

**TESIS**

**EVALUASI POTENSI LIKUIFAKSI  
BERDASARKAN DATA *CONE PENETRATION TEST* (CPT)**

**REZKI AMALIAH**

**D012191001**



**PROGRAM PASCASARJANA  
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

**HALAMAN SAMPUL**

**EVALUASI POTENSI LIKUIFAKSI  
BERDASARKAN DATA *CONE PENETRATION TEST* (CPT)**

sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister

disusun dan diajukan oleh

**Rezki Amaliah**

**D012191001**



Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2021**

# TESIS

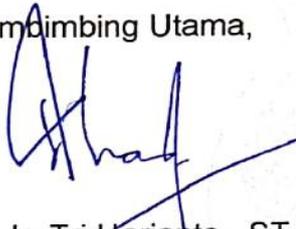
## EVALUASI POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN DATA CONE PENETRATION TEST (CPT)

Disusun dan diajukan oleh

**REZKI AMALIAH**  
**D012191001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 5 Juli 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Ir. Tri Harianto., ST., MT  
NIP. 19720309 200003 1 002

Pembimbing Pendamping,



Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M. Sc., Ph. D  
NIP. 19600730 198603 1 003

Ketua Program Studi S2  
Teknik Sipil,



Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty., ST., MT  
NIP. 19720619 200012 2 001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.  
NIP. 19601231 198609 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rezki Amaliah

NIM : D012191001

Program studi : Teknik Sipil

Konsentrasi : Geoteknik

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil saya sendiri, bukan merupakan mengambillalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 08 Juli 2021

Yang menyatakan



Rezki Amaliah

## PRAKATA

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wata'ala* atas izin-Nya sehingga penulisan usulan penelitian tesis dengan judul **“Evaluasi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT)”** dapat terselesaikan. Tak lupa pula penulis haturkan shalawat dan salam atas junjungan Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam* sebagai suri tauladan bagi sekalian umat dalam segala aspek kehidupan, sehingga menjadi motivasi penulis dalam menuntut ilmu

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada bapak **Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., MT.** dan bapak **Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M. Sc, Ph. D** selaku ketua dan sekretaris komisi penasehat yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian tesis ini.

Penghargaan yang setinggi-tingginya kepada: ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA.** (Rektor Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), bapak **Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT.** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge. ST.,MT.** (Ketua Departemen Sipil Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin), ibu **Dr. Eng. Rita Irmawati, ST., MT.** (Ketua Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin).

Penghargaan yang setinggi-tingginya pula kepada orang tua penulis ibu **Hj. Raoda, S. Ag** dan bapak **Drs. H. Lauki Hasri, M. Si** dan saudara-saudara penulis yang senantiasa selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan tesis ini. Serta dukungan dan semangat dari tim Laboratorium Mekanika Tanah yang sudah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini. Sehingga tesis ini tersusun sedemikian rupa. Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat utamanya bagi penulis sendiri, dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

## **ABSTRAK**

REZKI AMALIAH. Evaluasi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT) (dibimbing oleh Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST., MT. dan Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M. Sc, Ph. D.).

Gempa bumi dapat menimbulkan bahaya likuifaksi yang dapat merusak bangunan dan prasarana infrastruktur. Selain itu, gempa bumi sulit untuk diprediksi kapan dan dimana gempa akan terjadi dan selalu datang secara mendadak tanpa didahului dengan tanda atau gejala yang muncul sebelum kejadian. Maka dari itu, penting untuk kita menginvestigasi geoteknik bawah permukaan tanah sebelum membangun suatu konstruksi untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. Evaluasi potensi likuifaksi ini menggunakan data Cone Penetration Test (CPT) dengan mempertimbangkan nilai percepatan gempa maksimum (p.g.a) berkisar antara 0,1 g sampai 0,9 g dan magnitude gempa bumi sebesar 6,2 skala richter. Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, di daerah penelitian ini berpotensi terjadi likuifaksi pada saat nilai percepatan gempa maksimum (p.g.a) di atas 0,3 g.

**Kata kunci** : gempa bumi, likuifaksi, cone penetration test, cyclic stress ratio, cyclic resistance ratio, safety factor.

## ABSTRACT

REZKI AMALIAH. *Evaluation of Potential Liquefaction Based On Cone Penetration Test (CPT) data (Guided by Dr. Eng. Ir. Tri Harianto, ST. MT. and Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M. Sc, Ph. D).*

An earthquakes can inflict a liquefaction hazards which can damage buildings and infrastructure. In addition, earthquakes are difficult to predict when and where earthquakes will occur as they happen suddenly without being preceded by signs. Therefore, we must do a geological investigation before building construction to evaluate the potential liquefaction in that area. Evaluation of the potential liquefaction using Cone Penetration Test (CPT) is one method can be used because of its repeatable, provided a continuous profile, and economically. This method needs peak ground acceleration ( $a_{max}$ ) value at an interval of 0.1 g to 0.8 g and earthquake magnitude of 6.2 scale richter. Based on the results of the research, there were potentials of liquefactions when the peak ground acceleration ( $a_{max}$ ) value was above 0.3 g.

**Keywords:** earthquake, liquefaction, cone penetration test, cyclic stress ratio, cyclic resistance ratio, safety factor

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Manfaat Penelitian.....	3
E. Lingkup Penelitian.....	4
F. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Gempa Bumi.....	6
B. Likuifaksi.....	12
C. Mekanisme Terjadinya Likuifaksi.....	15
D. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi.....	17
E. Evaluasi Likuifaksi dan Masalah yang Ditimbulkannya.....	20
BAB III.....	22
METODOLOGI PENELITIAN.....	22
A. Pengumpulan Data.....	22
B. Bagan Alir Penelitian.....	22
C. Kerangka Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Data Cone Penetration Test (CPT).....	24

1. Menghitung <i>Cyclic Stress Ratio</i> (CSR) .....	24
2. Menghitung <i>Cyclic Resistance Ratio</i> (CRR).....	28
3. Menghitung <i>Safety of Factor</i> (FS) .....	32
BAB IV.....	36
HASIL DAN PEMBAHASAN .....	36
A. Deskripsi Daerah Penelitian .....	36
B. Hasil Perhitungan Likuifaksi.....	38
C. Perbandingan nilai <i>Safety Factor</i> (SF) dan Percepatan Gempa Maksimum ( $a_{max}$ ) .....	42
BAB V.....	56
PENUTUP .....	56
A. Kesimpulan.....	56
B. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57

## DAFTAR TABEL

**Tabel 1.** Intensitas Gempabumi Skala MMI (Modified Mercally Intensity) ..9

**Tabel 2.** Nilai Korelasi Antara Skala Richter dengan Percepatan

Tanah Maksimum, Durasi Bergetar, dan Skala MMI .....11

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Lempeng tektonik Indonesia.....	7
<b>Gambar 2.</b> Kondisi tegangan tanah efektif .....	14
<b>Gambar 3.</b> Kondisi partikel tanah sebelum dan sesudah naiknya tekanan air pori .....	15
<b>Gambar 4.</b> Kondisi struktur sebelum dan sesudah naiknya tekanan air pori	17
<b>Gambar 5.</b> Bagan alir proses detail penelitian.....	23
<b>Gambar 6.</b> Asumsi kondisi tanah untuk evaluasi nilai CSR.....	25
<b>Gambar 7.</b> Faktor Reduksi Tegangan dan Kedalaman .....	27
<b>Gambar 8.</b> Grafik Perilaku Tanah Berdasarkan Data (Robertson et al., 1986) .....	29
<b>Gambar 9.</b> Diagram alir perhitungan likuifaksi menggunakan data CPT .....	35
<b>Gambar 10.</b> Grafik hasil analisis potensi likuifaksi yang memperlihatkan kedalaman dan ketebalan lapisan. Tanah yang terlikuifaksi dan penurunan tanah total berdasarkan data CPT menggunakan metode Robertson dan Wride (1989).....	35
<b>Gambar 11.</b> Lokasi titik pengujian Cone Penetration Test .....	37
<b>Gambar 12.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-01 (b) Grafik data sondir di titik S-01.....	43
<b>Gambar 13.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-02 (b) Grafik data sondir di titik S-02.....	44
<b>Gambar 14.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-03 (b) Grafik data sondir di titik S-03.....	45
<b>Gambar 15.</b> (a) Grafik hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-04 (b) Grafik data sondir di titik S-04.....	46
<b>Gambar 16.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-05 (b) Grafik data sondir di titik S-05.....	47
<b>Gambar 17.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-06 (b) Grafik data sondir di titik S-06.....	48
<b>Gambar 18.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-07 (b) Grafik data sondir di titik S-07.....	49

<b>Gambar 19.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-08	
(b) Grafik data sondir di titik S-08.....	50
<b>Gambar 20.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-09	
(b) Grafik data sondir di titik S-09.....	51
<b>Gambar 21.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-10	
(b) Grafik data sondir di titik S-10.....	52
<b>Gambar 22.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-11	
(b) Grafik data sondir di titik S-11.....	53
<b>Gambar 23.</b> (a) Grafik Hubungan Kedalaman dan Safety Factor di titik S-12	
(b) Grafik data sondir di titik S-12.....	54

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Pertumbuhan jumlah penduduk yang semakin meningkat diiringi dengan semakin pesatnya pembangunan infrastruktur di Indonesia. Dalam pembangunan infrastruktur ini selain kita memperhatikan kekuatan struktur, kita juga perlu memperhatikan struktur yang mampu menahan berat dan gaya luar dari konstruksi tersebut yaitu lapisan tanah. Lapisan tanah harus didesain dengan memperhitungkan pengaruh gaya luar jika terjadi bencana alam, seperti gempa bumi.

Indonesia merupakan daerah rawan gempa bumi karena dilalui oleh jalur pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu: Lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Lempeng Indo-Australia bergerak relatif ke arah utara dan menyusup ke dalam lempeng Eurasia, sementara lempeng pasifik bergerak relatif ke arah barat. Jalur pertemuan lempeng berada di laut sehingga apabila terjadi gempa bumi besar dengan kedalaman dangkal maka akan berpotensi menimbulkan tsunami sehingga Indonesia juga rawan tsunami. Gempa bumi sulit untuk diprediksi kapan dan dimana gempa tersebut akan terjadi dan selalu datang secara mendadak tanpa didahului dengan tanda atau gejala yang muncul sebelum kejadian. Hal ini mengakibatkan guncangan yang terjadi menimbulkan kepanikan umum dan merusak segala sesuatu di permukaan bumi karena

hilangnya kestabilan tanah. Dan ini akan berdampak pada kerugian yang tidak sedikit hingga merenggut banyak nyawa. Kerusakan yang timbul akibat gempa bumi tidak hanya merusak konstruksi di atas tanah, tapi juga merusak struktur lapisan tanah seperti potensi likuifaksi yang bisa terjadi. Dimana tanah mengalami kehilangan kekuatan gesernya sehingga tanah yang awalnya solid berperilaku seperti material cair (*liquid*) akibat beban gempa yang sangat cepat sehingga tekanan air pori yang meningkat hingga ke titik sama besar dengan tegangan total. Likuifaksi biasanya terjadi pada kondisi tanah yang berbutir kasar (*granular soil*) tanah tipe seperti ini mencakup kerikil, pasir, atau lanau dengan sedikit atau tidak ada kandungan lempungnya.

Maka dari itu, melihat potensi likuifaksi yang sangat merusak dan bisa menimbulkan korban jiwa, penting bagi kita untuk mempertimbangkan potensi likuifaksi dalam membangun suatu konstruksi. Identifikasi potensi likuifaksi menggunakan data CPT yang merupakan salah satu cara untuk mengetahui konsistensi lapisan tanah terhadap potensi likuifaksi. Metode ini sering digunakan oleh para ahli seperti Seed dan Idriss (1971), Tatsuoka (1980), Tokimatsu dan Yoshimi (1983). Selain itu, sifat data metode CPT ini yang berulang (*repeatability*), akurat (*releability*), cepat, dan ekonomis. Hal inilah yang melatarbelakangi penulis untuk menganalisis potensi likuifaksi pada tanah dengan menggunakan data uji sondir.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan masalah-masalah yang telah dijabarkan di latar belakang, masalah yang akan dibahas yaitu :

1. Bagaimana analisis nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT) serta data gempa yang pernah terjadi?
2. Bagaimana analisis nilai faktor keamanan akibat peristiwa likuifaksi pada tanah yang ditinjau berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT)?

## **C. Tujuan Penelitian**

Tujuan penulisan ini adalah sebagai berikut :

1. Menghitung *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT) serta data gempa yang pernah terjadi
2. Menganalisis faktor keamanan akibat peristiwa likuifaksi pada tanah yang ditinjau berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT)

## **D. Manfaat Penelitian**

Berdasarkan tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini, maka hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam :

1. Dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam kegiatan perencanaan bangunan sipil
2. Diharapkan melalui penelitian ini, dapat dijadikan sebagai referensi

untuk menganalisa bahaya likuifaksi yang mungkin terjadi di suatu daerah sehingga diperoleh suatu angka keamanan dan karakteristik tanah yang memiliki potensial terhadap bahaya likuifaksi

3. Diharapkan penelitian ini dapat berguna sebagai sumber pengetahuan bagi masyarakat umum mengenai bahaya likuifaksi.

### **E. Lingkup Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah dan tujuan penelitian yang ingin dicapai maka ruang lingkup penelitian ini mencakup analisa potensi likuifaksi dengan menggunakan data Cone Penetration Test (CPT)

### **F. Sistematika Penulisan**

Agar penelitian ini lebih terarah maka disusun sistematika penulisan tesis yang akan dilakukan dengan sesuai tahapan-tahapan yang disyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis sehingga susunan tesis ini dapat diurutkan yaitu sebagai berikut :

## **BAB I PENDAHULUAN**

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang pentingnya masalah ini untuk diangkat dalam sebuah penelitian S2. Pokok bahasan dalam bab ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan dari penelitian ini, manfaat dari penelitian ini, lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab ini, memberikan gambaran informasi yang terkait tentang penelitian potensi likuifaksi dengan menggunakan data Cone Penetration Test (CPT) serta informasi-informasi lainnya sebagai bahan acuan dalam melengkapi penelitian ini.

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam bab ini, menjelaskan metode yang digunakan dalam menganalisa potensi likuifaksi dengan menggunakan data CPT

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dalam bab ini menjabarkan tentang hasil-hasil perhitungan analisa likuifaksi berdasarkan data CPT

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi tentang rangkuman penelitian secara keseluruhan beserta saran berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Gempa Bumi**

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempabumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi.

Gempa bumi merupakan bencana alam yang cukup unik, berbeda dengan bencana lainnya seperti badai, banjir, dan lainnya yang dapat diprediksi sedangkan gempa bumi sulit diprediksi kapan terjadinya. Dikarenakan gempa bumi ini muncul secara tiba-tiba, maka tidak dapat dihindari adanya kerugian secara materi hingga adanya korban jiwa. Dikarenakan kemunculan gempa yang secara tiba-tiba, menyebabkan kerugian material bahkan hingga dapat menghilangkan nyawa.

Indonesia menjadi salah satu negara yang rawan gempa bumi karena termasuk ke dalam daerah kegempaan aktif. Letak Indonesia berada di pertemuan 3 lempeng utama dunia, yaitu lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik



**Gambar 1.** Lempeng tektonik Indonesia

Pulau Sumatera, lepas pantai selatan Pulau Jawa, lepas pantai selatan Kepulauan Nusa Tenggara, dan perairan Maluku sebelah selatan dilalui oleh tumbukan lempeng Eurasia dan Australia. Sementara tumbukan lempeng Australia dan Pasifik terjadi di Pulau Papua. Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2019) sepanjang tahun 2010–2019 telah terjadi sedikitnya 134 kali gempa bumi dengan magnitudo  $M > 5.0$  di Indonesia.

Parameter gempa yang menyebabkan gerakan tanah sangat penting untuk menggambarkan karakteristik gempa yang terjadi. Menurut (Kramer,1996) ada beberapa parameter yang mempengaruhi kekuatan gempa, diantaranya:

### 1. Amplitudo

Kekuatan gempa dapat digambarkan dalam bentuk gelombang. Parameter gelombang yang tercatat dapat berupa hubungan antara waktu dengan percepatan, kecepatan, atau perpindahan.

### 2. Waktu kejadian gempa bumi (*Origin time*)

Waktu kejadian gempa bumi atau *origin time* adalah waktu pada saat terlepasnya akumulasi tegangan berupa gelombang gempa yang dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).

### 3. Durasi

Durasi guncangan berkaitan dengan waktu yang diperlukan untuk melepaskan energi yang terakumulasi oleh guncangan di sepanjang patahan. Lamanya durasi guncangan yang besar dapat memberikan pengaruh besar terhadap kerusakan akibat gempa bumi.

### 4. Hiposenter

Hiposenter merupakan titik pusat terjadinya gempa bumi. Terdapat beberapa jenis gempa bumi berdasarkan kedalaman hiposentrumnya, diantaranya:

- a. Gempa bumi dangkal dengan pusat kedalaman  $< 70$  km
- b. Gempa bumi sedang dengan pusat kedalaman  $70 - 300$  km
- c. Gempa bumi dalam dengan pusat kedalaman  $300 - 700$  km

## 5. Episenter

Episenter merupakan lokasi di permukaan tanah yang tegak lurus dengan hiposenter atau titik awal terjadinya gempa.

## 6. Kekuatan gempa bumi atau magnitudo

Besarnya energi yang dilepaskan saat gempa terjadi disebut dengan kekuatan gempa atau magnitudo gempa. Untuk dapat menggambarkan besarnya gempa bumi digunakan alat yang disebut seismograf. Saat gempa bumi terjadi, seismograf memantau kekuatan gempa bumi kemudian dicatat dalam seismogram.

**Tabel 1.** Intensitas Gempabumi Skala MMI (Modified Mercally Intensity)

Skala SIG BMKG	Warna	Deskripsi Sederhana	Deskripsi Rinci	Skala MMI	PGA (gal)
I	Putih	Tidak Dirasakan ( <i>Not Felt</i> )	Tidak dirasakan atau hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat.	I-II	< 2.9
II	Hijau	Dirasakan ( <i>Felt</i> )	Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.	III-V	2.9-88
III	Kuning	Kerusakan Ringan ( <i>Slight Damage</i> )	Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.	VI	89-167
IV	Jingga	Kerusakan Sedang ( <i>Moderate Damage</i> )	Banyak Retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar genteng bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan	VII-VIII	168-564

			mengalami kerusakan ringan sampai sedang.		
V	Merah	Kerusakan Berat ( <i>Heavy Damage</i> )	Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung.	IX-XII	> 564

Sumber : *Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2016*

Untuk mengukur kekuatan gempa yang terjadi dapat diketahui berdasarkan ukuran kekuatan atau magnitudo gempa dan dari intensitas gempa. Magnitudo diperhitungkan berdasarkan besarnya energi yang dilepaskan, sedangkan intensitas gempa berdasarkan berapa besar kerusakan yang terjadi.

Pada umumnya para ahli seismologis menggunakan skala magnitudo yang berbeda. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut:

#### 1. *Local Magnitude Scale* (ML)

Magnitudo gempa diukur dengan seismograf standar berdasarkan perpindahan gerakan tanah. Salah satunya adalah *local magnitude scale* atau dikenal dengan skala Richter (SR). Meningkatnya energi yang dilepaskan mengakibatkan percepatan tanah maksimum ( $a_{max}$ ) dan durasi bergetar ikut meningkat. Pada Tabel 2 dijelaskan mengenai korelasi antara *local magnitude* (ML) dengan percepatan tanah maksimum ( $a_{max}$ ), durasi bergetar, dan skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI).

**Tabel 2.** Nilai Korelasi Antara Skala Richter dengan Percepatan Tanah Maksimum, Durasi Bergetar, dan Skala MMI

Skala Richter (SR)	Percepatan Maksimum Tanah (amax)	Durasi Tanah Bergetar di Daerah Sekitar (detik)	Modified Mercalli Intensity (MMI)
$\leq 2$	-	-	I - II
3	-	-	III
4	-	-	IV - V
5	0,09 g	2	VI - VII
6	0,22 g	12	VII - VIII
7	0,37 g	24	IX - X
$\geq 8$	0,50 g	34	XI - XII

## 2. *Surface Wave Magnitude Scale (MS)*

*Surface wave magnitude* dihitung berdasarkan amplitudo pada gelombang permukaan yang memiliki periode 20 detik.

## 3. *Moment Magnitude Scale (MW)*

Untuk memperhitungkan kekuatan gempa besar, metode yang umum digunakan adalah skala magnitudo momen. Pada skala magnitudo momen seluruh ukuran gempa cenderung diperhitungkan. Salah satunya adalah momen seismik (MO). Momen seismik ditentukan berdasarkan radius pengaruh di permukaan.

Pengaruh gempa bumi disebabkan oleh proses tektonik dan efek sekunder. Efek sekunder merupakan proses nontektonik yang berhubungan langsung dengan guncangan gempa bumi. Beberapa akibat efek sekunder diantaranya yaitu, retak pada permukaan (*surface rupture*),

penurunan ketinggian permukaan tanah (*regional subsidence*), likuifaksi (*liquefaction*), dan pergerakan pada lereng (*slope movement*).

## B. Likuifaksi

Likuifaksi adalah hilangnya kekuatan tanah akibat kenaikan tegangan air pori dan turunnya tekanan efektif dari lapisan tanah yang timbul akibat beban siklik. Akibat struktur tanah pasir (*cohesionless*) menerima tegangan geser yang berturut-turut sehingga struktur tanah pasir memadat, tetapi karena peristiwa siklik ini terjadi dengan waktu sangat cepat maka proses pemadatan tidak terjadi dan tegangan air pori meningkat. (Idriss, I & Boulanger, 2008)

Gempa bumi dapat mengakibatkan *secondary effect* atau proses non tektonik di permukaan 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 tanah seiring dengan meningkatnya tegangan air pori. Peristiwa likuifaksi ini jika dilihat secara visual ditandai dengan munculnya lumpur pasir di permukaan tanah berupa semburan pasir (*sand boil*), tenggelamnya struktur bangunan di atas permukaan, rembesan air melalui rekahan tanah, penurunan muka tanah dan perpindahan lateral.

Kondisi tanah pada saat terjadi likuifaksi dapat dinyatakan dalam Persamaan 1 (Das, 2010).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

dengan:

$\sigma'$  = tegangan efektif tanah ( $\text{kg/m}^2$ )

$\sigma$  = tegangan total ( $\text{kg/m}^2$ )

$u$  = tekanan air pori ( $\text{kg/m}^2$ )

Sedangkan tekanan air pori tanah dihitung dengan menggunakan persamaan 3.

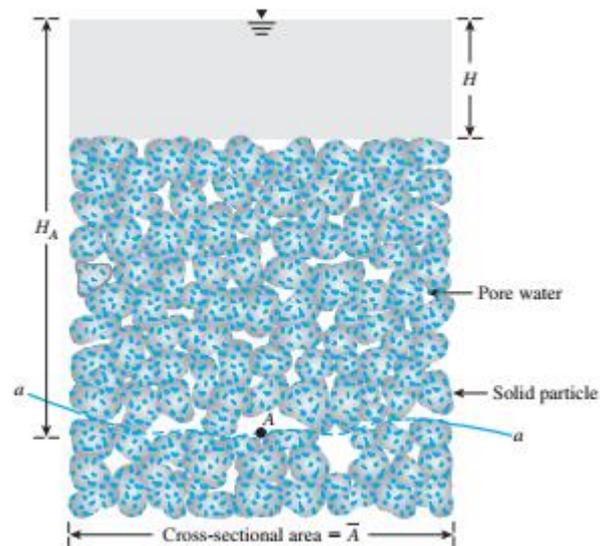
$$U = H_A \cdot \gamma_w \quad (3)$$

dengan:

$U$  = tekanan air pori ( $\text{kN/m}^2$ )

$H_A$  = jarak antara titik A dengan muka air (m)

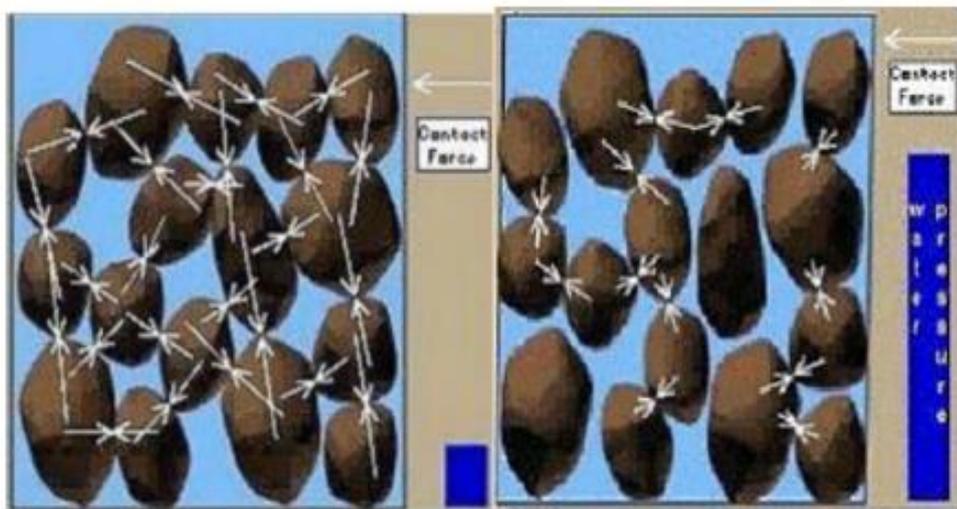
$\gamma_w$  = berat volume air ( $10 \text{ kN/m}^3$ )



**Gambar 2.** Kondisi tegangan tanah efektif

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



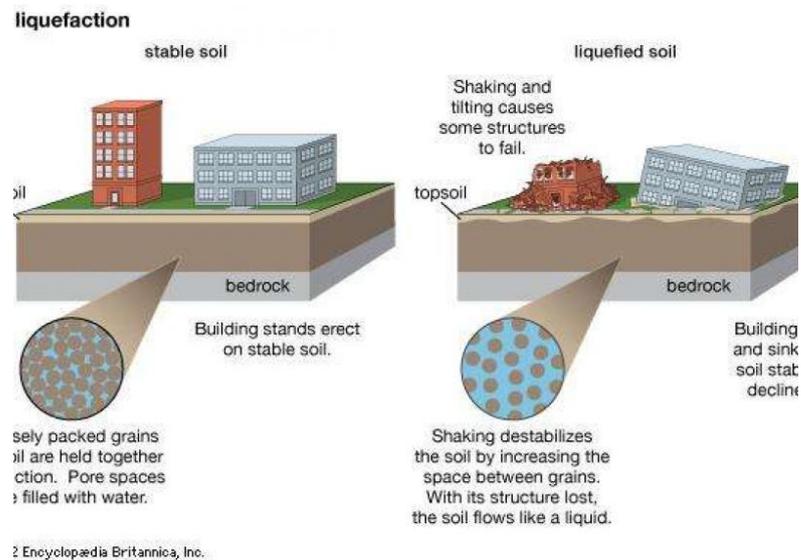
**Gambar 3.** Kondisi partikel tanah sebelum dan sesudah naiknya tekanan air pori

### C. Mekanisme Terjadinya Likuifaksi

Menganalisis potensi terjadinya likuifaksi diasumsikan selama berlangsungnya getaran gempa belum terjadi disipasi yang berarti di lapisan tanah, dengan kata lain belum terjadi redistribusi tekanan air pori pada massa tanah. Akibat beban siklik (beban gempa), tanah mengalami tekanan sebelum proses disipasi terjadi sehingga itu mengakibatkan tekanan air pori meningkat, muka air tanah sangat menentukan potensi terjadinya likuifaksi. (Tijow, K, Sompie, O, B, & Ticoh, J, 2018)

Endapan 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

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 3



**Gambar 4.** Kondisi struktur sebelum dan sesudah naiknya tekanan air pori

#### D. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi

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

##### 1. 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 antarpartikel 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).

## 2. 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.

## 3. Jenis tanah

Ishihara (1996) 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 nonplastis (*nonkohesif*). Diperkirakan tanah nonkohesi yang rentan terhadap likuifaksi adalah pasir bersih (*clean sands*), pasir berlumpur nonplastis (*nonplastic silty sands*), lumpur nonplastis (*nonplastic silt*) dan kerikil (*gravel*).

## 4. Kepadatan relatif awal (*Initial relative density*)

Berdasarkan studi lapangan, tanah non-kohesif yang mempunyai kepadatan relatif yang lepas rentan terhadap likuifaksi. Jika tanah memiliki kepadatan relatif yang semakin besar maka akan semakin besar tahanannya terhadap potensi likuifaksi.

## 5. Gradasi dan analisis butiran tanah

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  $D_{50}$  yang memiliki ukuran butir 0,15 mm hingga 0,35 mm berpotensi mengalami likuifaksi.

#### 6. 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*.

#### 7. Historis lingkungan

Menurut 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 kerapatan identik.

### **E. Evaluasi Likuifaksi dan Masalah yang Ditimbulkannya**

Potensi likuifaksi yang mengakibatkan tanah kehilangan kekuatan dan kekakuan yang disebabkan oleh gempa bumi perlu dievaluasi. Laporan penyelidikan geoteknik akan menilai konsekuensi setiap potensi likuifaksi dan kehilangan kekuatan tanah, termasuk estimasi penurunan tanah, pengurangan daya dukung, dan tindakan mitigasi. Seed dan Idriss (1967, 1971) mengusulkan metode umum untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. Langkah-langkah dalam mengevaluasi potensi likuifaksi adalah dengan menentukan jenis tanah, kedalaman muka air tanah, *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), dan *Safety of Factor* (FS)

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

- a. Indeks properties 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 seismik dan geologi, level muka air tanah dan tegangan efektif tanah.
- c. Karakteristik gempa, seperti intensitas guncangan pada tanah dan lama guncangan yang terjadi.

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 (Putra et al., 2009) :

1. Terjadinya penurunan tanah hingga 5 % ketebalan lapisan tanah terlikuifaksi.
2. Terjadinya kehilangan daya dukung lateral tanah.
3. Terjadinya pengapungan struktur yang dibenamkan dalam tanah, seperti tanki di bawah tanah.
4. Meningkatkan tekanan lateral tanah yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur penahan tekanan lateral tanah.
5. Terjadinya *lateral spreading (limited lateral movements)*.
6. Terjadinya *lateral flow (extensive lateral movements)*.