaan kayu kering udara. Kekuatan lentur ditentukan berdasarkan tegangan lentur maksimum yang diterima oleh kayu hingga putus (tegangan lentur mutlak). Sedangkan kekuatan tekan ditentukan berdasarkan tegangan tekan maksimum yang diterima oleh kayu hingga pecah (tegangan tekanan mutlak). Besarnya angka tegangan kayu dinyatakan dengan satuan kg/cm^3 . Biasanya semakin kuat suatu jenis kayu semakin besar pula Berat Jenis (BJ) nya. Selanjutnya, untuk tingkat / kelas kekuatan kayu dilihat dari 3 faktor, yaitu kuat lentur dalam satuan kg/cm^2 , kuat desak dalam satuan kg/cm^2 , serta berat jenis kayu ditampilkan pada pada Tabel 2.

Tabel 2. Kekuatan kayu menurut Jenis pengelompokannya

Kelas Kuat	Tegangan Lentur Mutlak (kg/cm^3)	Tegangan Tekanan Mutlak (kg/cm^3)	Berat Jenis (BJ)
I	≥ 1100	≥ 650	$\geq 0,90$
II	1100 – 725	650 – 425	0,90 – 0,60
III	725 – 500	425 – 300	0,60 – 0,40
IV	500 – 360	300 – 215	0,40 – 0,30
V	≤ 360	≤ 215	$\leq 0,30$

5. Cerucuk kayu

Cerucuk kayu yaitu salah satu jenis perkuatan tanah yang biasanya digunakan pada didaerah dengan kondisi tanah yang kurang stabil seperti jenis tanah lembek ataupun tanah gambut dengan elevasi muka air yang cukup tinggi. Untuk perencanaan kedalaman dan jarak antara tiang cerucuk harus dilakukan berdasarkan pemeriksaan tanah.

Cerucuk kayu tiang pendek dengan menggunakan kayu atau bambu telah digunakan di Indonesia, lebih populer tiang ini disebut "cerucuk" (tiang ramping). Biasanya tiang yang digunakan berukuran panjang 4 hingga 6 m dan dengan diameter 10cm. Tiang juga membantu memikul lalu lintas selama pelaksanaan konstruksi. Tiang kayu dengan sambungan telah berhasil digunakan sampai kedalaman 12m. Penggunaan tiang kayu dengan panjang 4m di bawah timbunan pasca lapisan lempung lunak yang dalam akan dapat mengurangi beda penurunan yang terjadi meskipun besarnya sangat sulit untuk dihitung. Pada gambut berserat, daya dukung yang diberikan oleh tiang pendek yang tidak menembus lapisan yang lebih keras dibawahnya sangat terbatas sampai tidak ada gunanya. Kepedulian akan masalah lingkungan juga harus diperhatikan bila solusi dengan menggunakan tiang kayu ini yang menjadi pilihan. Mengacu pada petunjuk teknik Tata Cara Pelaksanaan Pondasi Cerucuk Kayu yang ditebitkan oleh Dinas Pekerjaan Umum ada beberapa syarat yang harus dipenuhi dalam penggunaan bahan cerucuk kayu seperti pada Tabel 3.

Tabel. 3.Persyaratan cerucuk kayu

No	Uraian	Persyaratan
1	Diameter	Minimum 8 Cm,, maksimum 15 cm
2	Panjang	Minimum 3,5m, maksimum 6 in
3	Kelurusan	Cukup lurus, tidak belok dan bercabang
4	Kekuatan	Minimum kelas kuat II I PKKI 1973
5	Tegangan	Minimum kelas kuat III untuk mutu A PKKI 1973

(Sumber: Dinas Pekerjaan Umum)

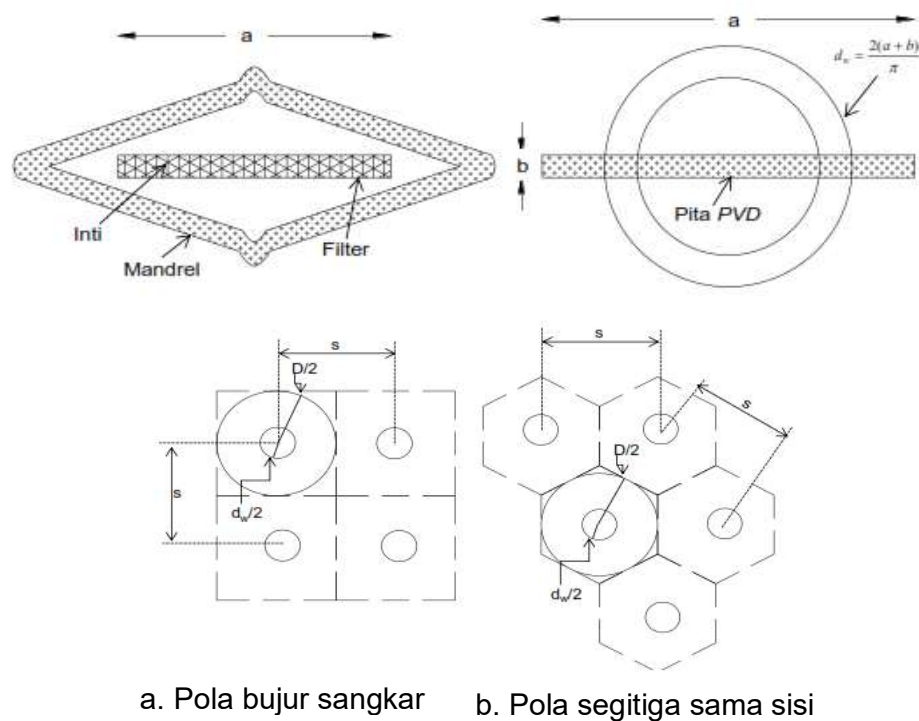
D. Prefabricated vertical drain (PVD)

Penggunaan prefabricated vertical drain (PVD) mulai dikembangkan pada tahun 1990 dan banyak digunakan dalam proyek di Eropa dan Jepang pada tahun 1940-an. PVD memiliki dimensi yang sangat kecil dan dipasang menggunakan mandrel dengan ujung tertutup (closed-end mandrel). Ukuran dan tampang melintang mandrel mempengaruhi banyaknya gangguan pada tanah. Akan tetapi, derajat gangguan pada umumnya lebih kecil dibandingkan dengan gangguan pada pemasangan drainase pasir vertikal. (Hardiyatmo HC, 2010). Perancangan drainase vertikal membutuhkan prediksi kecepatan pengaliran kelebihan tekanan air pori akibat beban akibat rembesan arah radial yang menuju drainase vertikal serta kontribusi drainase vertikal.

Menurut SNI 8460:2017 Ruang lingkup pekerjaan Prefabricated Vertical Drain (PVD) dapat digunakan pada pembangunan/pekerjaan di darat dan/atau di laut untuk tujuan mengurangi besaran penurunan setelah pembangunan, mempercepat proses konsolidasi dengan mengurangi panjang lintasan disipasi tegangan air pori berlebih, meningkatkan stabilitas (dengan menaikkan tegangan efektif dalam tanah) dan mengurangi/mitigasi efek likuifaksi. Dari setiap tujuan di atas akan memperbaiki kondisi tanah secara keseluruhan. Beberapa contoh aplikasi teknik ini seperti timbunan jalan dan jalan kereta api, pembangunan dan perkuatan tanggul-tanggul, prepembebanan untuk area penimbunan/tempat pembuangan, konstruksi lepas pantai dan dekat pantai, reklamasi, pelabuhan dan lapangan terbang.

Prefabricated Vertical Drain (PVD) pada umumnya berpenampang empat persegi panjang harus dinyatakan dalam bentuk diameter ekuivalen (dw) karena teori konsolidasi dengan drainase vertikal mengasumsikan bahwa air pori dialirkan oleh drainase vertikal penampang lingkaran. Diameter ekuivalen *PVD* didefinisikan sebagai diameter lingkaran drainase yang mempunyai kemampuan drainase yang sama dengan *PVD*.

Diameter ekuivalen dianggap hanya dipengaruhi oleh geometri drainase dan konfigurasinya dan tidak tergantung pada kondisi lapisan, sifat tanah, dan pengaruh pemasangan. Diameter ekuivalen dihitung berdasarkan ilustrasi pada Gambar 8. Jika keliling drainase vertikal bulat = πdw dan keliling drainase empat persegi panjang = $2(a+b)$, maka: $dw = 2(a+b)/\pi$



Gambar 8. Penentuan diameter ekuivalen PVD dan Pengaturan jarak drainase vertikal

Pengaturan jarak dalam drainase vertikal merupakan hal yang sangat penting. Hal ini sesuai dengan fungsi PVD untuk mengurangi panjang lintasan pengaliran. Jarak drainase vertikal tergantung pada jenis dan permeabilitas tanah. Hubungan antara jarak drainase vertikal (S) dengan diameter pengaruh (D) diperlihatkan pada Gambar 15. $D = 1,13 s$ (pola bujur sangkar) dan $D = 1,05 s$ (pola segitiga sama sisi).

E. Landasan Teori Perbaikan Tanah Pasir Lepas.

Menurut Suyono.s dan Kazuto N. (2000) bilamana suatu tanggul dari tanah dibangun di atas tanah pondasi yang terdiri dari tanah pasir lepas, maka kadang-kadang kita memperbincangkan stabilitas statisnya selama dan sesudah pelaksanaan. Berlainan dengan tanah pondasi yang dari tanah kohesi, maka kita tidak dapat mengharapkan suatu peningkatan kekuatan tanah berpasir itu. Jika suatu gaya gempa bekerja pada tanah pondasi berpasir maka sering tanah pasir itu mengalami peristiwa likuifaksi yang dapat mengakibatkan kerusakan yang berat.

Metode dasar untuk perbaikan tanah pondasi yang terdiri dari lapisan berpasir yang sering diterapkan saat ini adalah sama dengan metode yang diterapkan untuk pondasi tanah kohesi, yakni berdasarkan konsepsi untuk memperbaiki karakteristik mekanis lapisan berpasir itu dengan tindakan pemampatan yaitu dengan peningkatan kepadatan pasir. Perbaikan kepadatan bermanfaat untuk peningkatan pemampatan yang berarti juga menghindarkan penurunan tanah pondasi. Masalah lain yang terjadi pada

tanah kepasiran adalah masalah stabilitas pekerjaan penggalian atau peristiwa rembesan air tanah.

1. Metode tiang pasir padat.

Metode ini bukan hanya bisa digunakan untuk memperbaiki tanah tiang terdiri dari tanah kohesif akan tetapi metode ini juga dapat digunakan untuk memperbaiki tanah yang terdiri dari tanah berpasir lepas. Pada prinsipnya metode ini berdasarkan efek pemampatan oleh fibrasi selama pemancangan tiang-tiang pasir. Metode ini bertujuan untuk mengurangi angka pori tanah yang sekaligus meningkatkan gaya geser oleh kepadatan yang meningkat.

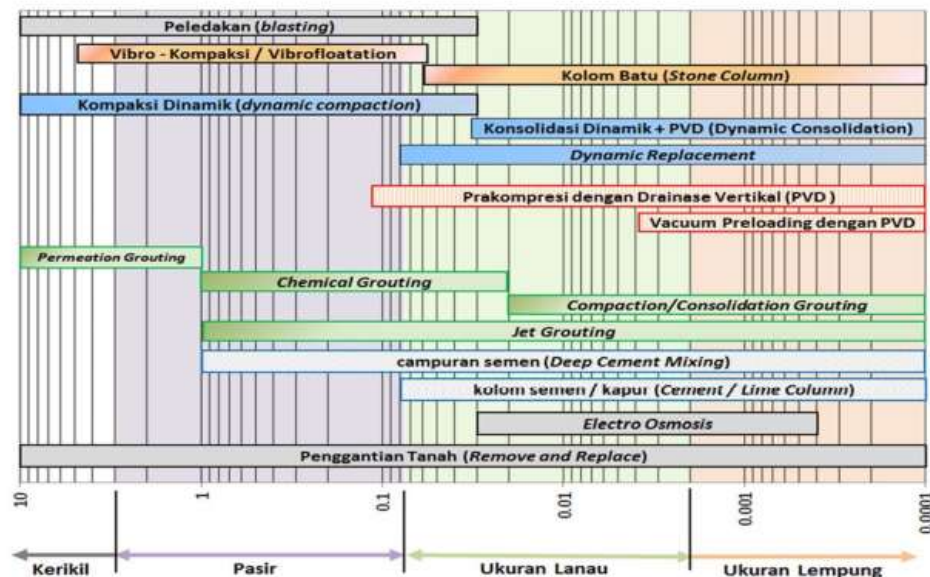
2. Metode vibro flotasi (*vibroflotation method*)

Pada metode ini, air disemprotkan ke dalam lapisan dengan bantuan suatu vibrator silinder. Air yang disemprotkan dan bergetar itu dapat memadatkan tanah pondasi yang terdiri dari tanah berpasir. Bersamaan dengan penyemprotan air, juga dimasukkan kerikil yang akan mengisi rongga-rongga yang terjadi oleh penyemprotan air. Tujuan pengisian dengan kerikil adalah sama dengan tujuan tiang pasir padat.

Pada prinsipnya menurut Tanaka, et al (1991) menjelaskan bahwa bahaya likuifaksi ini dapat ditanggulangi dengan dua teknik yaitu dengan cara memperbaiki sifat-sifat tanah, dan memperbaiki kondisi yang berkaitan dengan tegangan, deformasi, dan tekanan air pori. Namun secara umum penanganan likuifaksi dapat dilakukan dengan cara memadatkan tanah di lapangan yang memakai teknik antara lain teknik getaran (*vibro-*

compaction), perbaikan tanah dengan cara *deep soil mixing*, atau pemadatan dinamis (*dynamic compaction*). Pada kebanyakan penelitian, teknik perbaikan tanah (*ground improvement*) yang sering digunakan adalah teknik kolom-batu (*stone-column*) atau tiang-batu (*stone-piers*). Teknik ini mampu mengurangi resiko kerusakan struktur akibat peristiwa likuifaksi (Mitchell, et al., 1995; Martin, 2000). Namun demikian teknik perbaikan tanah lainnya seperti *cement/lime-column* dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengurangi resiko likuifaksi (Seed, et al 2001; Seed, et al, 2003). Selain itu, teknik kolom ini juga dapat digunakan sebagai pondasi untuk bangunan gedung (Kempfert, 2003).

Menurut SNI 8460:2017 adapun Kriteria penentuan jenis perbaikan tanah Berdasarkan hasil penyelidikan tanah secara garis besar jenis perbaikan tanah yang tepat untuk bangunan atau infrastruktur yang akan didirikan dapat ditentukan berdasarkan Gambar 9.



Gambar 9. Jenis-jenis metode perbaikan tanah

F. Matriks Studi Terdahulu

Penelitian ini memakai dasar beberapa penelitian yang pernah dilakukan dari berbagai penelitian yang menyangkut perbaikan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi. Ada beberapa penelitian terdahulu terkait tentang teknik perbaikan tanah (*ground improvement*) yang sering digunakan. Dari pengamatan tersebut sampai sekarang belum ada penelitian tentang uji model cerucuk kayu pada tanah potensi likuifaksi.

Richard Salauwe, et al (2015) Analisa Perkuatan Tanah Dengan Bambu Sebagai Micro Pile Pada Tanah Liquefaction (Proyek PLTU Manokwari) Hasil dari penelitian menyatakan bahwa daya dukung tanah terlikuifaksi awal adalah 1992,145 KN/m, setelah diberikan perkuatan dengan bambu pemodelan micro pile, hasil daya dukung meningkat menjadi 2219,355 dari metode Meyerhof, dan 3609,723 dari metode Luciano Decourt.

Helen Mitrani and S.P.G. Madabhushi, (2008) Ditemukan bahwa tiang mikro-tiang miring tidak memiliki efek yang merugikan pada kinerja struktur selama dan setelah gempa bumi. Mungkin juga bahwa kehadiran mereka dapat mengurangi *settlements* struktural dalam gempa bumi yang menyebabkan pencairan ke kedalaman kurang dari pada zona yang diperbaiki. Namun, tidak ada bukti konklusif yang diperoleh untuk menunjukkan bahwa micro pile secara signifikan menahan gerakan tanah

lateral karena geser monotonik dari struktur atau menghambat migrasi tekanan pori berlebih dari medan bebas ke zona pondasi.

Anasua GuhaRay, et al (2017) *Effect of micropiles on liquefaction of cohesionless soil using shake table tests*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, dengan menggunakan tiang mikro, respon tanah gembur tanpa kohesi di bawah pembebanan seismik dapat ditingkatkan secara signifikan dan potensi likuifaksi dari tanah jenuh gembur menurun drastis. Rasio jarak tanam terhadap diameter 6 sampai 7 sangat efektif dalam mengontrol likuifaksi untuk percepatan puncak tanah 0,4 g. Ketika nilai akselerasi puncak tanah berkurang, rasio jarak dan diameter optimum *mikro pile* meningkat. Oleh karena itu, ketahanan likuifaksi tanah jenuh berpasir dapat ditingkatkan jika jarak dan diameter *mikro pile* dipilih dengan benar.

Arsalan Salahi, et al (2015) *Evaluation of Stone Columns versus Liquefaction Phenomenon*. Hasil yang diperoleh bahwa likuifaksi terjadi pada tanah yang kurang kohesi. Likuifaksi lebih terasa selama gempa bumi di mana tekanan air pori berlebih meningkat pesat selama pembebanan siklik. Dengan kata lain, jika tegangan efektif menjadi nol selama kenaikan tersebut, maka likuifaksi adalah hasil akhirnya dan sebenarnya likuifaksi terjadi saat pasir mendidih, kehilangan daya dukung bebannya. Ada banyak teknik yang saat ini tersedia yang dapat mencegah likuifaksi. Salah satu teknik tersebut adalah dengan menggunakan metode kolom batu (*Stone Columns*).

Reza Ziaie Moayed and Seyed Abolhassan Naeini. (2012) *Improvement of Loose Sandy Soil Deposits using Micropiles*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan *mikro pile*, respon tanah gembur berpasir berlumpur di bawah pembebanan permukaan dapat ditingkatkan secara signifikan dan daya dukung tanah berpasir gembur meningkat pesat. Juga, modulus reaksi tanah dasar (K) meningkat. Yaitu dapat dilihat dengan Nilai SPT lapisan tanah yang meningkat setelah perbaikan tanah dengan pemasangan *mikro pile*. Oleh karena itu, ketahanan likuifaksi tanah berpasir juga ditingkatkan. Beberapa penelitian terdahulu yang mendukung dan berkaitan dengan likuifaksi dapat dilihat pada Tabel 4 Matriks Penelitian Terdahulu. Sehingga untuk teoritical background persamaan dan perbedaan dari penelitian ini dibuat dalam Gambar 10. Matriks Penelitian Yang Sejenis (*Research Mapping*). Trakait dengan jenis tanah yang digunakan, jenis material perkuatan dan model pengujian yang dilakukan. Sehingga dengan penelitian ini, diperoleh model penggunaan cerucuk kayu sebagai perkuatan pada tanah berpotensi likuifaksi yang sesuai untuk mencegah terjadinya likuifaksi.

No	Peneliti	Material Tanah		Jenis Penguatan											Model Pengujian				
				Mikro Pile					Geosintesis & Grafel	Stone column	Sandy column	Kolom sement	Pile	PVD					
		Silty clay	Silty sand	Sand	Cerucuk Bambu	Cerucuk kayu	Hybrid Pile	Baja							Composit				
1	Richard Salauwe, dkk. (2015)																		
2	Helen Mitrani, dkk. 2008																		
3	Anasua GuhaRay, dkk 2017																		
4	Arsalan Salahi, dkk 2015																		
5	Klaus Dietz, dkk. 2006																		
6	Reza Ziaie Moayed, dkk. 2012																		
7	Nima Ranbar Malidareh, dkk 2008																		
8	Waseim R. Azzam, dkk. 2016																		
9	Abdoulah Nandjar, dkk. 2014																		
10	Hendra Setaawan, dkk 2018																		
11	Jeong-Ho Ryu, dkk 2013																		
12	Pelln Tohumcu Özener, dkk. 2008																		
13	Ryo Hashimoto, dkk. 2016																		
14	Agus Setyo Muntohar dkk. 2008																		
15	X. Z. Ling, dkk 2013																		
16	Masaho Yoshida dkk 2020																		
17	Armin W. Stuedlein, dkk 2016																		
18	Wen-Yi Hung, dkk 2017																		
17	Tri Harianto, dkk 2015																		
18	Y. Sandiyutama, dkk 2015																		
19	Suyadi, dkk 2021																		

Gambar 10. Matriks Penelitian Yang Sejenis (*Research Mapping*).

Tabel 4. Matriks Penelitian Terdahulu.

NO	PENELITI / TAHUN	JUDUL	HASIL YANG DIPEROLEH	PUBLIKASI
1	Richard Salauwe, Fabian J. Manoppo dan Saartje Monintja, (2015)	Analisa Perkuatan Tanah Dengan Bambu Sebagai Micro Pile Pada Tanah Liquefaction (Proyek PLTU Manokwari)	Hasil dari penelitian menyatakan bahwa daya dukung tanah terlikuifaksi adalah 1992,145 KN/m, setelah diberikan perkuatan dengan bambu pemodelan micropile, hasil daya dukung meningkat menjadi 2219,355 dari metode Meyerhof, dan 3609,723 dari metode Luciano Decourt. Sedangkan menggunakan bantuan program Plaxis 3D, daya dukung menjadi lebih kecil yaitu 7,36 KN. Sedangkan untuk penurunan tanah setelah terlikuifaksi sebesar 2,987127 mm, dan setelah perkuatan, penurunan menjadi 0,82717 mm dari Qp dan Qs meyerhof, dan untuk Qp dan Qs Luciano Decourt 1,990 mm. Jika di dibandingkan dengan program plaxis 3D, penurunan yang terjadi akan lebih kecil = 0,0022940 mm, dari pada cara analitisnya.	Jurnal Ilmiah Media Engineering Vol.5 No.2, September 2015 (351-361) ISSN: 2087-9334
2	Helen Mitrani and S.P.G. Madabhushi, 2008	Centrifuge modelling of inclined micro-piles for liquefaction remediation of existing buildings.	Ditemukan bahwa tiang mikro (tiang miring) tidak memiliki efek yang merugikan pada kinerja struktur selama dan setelah gempa bumi. Mungkin juga bahwa kehadiran mereka dapat mengurangi <i>settlements</i> struktural dalam gempa bumi yang menyebabkan pencairan ke kedalaman kurang dari pada zona yang diperbaiki. Namun, tidak ada bukti konklusif yang diperoleh untuk menunjukkan bahwa mikro-tiang miring secara signifikan menahan gerakan tanah lateral karena geser monotonik dari struktur atau menghambat migrasi tekanan pori berlebih dari medan bebas ke zona pondasi.	Geomechanics and Geoengineering: An International Journal Vol. 3, No. 4, December 2008, 245--256
3	Anasua GuhaRay, Yunus Mohammed, S. Harisankar,	Effect of micropiles on liquefaction of cohesionless soil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa, dengan menggunakan tiang mikro, respon tanah gembur tanpa kohesi di bawah pembebanan seismik dapat ditingkatkan secara signifikan dan potensi likuifaksi dari tanah jenuh gembur menurun drastis.	Innov. Infrastruct. Solut. (2017) 2:13 DOI 10.1007/s41062-017-0064-9

	Manookare S. Gowre, 2017	using shake table tests	Rasio jarak tanam terhadap diameter 6 sampai 7 sangat efektif dalam mengontrol likuifaksi untuk percepatan puncak tanah 0,4 g. Ketika nilai akselerasi puncak tanah berkurang, rasio jarak dan diameter optimum mikro pile meningkat. Oleh karena itu, ketahanan likuifaksi tanah jenuh berpasir dapat ditingkatkan jika jarak dan diameter mikropil dipilih dengan benar.	
4	Arsalan Salahi, Hamed Niroumand, Khairul Anuar Kassim, 2015	Evaluation of Stone Columns versus Liquefaction Phenomenon	Likuifaksi terjadi pada tanah yang kurang kohesi. Likuifaksi lebih terasa selama gempa bumi di mana tekanan air pori berlebih meningkat pesat selama pembebanan siklik. Dengan kata lain, jika tegangan efektif menjadi nol selama kenaikan tersebut, maka likuifaksi adalah hasil akhirnya dan sebenarnya likuifaksi terjadi saat pasir mendidih, kehilangan daya dukung bebannya. Ada banyak teknik yang saat ini tersedia yang dapat mencegah likuifaksi. Salah satu teknik tersebut adalah dengan menggunakan kolom batu.	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , Vol. 20 [2015], Bund. 2 Available at ejge.com .
5	Klaus Dietz, Andre Schurmann, 2006	Foundation Improvement of historic buildings by micro piles, Museum Island, Berlin and St. Kolumba, Cologne	Dalam kasus seperti itu tumpukan mikro sering digunakan untuk rehabilitasi pondasi. Dua contoh, Pulau Museum di Berlin dan St. Kolumba di Koln, telah diambil untuk menunjukkan fleksibilitas yang tinggi dan cakupan luas dari penggunaan metode ini.	7 th ISM workshop, Schrobenhausen, 2006
6	Reza Ziaie Moayed and Seyed Abolhassan Naeini. 2012	Improvement of Loose Sandy Soil Deposits using Micropiles	Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan mikropile, respon tanah gembur berpasir berlumpur di bawah pembebanan permukaan dapat ditingkatkan secara signifikan dan daya dukung tanah berpasir gembur meningkat pesat. Juga, modulus reaksi tanah dasar meningkat. Nilai SPT lapisan tanah meningkat setelah perbaikan tanah dengan pemasangan mikropile. Oleh karena itu, ketahanan likuifaksi tanah berpasir juga ditingkatkan.	KSCE Journal of Civil Engineering (2012) 16(3):334-340 DOI 10.1007/s12205-012-1390-2

7	Nima Ranjbar Malidareh, Asskar Janalizadeh Choobbasti, 2008	Mitigation of Liquefaction Using Stone Columns	Analisis numerik untuk implementasi kolom batu di daerah dengan risiko likuifaksi tinggi menunjukkan efisiensi yang tinggi dari teknik ini untuk mengurangi resiko likuifaksi.	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , Vol. 13, Bund. F Available at ejge.com.
8	Jin Man Kim 2014	Performance Evaluation of Seismic Foundation Isolation System	Hasil pengujian model menunjukkan bahwa sistem Terak baja digunakan sebagai bahan isolasi pondasi seismik efektif dalam mereduksi gaya seismik yang bekerja pada struktur jembatan.	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , Vol. 19 [2014], Bund. E Available at ejge.com.
9	Waseim R. Azzam and Ahmed A. Farouk 2016	Performance of Reinforced Sandy Soil under Uniform Shaking	Hasil pengujian menunjukkan bahwa pembebanan dinamis meningkatkan kinerja tanah berpasir dan meningkatkan kekompakannya. Penguatan yang digunakan memiliki pengaruh yang cukup besar dalam mengurangi penurunan pondasi di bawah guncangan lateral dan menghasilkan interlock dinamis.	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , Vol. 21 [2016], Bund. 04 Available at ejge.com.
10	Abdoullah Namdar and Fadzil Mat Yahaya, 2014	Recent Advances on Study of Liquefaction and Time to Failure of Sandy Subsoil	Hasil penelitian telah mengungkapkan perilaku likuifaksi yang mendekati realistis dan waktu hingga kegagalan tanah. Hal ini dipengaruhi oleh gaya dinamis menginduksi tekanan air pori dan menyebabkan likuifaksi dinamis pada lapisan tanah berpasir. Karakteristik gaya dinamis bersama dengan sifat mekanik tanah bertanggung jawab atas besarnya likuifaksi dinamis dan waktu kegagalan tanah.	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , Vol. 19 [2014], Bund. G Available at ejge.com.
11	Hendra Setiawan , Yuko Serikawa, Wataru Sugita, Hajime Kawasaki and Masakatsu Miyajima, 2018	Experimental study on mitigation of liquefaction-induced vertical ground displacement by using gravel and geosynthetics	Dengan melakukan serangkaian uji <i>shaking table</i> , dipastikan bahwa pergeseran tanah vertikal menurun dengan penggunaan geosintetik dan kerikil masing-masing hingga 54% dan 32% untuk keadaan pasir lepas dan pasir padat. Selain itu, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan perbedaan penurunan antara kondisi pasir lepas dan pasir padat sekitar 62%.	Geoenvironmental Disasters (2018)
12	Jeong-Ho Ryu , and Jin Man Kim	Seismic Performance of Stone- Column	Hasil percobaan menunjukkan bahwa kolom batu dapat mencegah deformasi geser yang besar seperti pelunakan	<i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> ,

	2013	Reinforced Marine Soft Soil	siklik pada endapan lempung. Akan tetapi, juga diperlihatkan bahwa percepatan permukaan pada endapan lempung yang diperbaiki dapat diperkuat lebih dari pada pada endapan lempung yang tidak berkembang ketika mengalami gerakan seismik periodik yang pendek.	Vol. 18 [2013], Bund. C Available at ejge.com.
13	Abdul Hakam Dan Helmy Darjanto, 2013	Penelusuran Potensi Likuifaksi Pantai Padang Berdasarkan Gradasi Butiran dan Tahanan Penetrasi Standar	Hasil penelusuran potensi likuifaksi untuk daerah. Pantai Padang menghasilkan bahwa gradasi butiran tanah dilokasi tersebut memiliki potensi likuifaksi. Hasil tersebut dikompilasikan dengan analisis potensi likuifaksi berdasarkan nilai pukulan penetrasi standar. Kedalaman tanah yang berpotensi terlikuifaksi untuk Pantai Padang berada pada lapisan dengan kedalaman kurang dari 10m.	<i>Jurnal Teknik Sipil ITB</i> , vol. 20, no. 1, 2013, pp. 33-38, doi: 10.5614/jts.2013.20.1.4 .
14	Pelin Tohumcu Özener, Kutay Özeydin Mehmet Berilgen. 2009	Numerical and Physical Modeling of Liquefaction Mechanisms In Layered Sands	Hasil analisis eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa keberadaan lapisan lumpur yang kurang permeabel di dalam endapan pasir dan adanya lapisan pasir lepas yang mendasari endapan pasir padat dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perilaku likuifaksi.	Bulletin of Earthquake Engineering 7(1):199-219 DOI: 10.1007/s10518-008-9076-3
15	Ryo Hashimoto, Masaho Yoshida, Serina Hashimoto and Yoshinao Kurachi, 2016	Shaking Table Tests On A Deformation Mitigation Method For Road Embankment During Liquefaction By Using Gravel And Geosynthetics	Hasil Uji Shaking table skala kecil dalam medan gravitasi 1-g dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas metode mitigasi deformasi tanggul jalan selama likuifaksi dengan menggunakan geosintetik yang diapit di antara kerikil dapat menahan deformasi tanggul, dan efek ini dapat menjaga bentuk tanggul. Lapisan kerikil dapat menghilangkan tekanan air pori berlebih selama likuifaksi dengan segera, dan menahan deformasi geser di bawah tanggul karena permeabilitasnya yang tinggi. Selanjutnya, lapisan komposit yang terdiri dari kerikil dengan geosintetik dapat berfungsi sebagai pelat kaku dengan permeabilitas tinggi.	Geosynthetics Engineering Journal 2016 Volume 31 doi: 10.5030/jcigsjournal.31.255
16	Agus Setyo Muntohar, Anita	Aplikasi Teknik Kolom-Semen	Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan tanah baik perlawanan ujung (q_c) dan perlawanan gesek (q_f) di sekitar	Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi II

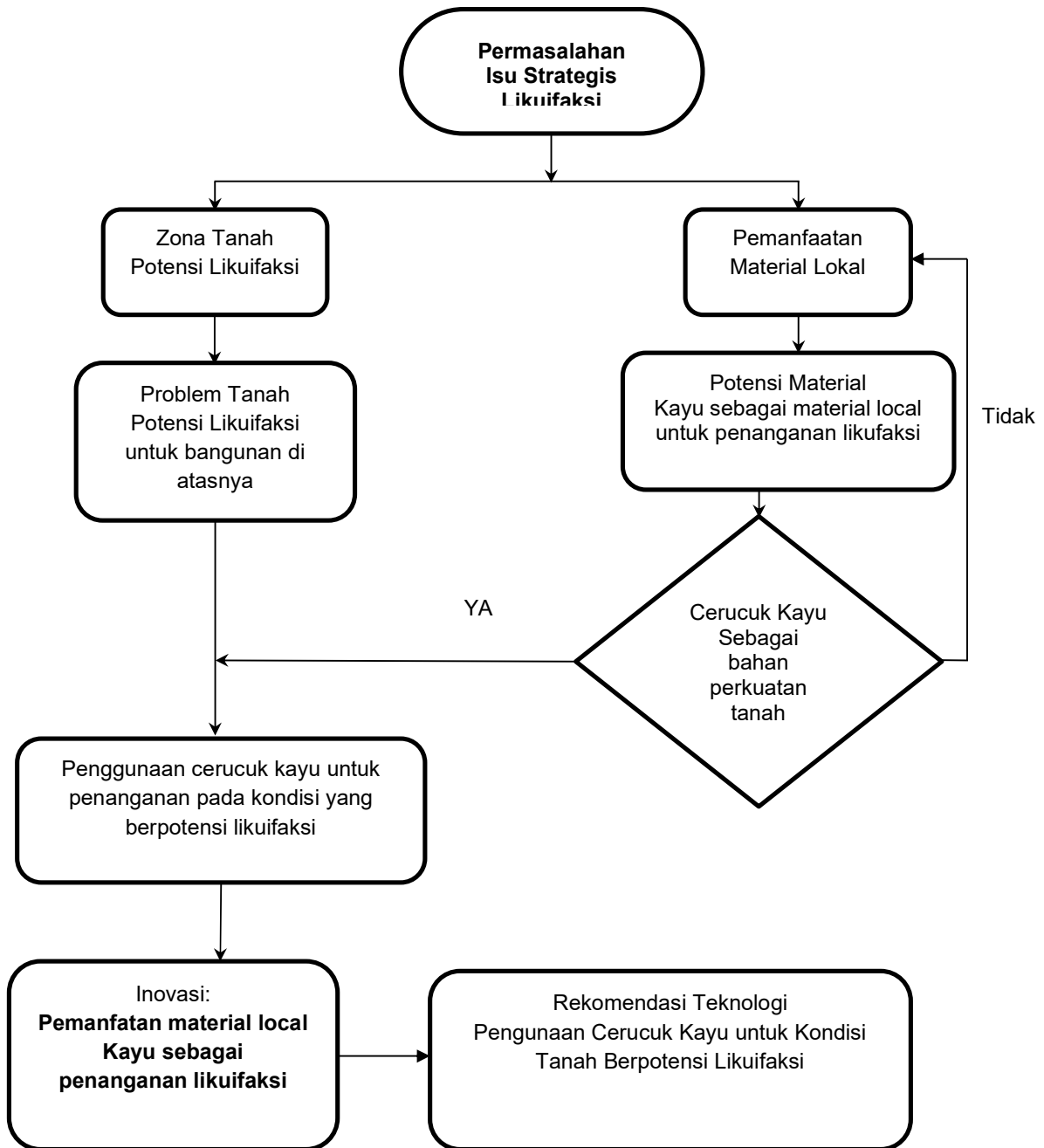
	Widianti, Ekrar Oktoviar, Edi Hartono, dan Willis Diana, 2008	(Cement-Column) Pada Tanah Berpasir	kolom-semen meningkat setelah pemasangan kolomsemen. Kekuatan tanah berkurang jika jaraknya semakin jauh dari kolom-semen. Kekuatan tanah juga meningkat dengan bertambahnya umur kolom-semen. Secara umum dapat dikatakan bahwa pemasangan kolom-semen telah mampu meningkatkan kekuatan tanah di sekitarnya baik pada arah radial maupun vertikal. Peningkatan kekuatan ini merupakan indikasi berkurangnya resiko likuifaksi pada tanah berpasir.	(SATEK2) 17-18 November 2008, Universitas Lampung, hal. 176-185
17	Armin W. Stuedlein, Tygh N. Gianella, and Greg Canivan. 2016	Densification of Granular Soils Using Conventional and Drained Timber Displacement Piles	Tiang pancang yang dipasang dengan jarak antar dua sampai lima diameter tiang pancang, dan kemudian dilakukan Pengukuran Cone Penetration Test (CPT) menunjukkan variasi peningkatan pasca pemasangan ketahanan penetrasi sesuai dengan peningkatan jarak tiang dan Temuan eksperimental dalam makalah ini mungkin secara luas diterapkan pada tiang pancang.	J. Geotech. Geoenviron. Eng., 04016075 ASCE. 2016 DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001554.
18	X. Z. Ling, X. Gao, L. Tang and L. Su, 2013	Effect of Shaking Intensity on Interactive Behavior of Soil-Pile Group Foundations in Liquefiable Soil during Shaking Table Tests	Hasil pengujian memberikan informasi rinci tentang riwayat waktu percepatan tiang, distribusi regangan lentur dalam kelompok tiang serta respon tanah dan tekanan air pori yang timbul di tanah sekitar tiang. Pencairan ringan terjadi di bawah guncangan sedang sementara likuifaksi total terjadi di bawah guncangan kuat. Percepatan tanah di permukaan tanah diperkuat pada getaran sedang dan kuat. Percepatan tiang dekat ujung dan superstruktur sedikit diperkuat di bawah guncangan sedang dan kuat, dengan faktor amplifikasi yang lebih besar terjadi pada kasus terakhir.	Conference: Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering December 2013 DOI: 10.1061/9780784413234.079
19	Tri Harianto, Ardy Arsyad, Wahyu Effendi 2015	Studi Deformasi Perkuatan Tanah Lunak Dengan Cerucuk Miring	Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa penggunaan cerucuk miring kayu dolken mampu mereduksi penurunan pada tanah hingga sebesar 33,2%.	Repository Universitas Hasanuddin, http://repository.unhas.ac.id/handle/123456789/16509

G. Kerangka Pikir Penelitian

Perkuatan cerucuk kayu sangat diharapkan mampu untuk digunakan sebagai material perkuatan tanah pada daerah rawan potensi likuifaksi, dengan kapasitas daya dukung yang baik akibat beban seismik. Sehingga perlunya dilakukan rekayasa uji model yang tepat untuk memberi perkuatan dalam susunan model yang paling optimal. Skema Kerangka Pikir Penelitian disusun dalam Gambar 11 dan untuk Alur Berdasarkan Kerangka Pikir Penelitian ditampilkan pada Gambar 12.

Isu-Isu Strategis	Penggunaan kayu dalam penanganan Tanah potensi likifaksi	Uji Model Cerucuk kayu sebagai Perkuatan tanah berpotensi likuifaksi
a) Kondisi geografis dan geologis wilayah Indonesia yang rawan akan potensi bencana likuifaksi. b) Penyebaran cerucuk kayu yang ada di Indonesia cukup besar. c) Pertumbuhan pembangunan infrastruktur semakin pesat akibat perkembangan daerah d) Kebutuhan material perkuatan tanah yang sulit dan mahal. e) Kayu <i>Eucalyptus pellita</i> merupakan asset lokal (<i>local content</i>) yang sangat potensial sebagai alternatif material. f) Kondisi infrastruktur yang rusak akibat dampak terjadinya Likuifaksi. g) Semakin berkembangnya rekayasa perkuatan tanah pada daerah rawan terjadi likuifaksi dengan metode penangan dan penggunaan material yang lebih ekonomis.	a)Potensial sifat-sifat fisik material kayu bus merah sebagai bahan material kayu kelas I. b)Perkuatan tanah berpotensi likuifaksi dengan cerucuk kayu. c)Karateristik fisik dan mekanik. d)Hasil lebih baik.	a)Perkutaan cerucuk kayu pada tanah berpotensi likuifaksi. b)Variasi model pemasangan cerucuk kayu sebagai bahan perkuatan. c)Pengujian menggunakan uji mejagetar (<i>shaking table</i>). d)Analisis tegangan, displacement, tekanan air pori dari hasil pengukuran uji model.

Gambar 11. Skema Kerangka Pikir Penelitian.



Gambar 12. Alur Berdasarkan Kerangka Pikir Peneliti