

MITIGASI BENCANA MENGGUNAKAN PETA FAKTOR KEAMANAN LIKUIFAKSI BERDASARKAN *CONE PENETRATION TEST* (STUDI KASUS ITERA)

Ahmad Yudi^{*1}, Sayed Ahmad Fauzan¹, Nugraha Bintang Wirawan¹

¹Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera

*Korespondensi: ahmad.yudi@si.itera.ac.id

ABSTRACT

Institute Technology of Sumatera (ITERA) located on Sumatera Island, take place on Lampung Selatan (South Lampung. As the coastal region, Lampung Selatan dominated by the sandy soil which allows the possibility of the Liquefaction. The objectives of this research is to mitigate the Liquefaction with analyze using Liquefaction of the safety factor map under the deterministic method. In order to establish the development of Institute Technology of Sumatera (ITERA, this research expected can be used as the consideration to mitigate the damage in relation with the site condition. Deterministic method is the ratio comparison of the Cyclic Resistant Ratio (CRR) and the Cyclic Stress Ratio (CSR) effected by the earthquakes. Cyclic Stress Ratio (CSR) depends on the depth of the soil layer, total vertical pressure, effective vertical pressure, earthquake's magnitude and the peak ground acceleration. Meanwhile, the Cyclic Resistance Ratio (CRR) calculated by the correlation of the empirical result of CPT. The safety factor value analyzed by the comparison value of CSR and CRR that pointed on 12 CPT location. In result, take the test location on ITERA, it is known that the safety factor in this site is on the safe zone and have been described on the color zone on the map as the disaster mitigation.

Keywords : Cone Penetration Test (CPT); Likuifaksi; safety factor

1. PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik, serta satu lempeng tektonik mikro, yaitu Lempeng Mikro Philipina. Kondisi ini memberikan konsekuensi akan rawannya bencana alam gempa bumi serta segala efek yang akan menyertai setiap kejadian gempa tersebut [1].

Salah satu fenomena yang dapat menyertai kejadian gempa adalah likuifaksi. Likuifaksi adalah suatu peristiwa dimana tanah berubah dari fase padat menjadi fase cair akibat meningkatnya tekanan air pori dalam rongga tanah. Kejadian ini terutama berkaitan dengan kondisi tanah pasiran jenuh yang memiliki kepadatan lepas atau sedang. Dampak dari peningkatan tekanan air pori tanah adalah tanah kehilangan kuat gesernya secara drastis akibat dari turunnya tegangan efektif tanah seiring dengan meningkatnya tegangan air pori.

Hilangnya kuat geser tanah akan menyebabkan kerusakan dahsyat pada struktur atau infrastruktur yang berada di atasnya. Kerusakan yang paling menonjol biasanya terletak di daerah pantai atau pelabuhan [2].

Menurut Soebowo, dkk. [1], Peristiwa likuifaksi dapat menimbulkan amblesan, keruntuhan, retakan tanah, kelongsoran dan lain-lain. Dari penelitian likuifaksi yang pernah dilakukan, diketahui bahwa peristiwa likuifaksi pada umumnya hanya terjadi pada daerah yang terbentuk oleh lapisan sedimen granular yang jenuh air dengan kepadatan yang rendah.

Institut Teknologi Sumatera (ITERA) merupakan satu-satunya institut negeri di Pulau Sumatera yang terletak pada kawasan Lampung Selatan yang merupakan daerah pesisir dengan kondisi tanah dominan berpasir, sehingga memungkinkan terjadinya likuifaksi di daerah ini. Oleh karena itu perlu adanya analisa mitigasi potensi likuifaksi di kawasan ITERA yang bertujuan untuk pencegahan terhadap

likuifaksi yang digambarkan dengan variabel faktor keamanan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa pelepasan energi yang menyebabkan dislokasi (pergeseran) pada bagian dalam bumi secara tiba-tiba. Terjadinya gempa bumi disebabkan oleh adanya pelepasan kekuatan yang berada dari dalam bumi, yaitu sentakan asli yang bersumber dari dalam bumi merambat melalui permukaan lalu menerobos permukaan kulit bumi karena keseimbangannya yang terganggu. Batuan kulit bumi menjadi bergeser sampai tercapainya keseimbangan kembali. Gempa bumi berlaku setiap hari di bumi, namun kebanyakan adalah kecil dan tidak menyebabkan kerusakan. Gempa bumi kecil juga akan mengiringi gempa bumi besar dan bisa terjadi sebelum atau sesudah gempa bumi besar tersebut terjadi yang disebut dengan gempa susulan [1].

2.2. Tanah

Tanah pengertiannya secara umum adalah material yang terdiri dari agregat padat yang tidak tersementasi satu sama lainnya dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang kosong diantara partikel tersebut (pori tanah). Butiran padat pada tanah merupakan hasil pelapukan batuan baik secara fisik maupun kimia [3].

Secara garis besar sifat-sifat tanah dapat dibagi sebagai berikut [3] :

1. Lempung

Lempung adalah tanah partikel mineral berkerangka dasar silikat yang berdiameter kurang dari 4 mikrometer. Lempung mengandung leburan silika dan aluminium yang halus. Unsur-unsur silikon, oksigen, dan aluminium adalah unsur yang paling banyak menyusun kerak bumi. Lempung terbentuk dari proses pelapukan batuan silika oleh asam karbonat dan sebagian dihasilkan dari aktivitas panas bumi.

2. Pasir

Pasir adalah contoh bahan mineral butiran. Butiran pasir umumnya berukuran antara 0,0625 sampai 2 milimeter. Materi pembentuk pasir adalah silikon dioksida, tetapi di beberapa pantai tropis dan subtropis umumnya dibentuk dari batu kapur. Pasir

secara teknis ada dua sifat yaitu pasir lepas (kepadatan rendah) dan pasir padat (kepadatan tinggi). Secara umum likuifaksi terjadi pada pasir lepas (kepadatan rendah).

3. Lanau

Lanau memiliki ukuran partikel dalam rentang 0,074 mm kebawah sampai 0,001 mm yang terbentuk akibat pelapukan batuan. Mereka mungkin bersifat organik jika terkontaminasi dengan material organik atau bisa bersifat anorganik.

Kebanyakan lapisan lanau dikontaminasi oleh mineral lempung sehingga mereka bersifat kohesif. 5-8 % kandungan lempung bisa membuat lapisan lanau memiliki kohesi, bergantung pada ukuran partikel dan tipe dari mineral lempung. Pada persentase lempung yang tinggi, atau bergantung efek visualnya, lapisan lanau bisa dengan bebas disebut "lempung".

2.3. Likuifaksi

Istilah likuifaksi mula-mula diciptakan oleh Mogami dan Kubo pada tahun 1953 yang secara historis digunakan untuk menamakan kejadian berbagai fenomena yang melibatkan deformasi tanah karena gangguan monoton, sementara, atau berulang-ulang pada tanah *cohesionless* jenuh yang berada pada kondisi *undrained*. Sebagaimana yang telah diketahui tanah *cohesionless* kering cenderung untuk memadat dibawah kondisi beban statis dan siklik. Ketika tanah tidak berkoheisi yang jenuh menerima beban cepat dibawah kondisi *undrained*, maka tanah tersebut akan cenderung memadat yang menyebabkan tekanan air pori meningkat dan tekanan efektif tanah berkurang [3].

Likuifaksi terjadi hanya pada tanah yang jenuh, jadi kedalaman dari muka air tanah berpengaruh terhadap kerentanan likuifaksi. Kerentanan terhadap likuifaksi akan berkurang dengan semakin dalamnya muka air tanah. Efek dari likuifaksi secara umum terlihat pada lokasi dimana muka air tanah hanya beberapa meter dari permukaan tanah. Di lokasi dimana level permukaan muka air tanahnya fluktuatif, maka likuifaksi mungkin juga fluktuatif [2].

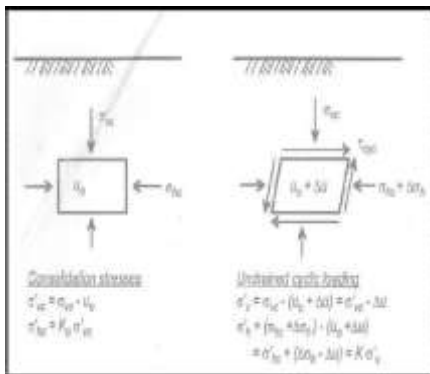
Salah satu kejadian likuifaksi yang menyebabkan kerusakan struktur adalah pada saat terjadinya gempa bumi Niigata tahun 1964, seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Akibat Likuifaksi pada Gempa Bumi Niigata, Jepang Tahun 1964 [2]

2.4. Kerangka Analisis Korelasi Untuk Mengetahui Potensi Likuifaksi

Beberapa pendekatan telah diusulkan dalam 45 tahun terakhir untuk menganalisis potensi likuifaksi. Pendekatan yang digunakan secara luas adalah pendekatan berbasis tekanan yang membandingkan tekanan siklik yang diinduksi oleh gempa bumi dengan tahanan siklik dari tanah. Tekanan siklik yang diinduksi oleh gempa bumi yang berada di bawah permukaan tanah terutama disebabkan oleh efek guncangan horizontal. **Gambar 2** secara skematis mengilustrasikan tekanan dan tekanan air pori beraksi pada elemen tanah yang berada di bawah permukaan tanah sebelum dan selama guncangan horizontal dari gempa bumi. Guncangan vertikal dari profil ini akan menghasilkan perubahan tambahan sementara pada tekanan vertikal total, tekanan total horizontal dan tekanan air pori, tetapi tekanan efektif vertikal dan horizontal tidak terpengaruh. Hal ini yang menyebabkan guncangan vertikal tidak disinggung dalam analisis.



Gambar 2 . Tekanan Siklik pada Elemen Tanah Dibawah Permukaan Tanah Ketika Terjadi Guncangan Horizontal [2]

2.5. Perhitungan Tekanan Siklik Yang Diinduksi Oleh Gempa Bumi

Tekanan geser yang diinduksi pada semua kedalaman lapisan tanah ketika gempa bumi terjadi disebabkan terutama sekali dari propagasi vertikal dari gelombang geser

horizontal. Prosedur analisis tekanan ini bisa dihitung jika karakteristik tanah yang terkandung dan input gerakannya diketahui. Analisis dinamik satu dimensi telah dikembangkan untuk mempermudah mendapatkan r_d . Analisis ini telah memperlihatkan bahwa r_d karakteristik pergerakan gempa bumi (intensitas dan frekuensi), profil gelombang kecepatan pada suatu lokasi, dan dinamik nonlinear dari properti tanah [2]. Analisis respon pada ratusan parameter yang mendapatkan parameter r_d sebagai fungsi dari kedalaman (z) dan magnitudo gempa (M) [2]. Dengan persamaan sebagai berikut:

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M) \quad (1)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin\left(\frac{z}{11,73} + 5,133\right) \quad (2)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin\left(\frac{z}{11,28} + 5,142\right) \quad (3)$$

Dimana :
 z = kedalaman dalam meter.
 M = momen magnitudo.
 nilai sinus dalam radian.

Persamaan diatas secara matematis hanya dapat diaplikasikan pada $z \leq 34$ m. Bagaimanapun, ketidakpastian kenaikan pada r_d dengan kenaikan kedalaman, sehingga persamaan di atas secara aktual hanya dapat dilakukan pada kedalaman kurang dari 20 m.

Tekanan siklik yang diinduksi oleh gempa dimana tekanan ini mempengaruhi potensi likuifaksi adalah sebesar 65% dari puncak tekanan siklik (Idriss dan Boulanger, 2008). Hal ini lah yang disebut dengan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$CSR = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vc}} = 0,65 \frac{\sigma_{vc}}{\sigma'_{vc}} \frac{\alpha_{max}}{g} r_d \quad (4)$$

Dimana :
 α_{max} = Percepatan gempa maksimum di permukaan
 σ_{vc} = Tekanan vertikal total (kN/m²)
 σ'_{vc} = Tekanan vertikal efektif (kN/m²)
 g = gravitasi (m/s²)
 r_d = Koefisienreduksi tekanan geser

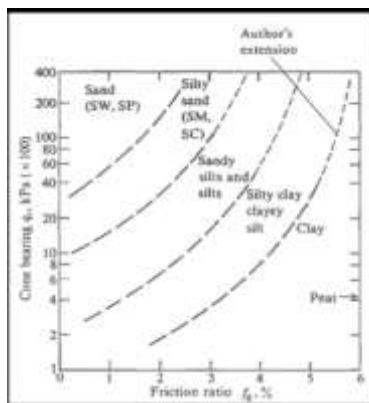
2.6. Penyelidikan Lapangan Untuk Mengevaluasi Potensi Likuifaksi

Hasil penyelidikan lapangan seperti Sondir dapat digunakan untuk mencari tahanan siklik dari tanah yang disebut dengan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR). Setelah itu CRR kita

bandingkan dengan CSR, dimana perbandingan CRR dengan CSR adalah faktor kemanan apakah likuifaksi terjadi atau tidak [3]. Untuk itu harus diketahui pengkorelasi antara hasil tes lapangan untuk mendapatkan CRR.

Data hasil tes lapangan berupa CPT atau Sondir dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. CPT memiliki *conical penetrometer* berdiameter 35,7 mm yang akan menekan masuk kedalam tanah dengan laju 20 cm/sec. Ketika itu *transducer* pada alat CPT atau Sondir akan mencatat gaya pada ujung konus, gaya tahanan pada bagian selimut yang berada dibelakang ujung konus. Gaya ujung dibagi dengan luas penampang dari penetrometer adalah tahanan ujung q_c dan tahanan gaya selimut dibagi dengan luas permukaan selimut adalah *friksi* (f_s). Keuntungan utama dari Sondir ini adalah menyediakan pencatatan data yang terus menerus dari tahanan penetrasi. Kerugiannya adalah sangat sulit untuk mempenetrasi lapisan yang memiliki partikel besar seperti batuan.

Korelasi empiris antara tipe tanah dengan beragam pengukuran Sondir telah dikembangkan, seperti terlihat pada **Gambar 3** yang memperlihatkan bagan empiris yang mengkategorikan tanah ke dalam lima sifat tanah yang berbeda dengan basis nilai dari tahanan ujung konus (q_c), *friction rasio* (F_R).



Gambar 3. Grafik Sifat Tanah dengan CPT yang Dinormalisasi yang Diusulkan oleh Robertson dan Campanella 1983 [3]

2.7. Koreksi Overburden pada Tes Lapangan

Tahanan penetrasi CPT pada pasir meningkat dengan kenaikan *confining stress*, dimana nilai q_c dari kedalaman dan lokasi yang berada tidak bisa secara langsung dibandingkan satu sama lainnya. Faktor

koreksi dari nilai CPT adalah C_N , kemudian didapat persamaan sebagai berikut :

$$q_{ci} = C_N q_c \quad (5)$$

Adapun nilai C_N didapat dengan rumus yang diusulkan oleh Idriss dan Boulanger (2008), yaitu:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^{1,338 - 0,249(q_c)^{0,264}} \leq 1,7 \quad (6)$$

Dimana,

C_N = Faktor koreksi dari nilai CPT

σ'_{vc} = Tekanan vertikal efektif (kN/m²)

P_a = Tekanan 1 atm (100 kPa)

q_c = Tahanan ujung (kN/m²)

Jika nilai C_N lebih dari 1,7, maka digunakan nilai $C_N = 1,7$.

2.8. Magnitude Scaling Factor (MSF)

Magnitude scaling factor (MSF) digunakan untuk menentukan CSR dan CRR yang menggunakan nilai M yang biasa (secara konvensional diambil $M=7,5$), karena CRR bergantung pada jumlah beban siklik yang berkorelasi dengan M (Idriss dan Boulanger, 2008). Definisi dasar dari MSF adalah :

$$MSF = \frac{CRR_M}{CRR_{M=7,5}} \quad (7)$$

Nilai MSF pada nilai M yang berbeda dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan yang dipakai oleh Idriss dan Boulanger (2008) seperti berikut:

$$MSF = 6,9 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 0,058 \leq 1,8 \quad (8)$$

Jika nilai MSF lebih dari 1,8, maka digunakan nilai $MSF = 1,8$.

2.9. Overburden Correction Factor (K_σ)

Overburden correction factor (K_σ) digunakan untuk menentukan CSR dan CRR terhadap nilai *effective overburden stress* yang biasa, karena CRR pada pasir bergantung pada *effective overburden stress* (Idriss dan Boulanger, 2008). Nilai K_σ di dapat dari :

$$K_\sigma - 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{\sigma'_{vc}}{P_a} \right) \leq 1,1 \quad (9)$$

Jika nilai K_σ lebih dari 1,1, maka digunakan nilai $K_\sigma = 1,1$.

Dimana koefisien C_σ didapat dari

korelasi dengan *overburden penetration Resistance* yang diusulkan oleh Idris dan Boulanger (2004) sebagai berikut :

$$C_{\sigma} = \frac{1}{37,3 - 8,27(q_c)^{0,264}} \leq 0,3 \quad (10)$$

Koefisien C_{σ} dibatasi maksimum dengan nilai 0,3. Jika nilai C_{σ} lebih dari 0,3, maka digunakan nilai $C_{\sigma} = 0,3$. Nilai q_{c1} juga mempunyai batas yaitu $q_{c1} \leq 211$.

2.10. Korelasi CPT dengan CRR pada Tanah Pasir

Seerti yang kita ketahui kekuatan dan kekakuan pada tanah berdasarkan tes lapangan didapat dari nilai SPT dan CPT nya. Kekuatan inilah yang akan menghasilkan nilai *Cyclic Resistene Ratio* (CRR) yang akan dibandingkan dengan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang berasal dari pergerakan dinamik tanah akibat gempa yang terjadi. Korelasi antara CRR dengan CPT yang diusulkan oleh Boulanger (2004) berdasarkan hasil studinya adalah sebagai berikut:

$$CRR_{M=7,5; \sigma'_{vc}=1} = \exp\left(\frac{q_{c1}}{540} + \left(\frac{q_{c1}}{67}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1}}{80}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1}}{114}\right)^4 - 3\right) \quad (11)$$

$$CRR_{M, \sigma'_{vc}} = CRR_{M=7,5; \sigma'_{vc}=1atm} \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \quad (12)$$

Faktor keamanan terhadap pemicu likuifaksi seperti yang telah disebutkan sebelumnya adalah nilai CRR dibandingkan dengan CSR seperti rumus berikut :

$$FK = \frac{CRR_{M, \sigma'_{vc}}}{CSR_{M, \sigma'_{vc}}} \quad (13)$$

2.11. Perambatan Gelombang Gempa dari Batuan Dasar ke Permukaan

Pada Penelitian ini dipakai korelasi antara nilai CPT (Sondir) dengan V_s yang diusulkan oleh Robetson dan Cabal (2009) berdasarkan hasil data penyelidikan 100 profil CPT di California dikombinasikan dengan beberapa data yang dipublikasikan hasilnya adalah kecepatan geser yang dinormalkan $V_{s1}(m/s)$.

$$V_{s1} = V_s \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}}\right)^{0,25} \quad (14)$$

$$V_s = \sqrt{\alpha_s \left(\frac{q_c - \sigma_{vc}}{P_a}\right)} \quad (15)$$

$$\alpha_s = 10^{(0,55 \cdot I_c + 1,68)} \quad (16)$$

2.12. Faktor Amplifikasi

Faktor amplifikasi yang dapat digunakan dalam analisis percepatan maksimum gempa di permukaan adalah faktor amplifikasi yang dikembangkan oleh Stewart et al. 2003 (Misliniyati, 2010). Selain itu, Faktor amplifikasi dari *American Society of Civil Engineers (ASCE)* 2010 juga dapat digunakan dalam analisis dengan terlebih dahulu mengetahui klasifikasi jenis tanah pada profil tanah yang ditinjau.

Tabel 1. Klasifikasi *Site* Didasarkan Atas Korelasi Penyelidikan Tanah Lapangan dan Laboratorium

Site Classification	V, (m/s)	N	Su (kPa)
A Hard rock	$V \geq 1500$	N/A	N/A
B Rock	$750 < V \leq 1500$	N/A	N/A
C Very Dense Soil and Soft Rock	$350 < V \leq 750$	$N > 50$	$Su \geq 100$
D Medium Soil	$175 < V \leq 350$	$15 \leq N \leq 50$	$50 \leq Su \leq 100$
E Soft Soil	$V < 175$	$N < 15$	$Su \leq 50$

Sumber: *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010* (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010)

Tabel 2. Faktor Amplifikasi

Site Classification	S _{PGA} , PGA				
	≤0,1	=0,2	=0,3	=0,4	≥0,5
Hard rock (S _A)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Rock (S _B)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Very Dense Soil and Soft Rock (S _C)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Medium Soil (S _D)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Soft Soil (S _E)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Sumber: *Peta Hazard Gempa Indonesia 2010* (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010)

3. METODE PENELITIAN

3.1. Gambaran Umum Penelitian

Tidak semua tanah rentan terhadap bahaya Likuifaksi. Langkah pertama untuk melakukan analisis potensi bahaya Likuifaksi adalah melakukan analisis kerentanan atau potensi Likuifaksi. Jika kondisi tanah di suatu

lokasi tidak berpotensi Likuifaksi maka bahaya Likuifaksi tidak akan terjadi. Kriteria analisis potensi Likuifaksi pada suatu lokasi ditentukan dari jenis tanah. Sehingga pada penelitian ini dilakukan analisis potensi Likuifaksi dengan metode deterministik berdasarkan data sondir pada setiap jenis lapisan tanah.

Analisis menggunakan metode deterministik, dengan melakukan perbandingan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang menggambarkan resistensi atau kekuatan tanah terhadap *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang menggambarkan beban gempa yang terjadi. Perbandingan di atas akan menghasilkan suatu angka faktor keamanan yang mengindikasikan bahaya potensi Likuifaksi. Nilai faktor keamanan suatu lokasi terhadap Likuifaksi adalah sebesar 1,2, jika kecil dari nilai tersebut maka lokasi yang kita tinjau bahaya Likuifaksinya akan tinggi. Kemudian nilai faktor keamanan digambarkan dalam peta zonasi sebagai langkah mitigasi dalam perencanaan pembangunan kedepannya.

3.2. Analisis Pengolahan Data

Dalam penelitian ini dilakukan analisis potensi likuifaksi dengan metode deterministik yang dipublikasikan oleh Idriss dan Boulanger (2008). Metode ini menggunakan perbandingan dari *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang menggambarkan resistensi tanah terhadap *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang menggambarkan beban gempa yang terjadi. Adapun tahapan dan cara yang akan dilakukan dalam analisis ini adalah sebagai berikut :

1. Penentuan Jenis Tanah di setiap Lapisan.
2. Menghitung Nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) setiap Lapisan Tanah.
3. Menghitung Nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) setiap Lapisan Tanah.
4. Perhitungan Faktor Keamanan (*Factor of Safety*) dari Tes CPT.
5. Membuat Peta Mitigasi Likuifaksi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Dalam evaluasi potensi likuifaksi dengan metode deterministik yang didapat berupa parameter nilai faktor keamanan. Nilai faktor keamanan didapat dari perbandingan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan *Cyclic Stress Ratio* (CSR).

Adapun variabel yang mempengaruhi nilai CSR adalah percepatan gempa maksimum di permukaan, koefisien reduksi tekanan geser, serta tekanan vertikal total dan tekanan vertikal efektif tanah. Nilai CRR didapat dari korelasi empiris dengan hasil tes CPT pada 12 titik yang tersebar di ITERA.

Pengambilan data CPT dilakukan hingga batas kedalaman 10 meter. Namun sondir hanya mencapai kedalaman 1,4 – 8,4 meter. Hal ini karena penetrasi konus sudah tidak mampu menembus lapisan tanah yang lebih dalam.

4.2. Data Tes Lapangan CPT

Hasil tes lapangan CPT dilakukan pada 12 titik yang tersebar di ITERA. Pada 12 titik penelitian itu didapat hasil yang berbeda-beda dan kedalaman yang berbeda juga. Hal ini dikarenakan kemampuan alat sondir itu yang terbatas.

Tabel 3. Rekap Hasil Tes CPT di 12 Titik lokasi ITERA

No.	Lokasi	Tahanan Ujung (qc) (kg/cm ²)	<i>friction ratio</i> (FR) (%)	Kedalaman (m)
1	Titik 1	220	1	3,6
2	Titik 2	200	3	3,0
3	Titik 3	225	1	2,0
4	Titik 4	230	1	1,4
5	Titik 5	200	3	8,4
6	Titik 6	220	1	4,0
7	Titik 7	230	1	2,2
8	Titik 8	230	1	1,8
9	Titik 9	230	1	3,0
10	Titik 10	200	3	4,2
11	Titik 11	200	0,25	1,6
12	Titik 12	200	0,25	2,2

4.3. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan dari Tes CPT

Dari analisis didapat nilai faktor keamanan yang dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Faktor Keamanan Hasil Tes CPT di 12 Titik lokasi ITERA

No.	Lokasi	CRR	CSR	Faktor Keamanan (SF)	Warna
1	Titik 1	0.7912	0.46	1.72	Green
2	Titik 2	0.85772	0.523	1.64	Yellow
3	Titik 3	0.8352	0.464	1.8	Green
4	Titik 4	0.93916	0.443	2.12	Green
5	Titik 5	0.79222	0.554	1.43	Yellow
6	Titik 6	0.7978	0.463	1.71	Green
7	Titik 7	0.8791	0.483	1.82	Green
8	Titik 8	0.7871	0.463	1.7	Green
9	Titik 9	0.83248	0.473	1.76	Green
10	Titik 10	0.82446	0.546	1.51	Yellow
11	Titik 11	0.9177	0.483	1.9	Green
12	Titik 12	0.79636	0.463	1.72	Green

4.4. Peta Zonasi Faktor Keamanan



Gambar 4. Peta Zonasi Faktor Keamanan Likuifaksi

Berdasarkan perhitungan faktor keamanan likuifaksi, peta zonasi mitigasi dibuat dan dapat dilihat pada **Gambar 4**. Dengan ketentuan, warna hijau menunjukkan $SF > 1.7$ dan kuning menunjukkan $SF < 1.7$.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bahaya potensi likuifaksi di ITERA termasuk dalam kategori daerah dengan tingkat potensi likuifaksi aman.
2. Pembangunan ITERA diharapkan dapat memperhatikan peta zonasi factor keamanan likuifaksi sebagai langkah mitigasi.

6. SITASI DAN DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soebowo, E., Tohari, A. and Sarah, D., *Potensi Likuifaksi Akibat Gempa Bumi Berdasarkan Data CPT Dan N-SPT Di Daerah Patalan Bantul, Yogyakarta*, Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan Jilid 19 No.2,85-97, 2009
- [2] Idriss I.M., and Boulanger R.W., *Semi-Empirical Procedures For Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes*, Department Of Civil and Environmental Engineering University Of California, 2004
- [3] Yulman, M.A., *Studi potensi likuifaksi dengan metedologi deterministik kasus kota padang [Tugas Akhir]*, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung : Bandung, 2010