

# ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DENGAN MENGGUNAKAN NILAI SPT

(Studi Kasus : Jembatan Ir. Soekarno Manado)

Anry Gratio Deo Warouw

Fabian J. Manoppo, Steeva G. Rondonuwu

Universitas Sam Ratulangi Fakultas Teknik Jurusan Sipil Manado

Email: [warouww@gmail.com](mailto:warouww@gmail.com)

## ABSTRAK

Salah satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah fenomena hilangnya daya dukung tanah akibat getaran gempa atau beban siklik yang disebut dengan peristiwa Likuifaksi. Peristiwa Likuifaksi dapat menyebabkan kerugian yang sangat besar pada proyek infrastruktur, dalam hal ini Jembatan Ir. Soekarno Manado menjadi lokasi evaluasi potensi Likuifaksi dengan menggunakan nilai uji Standart Penetrasi (SPT). Analisis potensi likuifaksi bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan terhadap Likuifaksi di tiap lapisan tanah di Jembatan Ir. Soekarno Manado, dengan membandingkan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang adalah nilai tahanan tanah untuk menahan Likuifaksi dengan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) yang merupakan ratio tegangan siklik yang terjadi pada tanah akibat gempa dan dapat menyebabkan Likuifaksi terjadi. Nilai faktor keamanan (FS) harus melebihi nilai satu, likuifaksi dapat terjadi jika nilai faktor keamanan (FS) lebih kecil dari satu dan dikatakan kritis terhadap Likuifaksi jika faktor keamanan (FS) sama dengan satu. Berdasarkan evaluasi potensi Likuifaksi dilakukan dengan kontrol faktor keamanan (FS) terhadap Likuifaksi pada gempa referensi yaitu dengan Moment Magnitude ( $M_w$ ) = 7.5, 7.6, 7.7, 8, 8.5, dan 9, percepatan gempa maksimum yang terjadi dipermukaan tanah ( $a_{max}$ ) PUSKIM = 0.622g dan kondisi muka air tanah yang dangkal. Maka didapati faktor keamanan (FS) pada Moment Magnitude ( $M_w$ ) = 7.5 hingga  $M_w$  = 8 tanah yang disekitar Pylon Jembatan Ir. Soekarno Manado aman terhadap Likuifaksi, dan pada  $M_w$  = 8.5 hingga  $M_w$  = 9, Likuifaksi dapat terjadi dilapisan I (0 m – 10 m).

**Kata Kunci :** Cyclic Resistance Ratio (CRR), Cyclic Stress Ratio (CSR), Likuifaksi, Standart Penetration Test (SPT)

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Wilayah Indonesia memiliki aktifitas gempa yang sangat tinggi, dikarenakan letak lokasi Indonesia dipertemuan empat lempeng tektonik utama bumi yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik dan Philipine menjadikan gempa adalah hal sering terjadi dan sangat perlu diperhitungkan dalam bangunan teknik sipil seperti bangunan gedung, jembatan, dan lain - lain. Gempa yang terjadi dapat mengakibatkan kegagalan pada struktur tanah dengan hilangnya daya dukung tanah. Likuifaksi adalah suatu peristiwa dimana berubahnya sifat tanah dari sifat padat ke sifat cair, yang disebabkan oleh gempa atau beban siklik sehingga naiknya tekanan air pori hingga dapat melebihi tegangan *vertical* dan membuat tegangan

efektif menjadi sama dengan nol. Peristiwa likuifaksi menyebabkan keruntuhan *punching* pada tanah, retakan tanah, kelongsoran, perbedaan penurunan tanah pada bangunan. Seperti pada tahun 2018 di Kota Palu kelurahan Petobo yang diguncang gempa dengan *Moment Magnitude* = 7.4 yang menyebabkan peristiwa Likuifaksi terjadi dan memakan banyak korban. Dalam pembangunan Jembatan Ir. Soekarno Manado, ditemukan di lapangan bahwa tanah dasarnya adalah tanah lanau berpasir dan pasir padat dengan letak muka air tanah yang sangat tinggi. Lokasi pembangunan Jembatan Ir. Soekarno terletak pada kolam pelabuhan Manado dan termasuk lokasi rawan gempa yang dimana bisa memperbesar potensi terjadi peristiwa likuifaksi, sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut dengan percepatan gempa sesuai

dengan peta gempa Indonesia. Hal ini yang menjadi latar belakang penulisan untuk menganalisis potensi likuifaksi menggunakan nilai Standart Penetration Test (SPT).

### Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah dalam penulisan ini :

1. Apakah kondisi tanah pada lokasi Jembatan Soekarno memiliki potensi terjadinya likuifaksi?
2. Berapa Faktor Keamanan Likuifaksi Jembatan Soekarno terhadap Likuifaksi?

### Batasan Masalah

Untuk dapat memfokuskan penelitian ini, maka perlu diadakan batasan masalah. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut :

1. Metode yang digunakan untuk menghitung potensi Likuifaksi menggunakan data Standart Penetration Test (SPT).
2. Peninjauan potensi Likuifaksi hanya pada Pylon Jembatan Ir. Soekarno (main bridge)
3. Data tanah yang dipakai adalah data tanah dari tenaga ahli.
4. Data tanah yang dipakai dalam penelitian ini hanya dikhususkan pada tanah dasar Pylon Jembatan Soekarno.
5. Tidak menghitung settlement akibat likuifaksi
6. Tidak meninjau Lateral Displacement akibat likuifaksi
7. Tinjauan muka air tanah kedalaman 0 m
8. Analisis respon spektra menggunakan situs respon spektra PUSKIM

### Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui besar potensi Likuifaksi dengan memperhitungkan Faktor Keamanan Likuifaksi dari tanah dasar Jembatan Ir. Soekarno Manado.

### Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dalam penulisan ini:

1. Untuk menambah wawasan, ilmu pengetahuan dan menjadi pembanding jika akan melakukan suatu pekerjaan yang sama.

2. Dapat membantu mahasiswa, dosen, dan praktisi sebagai referensi dalam memetakan area (microzonasi) yang memiliki potensi terjadinya Likuifaksi khususnya di Kota Manado sebagai suatu upaya mitigasi.
3. Manfaat Teoritis, penelitian ini dapat menjadi referensi atau acuan dalam ilmu Teknik Sipil, khususnya dalam menganalisa potensi Likuifaksi pada tanah berdasarkan Nilai Standart Penetration Test.

## LANDASAN TEORI

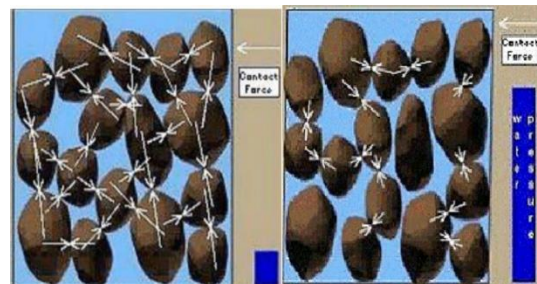
### Likuifaksi

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)

### 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)



Gambar 1. Kondisi partikel tanah sebelum dan sesudah naiknya tekanan air pori

Pada suatu lapisan tanah pasir yang jenuh air, pengaruh dari getaran gempa atau beban siklik, akan mengalami perubahan sifat tanah. Dimana dari sifat solid ke sifat liquid (cair) yang mengakibatkan berkurangnya tegangan efektif tanah dan membuat tanah tersebut kehilangan daya dukungnya. Hal ini dapat dijelaskan dalam rumus tegangan efektif :

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

Dimana :

- $\sigma'v$  = Tegangan efektif vertikal (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma$  = Tegangan vertikal total (kN/m<sup>2</sup>)
- $u$  = Tekanan air pori (kN/m<sup>2</sup>)

Rumus kuat geser tanah :

$$S = c' + \sigma'v \tan \varphi \quad (2)$$

Dimana :

- $S$  = Kuat geser tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $c'$  = Kohesi tanah efektif (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma'v$  = Tegangan tanah efektif vertikal (kN/m<sup>2</sup>)
- $\varphi'$  = Sudut geser dalam tanah efektif

Terlihat jelas dari kedua rumus ini, jika terjadi peningkatan tekanan air pori sampai nilainya sama dengan tegangan total maka tegangan efektifnya nol dan kuat geser tanah menurun apalagi jika tanahnya tidak mempunyai kohesi. Sehingga inilah yang menyebabkan tanah tersebut terjadi likuifaksi, akibatnya tanah tersebut amblas atau kehilangan daya dukung dan berperilaku seperti fluida.

### Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa alam dimana terjadi getaran di muka bumi akibat pelepasan energy dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Gempa bumi yang terjadi berupa gempa bumi vulkanik dan gempa bumi tektonik. Gempa bumi vulkanik terjadi dengan keluarnya magma dari kulit bumi disertai dengan letusan sehingga terjadi getaran pada lapisan tanah. Gempa bumi dapat menyebabkan suatu kegagalan struktur dengan hilangnya daya dukung tanah pada tanah yang jenuh air. (Ariandi, E, Manoppo, F, J, & Sumampouw, J, E, R, 2019)

Definisi – definisi yang berhubungan dengan gempa tektonik :

1. Pusat gempa (focus), yaitu suatu titik dibawah tanah dimana pertama kali energy gempa tersebut yang juga diistilahkan sebagai hiposenter atau hipofocus.
2. Kedalaman gempa (focus depth), adalah jarak vertical dari muka tanah ke focus gempa. Jika kedalaman fokus (pusat gempa) antara 300 km sampai 700 km, itu merupakan gempa dalam. Jika kedalaman focus (pusat gempa) antara 70 km sampai 300 km, merupakan gempa sedang dan jika lebih kecil dari 70 km merupakan gempa dangkal. Gempa dangkal yang umumnya sering terjadi di wilayah Indonesia.
3. Intensitas merupakan ukuran dari efek kerusakan yang disebabkan oleh gempa tektonik disuatu lokasi yang dinyatakan dalam beberapa tingkatan dan bersifat objektif.
4. Seismisitas, kumpulan data yang memuat persebaran gempa yang meliputi gempa utama (gempa yang terjadi pertama kali). Tingginya nilai seismisitas suatu wilayah ditandai dengan semakin banyaknya titik pada peta persebaran seismisitas.
5. Pelepasan energy, merupakan gerakan kulit bumi yang terdeformasi kemudian mengumpulkan energy secara terakumulasi sampai suatu saat dimana kulit bumi bergeser pada patahan lama atau bisa menimbulkan patahan baru. Pergerakan dimulai dari titik yang paling lemah pada patahan, sehingga titik disampingnya mendapat tekanan yang lebih besar dari sebelumnya, kemudian titik-titik tersebut bergeser dan menjalar sampai beberapa kilometer.

### Parameter Gempa Bumi

1. Origin Time  
Origin time merupakan waktu kejadian gempa bumi, yaitu waktu terlepasnya akumulasi tegangan (stress) yang berbentuk penjalaran gelombang gempa dan dinyatakan hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dalam satuan waktu setempat atau Universal Time Coordinated (UTC).
2. Magnitude  
Magnitude adalah ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besar

energy yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi. Satuan yang umumnya digunakan di Indonesia adalah Skala Richter (SR).

3. Episentrum (Epicenter)

Episentrum adalah titik di permukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari kedalaman sumber gempa bumi. Posisi episentrum dimuat dengan system koordinat geografis yang di nyatakan dalam derajat lintang dan bujur

4. Kedalaman Sumber Gempa

Kedalaman sumber gempa bumi atau Hiposentrum adalah jarak yang dihitung tegak lurus dari permukaan bumi. Kedalaman gempa dibagi menjadi tiga zona : dangkal, sedang dan dalam.

**Tanah**

Ukuran partikel tanah sangat beragam, dengan ukuran antara lebih besar dari 100 mm sampai kurang dari 0.001 mm. Jenis tanah umumnya terdiri dari campuran berbagai partikel tanah, dan seringkali kita mendapat di lapangan tanah tersebut memiliki dua jenis partikel. Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem penggolongan yang sistematis dari jenis – jenis tanah yang mempunyai sifat – sifat yang sama kedalam kelompok – kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya Pada umumnya, tanah asli adalah campuran dari butir-butir dengan distribusi ukuran yang berbeda-beda. Dimana tekstur tanah tersebut dipengaruhi terhadap ukuran dari tiap-tiap butir yang ada di dalam tanah. Kriteria – kriteria tersebut adalah tanah keras, tanah sedang dan tanah lunak dengan tebal maksimum 30 m ditunjukkan pada tabel 1. Tanah yang terdiri dari rentang ukuran dari pasir ke kerikil disebut dengan tanah berbutir kasar (coarse – grained). Sebaliknya, tanah dengan partikel lanau ke lempung disebut dengan tanah berbutir halus (fine – grained).

**Tegangan Dalam Tanah**

1. Tegangan Efektif

Tegangan efektif adalah tegangan total dikurangi tekanan air pori, tegangan efektif berlaku pada tanah yang terendam air sempurna. Semakin besar tegangan efektif semakin padat tanah tersebut, tegangan-tegangan yang berhubungan dengan tegangan efektif adalah :

- a. Tegangan total vertikal ( $\sigma_v$ ), gaya per satuan luas yang ditanggung oleh partikel tanah dan tekanan air pori pada arah vertikal tanah,

$$\sigma_v = \gamma_{sat} * z \quad (3)$$

- b. Tekanan air pori (u), merupakan tekanan air yang mengisi pori – pori partikel tanah.

$$u = \gamma_w * z \quad (4)$$

Maka, tegangan efektif tanah adalah tegangan total vertikal tanah dikurangi tegangan air pada pori tanah.

2. Kekuatan Geser Tak Terdrainase

Kekuatan geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Maka kuat geser tanah terdiri dari dua bagian yaitu:

- a. Bagian tanah yang bersifat kohesif
- b. Tanah yang bersifat gesekan yang sebanding dengan tegangan efektif pada bidang geser.

Keadaan tak terdrainase adalah keadaan tanah yang kadar airnya tidak berubah didalam tanah, termasuk pada keadaan di lapangan maupun keadaan dipengujian laboratorium. Jika pada kondisi tanah tak terdrainase dan sepenuhnya jenuh air, maka tidak terjadi perubahan pada tegangan efektif. Dalam keadaan tak terdrainase, kekuatan geser tidak dipengaruhi oleh perubahan tegangan total pada tanah. Tanah berperilaku sudut gesernya ( $\phi$ ) sama dengan nol. Dengan kondisi undrained tanah dengan mudah untuk berperilaku seperti liquid.

**Analisa Potensi Likuifaksi**

Metode yang digunakan pada menganalisis potensi likuifaksi ini adalah metode korelasi empiris yang disepakati pada workshop mengenai CRR oleh NCEER tahun 1996 dan tahun 1998, yang dimuat dalam dalam journal of *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 127, nomor 10, Oktober 2001, (halaman 817-833). Pada dasarnya untuk menganalisa potensi likuifaksi terdapat dua parameter utama yaitu CSR (Cyclic Stress Ratio), yang merupakan ratio dari tegangan tanah akibat beban siklik dan CRR (Cyclic Resistance Ratio), yang merupakan ratio ketahanan terhadap beban siklik atau

ketahanan menahan terjadinya likuifaksi. Dalam menganalisa potensi likuifaksi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan tes uji di laboratorium dan pendekatan perhitungan dari data tes di lapangan. Metode untuk mengevaluasi potensi likuifaksi menggunakan nilai Faktor Keamanan dari hasil perbandingan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) dengan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR), dimana bagian nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) adalah ratio tegangan tanah siklik yang disebabkan oleh beban seismik (gempa) dan bagian CRR adalah kapasitas tahanan tanah dari tegangan siklik tersebut yang dapat memicu terjadi Likuifaksi. Faktor Keamanan (FS) yang digunakan tidak diperbolehkan kurang dari satu, karena jika kurang dari satu maka tanah akan mengalami likuifaksi. Dimana dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (5)$$

Dimana :

- Jika  $FS < 1$ , Terjadi Likuifaksi
- Jika  $FS = 1$ , Kondisi Kritis
- Jika  $FS > 1$ , Tidak terjadi Likuifaksi

**Metode Evaluasi Cyclic Stress Ratio (CSR)**

Untuk mengevaluasi nilai CSR, dalam penulisan ini menggunakan persamaan dari Seed & Idriss (1971) :

$$CSR = 0.65 * \frac{amax}{g} * \frac{\sigma v}{\sigma'v} * rd \quad (6)$$

Dimana :

- $amax$  = Percepatan maksimum gempa dipermukaan tanah (g)
- $g$  = Percepatan Gravitasi bumi (m/s<sup>2</sup>)
- $\sigma'v$  = Tegangan efektif tanah dikedalaman z (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma v$  = Tegangan total tanah dikedalaman z (kN/m<sup>2</sup>)
- $rd$  = Koefisien reduksi tegangan

Konstanta 0.65 adalah weighting factor untuk menghitung siklus tegangan uniform yang dibutuhkan untuk menghasilkan kenaikan tekanan air pori yang sama dengan getaran gempa bumi irregular,  $amax$  sangat berpengaruh dalam analisa potensi likuifaksi.

(Lonteng, C, V, Balamba, Monintja, & Sarajar, A, 2013)

Tabel 1. Jenis – jenis tanah

Jenis tanah	Kecepatan rambat gelombang geser rata-rata, $\bar{v}_s$ (m/det)	Nilai hasil Test Penetrasi Standar rata-rata $\bar{N}$	Kuat geser niralir rata-rata $\bar{S}_u$ (kPa)
Tanah Keras	$\bar{v}_s \geq 350$	$\bar{N} \geq 50$	$\bar{S}_u \geq 100$
Tanah Sedang	$175 \leq \bar{v}_s < 350$	$15 \leq \bar{N} < 50$	$50 \leq \bar{S}_u < 100$
Tanah Lunak	$\bar{v}_s < 175$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_u < 50$
	atau, setiap profil dengan tanah lunak yang tebal total lebih dari 3 m dengan $PI > 20$ , $w_n \geq 40\%$ dan $S_u < 25$ kPa		
Tanah Khusus	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

(sumber: SNI 1726:2012)

**Metode Evaluasi Cyclic Resistance Ratio**

Diambil metode dari NCEER/NSF tentang ketahanan tanah terhadap likuifaksi tahun 1998 mengenai analisa likuifaksi, didapatkan metode evaluasi CRR dengan berdasarkan nilai hasil SPT. . Metode dengan nilai SPT ini sudah diuji selama bertahun-tahun sehingga mendapatkan plot kurva antara nilai SPT yang terkoreksi tegangan efektif (N1)60 dengan nilai CRR. Dalam koreksi ini ada penyesuaian kembali dimana kurva SPT clean-sand base mencapai konsistensi yang lebih besar dan nilai CRR dikembangkan untuk prosedur shear wave velocity (Vs) dan cone penetration test (CPT). Diperlukan koreksi terhadap partikel halus didalam tanah (fines content) indikasi nilai CRR naik seiring meningkatnya nilai partikel halus (fines content).(Idriss, I & Boulanger, 2008)

$$CRR_{7.5} = exp \left[ \frac{(N1)_{60.cs}}{14.1} + \left[ \frac{(N1)_{60.cs}}{126} \right]^2 - \left[ \frac{(N1)_{60.cs}}{23.6} \right]^3 + \left[ \frac{(N1)_{60.cs}}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right] \tag{7}$$

$$(N1)_{60.cs} = (N1)_{60} + \Delta(N1)_{60} \tag{8}$$

$$\Delta(N1)_{60} = exp \left[ 1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left( \frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right] \tag{9}$$

Dimana :

- CRR7.5 = Cyclic Resistance Ratio direfrensi gempa (Mw = 7.5)
- (N1)60.cs = Nilai (N1)60 yang sudah dikoreksi *clean - sands*
- (N1)60 = Nilai SPT yang sudah dikoreksi tegangan tanah
- FC = Fines Content (%)
- Δ(N1)60 = Koefisien

**Magnitude Scaling Factors**

Magnitude Scaling Factor (MSF) dipakai untuk menyesuaikan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) ke nilai yang umum yaitu Momen Magnitude (Mw) = 7.5, jadi CRR yang diperoleh dari grafik maupun hasil analisis adalah berdasarkan pada gempa bumi dengan Momen Magnitude (Mw) = 7.5. Apabila terjadi gempa dengan Mw < 7.5 maka sebenarnya efek yang ditimbulkan akan lebih kecil terhadap gempa dengan Mw > 7.5 dengan asumsi tanah tersebut mempunyai ketahanan yang lebih besar (Idriss, I & Boulanger, 2008). Dalam penulisan skripsi ini untuk menganalisis nilai Magnitude Scaling Factor (MSF), persamaan

yang dipakai adalah persamaan seperti berikut ini :

$$MSF = -0.058 + 6.9 exp(-0.25 * Mw) \leq 1.8 \tag{10}$$

Dimana Mw adalah Moment Magnitude gempa refrensi. Nilai CRR dengan besar Moment Magnitude selain dari 7.5, diperlukan faktor koreksi yaitu nilai MSF dan nilai Kσ dimana nilai Kσ adalah nilai koreksi tegangan total (Das, B & Luo, 2014).

$$CRR_M = CRR_{M=7.5} * MSF * K\sigma \tag{11}$$

$$K\sigma = 1 - C\sigma ln \left( \frac{\sigma'v}{Pa} \right) \leq 1.1 \tag{12}$$

$$C\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 * \sqrt{(N1)_{60.cs}}} \tag{13}$$

Dimana:

- CRR<sub>M</sub> = Cyclic Resistance Ratio direfrensi gempa
- Cσ = Faktor koreksi nilai CRR
- (N1)60.cs = Nilai N – SPT yang sudah dikoreksi
- σ'v = Tegangan efektif vertikal (kN/m<sup>2</sup>)
- Pa = Tekanan atmosfer ( =100 kN/m<sup>2</sup>)

**METODOLOGI PENELITIAN**

Dalam menganalisis potensi likuifaksi di lokasi Jembatan Ir. Soekarno Manado, penulis melakukan dengan tahap – tahap berikut, yaitu :

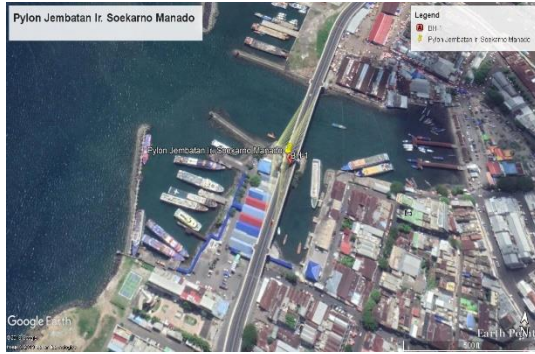
1. Menganalisis jenis dan sifat – sifat tanah
2. Menganalisis percepatan gempa dipermukaan tanah
3. Menghitung tegangan tanah
4. Menghitung nilai Cyclic Stress Ratio (CSR)
5. Menghitung nilai MSF sesuai dengan gempa – gempa refrensi
6. Menghitung nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) setiap lapisan tanah
7. Mengevaluasi potensi likuifaksi berdasarkan faktor keamanan (FS)

**Lokasi dan Metode Pengumpulan Data**

Data – data pokok yang dibutuhkan dalam penelitian ini ada dua macam yaitu :

1. Data tanah disekitar lokasi Jembatan Ir. Soekarno Manado.
2. Data gempa yang terjadi disekitar lokasi jembatan Ir. Soekarno Manado.

Lokasi penelitian dapat dilihat gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

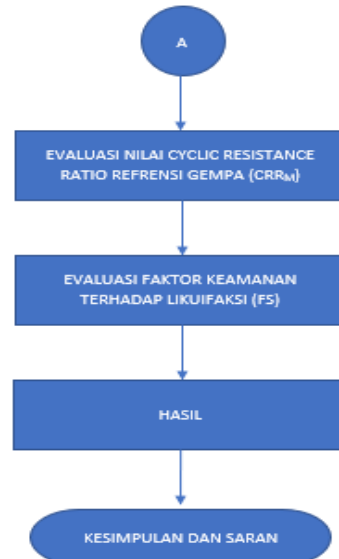
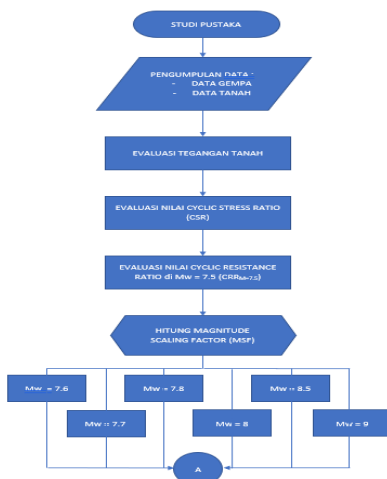
**Data Gempa**

Analisis potensi likuifaksi dipenulisan ini diawali dengan perhitungan percepatan maksimum dipermukaan tanah dan pencarian gempa terbesar yang pernah terjadi disekitar lokasi dari tahun 1925 – 2019 dengan radius 300 km, agar dapat menentukan referensi besaran Momen Magnitude ( $M_w$ ) dalam analisa potensi likuifaksi. Situs Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman (PUSKIM) dipakai untuk menganalisis Respon Spektra Wilayah Indonesia berdasarkan panduan SNI 1726:2012. Untuk situs pencarian gempa digunakan situs dari United States Geological Survey (USGS).

**Data Tanah**

Untuk mendapatkan data tanah, penulis mengambil data sekunder dari hasil in – situ test di lokasi Jembatan Ir. Soekarno Manado. Data yang diperlukan untuk menganalisis potensi likuifaksi yaitu data yang berkaitan dengan sifat fisik tanah, mekanis tanah dan hasil dari pengujian Standart Penetration (SPT).

**Bagan Alir**



Gambar 3. Bagan Alir

**HASIL DAN ANALISIS**

**Pengolahan Data Tanah**

Data tanah tersebut hasil dari pengujian Bore dan Standart Penetration (SPT). Data tanah jembatan Ir. Soekarno Manado ditabulasikan sebagai berikut :

Tabel 2. Data Tanah Jembatan Ir. Soekarno Manado

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	Jenis Tanah	N - SPT	N60
0 - 10	10	Soft Clayey Sandy Silt	4	4.81667
10 - 12	2	Medium Dense Silty Fine Sand	12	14.45
12 - 20	8	Very Dense Sand	38	45.7583
20 - 32	12	Very Dense Silty Sand	50	60.2083
32 - 50	18	Dense Silty Sand	35	42.1458

\*posisi muka air tanah (MAT) = 0 m

**Analisis hasil uji Standart Penetration Test (SPT)**

Untuk menganalisis potensi likuifaksi, data tanah dari hasil uji Standart Penetration (SPT) harus dikoreksi terhadap efisiensi alat uji sebesar 60% energy sehingga kita memperoleh nilai N60. Berikut adalah hasil perhitungan koreksi nilai N – SPT terhadap efisiensi alat uji.

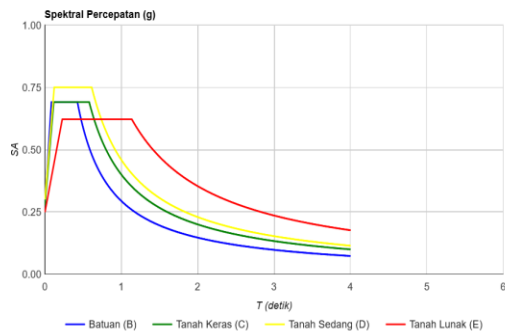
Tabel 3. Koreksi nilai N – SPT terhadap efisiensi alat

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	N - SPT	EF	Cs	Cr	Cb	N60
0 - 10	10	4	0.85	1	0.85	1	4.81667
10 - 12	2	12	0.85	1	0.85	1	14.45
12 - 20	8	38	0.85	1	0.85	1	45.7583
20 - 32	12	50	0.85	1	0.85	1	60.2083
32 - 50	18	35	0.85	1	0.85	1	42.1458

Dari hasil yang ditunjukkan dalam tabel nilai SPT yang sudah dikoreksi oleh efisiensi alat bahwa nilai SPT rata – rata berada diangka < 15. Menurut tabel 1 mengolongkan bahwa jenis tanah dipenelitian ini adalah “TANAH LUNAK”.

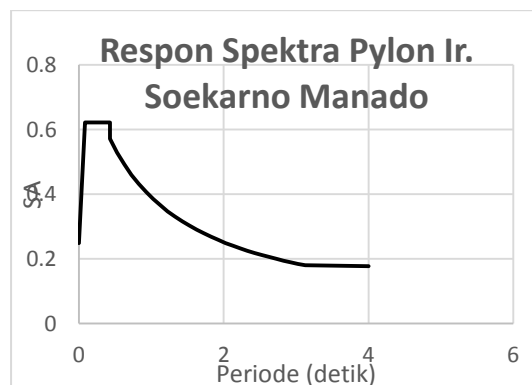
**Analisis percepatan puncak gempa horizontal dipermukaan tanah (amax)**

Untuk mendapatkan data gempa yang diperlukan untuk menganalisis potensi Likuifaksi, maka dilakukan analisis respon spectra pada lokasi Jembatan Ir. Soekarno dengan menginput koordinat Pylon Jembatan Ir. Soekarno Manado disitus Desain Spektra Indonesia PUSKIM.



Gambar 4. Respon Spectra lokasi penelitian

Dari hasil tersebut diambil percepatan tanah “LUNAK”, dan kemudian didapatkan hubungan antara periode gempa dan percepatan maksimum gempa horizontal dipermukaan tanah. Hasil percepatan gempa maksimum dipermukaan tanah terdapat pada periode 0.085 – 0.426 detik. Sehingga didapatkan nilai percepatan maksimum gempa horizontal dipermukaan tanah sebesar 0.622g.



Gambar 5. Respon Spectra lokasi penelitian (tanah lunak)

**Analisis tegangan pada tanah**

Menganalisis potensi Likuifaksi diperlukan perhitungan tegangan pada tanah. Tegangan yang dipakai untuk menganalisis potensi Likuifaksi mencakup tegangan total vertikal tanah ( $\sigma_v$ ) dan tegangan efektif vertikal tanah ( $\sigma'_v$ ).

Tabel 4. Perhitungan tegangan vertikal tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Ysat	$\sigma'_v$	$\sigma_v$
		(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
0 - 10	Soft Clayey Sandy Silt	16	61.9	160
10 - 12	Medium Dense Silty Fine Sand	16	74.28	192
12 - 20	Very Dense Sand	17	131.8	340
20 - 32	Very Dense Silty Sand	17	218.08	544
32 - 50	Dense Silty Sand	17.5	356.5	875

**Analisis Cyclic Stress Ratio**

Penentuan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) yaitu berdasarkan ratio tegangan tanah, percepatan horizontal gempa dipermukaan tanah (amax), koefisien tegangan reduksi (rd), dan percepatan gravitasi bumi (g).

Tabel 5. Perhitungan nilai reduksi tegangan tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	$\alpha$	$\beta$	rd
0 - 10	Soft Clayey Sandy Silt	-1.129	0.11839	0.8334
10 - 12	Medium Dense Silty Fine Sand	-1.133	0.11876	0.833
12 - 20	Very Dense Sand	-1.146	0.12021	0.8316
20 - 32	Very Dense Silty Sand	-1.166	0.12238	0.8295
32 - 50	Dense Silty Sand	Kedalaman $\geq$ 34 m		0.6975

Tabel 6. Perhitungan nilai Cyclic Stress Ratio

Kedalaman (m)	$\sigma_v/\sigma'_v$	amax/g	CSR
0 - 10	2.58481422	0.063405	0.08367485
10 - 12	2.58481422	0.063405	0.08362392
12 - 20	2.57966616	0.063405	0.08325447
20 - 32	2.49449743	0.063405	0.08021279
32 - 50	2.45441795	0.063405	0.06320485

\*nilai percepatan gravitasi bumi (g) = 9.81 m/s<sup>2</sup>

**Analisis Cyclic Resistance Ratio**

Pada dasarnya persamaan Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang dipakai berdasarkan hasil consensus oleh National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) hanya dikhususkan pada pasir murni (clean – sands) dengan Moment Magnitude (Mw) 7.5.

Idriss & Boulanger (2008 & 2014) dengan memperhitungkan parameter – parameter (N1)60 dan  $\Delta(N1)60$  sebagai koreksi Cyclic Resistance Ratio (CRR) terhadap fines



content (FC). Berikut ini adalah hasil perhitungan koreksi nilai N60 terhadap koreksi tegangan tanah (CN) dan terhadap koreksi fines content (FC) :

Tabel 7. Perhitungan nilai (N1)60

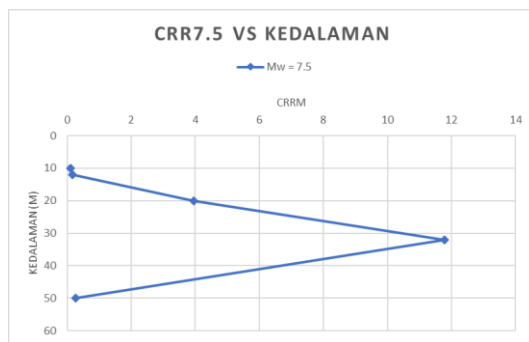
Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	N60	CN	(N1)60
0 - 10	10	4.8167	1.27103	6.12211
10 - 12	2	14.45	1.16028	16.7661
12 - 20	8	45.758	0.87105	39.8577
20 - 32	12	60.208	0.67716	40.7707
32 - 50	18	42.146	0.52963	22.3216

Tabel 8. Perhitungan nilai (N1)60.cs

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	(N1)60	Δ(N1)60	(N1)60.cs
0 - 10	10	6.1221	2.07254	8.19465
10 - 12	2	16.766	0.13502	16.9011
12 - 20	8	39.858	0.00192	39.8596
20 - 32	12	40.771	2.07254	42.8433
32 - 50	18	22.322	2.07254	24.3941

Tabel 9. Perhitungan nilai Cyclic Resistance Ratio

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	(N1)60.cs	CRR7.5
0 - 10	10	8.1946491	0.10586
10 - 12	2	16.901115	0.17298
12 - 20	8	39.859646	3.94947
20 - 32	12	42.843286	11.7736
32 - 50	18	24.394114	0.27636



Gambar 6. Grafik nilai CRR<sub>M=7.5</sub>

Untuk mendapatkan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) dengan variasi Moment Magnitude gempa yang ditinjau atau selain Moment Magnitude (Mw) = 7.5, diperlukan perhitungan faktor koreksi tegangan tanah (Kσ) dan Magnitude Scaling Factor (MSF).

Berdasarkan situs pencarian gempa United States Geological Survey (USGS), ada tiga gempa terbesar yang pernah terjadi

disekitar lokasi (radius 300 km) yaitu dengan besaran gempa Mw = 7.6, 7.7, & 7.8. maka untuk nilai MSF yang ditinjau dalam penelitian ini Mw = 7.6, 7.7, 7.8, 8, 8.5, & 9.

Tabel 10. Hasil perhitungan Cσ dan Kσ

Kedalaman (m)	Tebal Lapisan (m)	CRR7.5	Cσ	Kσ
0 - 10	10	0.1058618	0.0862	1.04135
10 - 12	2	0.1729754	0.11881	1.03533
12 - 20	8	3.9494733	0.3	0.91717
20 - 32	12	11.773559	0.3	0.76609
32 - 50	18	0.2763566	0.15859	0.7984

Setelah didapatkan nilai Magnitude Scaling Factor (MSF) untuk variasi Moment Magnitude gempa yang ditinjau dan faktor koreksi tegangan tanah (Kσ), maka hitung nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) dengan variasi Moment Magnitude gempa.

Tabel 11. Hasil perhitungan MSF divariasi gempa

MSF					
Mw = 7.6	Mw = 7.7	Mw = 7.8	Mw = 8	Mw = 8.5	Mw = 9
0.974023473	0.948542722	0.9236911	0.87581	0.7660875	0.6693

Tabel 12. Hasil perhitungan nilai CRR dengan variasi Mw

Kedalaman (m)	CRRM					
	Mw = 7.6	Mw = 7.7	Mw = 7.8	Mw = 8	Mw = 8.5	Mw = 9
0 - 10	0.10737	0.10456	0.10183	0.0965487	0.08445	0.073777
10 - 12	0.17443	0.16987	0.16542	0.1568458	0.13719	0.119854
12 - 20	3.52822	3.43592	3.3459	3.1724766	2.77501	2.424254
20 - 32	8.78533	8.5555	8.33136	7.8995176	6.90982	6.036432
32 - 50	0.2149	0.20929	0.20381	0.1932427	0.169032	0.1476668

### Evaluasi potensi Likuifaksi

Evaluasi potensi Likuifaksi dengan menggunakan metode Faktor Keamanan (FS), yang mana tanah dapat mengalami Likuifaksi jika FS < 1, tanah tersebut dikatakan dalam kondisi kritis Likuifaksi jika FS = 1, dan tanah tersebut aman terhadap Likuifaksi jika FS > 1.

Berikut ini adalah hasil perhitungan evaluasi Faktor Keamanan (FS) tanah terhadap Likuifaksi dalam bentuk tabulasi dan grafik :

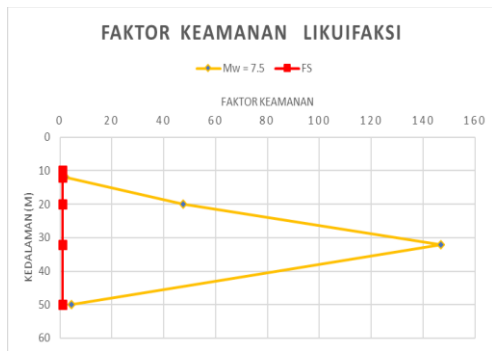
Tabel 13. Hasil perhitungan Faktor Keamanan (FS)

Kedalaman (m)	CRR7.5	CSR	FS	KETERANGAN
0 - 10	0.105862	0.0836749	1.26516	TIDAK LIKUIFAKSI
10 - 12	0.172975	0.0836239	2.06849	TIDAK LIKUIFAKSI
12 - 20	3.949473	0.0832545	47.4386	TIDAK LIKUIFAKSI
20 - 32	11.77356	0.0802128	146.779	TIDAK LIKUIFAKSI
32 - 50	0.276357	0.0632048	4.37239	TIDAK LIKUIFAKSI

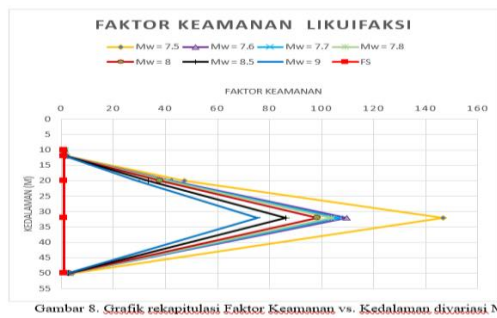
Tabel 14. Hasil perhitungan Faktor Keamanan untuk variasi Mw = 7.6, 7.7, 7.8, 8, 8.5 & 9

Kedalaman (m)	FAKTOR KEAMANAN (FS)						KETERANGAN
	Mw = 7.6	Mw = 7.7	Mw = 7.8	Mw = 8	Mw = 8.5	Mw = 9	
0 - 10	1.283245	1.2496751	1.2169339	1.15386	1.009296	0.8817219	Mw = 8.5 Kristis & 9 Likuifaksi
10 - 12	2.085933	2.0313644	1.978143	1.87561	1.640625	1.4332513	Tidak Likuifaksi
12 - 20	42.3788	41.270161	40.188891	38.1058	33.33171	29.118612	Tidak Likuifaksi
20 - 32	109.5254	106.66016	103.86568	98.482	86.14373	75.255235	Tidak Likuifaksi
32 - 50	3.400248	3.3112963	3.224541	3.0574	2.674358	2.3363212	Tidak Likuifaksi

- \*Jika FS > 1, Lapisan tanah tersebut aman terhadap Likuifaksi.
- \*Jika FS = 1, Lapisan tanah kritis terjadi Likuifaksi.
- \*Jika FS < 1, Likuifaksi dapat terjadi dilapisan tanah tersebut.



Gambar 7. Grafik Faktor Keamanan vs Kedalaman (Mw = 7.5)



Gambar 8. Grafik Faktor Keamanan

**PENUTUP**

**Kesimpulan**

1. Data tanah yang didapatkan melalui pengujian Standart Penetration (SPT) menunjukkan lokasi Pylon Jembatan Ir. Soekarno Manado merupakan tanah pasir berlanau (silty sand) dengan kondisi muka air tanah = 0 m, dan berdasarkan klasifikasi tanah pada SNI 1726:2012, nilai penetrasi rata-rata ( $\bar{N}$ ) menunjukkan tanah dasar berjenis tanah lunak dengan nilai ( $\bar{N}$ ) = 11.73.
2. Dengan menggunakan situs Desain Spektra Indonesia PUSKIM didapat nilai percepatan gempa dipermukaan tanah

maksimum dilokasi Pylon Jembatan Ir. Soekarno Manado yaitu 0.622g yang dimana daerah tersebut harus memperhatikan bahaya gempa dan bahaya terjadinya Likuifaksi.

3. Berdasarkan situs pencarian gempa United States Geological Survey (USGS) gempa terbesar yang pernah terjadi disekitar lokasi dengan radius 300 km dari tahun 1925 – 2019 sebesar Mw = 7.8.
4. Analisa potensi Likuifaksi dengan variasi Moment Magnitude (Mw) = 8.5 dan 9 berpotensi terjadi Likuifaksi dilapisan I (0 m – 10 m).
5. Nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) dengan koreksi clean – sands sangat dipengaruhi oleh presentasi fines content (FC). Dimana semakin besar presentasi fines content (FC) semakin besar juga nilai CRR.
6. Semakin dalam suatu kedalaman tanah, semakin besar juga Faktor Keamanan Likuifaksi, sehingga aman terhadap Likuifaksi.
7. Kondisi muka air tanah (MAT) sangat mempengaruhi tegangan efektif, sehingga mempengaruhi nilai Cyclic Stress Ratio (CSR). Jika muka air tanah semakin dekat dengan permukaan tanah, maka dapat memperbesar potensi terjadinya Likuifaksi.
8. Bertambahnya Moment Magnitude (Mw) gempa mengakibatkan nilai Cyclic Resistance Ratio semakin kecil, sehingga dapat memperbesar potensi terjadinya Likuifaksi.
9. Semakin kecil nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) seiring nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) semakin besar, dapat memperbesar potensi Likuifaksi.

### Saran

1. Hasil analisis potensi Likuifaksi sebaiknya menggunakan perhitungan hasil Cone Penetration Test (CPT), sebagai pembanding hasil perhitungan potensi Likuifaksi.
2. Disarankan untuk penelitian selanjutnya, menghitung dampak Likuifaksi terhadap kestabilan pondasi Jembatan Ir. Soekarno Manado, dikarenakan Likuifaksi sangat berbahaya pada kestabilan pondasi (defleksi).
3. Disarankan untuk penelitian selanjutnya, dimana perhitungan dan analisa Likuifaksi dilakukan dengan pemodelan dilaboratorium menggunakan shaking table atau centrifuge test dan melakukan pemodelan disoftware berbasis finite element atau finite difference (PLAXIS 3D atau FLAC 3D).
4. Jumlah titik pengujian untuk perhitungan potensi Likuifaksi sebaiknya ditambah, agar supaya ada pebanding dan dapat menghasilkan stratigraphy (gambar potongan melintang jenis – jenis tanah).
5. Sebaiknya data tanah yang diambil untuk penelitian Likuifaksi adalah data tanah primer.
6. Saran saya untuk adanya potensi Likuifaksi dimagnitude gempa yang besar (8.5 & 9) dilokasi penelitian sebaiknya melakukan perkuatan tanah dengan cara Deep Compaction (Granular Pile, Stone Column, dll) agar mencegah terjadinya Likuifaksi.
7. Likuifaksi terjadi di kota Palu, Sulawesi Tengah menimbulkan banyak korban jiwa, sehingga sangat diperlukan microzonasi atau pemetaan kawasan – kawasan yang berpotensi Likuifaksi di daerah – daerah Indonesia.
8. Literatur serta studi tentang perilaku tanah Likuifaksi sangat minim, untuk itu fenomena Likuifaksi merupakan topik yang menarik untuk dijadikan bahan penelitian selanjutnya

### DAFTAR PUSTAKA

- Ariandi, E, S, J Manoppo, F., and R Sumampouw, J, E. 2019. “Kajian Potensi Likuifaksi Pada Sekitar Pondasi Jembatan Prategang Di Sawangan.” *Jurnal Tekno* 17: 21.
- Das, B, M, and Z Luo. 2014. *Principles of Soil Dynamics*. 3rd ed. Cengage Learning.
- Ghorbani, Ali, Reyhaneh Jahanpour, and Hadi Hasanzadehshooili. 2019. “Evaluation of Liquefaction Potential of Marine Sandy Soil with Piles Considering Nonlinear Seismic Soil–Pile Interaction; A Simple Predictive Model.” *Marine Georesources and Geotechnology* 0 (0): 1–22. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1550543>.
- Hardiyatmo, H, C. n.d. *Pondasi I*. 2nd ed. Gadjadara University Press.
- Idriss, I, M, and W Boulanger. 2008. *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Ishihara, K. 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science Publications.
- Legrans, R, I. 2016. “Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Uji Penetrasi Standart (SPT) Di Pesisir Pantai Belang Minahasa Tenggara.” *Jurnal Tekno* 14: 38.
- Lonteng, C, V, D; S Balamba; S Monintja, and N Sarajar, A. 2013. “Analisis Potensi Likuifaksi Di PT. PLN (Persero) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 Sulawesi Utara 2 X 25 MW Power Plan.” *Jurnal Sipil Statik*.

Tandaju, C, V; Manoppo, Fabian J, Jack H Ticoh, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam, and Ratulangi Manado. 2019. “Analisis Potensi Likuifaksi ( Studi Kasus : PLTU AREA GORONTALO )” 7 (8).

Tijow, K, C, A Sompie, O, B, and H Ticoh, J. 2018. “Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (SPT) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara.” *Jurnal Sipil Statik*.