



Analisis Geoteknik Pada Lokasi Pariwisata Mangatasik Terhadap Potensi Likuifaksi

Deo Paskah A. P. Bujung¹, Oktovian B. A. Sompie², Steeva G. Rondonuwu³

Program Studi Magister Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil,

Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado ^{1,2,3}

E-mail: deobujung12@gmail.com

Abstrak

Sebagai wilayah dengan potensi sumber daya alam yang begitu kaya, Indonesia menjadi salah satu negara destinasi pariwisata yang dikenal di seluruh dunia. Akan tetapi, selain potensi sumber daya alam dan pariwisata yang luar biasa tersebut, wilayah Indonesia juga memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap bencana alam salah satunya likuifaksi. Liquefaksi adalah peristiwa perubahan sifat tanah dari kondisi padat (solid) menjadi kondisi cair (liquid), yang diakibatkan oleh beban siklis dinamis pada saat terjadi gempa sehingga terjadi peningkatan tekanan air pori hingga mendekati atau melampaui tegangan vertikal. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisis potensi likuifaksi berdasarkan data Standard Penetration Test (SPT) lalu melakukan perbandingan faktor keamanan (Safety Factor) dengan data tanah yang diperoleh dari metode ADMT. Kawasan Pariwisata Mangatasik tidak memiliki potensi likuifaksi. Hal ini ditunjukkan melalui hasil analisis yang diperoleh, dimana untuk CRR pada magnitude 7.5 (CRR-7.5) maupun CRR pada magnitude 8.0 (CRR-8.0) memiliki faktor keamanan minimum sebesar 1.090482343 pada kedalaman 6 meter (CRR-7.5) dan 1.010287301 pada kedalaman 6 meter (CRR-8.0). Pada Analisis kedalaman tanah dengan menggunakan metode ADMT diperoleh nilai resistivitas minimum pada area yang ditinjau sebesar 30 Ω.m, sehingga lapisan tanah pesisir pantai di lokasi tersebut memiliki resistivitas sedang. Dari perbandingan yang dilakukan terhadap faktor keamanan dan resistivitas untuk CRR-7.5 dan CRR-8.0, diperoleh bahwa lapisan tanah dengan faktor keamanan terkecil memiliki resistivitas yang cenderung sedang. Sedangkan untuk lapisan tanah dengan faktor keamanan terbesar memiliki resistivitas yang cenderung tinggi. Hal ini juga selaras dengan N-SPT pada lapisan tanah tersebut.

Kata Kunci: ADMT, Faktor Keamanan, Liquefaksi, Magnitude, Resistivitas

Abstract

As a region with such rich potential in natural resources, Indonesia has become one of the globally recognized tourist destination countries. However, in addition to its extraordinary potential in natural resources and tourism, Indonesia also faces a high level of vulnerability to natural disasters, one of which is liquefaction. Liquefaction is the phenomenon of changing the nature of soil from a solid to a liquid state, caused by dynamic cyclic loading during an earthquake, resulting in an increase in pore water pressure approaching or exceeding the vertical stress. This research was conducted by analyzing the potential for liquefaction based on Standard Penetration Test (SPT) data and comparing the Safety Factor with soil data obtained from the Cone Penetration Test (CPT) method. The Mangatasik Tourism Area does not have liquefaction potential. This is indicated by the results of the analysis obtained, where for Cyclic Resistance Ratio at magnitude 7.5 (CRR-7.5) and Cyclic Resistance Ratio at magnitude 8.0 (CRR-8.0), the minimum safety factor is 1.090482343 at a depth of 6 meters (CRR-7.5) and 1.010287301 at a depth of 6 meters (CRR-8.0). In the analysis of soil depth using the CPT method, the minimum

78



Copyright © 2024 Authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

resistivity value in the surveyed area is 30 Ω.m, indicating that the coastal soil layer in that location has moderate resistivity. From the comparison made between safety factors and resistivity for CRR-7.5 and CRR-8.0, it is found that the soil layer with the smallest safety factor tends to have moderate resistivity. Meanwhile, the soil layer with the largest safety factor tends to have high resistivity. This is also consistent with the N-SPT in that soil layer.

Keywords: ADMT, Liquefaction, Magnitude, Safety Factor.

1. PENDAHULUAN

Sebagai wilayah dengan potensi sumber daya alam yang begitu kaya, Indonesia menjadi salah satu negara destinasi pariwisata yang dikenal di seluruh dunia. Akan tetapi, selain potensi sumber daya alam dan pariwisata yang luar biasa tersebut, wilayah Indonesia juga memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap bencana alam salah satunya gempa bumi. Hal ini dikarenakan wilayah Indonesia terletak pada pertemuan 4 (empat) lempeng tektonik bumi yakni Lempeng Pasifik, Indo-Australia, Eurasia, dan Filipina. Sehingga wilayah Indonesia memiliki aktivitas gempa yang sangat tinggi. Gempa dapat terjadi akibat pergerakan dari lempeng tektonik bumi. Gempa bumi dapat memberi dampak kerusakan lingkungan secara fisik seperti kerusakan pada struktur bangunan, kondisi tanah, kerugian materi lainnya hingga menyebabkan korban jiwa. Dalam aspek geoteknik, kerusakan akibat gempa yang dimaksud yakni kegagalan / keruntuhan (failure) pada struktur tanah yang mengakibatkan tanah menjadi tidak stabil sehingga kehilangan daya dukungnya, misalnya fenomena tanah longsor (kondisi tanah pada lereng), penurunan tanah (settlement) atau likuifaksi.

Likuifaksi adalah peristiwa perubahan sifat tanah dari kondisi padat (solid) menjadi kondisi cair (liquid), yang diakibatkan oleh beban siklis dinamis pada saat terjadi gempa sehingga terjadi peningkatan tekanan air pori hingga mendekati atau melampaui tegangan vertikal. Likuifaksi biasanya dapat terjadi pada tanah non-kohesif (lanau, pasir) yang jenuh air. Karakteristik tanah ini cenderung mudah kehilangan kuat gesernya saat menerima getaran, terutama akibat gempa (Tuerah et al., 2021). Kawasan pariwisata Mangatasik adalah daerah pesisir yang begitu diminati oleh wisatawan lokal maupun mancanegara memiliki karakteristik tanah non-kohesif (pasir dan lanau) (Badan Geologi, 2019). Terkait hal tersebut, perlu bagi penulis untuk melakukan penelitian berupa analisis potensi likuifaksi pada daerah tersebut.

Tujuan yang hendak dicapai ialah menentukan seberapa besar potensi Likuifaksi di Kawasan Pariwisata Mangatasik dengan menentukan nilai Faktor Keamanan (Safety Factor) yang diperoleh dari besaran nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) berdasarkan data Standard Penetration Test (SPT) serta data riwayat gempa di lokasi tersebut. Selain itu, juga tujuan lainnya ialah menentukan korelasi Safety Factor yang diperoleh berdasarkan data SPT dengan resistivitas yang diperoleh dari pengambilan data dengan metode ADMT (Active Directory Migration Tools) untuk lapisan tanah di Kawasan Pariwisata Mangatasik. Namun, dalam penelitian ini dibatasi pada pengambilan data hanya di satu lokasi atau satu titik. Adapun lokasi tersebut merupakan bagian dari kawasan pariwisata Mangatasik yang terletak di Desa Ranowangko, Kecamatan Tombariri, Kabupaten Minahasa. Dengan koordinat $1^{\circ}23'52.67''$ LU - $124^{\circ}39'5.49''$ BT.

2. METODE PENELITIAN

Untuk penelitian ini diperlukan beberapa data seperti: Data Tanah (Data SPT di lapangan), Data Gempa dan Data Pengukuran ADMT. Dalam menganalisa data tanah diambil data uji lapangan yang dilakukan di lokasi proyek pembangunan bangunan pemecah ombak (*Breakwater*) di Ranowangko, Minahasa. Data-data yang dibutuhkan untuk menganalisa potensi likuifaksi yakni data yang terkait dengan sifat fisik maupun sifat mekanis tanah, serta hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT). SPT sendiri merupakan metode pengujian geoteknik yang umum digunakan untuk menentukan sifat fisik dan mekanik dari lapisan tanah di dalam permukaan tanah. Tes ini dilakukan dengan menggunakan alat penetrometer standar, yang terdiri dari sebuah bor dengan ujung berbentuk kerucut (*cone*) yang dilengkapi dengan pengukur jumlah pukulan yang diperlukan untuk menembus tanah.

Kemudian data gempa berupa perhitungan percepatan gempa, dalam penelitian ini dilakukan perhitungan percepatan gempa di permukaan (a_{max}). Untuk memperoleh data percepatan gempa yang ada di lokasi penelitian, diambil data respon spektra dari situs Desain Spektra Indonesia yang dikeluarkan oleh Kementerian PUPR Republik Indonesia. Pada situs tersebut, tersedia data percepatan gempa sesuai lokasi yang dimasukkan di dalam kotak pencarian dengan memasukan koordinat lokasi yang hendak ditinjau.

Pengambilan data Magnetotellurik dilakukan secara langsung di lapangan, yang bertujuan untuk mengetahui nilai resistivitas tanah pada kedalaman tertentu. Pengambilan data ini dilakukan dengan alat Magnetotellurik, dimana alat ini dipasang pada permukaan tanah dan langsung melakukan pemindaian ke bawah permukaan tanah. Dari pemindaian tersebut diperoleh nilai resistivitas di bawah permukaan tanah.

Setelah data-data tersebut diperoleh maka dilakukan prosedur penelitian sebagai berikut:

- 1) Menganalisa jenis dan sifat dari lapisan tanah (termasuk resistivitas tanah tersebut);
- 2) Menghitung percepatan gempa (a_{max}) di muka tanah;
- 3) Mengitung tegangan-tegangan yang ada di dalam tanah;
- 4) Menghitung nilai Cyclic Stress Ratio (CSR);

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (1)$$

Dimana:

CSR	= Cyclic Stress Ratio
τ_{max}	= tegangan geser siklis
σ_{vo}	= Tegangan vertikal <i>overburden</i> total
σ'_{vo}	= Tegangan vertikal <i>overburden</i> efektif
a_{max}	= Percepatan horizontal maksimum tanah (m/s^2)
r_d	= Koefisien reduksi kedalaman
g	= Percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)

- 5) Menghitung nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR).

Untuk menghitung nilai CRR dilakukan langkah-langkah berikut:

1. Menghitung Nilai (N1)60

$$(N1)_{60} = Nm C_N C_E C_B C_R C_S \quad (2)$$

Dimana :

Nm = N-SPT yang diperoleh dari tes lapangan

C_N	= Faktor normalisasi Nm terhadap tegangan <i>overburden</i> pada umumnya
C_E	= Koreksi rasio energi hammer
C_B	= Koreksi untuk diameter lubang bor
C_R	= Faktor koreksi dari panjang batang
C_S	= Koreksi untuk sampel

2. Menghitung Nilai (N_1)_{60CS}

$$(N_1)_{60\text{ cs}} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (3)$$

Dimana α dan β merupakan koefisien yang didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$\alpha = 0 \text{ untuk } FC \leq 5\%$$

$$\alpha = \exp[1,76 - (190/FC^2)] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\%$$

$$\alpha = 5,0 \text{ untuk } FC \geq 35\%$$

$$\beta = 1,0 \text{ untuk } FC \leq 5\%$$

$$\beta = [0,99 + (FC^{1.5}/1,000)] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\%$$

$$\beta = 1,2 \text{ untuk } FC \geq 35\%$$

3. Menghitung CRR-7.5

Menentukan nilai CRR pada skala gempa 7,5 skala Richter dapat dihitung menggunakan kurva antara nilai SPT terkoreksi (N_1)₆₀ dengan nilai CSR. Idriss & Boulanger (2008) memformulasikan beberapa parameter nilai yang persamaannya sudah diubah, sehingga persamaan untuk menentukan nilai CRR yang dijumlahkan dengan nilai Mw sebesar 7.5 diformulasikan sebagai berikut:

$$CRR_{7,5} = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60\text{ cs}}}{14,1} + \left[\frac{(N_1)_{60\text{ cs}}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60\text{ cs}}}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60\text{ cs}}}{25,4} \right]^4 - 2,8 \right\} \quad (4)$$

Jika nilai $(N_1)_{60\text{ cs}} > 37,5$ maka tanah tersebut tidak perlu dilakukan evaluasi karena nilai yang berpotensi mengalami likuifaksi adalah ketika $(N_1)_{60\text{ cs}} < 37,5$. Jika $(N_1)_{60\text{ cs}}$, maka tanah tersebut sanggup menahan beban seismik yang direpresentasikan dengan nilai $CRR_{7,5}$.

Untuk skala gempa yang berbeda dengan *magnitude* gempa 7,5 SR dibutuhkan faktor koreksi yang disebut *Magnitude Scale Factor* (MSF) yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$CRR_M = CRR_{7,5} \times K\sigma \times MSF \quad (5)$$

Dimana :

$$CRR_{7,5} = \text{CRR pada skala 7,5 SR}$$

$$K\sigma = \text{Faktor koreksi } overburden$$

$$MSF = \text{Magnitude Scale Factor}$$

Nilai MSF didapat dari hasil kombinasi data laboratorium dengan mengkombinasikan nilai CRR dengan jumlah siklus pembebahan yang sama dan korelasi dari jumlah ekuivalen siklus pembebahan yang seragam dengan magnitude gempa yang terjadi.

- 6) Menghitung nilai Faktor Keamanan berdasarkan nilai CSR dan CRR yang dinyatakan dalam persamaan:

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \quad (6)$$

Dimana:

Jika $SF = \frac{CRR}{CSR} < 1$, maka terjadi likuifaksi.

Jika $SF = \frac{CRR}{CSR} = 1$, maka kondisi kritis.

Jika $SF = \frac{CRR}{CSR} > 1$, maka tidak terjadi likuifaksi.

- 7) Membandingkan nilai Faktor Keamanan dengan nilai resistivitas yang diperoleh dari pengambilan data Magnetotellurik.

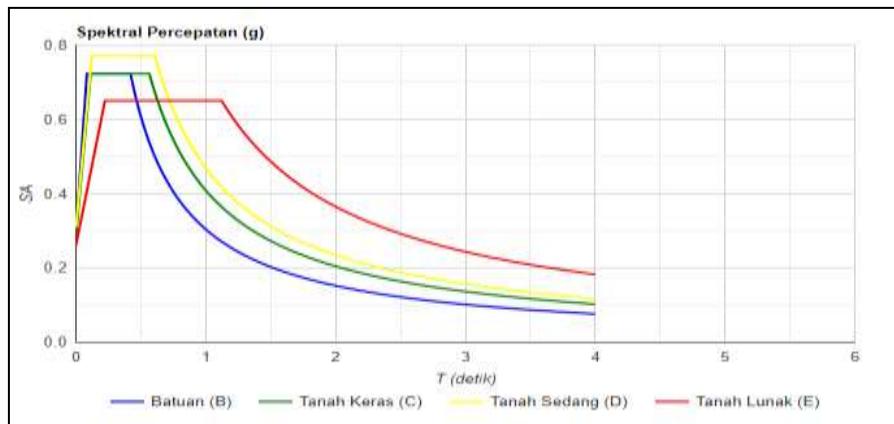
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam menentukan potensi likuifaksi, hal yang pertama yang harus dilakukan adalah pengujian tanah. Dari pengujian tanah tersebut diperoleh data tanah untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekanis dari tanah tersebut. Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam bab sebelumnya bahwa likuifaksi berpotensi terjadi pada tanah dengan nilai kohesi yang rendah. Data tanah yang diambil di lokasi merupakan data berdasarkan hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT).

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Jenis Tanah

KEDALAMAN (m)	PROFIL TANAH	DESKRIPSI TANAH	N-SPT	JENIS TANAH
2.00		Batu karang berpasir, lepas,	52	
4.00		warna coklat kehitaman	23	
6.00			15	
8.00			16	$\bar{N} = 29,75$
10.00		Pasir sedikit berkarang,	22	Tanah
12.00		lepas, warna hitam	29	Sedang
14.00			35	
16.00			46	

Selanjutnya, untuk menentukan potensi likuifaksi diperlukan data gempa di lokasi yang ditinjau. Data gempa diambil dari website Desain Spektra Indonesia <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>. Dengan memasukkan koordinat dari lokasi yang ditinjau, maka didapat nilai percepatan gempa (a_{max}) yang ada di lokasi tersebut.



Gambar 2. Spektrum Respon Desain Lokasi Penelitian (untuk semua jenis tanah)

Dari kedua analisis data tersebut, maka dilakukan perhitungan untuk nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR). Nilai CSR untuk setiap lapisan tanah dihitung sehingga diperoleh:

Tabel 2. Perhitungan Nilai CSR

KEDALAMAN (m)	amax (g)	σv (kN/m ²)	$\sigma'v$ (kN/m ²)	CSR
2.00	0.48042	42.00	22.00	0.369607
4.00	0.48042	84.00	44.00	0.228591
6.00	0.48042	120.00	60.00	0.147749
8.00	0.48042	156.00	76.00	0.093327
10.00	0.48042	192.00	92.00	0.058258
12.00	0.48042	228.00	108.00	0.036095
14.00	0.48042	264.00	124.00	0.022241
16.00	0.48042	300.00	140.00	0.013644

Dari perhitungan dalam tabel tersebut diperoleh nilai CSR untuk setiap lapisan tanah, dimana nilai CSR terbesar terletak pada kedalaman 2.00 meter. Setelah diperoleh nilai CSR, maka dihitung untuk nilai CRR.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Nilai CRR7.5

KEDALAMAN (m)	(N1)60	(N1)60CS	CRR-7.5
2.00	68.479	69.641	2.779E+14
4.00	26.226	27.387	0.36
6.00	15.583	15.585	0.16
8.00	15.265	15.267	0.16
10.00	19.406	19.408	0.20
12.00	23.785	23.787	0.26
14.00	26.824	26.826	0.34
16.00	33.085	33.087	0.77

Tabel 4. Hasil Perhitungan Nilai CRR-M8

KEDALAMAN (m)	CRR-7.5	$C\sigma$	$K\sigma$	MSF M=8	CRR-M8
2.00	2.77914E+14	-0.4541841	0.3123073	0.875813	7.6016E+13
4.00	0.36	0.17119744	1.1	0.875813	0.34685285
6.00	0.16	0.11320299	1.057827	0.875813	0.149268835
8.00	0.16	0.11189518	1.0307082	0.875813	0.142973341
10.00	0.20	0.13043291	1.0108757	0.875813	0.176060633
12.00	0.26	0.15471109	0.9880933	0.875813	0.228389293
14.00	0.34	0.17565048	0.9622156	0.875813	0.287146286
16.00	0.77	0.23626157	0.9205045	0.875813	0.621055896

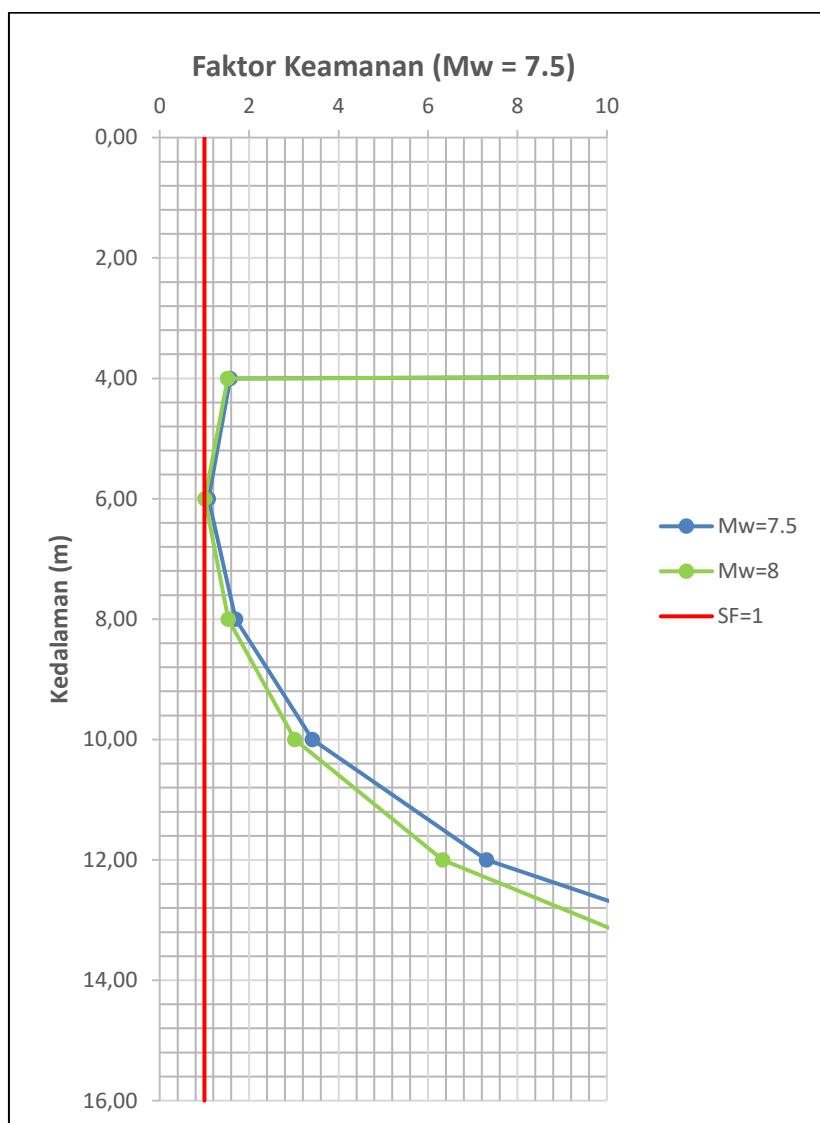
Setelah diperoleh nilai CSR dan CRR, maka dihitung Faktor Keamanannya. Faktor Keamanan ditentukan melalui persamaan nilai CRR yang dibagi dengan nilai CSR. Dengan ketentuan jika nilai faktor keamanan kurang dari 1, maka tanah tersebut berpotensi terjadi likuifaksi. Sebaliknya, jika nilai faktor keamanan lebih dari 1, maka tanah tersebut tidak berpotensi terjadi likuifaksi.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Nilai Faktor Keamanan Untuk CRR-7.5

KEDALAMAN (m)	CRR-7.5	CSR	SF
2.00	2.77914E+14	0.369607	7.5192E+14
4.00	0.360031889	0.228591	1.575003376
6.00	0.161117564	0.147749	1.090482343
8.00	0.158382699	0.093327	1.697067658
10.00	0.198862496	0.058258	3.413471334
12.00	0.263916282	0.036095	7.311786318
14.00	0.340736929	0.022241	15.32053207
16.00	0.770358965	0.013644	56.46271204

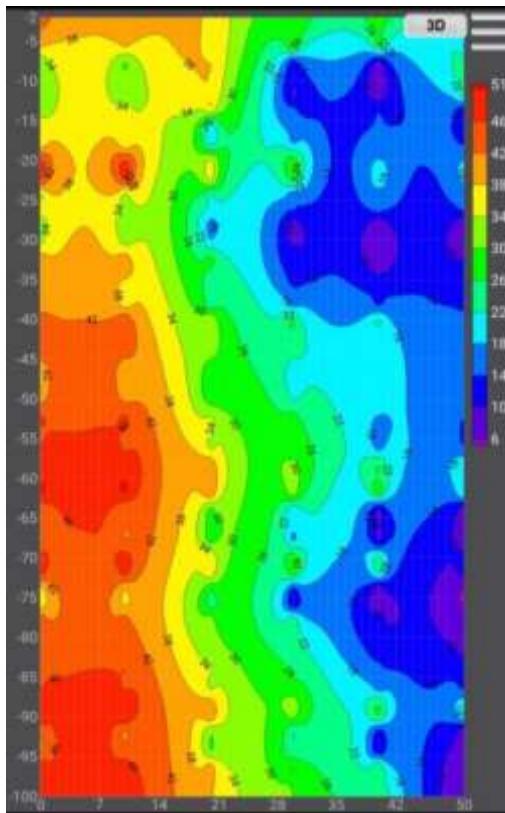
Tabel 6. Hasil Perhitungan Nilai Faktor Keamanan Untuk CRR-M8

KEDALAMAN (m)	CRR-M8	CSR	SF
2.00	7.6016E+13	0.369607	2.05667E+14
4.00	0.34685285	0.228591	1.517350062
6.00	0.149268835	0.147749	1.010287301
8.00	0.142973341	0.093327	1.531956676
10.00	0.176060633	0.058258	3.02207774
12.00	0.228389293	0.036095	6.327513004
14.00	0.287146286	0.022241	12.91093952
16.00	0.621055896	0.013644	45.51968863



Gambar 3. Grafik Nilai Faktor Keamanan

Tabel diatas menunjukkan nilai faktor keamanan (SF) untuk Mw 7.5 dan Mw 8 berada lebih dari 1 untuk semua lapisan kedalaman tanah, dengan demikian lokasi tersebut tidak berpotensi likuifaksi. Selanjutnya, dilakukan perbandingan potensi likuifaksi yang diperoleh dari data SPT dengan yang diperoleh dari data Magnetotellurik / ADMT. Data Magnetotellurik menampilkan resistivitas tanah pada kedalaman tertentu.



Gambar 4. Data Magnetotellurik di Lokasi Pariwisata Mangatasik

Data tersebut disesuaikan dengan kedalaman yang diperoleh pada data SPT yakni 0-16 meter, terlihat pada data tersebut nilai resistivitas berada pada *range* 30-42 Ohm.meter.

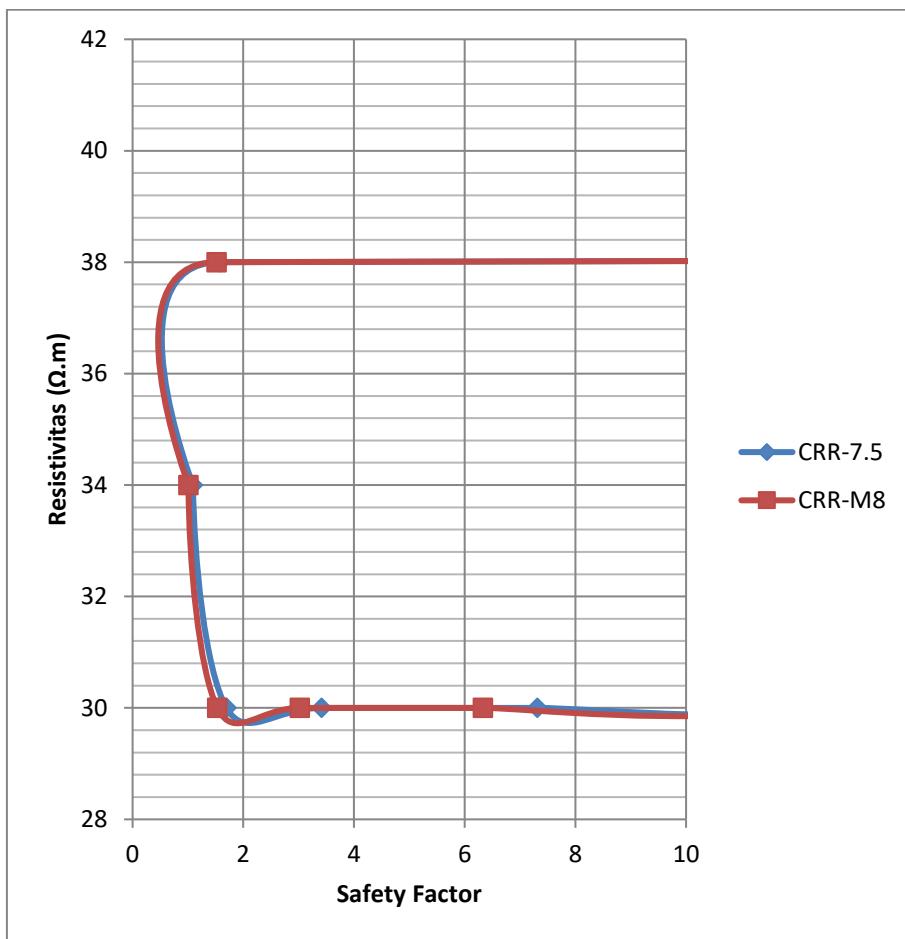
Tabel 7. Perbandingan Faktor Keamanan dan Resistivitas untuk CRR-7.5

KEDALAMAN (m)	CRR-7.5	CSR	SF	Resistivitas ($\Omega\text{.m}$)
2.00	2.77914E+14	0.369607	7.5192E+14	42
4.00	0.360031889	0.228591	1.575003376	38
6.00	0.161117564	0.147749	1.090482343	34
8.00	0.158382699	0.093327	1.697067658	30
10.00	0.198862496	0.058258	3.413471334	30
12.00	0.263916282	0.036095	7.311786318	30
14.00	0.340736929	0.022241	15.32053207	30
16.00	0.770358965	0.013644	56.46271204	34

Tabel 8. Perbandingan Faktor Keamanan dan Resistivitas untuk CRR-M8

KEDALAMAN (m)	CRR-M8	CSR	SF	Resistivitas ($\Omega\text{.m}$)
2.00	7.6016E+13	0.369607	2.05667E+14	42
4.00	0.34685285	0.228591	1.517350062	38
6.00	0.149268835	0.147749	1.010287301	34

8.00	0.142973341	0.093327	1.531956676	30
10.00	0.176060633	0.058258	3.02207774	30
12.00	0.228389293	0.036095	6.327513004	30
14.00	0.287146286	0.022241	12.91093952	30
16.00	0.621055896	0.013644	45.51968863	34



Gambar 5. Hubungan Antara Resistivitas dan Faktor Keamanan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh penulis diperoleh bahwa kawasan Pariwisata Mangatasik tidak memiliki potensi likuifaksi. Hal ini ditunjukkan melalui hasil analisis yang diperoleh, dimana untuk CRR pada magnitude 7.5 (CRR-7.5) maupun CRR pada magnitude 8.0 (CRR-8.0) memiliki faktor keamanan minimum sebesar 1.090482343 pada kedalaman 6 meter (CRR-7.5) dan 1.010287301 pada kedalaman 6 meter (CRR-8.0). Pada Analisis kedalaman tanah dengan menggunakan metode Magnetotellurik diperoleh nilai resistivitas minimum pada area yang ditinjau sebesar $30 \Omega \cdot m$, sehingga lapisan tanah pesisir pantai di lokasi tersebut memiliki resistivitas sedang. Dari perbandingan yang dilakukan terhadap faktor keamanan dan resistivitas untuk CRR-7.5 dan CRR-8.0, diperoleh bahwa lapisan tanah dengan faktor keamanan terkecil memiliki resistivitas yang cenderung sedang. Sedangkan untuk lapisan tanah dengan faktor keamanan terbesar memiliki resistivitas yang cenderung tinggi. Hal ini juga selaras dengan N-SPT pada lapisan tanah tersebut. Dalam melaksanakan penelitian selanjutnya, perhitungan dan

analisis Likuifaksi dapat dilakukan dengan membuat pemodelan di laboratorium seperti *Shaking Table* atau melakukan pemodelan dengan perangkat lunak (Software) berbasis Finite Element seperti PLAXIS 3D. Untuk daerah yang berpotensi terjadi Likuifaksi pada magnitude gempa yang besar 8.5 atau 9, sebaiknya melakukan perkuatan tanah dengan cara *Deep Compaction* untuk mencegah terjadinya Likuifaksi. Peristiwa Likuifaksi dapat menimbulkan banyak korban jiwa, sehingga sangat diperlukan mitigasi seperti melakukan micro-zonasi atau pemetaan kawasan atau daerah yang berpotensi Likuifaksi di Indonesia, khususnya di Sulawesi Utara.

DAFTAR PUSTAKA

- Blake, T. F. (1996). Summary Report of Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER 97-0022.
- Blakely R J. (1995). Potential Theory in Gravity and Magnetic Application. New York: Cambridge University Press.
- Das, B. M. (1995). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik. Penerbit Erlangga, 1–300.
- Halim Hasmar, H. A. (2013). DINAMIKA TANAH & REKAYASA KEGEMPAAN (U. P. Yogyakarta (ed.)). UII Press Yogyakarta.
- Idris, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). SOIL LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES. In Earthquake Engineering Research Institute (Vol. 160, Issue 4057). <https://doi.org/10.1177/136218079700300202>
- Kadir, T. V. S. (2011). Metode Magnetotelluric (MT) untuk Eksplorasi Panasbumi Daerah Lili, Sulawesi Barat dengan Data Pendukung Metode Gravitasi. Skripsi S1 Universitas Indonesia. Depok.
- Mulyono, T. (2016). Klasifikasi Tanah. June.
- Munirwan, R. P., & Gunawan, H. (2012). Evaluasi Potensial Likuifaksi Pesisir Pantai Krueng Raya Aceh Besar Provinsi Aceh. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(2), 131–142.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. In Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- Seed, H.B. and Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1249–1273.
- Seed, H.B. and Idriss, I. M. (1982). Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland.
- Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., C. R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance Evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111, 1425–1445.
- Simpson, F., dan Bahr, K. (2005). Practical Magnetotellurics, Cambridge: Cambridge University Press.
- Tuerah, E., Sompie, O. B. A., & Rondonuwu, S. G. (2021). Analisis geoteknik lokasi bekas tambang nmr ratatotok terhadap potensi likuifaksi. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(1), 1–6.
- Warouw, A. G. D., Manoppo, F. J., & Rondonuwu, S. G. (2019). Analisis Potensi Likuifaksi Dengan Menggunakan Nilai SPT (Studi Kasus : Jembatan Ir. Soekarno Manado). *Jurnal Sipil Statik*, 7(11), 1453–1464.