



Analisis Geoteknik Lapisan Tanah Berdasarkan Data Sondir Studi Kasus : Pembangunan Rumah Sakit GMIM Kaupusan Langowan

Yefta B. Kombaitan^{#a}, Agnes T. Mandagi^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^ayeftabraven971@gmail.com, ^batmandagi@gmail.com, ^calva.sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang rawan gempa bumi karena berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Salah satu fenomena yang dapat terjadi akibat gempa bumi adalah likuefaksi. Likuefaksi terjadi ketika lapisan tanah kehilangan kekuatannya akibat getaran atau tekanan. Penelitian ini berfokus pada analisis potensi risiko geoteknik likuefaksi dan mitigasi dengan perkuatan tanah *stone column* di wilayah Wolaang, Sulawesi Utara pada pembangunan Rumah Sakit GMIM Kaupusan dengan menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT). Penilaian potensi likuefaksi dilakukan dengan menghitung nilai *Safety Factor* (SF), yang merupakan rasio antara *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dengan menggunakan metode *National Center Of Earthquake Engineering Research* (NCEER) USA. Pada percepatan gempa yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari data sejarah gempa yang pernah terjadi di lokasi tersebut. Besar *Peak Ground Acceleration* (PGA) dihitung menggunakan rumus empiris yang dikembangkan oleh Matuschka (1980), dengan asumsi bahwa kekuatan gempa yang terjadi mencapai 6,2 SR, 7,5 SR dan 8 SR, untuk memperkirakan potensi percepatan yang mungkin terjadi. Jika hasil *safety factor* > 1 maka dikakukan perkuatan tanah dengan metode *stone column* menggunakan metode Mochtar (2000) dan metode Priebe (1995). Hasil analisis menunjukkan bahwa dominan nilai CSR lebih besar dibandingkan nilai CRR pada masing – masing kekuatan gempa, sehingga menghasilkan (SF < 1), yang artinya terjadi potensi likuefaksi pada kekuatan gempa 5,8 SR, 6,2 SR, 7,5 SR, dan 8 SR, mitigasi perkuatan tanah dengan *stone column* menghasilkan (SF > 1), sehingga metode perbaikan tanah ini mampu mencegah terjadinya potensi likuefaksi.

Kata kunci: *Cyclic Stress Ratio, Cyclic Resistance Ratio, gempa, likuifaksi, stone column*

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Aktivitas gempa bumi di Indonesia sangat tinggi, yang terbukti dari banyaknya bencana alam yang didominasi oleh gempa bumi. Gempa ini menyebabkan kerusakan besar yang dapat mengancam kehidupan makhluk hidup serta merusak berbagai bangunan. Langowan, yang terletak di Sulawesi Utara, adalah suatu kota yang mengalami perkembangan infrastruktur yang pesat, termasuk pembangunan Rumah Sakit GMIM Kaupusan. Wilayah ini dikenal memiliki aktivitas seismik yang lumayan cukup tinggi karena berada di dekat lempeng tektonik aktif. Oleh karena itu, penelitian geoteknik menjadi sangat penting untuk memastikan keamanan dan stabilitas struktur bangunan yang akan dibangun.

Dengan meningkatnya aktivitas seismik di wilayah Langowan, analisis likuefaksi menjadi suatu keharusan dalam perencanaan dan desain fondasi untuk pembangunan konstruksi seperti pembangunan rumah sakit. Likuefaksi dapat menyebabkan penurunan tanah yang tidak merata, runtuhnya fondasi, dan kerusakan struktural yang berpotensi mengancam keselamatan pengguna bangunan. Pembangunan infrastruktur yang dibangun, terutama struktur besar seperti rumah sakit, membutuhkan analisis geoteknik yang cermat untuk memastikan kestabilan dan keamanan struktur. Uji sondir, juga dikenal sebagai uji penetrasi sondir (CPT), adalah salah satu metode

yang umum digunakan dalam analisis geoteknik. CPT memberikan informasi penting tentang karakteristik lapisan tanah seperti ketebalan, dan konsistensi tanah.

Geoteknik berkonsentrasi pada bagaimana tanah dan batuan berperilaku dan berinteraksi dengan struktur yang dibangun di atasnya. Analisis geoteknik sangat penting untuk memastikan bahwa fondasi yang direncanakan adalah stabil dan aman. Oleh sebab itu, penulis merasa tertarik untuk membahas dan memahami bagaimana kondisi geoteknik tanah dengan menganalisis potensi likuefaksi.

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan perhitungan potensi likuefaksi yang mungkin terjadi, kemudian akan dilakukan perhitungan kembali dengan meningkatkan percepatan gempa, dan melakukan mitigasi jika berpotensi likuifaksi dengan perbaikan tanah *stone column*.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari tugas akhir ini adalah :

1. Menganalisis perubahan nilai percepatan gempa dari nilai magnitude sejarah gempa, ke percepatan gempa yang ditingkatkan.
2. Menganalisis potensi geoteknik likuefaksi dengan menghitung *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan faktor keamanan menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT).
3. Menganalisis kekuatan tanah *stone column* pada kedalaman yang mengalami potensi likuefaksi.

1.4. Batasan Masalah

Berikut batasan – batasan masalah dalam penelitian ini :

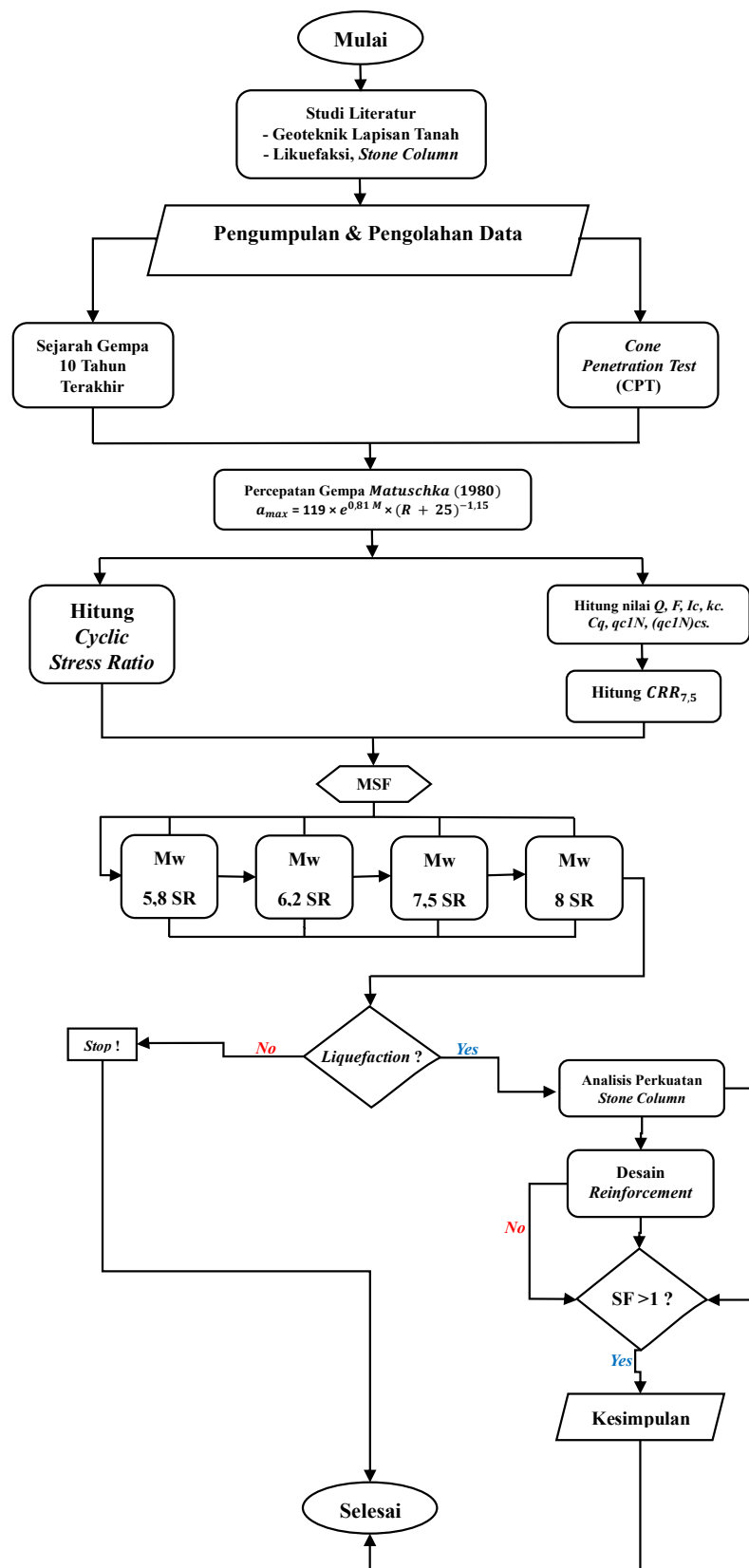
1. Pada analisis *stone column*, hanya berfokus pada analisis untuk mendapatkan *safety factor* setelah pemasangan *stone column*, terhadap pencegahan likuefaksi.
2. Satuan yang digunakan dalam percepatan gempa adalah gal.
3. Fokus penelitian ini hanya pada pengenalan kondisi geoteknik tanah dengan menganalisis potensi likuefaksi.

2. Metode

Penelitian berlokasi di Wolaang. Kec. Langowan Utara, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer, yaitu hasil penyelidikan tanah (data sondir) dan data sejarah gempa di lokasi pembangunan Rumah Sakit GMIM Kaupusan Langowan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian
(Sumber : Google Earth)



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

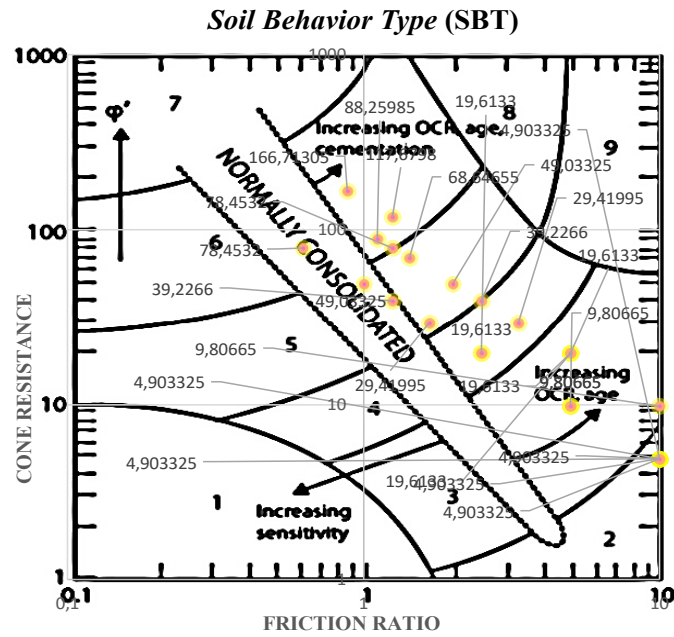
3.1. Analisis Pengolahan Data Sondir dan Pengklasifikasikan Jenis Lapisan Tanah

Untuk mengetahui jenis lapisan tanah, dilakukan olah data sondir dengan menghitung nilai parameter tanah yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengolahan Data Sondir dan Klasifikasi Tanah Titik Sondir S2

Depth	q_c	f_s	CPT RESULTS		R_f	I_c	Soil Description	u	γ	qc/pa
			q_c	f_s						
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa					kN/m ³	
0,00	0	0	0	0	0	0		0	0	0
0,20	0	0	0	0	0	0		0	0	0
0,40	0	0	0	0	0	0		0	0	0
0,60	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56	Clay - orgnic soil	0	17,21	4,90
0,80	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56		0	17,21	4,90
1,00	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56		0	17,21	4,90
1,20	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56		0	17,21	4,90
1,40	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56		0	17,21	4,90
1,60	5	0,5	490,33	49,03	10	3,56		0	17,21	4,90
1,80	10	0,5	980,66	49,03	5	3,13	Clays: clay to silty clay	0	17,48	9,81
2,00	10	0,5	980,66	49,03	5	3,13		0	17,48	9,81
2,20	10	0,5	980,66	49,03	5	3,13		0	17,48	9,81
2,40	10	1	980,66	98,06	10	3,33		0	18,28	9,81
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	2,5	2,71	Silt mixtures: clay	0	17,74	19,61
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	2,5	2,71	silt to sandy	0	17,74	19,61
3,00	20	1	1961,33	98,06	5	2,90	Clays: clay to silty clay	0	18,54	19,61
3,20	20	1	1961,33	98,06	5	2,90		0	18,54	19,61
3,40	20	1	1961,33	98,06	5	2,90		0	18,54	19,61
3,60	30	0,5	2942	49,03	1,67	2,47	Silt mixtures: clayey	0	17,89	29,42
3,80	30	1	2942	98,06	3,33	2,65		0	18,69	29,42
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	1,25	29		0	18,01	39,23
4,20	40	1	3922,66	98,06	2,5	2,48		1,962	18,81	39,23
4,40	50	0,5	4903,33	49,03	1	2,16	Sand mixtures: silty sand to silty silt	3,924	18,09	49,03
4,60	50	1	4903,33	98,06	2	2,34		5,886	18,89	49,03
4,80	70	1	6864,66	98,06	1,43	2,14		7,848	19,02	68,65
5,00	80	0,5	7845,32	49,03	0,63	1,87	Sands: clean sand:	9,81	18,28	78,45
5,20	80	1	7845,32	98,06	1,25	2,05		11,772	19,08	78,45
5,40	90	1	8825,99	98,06	1,11	1,98	Sands: clean sands to silty sands	13,734	19,12	88,26
5,60	120	1,5	11768	147,1	1,25	1,92		15,696	19,69	117,68
5,80	170	1,5	16671,3	147,1	0,88	1,71		17,658	19,83	166,71

Sumber : Hasil Analisis, 2024



Gambar 3. Grafik Soil Behavior Type (SBT)

3.2. Analisis Potensi Likuefaksi

3.2.1 Perolehan Peak Ground Acceleration (PGA)

Berdasarkan informasi menurut USGS, terdapat 14 kejadian gempa bumi sejak tahun 2015 hingga tahun 2024. Berikut informasi data sejarah gempa yang didapat yang diuraikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perolehan Jarak R dan percepatan PGA Data Sejarah Gempa Dari Data Sejarah Gempa

No	Data Gempa					
	Date	Depth km	Magnitude SR	Epicenter km	R km	PGA gal
1	2024-07-08	8,371	4,9	51	52	43,68
2	2023-10-25	138,68	5,2	29	142	22,37
3	2023-08-25	80,26	5,0	55	97	28,17
4	2023-04-02	111,35	5,0	62	127	21,87
5	2020-08-08	120,77	5,7	27	124	36,77
6	2020-05-07	126,05	4,9	64	141	17,58
7	2018-11-21	69,44	4,8	57	90	24,88
8	2018-08-29	55,08	4,6	62	83	21,95
9	2018-06-08	22,29	4,8	82	85	26,15
10	2018-03-15	55,87	5,8	69	89	55,21
11	2018-01-06	75,67	5,2	68	102	29,84
12	2016-09-27	35	4,7	4	35	47,38
13	2015-10-02	109,83	5,2	11	110	28,41
14	2015-05-02	79,47	5,3	75	109	30,80

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Untuk percepatan gempa diambil nilai PGA tertinggi yaitu sebesar 55,21 gal yang berada pada kedalaman 56 km dan jarak 69 km, dengan besaran magnitudo 5,8 SR. Dilakukan asumsi kekuatan magnitudo gempa sebesar 6,2 SR untuk mendapatkan nilai percepatan gempa yang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Percepatan Gempa Pada Magnitudo 6,2 SR

Date	Koordinat		Depth	Magnitude	Epicenter	R	PGA
	latitude	longitude	km	SR	km	km	gal
2016-09-27	1,35	124,79	35,00	6,2	4	35,23	162,11

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Dilakukan perhitungan percepatan gempa, pada asumsi kekuatan *magnitude* 7,5 SR, diambil nilai percepatan tertinggi yang menghasilkan nilai PGA 464,64 gal, yang ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Percepatan Gempa Pada Magnitudo 7,2 SR

Date	Depth	Magnitude	Epicenter	R	PGA
	km	SR	km	km	gal
2016-09-27	35,00	7,5	4	35,23	464,64

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Dilakukan kembali perhitungan percepatan gempa, pada asumsi kekuatan *magnitude* 8 SR, dengan hasil nilai PGA terendah yaitu 216,55 gal yang ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perolehan Nilai Percepatan Gempa Pada Magnitudo 8 SR

Date	Koordinat		Depth	Magnitude	Epicenter	R	PGA
	latitude	longitude	km	SR	km	km	gal
2020-05-07	0,75	124,66	35,00	8	64	141,37	216,55

Sumber : Hasil Analisis, 2024

3.2.2 Perolehan Safety Factor Terhadap Potensi Likuefaksi

Berdasarkan data sejarah gempa, besarnya magnitudo yang terjadi berada pada 5,8 SR, berdasarkan data uji sondir yang telah diolah, kemudian melakukan perhitungan faktor keamanan terhadap potensi likuefaksi, apabila nilai ($SF < 1$), menunjukkan adanya potensi likuefaksi, kemudian jika ($SF > 1$), maka menunjukkan tidak ada potensi likuefaksi.

Tabel 6. Perolehan Nilai *Magnitude Scaling Factor* (MSF)

Magnitude Scaling Factor			
5,8 SR	6,2 SR	7,5 SR	8 SR
1,93	1,63	1,00	0,85

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 7. Perolehan Nilai Faktor Keamanan Pada Kekuatan Gempa 5,8 SR

Magnitudo 5,8 SR								
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	$CRR_{7,5}$	CRR	SF
			q_c	f_s				
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa				
0,00	0	0	0	0	0,00	0	0	0,00
0,20	0	0	0	0	0,00	0	0	0,00

Liquefaction

Magnitudo 5,8 SR									
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	$CRR_{7,5}$	CRR	SF	Status
			q_c	f_s					
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa					
0,40	0	0	0	0	0,00	0	0	0,00	
0,60	5	0,5	490,33	49,03	3,49	0,10	0,20	0,06	
0,80	5	0,5	490,33	49,03	3,43	0,10	0,19	0,06	
1,00	5	0,5	490,33	49,03	3,38	0,10	0,19	0,06	
1,20	5	0,5	490,33	49,03	3,32	0,10	0,19	0,06	
1,40	5	0,5	490,33	49,03	3,27	0,10	0,18	0,06	
1,60	5	0,5	490,33	49,03	3,21	0,09	0,18	0,06	
1,80	10	0,5	980,66	49,03	3,15	0,13	0,25	0,08	
2,00	10	0,5	980,66	49,03	3,10	0,13	0,25	0,08	
2,20	10	0,5	980,66	49,03	3,04	0,13	0,24	0,08	
2,40	10	1	980,66	98,06	2,99	0,10	0,20	0,07	
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	2,93	0,30	0,57	0,20	
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	2,87	0,29	0,55	0,19	
3,00	20	1	1961,33	98,06	2,82	0,16	0,31	0,11	
3,20	20	1	1961,33	98,06	2,76	0,16	0,31	0,11	
3,40	20	1	1961,33	98,06	2,71	0,16	0,30	0,11	
3,60	30	0,5	2942	49,03	2,65	0,61	1,18	0,44	
3,80	30	1	2942	98,06	2,59	0,27	0,52	0,20	
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	2,54	1,23	2,37	0,93	
4,20	40	1	3922,66	98,06	2,55	0,47	0,90	0,35	No
4,40	50	0,5	4903,33	49,03	2,55	2,31	4,45	1,74	
4,60	50	1	4903,33	98,06	2,54	0,79	1,52	0,60	Liquefaction
4,80	70	1	6864,66	98,06	2,53	2,03	3,92	1,55	
5,00	80	0,5	7845,32	49,03	2,53	10,28	19,84	7,84	No
5,20	80	1	7845,32	98,06	2,50	2,99	5,77	2,31	
5,40	90	1	8825,99	98,06	2,48	4,32	8,34	3,37	
5,60	120	1,5	11768	147,1	2,44	5,41	10,44	4,28	
5,80	170	1,5	16671,3	147,1	2,40	18,37	35,46	14,75	

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Hasil analisis potensi likuefaksi 5,8 SR pada Tabel 7, memicu terjadinya potensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 4,2 m dan 4,6 m. Sedangkan pada kedalaman 4,4 m, 4,8 yang mencapai 5,8 m tidak berpotensi likuefaksi.

Tabel 8. Perolehan Nilai Faktor Keamanan Pada Kekuatan Gempa 6,2 SR

Magnitudo 6,2 SR									
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	$CRR_{7,5}$	CRR	SF	Status
			q_c	f_s					
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa					
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	Liquefaction
0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,40	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,60	5	0,5	490,33	49,03	10,25	0,10	0,17	0,02	
0,80	5	0,5	490,33	49,03	10,08	0,10	0,16	0,02	
1,00	5	0,5	490,33	49,03	9,92	0,10	0,16	0,02	
1,20	5	0,5	490,33	49,03	9,76	0,10	0,16	0,02	
1,40	5	0,5	490,33	49,03	9,59	0,10	0,15	0,02	
1,60	5	0,5	490,33	49,03	9,43	0,09	0,15	0,02	
1,80	10	0,5	980,66	49,03	9,26	0,13	0,21	0,02	
2,00	10	0,5	980,66	49,03	9,10	0,13	0,21	0,02	
2,20	10	0,5	980,66	49,03	8,93	0,13	0,21	0,02	
2,40	10	1	980,66	98,06	8,77	0,10	0,17	0,02	
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	8,60	0,30	0,48	0,06	
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	8,44	0,29	0,47	0,06	
3,00	20	1	1961,33	98,06	8,28	0,16	0,26	0,03	
3,20	20	1	1961,33	98,06	8,11	0,16	0,26	0,03	
3,40	20	1	1961,33	98,06	7,95	0,16	0,25	0,03	

Magnitude 6,2 SR									
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	$CRR_{7,5}$	CRR	SF	Status
			q_c	f_s					
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa					
3,60	30	0,5	2942	49,03	7,78	0,61	0,99	0,13	
3,80	30	1	2942	98,06	7,62	0,27	0,44	0,06	
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	7,45	1,23	2,00	0,27	
4,20	40	1	3922,66	98,06	7,48	0,47	0,76	0,10	
4,40	50	0,5	4903,33	49,03	7,50	2,31	3,75	0,50	
4,60	50	1	4903,33	98,06	7,47	0,79	1,28	0,17	
4,80	70	1	6864,66	98,06	7,44	2,03	3,31	0,44	No
5,00	80	0,5	7845,32	49,03	7,43	10,28	16,73	2,25	
5,20	80	1	7845,32	98,06	7,34	2,99	4,87	0,66	Liquefaction
5,40	90	1	8825,99	98,06	7,27	4,32	7,03	0,97	
5,60	120	1,5	11768	147,1	7,16	5,41	8,80	1,23	No
5,80	170	1,5	16671,3	147,1	7,06	18,37	29,89	4,23	

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Pada kekuatan gempa 6,2 SR pada Tabel 8, memicu terjadinya potensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 4,8 m, 5,2 m, dan 5,4 m.

Tabel 9. Perolehan Nilai Faktor Keamanan Pada Kekuatan Gempa 7,5 SR

Magnitude 7,5 SR								
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	CRR	SF	Status
			q_c	f_s				
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa				
0,00	0	0	0	0	0	0	0	Liquefaction
0,20	0	0	0	0	0	0	0	
0,40	0	0	0	0	0	0	0	
0,60	5	0,5	490,33	49,03	29,37	0,10	0,00	
0,80	5	0,5	490,33	49,03	28,90	0,10	0,00	
1,00	5	0,5	490,33	49,03	28,43	0,10	0,00	
1,20	5	0,5	490,33	49,03	27,96	0,10	0,00	
1,40	5	0,5	490,33	49,03	27,49	0,10	0,00	
1,60	5	0,5	490,33	49,03	27,02	0,09	0,00	
1,80	10	0,5	980,66	49,03	26,55	0,13	0,00	
2,00	10	0,5	980,66	49,03	26,08	0,13	0,00	
2,20	10	0,5	980,66	49,03	25,61	0,13	0,00	
2,40	10	1	980,66	98,06	25,13	0,10	0,00	
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	24,66	0,30	0,01	
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	24,19	0,29	0,01	
3,00	20	1	1961,33	98,06	23,72	0,16	0,01	
3,20	20	1	1961,33	98,06	23,25	0,16	0,01	
3,40	20	1	1961,33	98,06	22,78	0,16	0,01	
3,60	30	0,5	2942	49,03	22,31	0,61	0,03	
3,80	30	1	2942	98,06	21,84	0,27	0,01	
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	21,37	1,23	0,06	
4,20	40	1	3922,66	98,06	21,43	0,47	0,02	
4,40	50	0,5	4903,33	49,03	21,48	2,31	0,11	
4,60	50	1	4903,33	98,06	21,40	0,79	0,04	
4,80	70	1	6864,66	98,06	21,31	2,03	0,10	
5,00	80	0,5	7845,32	49,03	21,30	10,28	0,48	
5,20	80	1	7845,32	98,06	21,04	2,99	0,14	
5,40	90	1	8825,99	98,06	20,84	4,32	0,21	
5,60	120	1,5	11768	147,1	20,52	5,41	0,26	
5,80	170	1,5	16671,3	147,1	20,23	18,36	0,91	

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Kekuatan gempa 7,5 SR pada Tabel 9, memicu terjadinya potensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 5,8 m dengan muka air tanah mencapai 4 m.

Tabel 10. Perolehan Nilai Faktor Keamanan Pada Kekuatan Gempa 8 SR

Magnitude 8 SR								
Depth	q_c	f_s	CPT Results		CSR	CRR	SF	Status
			q_c	f_s				
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kPa	kPa				
0,00	0	0	0	0	0	0	0	Liquefaction
0,20	0	0	0	0	0	0	0	
0,40	0	0	0	0	0	0	0	
0,60	5	0,5	490,33	49,03	29,37	0,10	0,00	
0,80	5	0,5	490,33	49,03	28,90	0,10	0,00	
1,00	5	0,5	490,33	49,03	28,43	0,10	0,00	
1,20	5	0,5	490,33	49,03	27,96	0,10	0,00	
1,40	5	0,5	490,33	49,03	27,49	0,10	0,00	
1,60	5	0,5	490,33	49,03	27,02	0,09	0,00	
1,80	10	0,5	980,66	49,03	26,55	0,13	0,00	
2,00	10	0,5	980,66	49,03	26,08	0,13	0,00	
2,20	10	0,5	980,66	49,03	25,61	0,13	0,00	
2,40	10	1	980,66	98,06	25,13	0,10	0,00	
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	24,66	0,30	0,01	
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	24,19	0,29	0,01	
3,00	20	1	1961,33	98,06	23,72	0,16	0,01	
3,20	20	1	1961,33	98,06	23,25	0,16	0,01	
3,40	20	1	1961,33	98,06	22,78	0,16	0,01	
3,60	30	0,5	2942	49,03	22,31	0,61	0,03	
3,80	30	1	2942	98,06	21,84	0,27	0,01	
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	21,37	1,23	0,06	
4,20	40	1	3922,66	98,06	21,43	0,47	0,02	
4,40	50	0,5	4903,33	49,03	21,48	2,31	0,11	
4,60	50	1	4903,33	98,06	21,40	0,79	0,04	
4,80	70	1	6864,66	98,06	21,31	2,03	0,10	
5,00	80	0,5	7845,32	49,03	21,30	10,28	0,48	
5,20	80	1	7845,32	98,06	21,04	2,99	0,14	
5,40	90	1	8825,99	98,06	20,84	4,32	0,21	
5,60	120	1,5	11768	147,1	20,52	5,41	0,26	
5,80	170	1,5	16671,3	147,1	20,23	18,36	0,91	

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Pada Tabel 10, menunjukkan tidak adanya potensi likuefaksi pada semua kedalaman.

3.3. Perbaikan Tanah Stone Column

3.3.1 Analisis Parameter Stone Column

Dilakukan *preliminary design* menggunakan metode Mochtar (2000) dan metode Priebe (1995) dengan perencanaan :

Diameter (D) = 1,5 m

Spasi (S) = 2,4 m

Pola pemasangan = *Equilateral triangle*

Tabel 11. Parameter Yang Memengaruhi Stone Column

D_c	A_c	A	K_{ac}	n_0	$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1$	$\Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)$	$\frac{\bar{A}_c}{A}$	n_1
m	m ²	m ²	°					
2,94	1,767	6,789	0,5	1,573	0,6	1,48	0,518	20

Sumber : Hasil Analisis, 2024

3.3.2 Hasil Nilai Safety Factor Setelah Analisis Pemasangan Stone Column

Hasil perhitungan kembali terhadap faktor keamanan dilakukan pada kekuatan gempa 5,8 SR pada kedalaman yang berpotensi likuefaksi yaitu pada kedalaman mencapai 4,2 m dan 4,6 m.

Tabel 12. Parameter Yang Memengaruhi Stone Column

Depth (m)	q_c kg/cm ²	f_s kg/cm ²	CPT Results		CSR	CRR	SF'
			q_c kPa	f_s kPa			
0,00	0	0	0	0	0,00	0	0,00
0,20	0	0	0	0	0,00	0	0,00
0,40	0	0	0	0	0,00	0	0,00
0,60	5	0,5	490,33	49,03	3,49	0,20	1,15
0,80	5	0,5	490,33	49,03	3,43	0,19	1,15
1,00	5	0,5	490,33	49,03	3,38	0,19	1,12
1,20	5	0,5	490,33	49,03	3,32	0,19	1,14
1,40	5	0,5	490,33	49,03	3,27	0,18	1,10
1,60	5	0,5	490,33	49,03	3,21	0,18	1,12
1,80	10	0,5	980,66	49,03	3,15	0,25	1,59
2,00	10	0,5	980,66	49,03	3,10	0,25	1,61
2,20	10	0,5	980,66	49,03	3,04	0,24	1,58
2,40	10	1	980,66	98,06	2,99	0,20	1,34
2,60	20	0,5	1961,33	49,03	2,93	0,57	3,89
2,80	20	0,5	1961,33	49,03	2,87	0,55	3,83
3,00	20	1	1961,33	98,06	2,82	0,31	2,20
3,20	20	1	1961,33	98,06	2,76	0,31	2,25
3,40	20	1	1961,33	98,06	2,71	0,30	2,21
3,60	30	0,5	2942	49,03	2,65	1,18	8,91
3,80	30	1	2942	98,06	2,59	0,52	4,02
4,00	40	0,5	3922,66	49,03	2,54	2,37	18,66
4,20	40	1	3922,66	98,06	2,55	0,90	7,06
4,60	50	1	4903,33	98,06	2,54	1,52	11,97

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Setelah pemasangan *stone column* terhadap faktor keamanan, menghasilkan nilai lebih dari 1, yang artinya metode perbaikan tanah ini mampu meningkatkan nilai *safety factor* terhadap potensi likuefaksi pada lokasi penelitian.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data sejarah gempa, terdapat 14 kejadian gempa yang pernah terjadi, pada 15 Maret 2018 memiliki kekuatan gempa tertinggi yaitu sebesar 5,8 SR yang menghasilkan percepatan seismik 162,11 gal, magnitudo gempa berkekuatan 7,5 SR, menghasilkan nilai PGA sebesar 464,64 gal, sedangkan pada momen kekuatan gempa sebesar 8 SR yang memiliki nilai percepatan seismik 216,55 yang dianalisis berdasarkan nilai PGA terendah

Berdasarkan data gempa yang pernah terjadi dan hasil uji CPT di wilayah Wolaang dan sekitarnya, memiliki nilai CSR yakni antara 2,40 sampai dengan 3,49. Nilai ini relatif besar dibandingkan dengan nilai CRR yakni 0,18 hingga 2,37. Perbandingan nilai antara CRR dan CSR menghasilkan nilai FS kurang dari 1, menandakan bahwa kekuatan magnitudo gempa sebesar 5,8 memicu terjadinya potensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 4,2 m dan 4,6 m. Pada magnitudo 6,2 SR berpotensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 4,8 m, 5,2 m, dan 5,4 m. Terjadi potensi likuefaksi pada kedalaman mencapai 5,8 m pada kekuatan gempa 7,5 SR. Analisis asumsi kekuatan gempa 8 SR memiliki potensi likuifaksi mencapai kedalaman 5,6 m. Hal ini menunjukkan semakin besar kekuatan magnitudo gempa yang terjadi, maka semakin besar berpotensi likuefaksi.

Dengan hasil faktor keamanan lebih dari 1 setelah pemasangan *stone column*, menandakan metode perbaikan tanah ini mampu menghasilkan faktor keamanan lebih dari 1, sehingga mampu untuk mencegah potensi likuifaksi.

Referensi

- ASTM D3441-98. *Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Test of Soil*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2012). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta : Departemen Perencanaan Umum.
- Baeruma, M. M, Fabian J. Manoppo, & Agnes T. Mandagi. (2020). “Analisis Perkuatan Embankment Pada Tanah Berpotensi Likuifaksi Akibat Gempa Dengan Menggunakan Ijuk.” *Jurnal Sipil Statik*, 8(3):327–336.
- Das, Braja M, Dean Emeritus, & Khaled Sobhan. (2014). *Principles Of Soil Geotechnical Engineering, Eight Edition*. USA : Cengage Learning.
- Das, Braja M. (1995). *Meanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) I*. Terjemahan N. E. Mochtar & I. B. Mochtar. Jakarta : Erlangga.
- Lonteng et al. (2013). "Analisis Potensi Likuifaksi Di PT. PLN (Persera) UIP KIT Sulmapa PLTU 2 Sulawesi Utara 2 X 25 MW Power Plan". *Jurnal Sipil Statik*, 1(11) : 705-717.
- Ramadhan, A. (2011). *Analisis Penggunaan Stone Column Pada Daerah Berpotensi Likuifaksi. Studi Kasus Proyek Aibstrip Tanjung Ulie, Halmahera, Maluku Utara*. Skripsi Program S1 Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung. Bandung
- Robertson, P. K, & R. G. Campanella. (1983). “Interpretation of Cone Penetration Test Part I (Sand) Part II (Clay).” *Canadian Geotechnical Journal* 20(4).
- Seed, H. B, & Izzat, M. Idriss. (1971). Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of Geotechnical and Foundation Engineering*, Vol. 97, Is. 9, 1249-1273.
- Setiawan, M. Z. (2019). *Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Pengujian Cone Penetration Test (CPT) Dengan Metode Percepatan Gempa Matuschka Di Wilayah Sukaramai, Baiturahman, Banda Aceh*. Skripsi Program S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Malang.
- Tandaju, C. A. V, Fabian J. Manoppo, & Jack H. Ticoh. (2019). “Analisis Potensi Likuifaksi (Studi Kasus: PLTU Area Gorontalo).” *Jurnal Sipil Statik*, 7(8):1081–1094.
- Tuerah, T, Oktovian B. A. Sompie, & Steeva G. Rondonuwu. (2021). “Analisis Geoteknik Lokasi Bekas Tambang NMR Ratatotok Terhadap Potensi Likuifaksi.” *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(1):1–6.
- USGS National Earthquake Information Center.
- Yoshimi Y, and Tokimatsu K, (1977). Settlement Of Buildings On Saturated Sand During Earthquakes. *Soils and Foundations*, Vol. 17 (1), pp. 23-38.