

ANALISI PENURUNAN FONDASI TIANG RAKIT TERHADAP PENGARUH LIKUIFAKSI DI SULAWESI

Wesley Kohar¹ dan Aniek Prihatiningih²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Wesley.325150153@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
aniekp@ft.untar.ac.id

Masuk: 16-07-2020, revisi: 20-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 05-08-2020

ABSTRACT

Liquefaction is one of the most dangerous effect of earthquake. When earthquake happens, the soil characteristic will change from solid to liquid state because of the dynamic cyclic load. Buildings that sits on such soil will totally fail because of the soil loss of bearing capacity. So, detailed analysis and evaluation of the potential of liquefaction when earthquake occurs is needed, such as CSR and CRR, Chinese Criteria, Tsuchida, Bray & Sancio and Seed et al. The result of the analyses will be compared to each method to other. The result of the analysis will show whether liquefaction happen or not in every layer of the analysed soil. Steps that that are usually made by the geotechnical engineer expert is that the soil need to be improved beforehand. But in this study. Piled-raft foundation which is combination of piled and raft foundation is used for settlement analysis. The result of the analysis will show the settlement of the foundation before and after its affected by liquefaction.

Keywords: earthquake; liquefaction; liquefaction potensial; piled-raft foundation; settlement

ABSTRAK

Likuifaksi merupakan salah satu peristiwa yang sangat bahaya yang ditimbulkan oleh bencana bumi. pada saat gempa bumi terjadi, sifat tanah akan berubah dari solid menjadi liquid akibat beban siklik yang terjadi. Bangunan yang menempati tanah yang mengalami likuifaksi akan langsung gagal total karena tanah mengalami kehilangan daya dukung. Untuk itu, diperlukan metode-metode yang rinci untuk menganalisis dan mengevaluasi potensi terjadinya likuifaksi saat terjadi gempa, yaitu analisis potensi likuifaksi yang dapat berupa analisis CSR dan CRR, Chinese Criteria, Tsuchida, Bray & Sancio dan Seed et al. Hasil analisis potensi likuifaksi tersebut akan dibandingkan satu metode dengan yang lainnya. Hasil analisis menunjukkan potensi terjadinya likuifaksi pada tiap lapisan tanah yang akan ditampilkan dalam bentuk grafik maupun tabel. Fondasi tiang rakit yang merupakan gabungan antara fondasi tiang dan rakit digunakan untuk analisis penurunan fondasi pada skripsi ini. Hasil analisis akan menunjukkan penurunan fondasi sebelum dan setelah likuifaksi terjadi yang akan ditampilkan dalam bentuk tabel.

Kata kunci: gempa bumi; likuifaksi; potensi likuifaksi; fondasi tiang rakit; penurunan

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi dapat mengakibatkan struktur bangunan bagian atas maupun bawah mengalami kegagalan. Karena getaran yang disebabkan oleh gempa bumi dapat membuat tanah seolah-olah menjadi air yang artinya tanah mengalami kehilangan daya dukung. Peristiwa ini disebut peristiwa likuifaksi. Likuifaksi adalah proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air menjadi cair akibat meningkatnya tekanan air pori yang besarnya menjadi sama dengan tekanan total akibat terjadinya beban dinamik, sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol. Likuifaksi dapat menimbulkan berbagai dampak seperti, *Sand Boils, Flow Failure, Lateral Spread, Ground Oscillation, Loss of Bearing Capacity, Ground Settlement*. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui potensi likuifaksi dan penambahan penurunan berdasarkan data tanah yang ada dengan menggunakan fondasi tiang rakit sebagai fondasi yang akan dianalisis. Harapannya penelitian ini dapat bermanfaat untuk para ahli geoteknik untuk dijadikan sebagai patokan dalam perencanaan karena mampu memberikan pertimbangan efek likuifaksi pada daerah itu, serta diharapkan dapat menjadi inspirasi dan sebagai ilmu pengetahuan yang dapat digunakan sebagai bahan referensi

bagi penelitian sejenis yang akan dilakukan ataupun diaplikasikan sebagai perencanaan struktur bawah di daerah yang memiliki kondisi yang sama.

Fondasi tiang rakit

Fondasi tiang rakit digunakan ketika fondasi rakit melewati batas-batas izin penurunan dan tegangan. Selain itu, fondasi tiang rakit dapat dipakai untuk tanah yang memiliki daya dukung yang rendah dan harus memikul beban yang besar. Penggunaan fondasi tiang bersama dengan fondasi rakit dapat mengurangi penurunan (Poulos, 2001).

Daya dukung fondasi rakit

Perhitungan daya dukung fondasi rakit menggunakan rumus (Terzaghi, 1943) dengan asumsi keruntuhan geser menyeluruh, sebagai berikut:

$$q_{ult} = c \times N_c \times S_c + q \times N_q + 0.5 \times \gamma \times B \times N_\gamma \times S_\gamma \tag{1}$$

dengan q_{ult} = Daya Dukung Metode Terzaghi, c = kohesi, N_c = faktor kapasitas dukung, S_c = faktor bentuk fondasi, q = tegangan efektif, N_q = factor kapasitas daya dukung, γ = Berat Jenis Tanah, B = Lebar Alas Fondasi, N_γ = factor kapasitas daya dukung, S_γ = factor bentuk fondasi.

Tabel 1. Faktor bentuk fondasi

<i>for</i>	<i>Strip</i>	<i>Round</i>	<i>Square</i>
S_c	1.0	1.3	1.3
S_γ	1.0	0.6	0.8

(Sumber: Bowles, 1996)

Tabel 2. Faktor kapasitas daya dukung fondasi

ϕ	N_c	N_q	N_γ	K_{py}
0	5.7	1	0	10.8
5	7.3	1.6	0.5	12.2
10	9.6	2.7	1.2	14.7
15	12.9	4.4	2.5	18.6
20	17.7	7.4	5	25
25	25.1	12.7	9.7	35
30	37.2	22.5	19.7	52
35	52.6	36.5	36	
40	57.8	41.4	42.4	82
45	95.7	81.3	100.4	141
50	172.3	173.3	294.5	298
55	258.3	287.9	780.1	
60	347.5	415.1	1153.2	800

(Sumber: Bowles, 1996)

Tabel 1 dan 2 digunakan untuk mencari koefisien yang akan digunakan dalam menganalisis daya dukung fondasi rakit.

Daya dukung fondasi tiang

Tipe tiang yang digunakan pada penelitian ini adalah tiang bor dan rumus yang digunakan dalam menganalisis daya dukung fondasi tiang tersebut adalah menggunakan metode Reese & Wright (1977).

$$Q_u = Q_p + Q_s + W_p \tag{2}$$

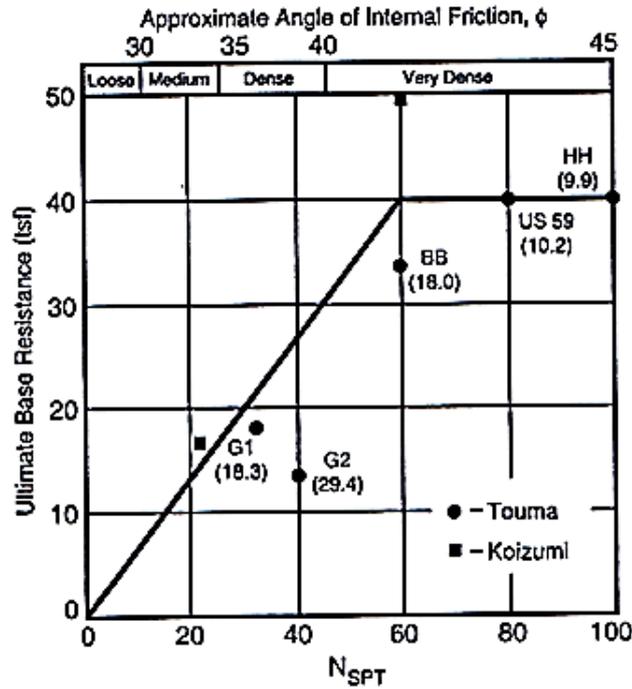
dengan Q_u = daya dukung ultimit tiang Q_p = daya dukung ujung tiang, Q_s = daya dukung selimut tiang, W_p = berat fondasi tiang.

Daya dukung ujung tiang

$$Q_p = \frac{A \times q_p}{FK} \tag{3}$$

dengan A = luas penampang tiang bor, FK = faktor keamanan, q_p = tahanan ujung per satuan luasan

Untuk tanah non-kohesif, tahanan ujung per satuan luas dapat diambil pada gambar 1 sesuai dengan usulan Reese.



Gambar 1. Nilai tahanan ujung per satuan luas (Sumber: Reese & Wright 1977)

Analisis daya dukung selimut tiang

Rumus yang digunakan dalam menghitung daya dukung selimut tiang adalah menggunakan metode Reese & Wright (1977).

$$Q_s = \frac{f_s \times L \times p}{FK} \tag{4}$$

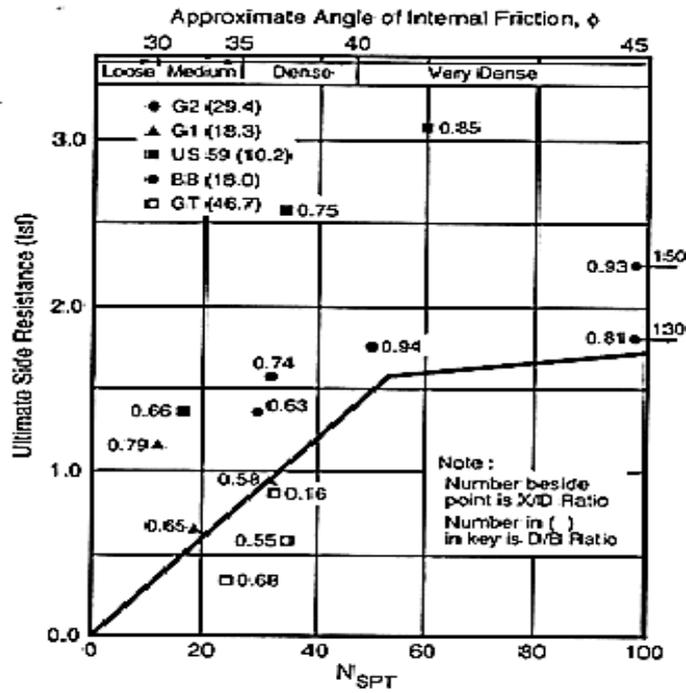
dengan Q_s = daya dukung selimut tiang, f_s = gesekan selimut tiang, p = keliling penampang tiang, FK = faktor keamanan.

Pada tanah kohesif, nilai gesekan selimut tiang dapat diperoleh dari faktor adhesi (α) dengan kohesi tanah (c_u)

$$f_s = \alpha \cdot c_u \tag{5}$$

dengan α = faktor adhesi, c_u = kohesi tanah (ton/m^2)

pada tanah non kohesif, Nilai f_s dapat diperoleh dari kolerasi dengan nilai N_{spt} seperti pada gambar 2



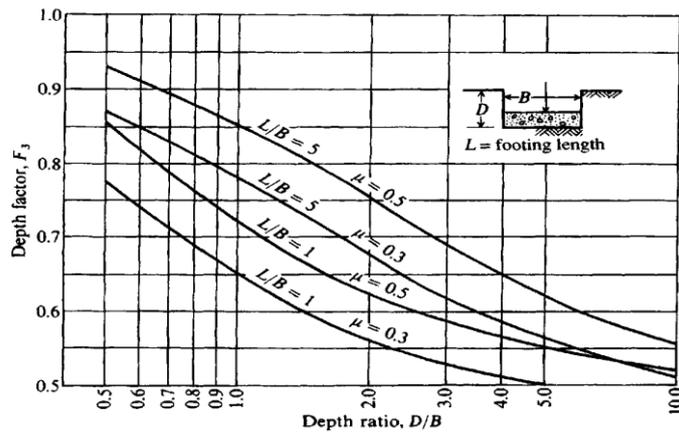
Gambar 2. Hubungan N_{spt} dengan f_s pada tanah non-kohesif (Reese & Wright, 1977)

Penurunan elastis

Penurunan fondasi yang terletak pada tanah berbutir halus jenuh dapat dibagi menjadi 3 komponen yaitu: penurunan elastis (*immediate settlement*), penurunan konsolidasi primer, dan penurunan konsolidasi sekunder. Hardiyatmo (1996). Penurunan elastis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$S_e = q \times B' \times \frac{1-\mu^2}{E_s} \times \left(I_1 \times \frac{1-2\mu}{1-\mu} \times I_2 \right) \times I_f \tag{6}$$

Dengan S_e = penurunan elastis, Q = tegangan pada dasar lapisan tanah, B' = ukuran paling minim fondasi, μ = poisson's ratio, E_s = Modulus elastisitas tanah, I_f = faktor kedalaman.



Gambar 3. Grafik faktor I_f (Sumber: Bowles, 1996)

Tabel 3. Faktor I_1 dan I_2

N	M=2.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
0.2	$I_1=0.007$	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	$I_2=0.043$	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
0.4	0.026	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
	0.074	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075
0.6	0.053	0.051	0.051	0.050	0.049	0.049	0.049	0.049
	0.094	0.097	0.097	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
0.8	0.086	0.082	0.082	0.080	0.080	0.080	0.079	0.079
	0.107	0.111	0.111	0.113	0.113	0.113	0.113	0.113
1.0	0.121	0.115	0.115	0.112	0.112	0.112	0.111	0.111
	0.114	0.120	0.120	0.123	0.124	0.124	0.124	0.124
1.5	0.207	0.197	0.197	0.192	0.191	0.190	0.190	0.189
	0.118	0.130	0.130	0.136	0.137	0.138	0.138	0.139
2.0	0.284	0.271	0.271	0.264	0.262	0.261	0.260	0.259
	0.114	0.131	0.131	0.139	0.141	0.143	0.144	0.145
3.0	0.402	0.392	0.392	0.378	0.378	0.376	0.374	0.373
	0.097	0.122	0.122	0.122	0.141	0.144	0.145	0.147
4.0	0.484	0.484	0.484	0.474	0.470	0.466	0.462	0.453
	0.082	0.110	0.110	0.129	0.135	0.139	0.145	0.154
5.0	0.553	0.554	0.554	0.548	0.543	0.540	0.536	0.534
	0.070	0.098	0.098	0.120	0.128	0.133	0.137	0.140

(Sumber: Bowles, 1996)

Penurunan konsolidasi primer

Berikut persamaan-persamaan konsolidasi primer yang digunakan dalam penelitian ini

Untuk konsolidasi normal:

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_o} \log \left(\frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \right) \quad (7)$$

Untuk konsolidasi berlebih:

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_o} \log \left(\frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \right) \quad (8)$$

dengan S_c = penurunan konsolidasi primer, C_c = indeks kompresi, C_s = swelling index, H = tebal lapisan, e_o = initial void ratio, p_o' = tegangan efektif, Δp = tegangan pada lapisan ketika terbebani.

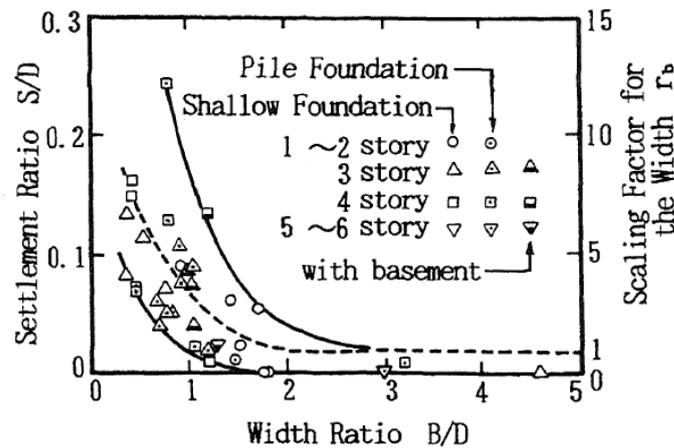
Penurunan akibat likuifaksi

Penambahan penurunan yang disebabkan oleh likuifaksi dapat dihitung dari rumus yang diusulkan oleh (Ishii & Tokimatsu, 1988).

$$S_{st} = S_v \cdot r_b \quad (9)$$

dengan S_{st} = total penurunan akibat likuifaksi, S_v = penurunan akibat volumetric strain yang disebabkan oleh gempa, r_b = faktor akibat deformasi geser.

Faktor r_b dapat diperoleh dari grafik berikut



Gambar 4. Hubungan antara *settlement ratio* dengan *width ratio* dengan *scaling factor* r_b

Penurunan akibat volumetric strain dapat dirumuskan oleh (Lee, 2007) sebagai berikut.

$$S_v = \sum_{i=1}^n H_i \varepsilon_{vi} \quad (10)$$

dengan H_i = Ketebalan tanah lapisan i , ε_{vi} = nilai *volumetric strain* lapisan i , n = jumlah lapisan tanah.

Data penyelidikan tanah

Data penyelidikan tanah merupakan hal yang paling penting yang digunakan dalam melakukan penelitian. Pada perhitungan likuifaksi, data SPT dan CPT menunjukkan hasil yang hampir sama (Fernando & Prihatiningsih, 2019). Pada penelitian ini, digunakan data penyelidikan tanah CPT dari GEC (*Geotechnical Engineering Consultant*) dengan tanah yang berasal dari kota Palu. Data penyelidikan tanah yang digunakan pada penelitian ini ini terdiri 3 data/titik.

Metode rasio tegangan siklik (CSR) dan rasio hambatan siklik (CRR)

Metode ini digunakan untuk mengetahui potensi likuifaksi. Rumus-rumus CSR dan CRR adalah sebagai berikut.

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \quad (11)$$

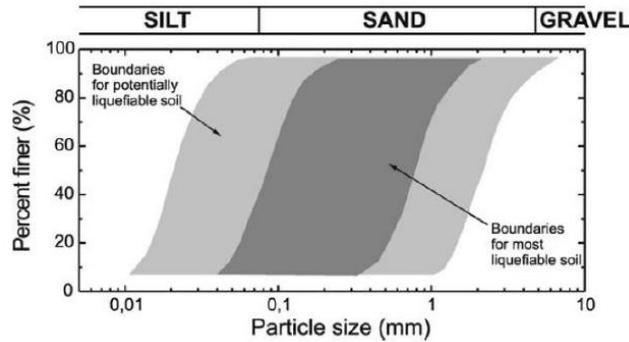
dengan 0.65 = asumsi tegangan geser 65% seragam, a_{max}/g = percepatan gempa maksimum, σ_{vo} = tegangan beban vertikal, σ'_{vo} = tegangan efektif beban vertikal.

$$CRR = \frac{\tau_h}{\sigma'_v} \cdot \sigma'_v \quad (12)$$

dengan τ_h = tegangan geser siklik σ'_v = tegangan efektif beban vertikal.

Metode Tsuchida

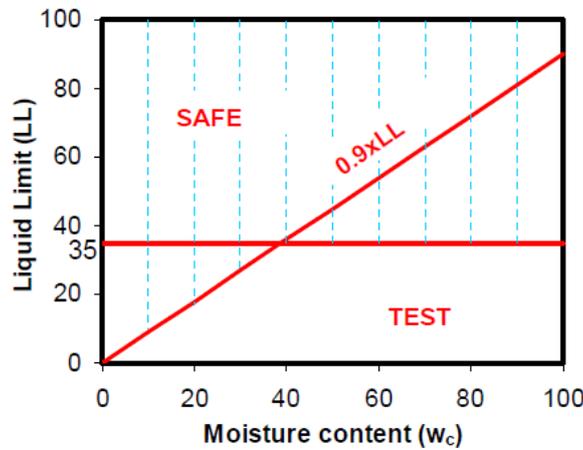
Sebuah metode analisis potensi likuifaksi dengan menggunakan data *grainsize distribution*. Data ukuran butiran tanah dengan persen butiran yang lolos pada saringan apabila terdapat di bagian dalam kurva, maka tanah tersebut berpotensi likuifaksi. Tetapi apabila data berada di luar kurva, maka tidak berpotensi likuifaksi.



Gambar 5. Grafik hubungan potensi likuifaksi dengan persen kehalusan dan ukuran partikel (Tsuchida, 1970)

Chinese Criteria

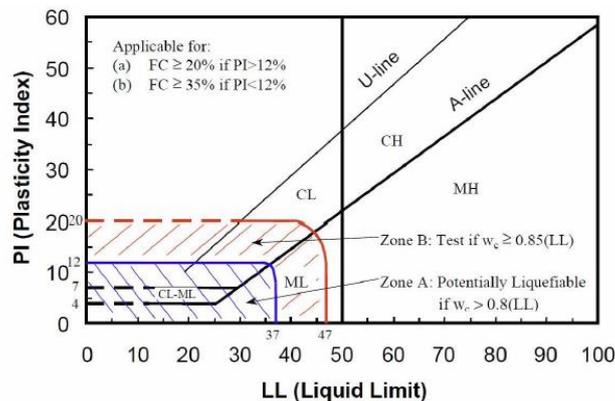
Sebuah metode analisis potensi likuifaksi dengan menggunakan data *Liquid Limit* (LL) dibandingkan dengan *Water Content* (Wc). Apabila nilai *Liquid Limit* kurang dari 35% dengan *Water Content* kurang dari $0.9 \times \text{Liquid Limit}$, maka data berpotensi likuifaksi. Jika data terletak pada bagian yang tidak tersisir (test), maka tanah berpotensi likuifaksi.



Gambar 6. Grafik chinese criteria (Seed & Idriss, 1982)

Metode Seed et al

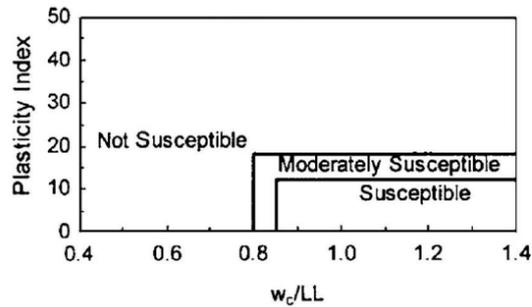
Metode analisis potensi likuifaksi ini menggunakan data *Liquid Limit* (LL) dibandingkan dengan *Plasticity Index* (PI). Apabila nilai *Liquid Limit* (LL) kurang dari 37% dan *Plasticity Index* (PI) kurang dari 12% maka tanah berpotensi tinggi mengalami likuifaksi. Apabila nilai *Liquid Limit* (LL) berada diantara 37%-47% dan *Plasticity Index* (PI) berada diantara 12%-20% maka tanah berpotensi likuifaksi.



Gambar 7. Grafik metode Seed et al (Seed et al, 1982)

Metode Bray and Sancio

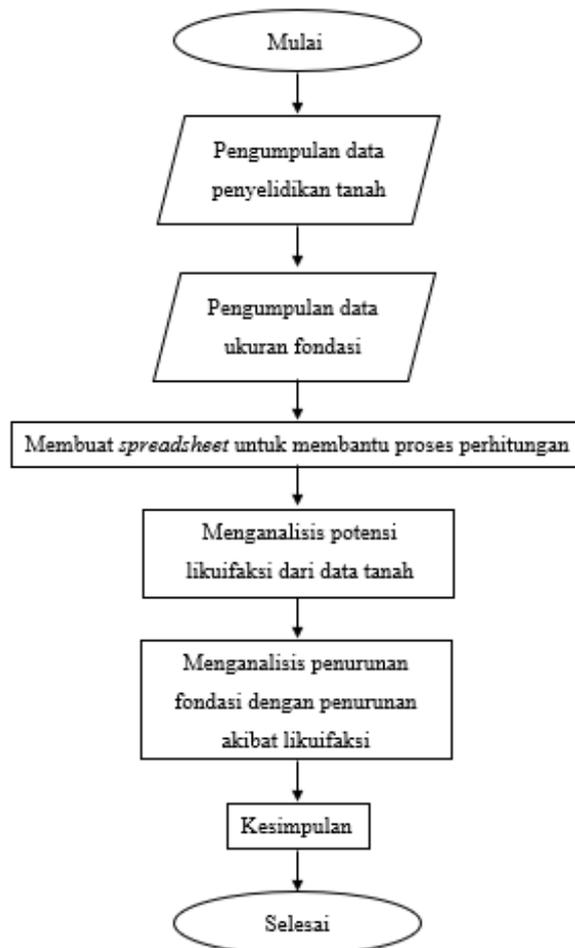
Metode analisis likuifaksi ini menggunakan perbandingan *Water Content* dengan *Liquid Limit* (w_c/LL) dengan *Plasticity Index* (PI). Jika w_c/LL lebih besar sama dengan dari 0.85 sedangkan PI lebih kecil sama dengan 12 maka tanah berpotensi tinggi likuifaksi. Jika w_c/LL berada diantara 0.8-0,85 sedangkan PI berada diantara 12%-20% maka tanah berpotensi mengalami likuifaksi. Jika PI lebih besar dari 20% maka tanah dianggap terlalu lempung untuk mengalami likuifaksi.



Gambar 8. Grafik hubungan potensi likuifaksi dengan indeks plastisitas dan perbandingan kadar air dengan batas cair (Bray dan Sancio, 2004)

2. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai tahapan yang digunakan dalam penulisan skripsi ini yang akan dijelaskan melalui gambar diagram alir.



Gambar 9. Diagram alir penelitian

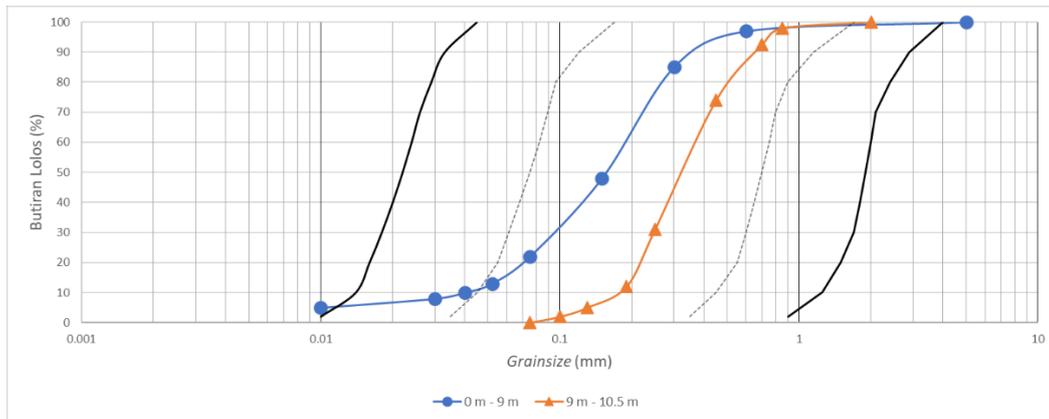
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi likuifaksi

Analisis digunakan 3 sampel pengujian, yaitu CPT 1, CPT 2, dan CPT 3. Untuk penjabaran akan diberikan CPT 1.

Metode Tsuchida

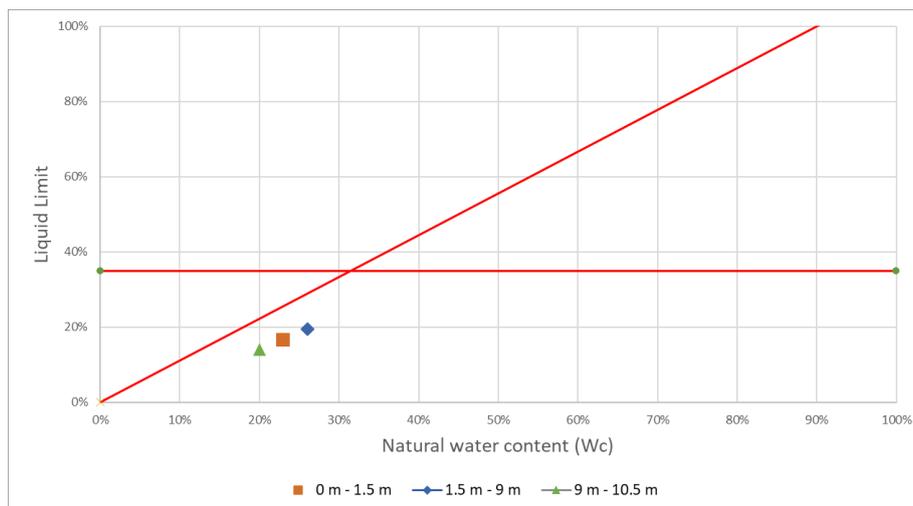
Hasil analisis metode Tsuchida menunjukkan bahwa tanah berpotensi likuifaksi pada setiap kedalaman yaitu, dari kedalaman 0 meter sampai dengan 10.5 meter.



Gambar 10. Hasil metode tsuchida dengan data CPT 1

Metode Chinese Criteria

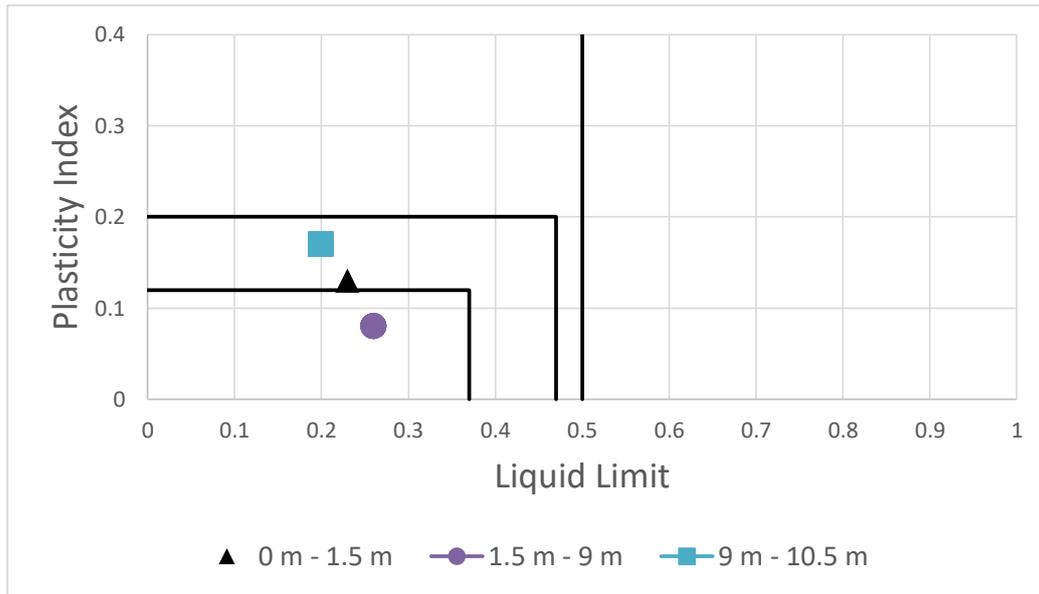
Grafik hasil analisis metode *Chinese Criteria* menunjukkan bahwa tanah berpotensi likuifaksi pada setiap kedalaman yaitu, dari kedalaman 0 meter sampai dengan 10.5 meter.



Gambar 11. Hasil metode *chinese criteria* dengan data CPT 1

Seed et al

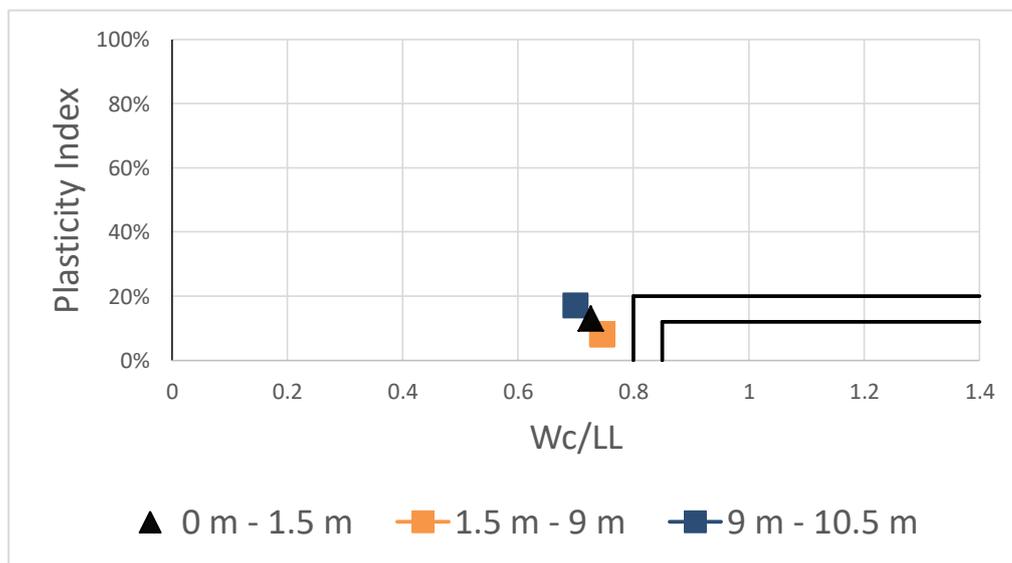
Hasil analisis metode Seed et al menunjukkan bahwa pada tanah berpotensi likuifaksi tinggi pada kedalaman 1.5 meter sampai dengan 9 meter, dan berpotensi likuifaksi pada kedalaman 0 meter sampai dengan 1.5 meter dan 9 meter sampai dengan 10.5 meter.



Gambar 12. Hasil metode Seed et al dengan data CPT 1

Bray & Sancio

Hasil analisis metode Bray & Sancio menunjukkan bahwa tanah tidak berpotensi likuifaksi pada setiap kedalaman yaitu, dari kedalaman 0 meter sampai dengan 10.5 meter.



Gambar 13. Hasil metode Bray & Sancio dengan data CPT 1

Analisis rasio tegangan siklik dan rasio hambatan siklik

t_{av} menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan pada tanah ketika gempa terjadi, sedangkan t_h menunjukkan tegangan yang dapat ditahan oleh tanah sebelum terjadi likuifaksi. Maka Jika nilai $t_{av} > t_h$ maka tanah pada kedalaman tersebut dapat mengalami likuifkasi ketika gempa terjadi.

Tabel 4. Analisis rasio tegangan siklik (CSR) CPT 1

Kedalaman (m)	O_v (T/m ²)	a_{max}/g	C_D (T/m ²)	t_{av} (T/m ²)
1,5	2,1	0,4	0,98	0,80262
3	4,35	0,4	0,97	3,29121
4,5	6,6	0,4	0,96	7,41312
6	8,85	0,4	0,95	13,1157
7,5	11,1	0,4	0,94	20,3463
9	13,2	0,4	0,9	27,7992
10,5	15,3	0,4	0,88	36,75672

Tabel 5. Analisis rasio hambatan siklik (CRR) CPT 1

Kedalaman (m)	O_v (T/m ²)	t_h/O_v'	t_h (T/m ²)
1,5	2,1	0,12	0,252
3	4,35	0,06	0,261
4,5	6,6	0,05	0,33
6	8,85	0,03	0,2655
7,5	11,1	0,05	0,555
9	13,2	0,045	0,594
10,5	15,3	0,085	1,3005

Jika nilai $t_{av} > t_h$ maka tanah pada kedalaman tersebut berpotensi mengalami likuifaksi

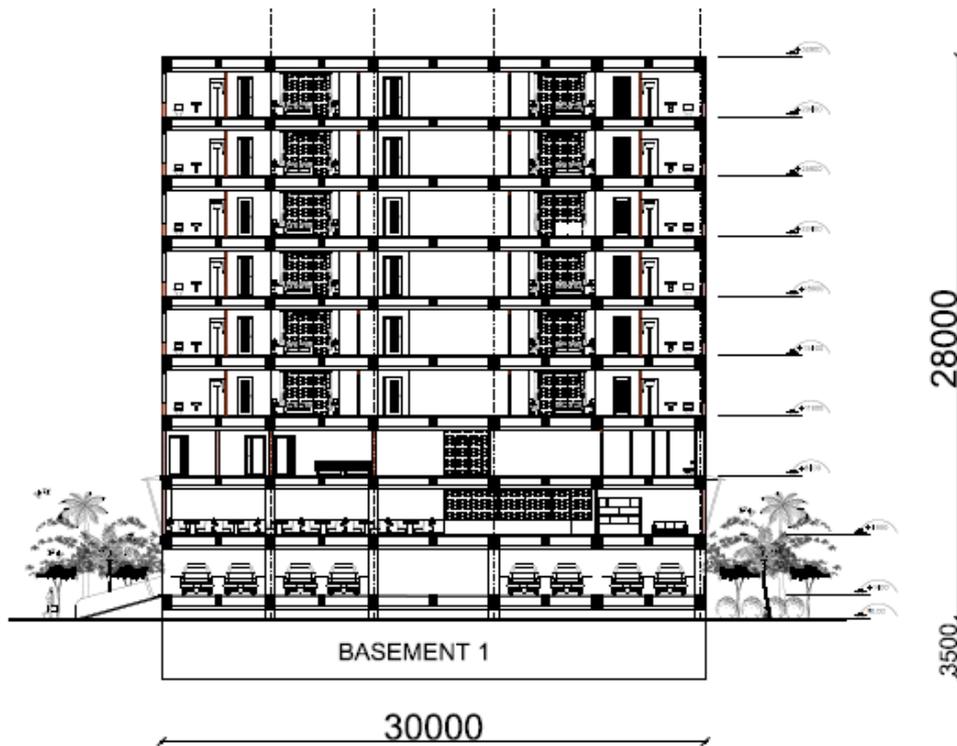
Tabel 6. Rangkuman analisis CSR dan CRR

Kedalaman (m)	t_{av} (T/m ²)			t_h (T/m ²)			Kesimpulan		
	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2	C-3	C-1	C-2	C-3
0 – 1,5	0,8026	1,2842	1,46765	0,252	0,792	0,792	YES	YES	YES
1,5 – 3,0	3,2912	4,9368	5,44752	0,261	0,1125	0,216	YES	YES	YES
3,0 – 4,5	7,4131	10,873	11,3668	0,33	0,396	0,69	YES	YES	YES
4,5 – 6,0	13,116	19,018	19,3401	0,2655	0,3915	0,45	YES	YES	YES
6,0 – 7,5	20,346	29,299		0,555	0,486		YES	YES	
7,5 – 9,0	27,799	39,382		0,594	0,2423		YES	YES	
9,0 – 10,5	36,757			1,3005			YES		

Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah dapat mengalami likuifaksi pada kedalaman 0 meter sampai dengan 10.5 meter.

Asumsi berat bangunan

Perhitungan berat bangunan diperoleh dari berat jenis beton dikali dengan volume total bangunan



Gambar 14. Bentuk bangunan dengan 1 basement yang akan dihitung

Pada penelitian ini berat bangunan diperoleh dari volume bangunan yang akan dihitung lalu dikalikan dengan berat jenis beton yang ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 7. Asumsi berat bangunan

Jenis beban	Berat (kN)
Berat bangunan	90720
Berat basement	30240
Berat bangunan + basement	120960

Berat jenis beton yang digunakan = 24 kN/m²

Daya dukung fondasi rakit

Nilai daya dukung fondasi rakit menggunakan rumus 1 diperoleh nilai daya dukung fondasi rakit pada kedalaman 10.5 meter sebesar 2437.3 kN/m².

Daya dukung fondasi tiang

Dari hasil analisis menggunakan rumus yang diusulkan oleh Reese & Wright (1977) diperoleh daya dukung tiang sebagai berikut.

Tabel 8. Daya dukung fondasi tiang

Kedalaman 10.5 m	Daya Dukung (kN)	
	Sebelum likuifkasi	saat Likuifaksi
	295	127,23

Distribusi beban

Distribusi beban dalam penelitian ini dibagi menjadi 2 kombinasi berdasarkan pada SNI 8460:2017. Kombinasi pertama adalah 75% beban diterima fondasi rakit 25% diterima oleh fondasi tiang, dan kombinasi ke-2 adalah 25% beban diterima fondasi rakit dan 75% diterima oleh fondasi tiang.

Jumlah tiang

Dari hasil analisis dari daya dukung tiang, semakin panjang tiang pada umumnya semakin besar kapasitas daya dukung tiangnya. Semakin besar kapasitas tiang maka, jumlah tiang yang dibutuhkan dalam perencanaan akan semakin sedikit. Jumlah tiang diperoleh dari besar beban yang diterima oleh tiang dibagi dengan kapasitas daya dukung tiang. Jarak antar tiang tidak melebihi 2.5 dari diameter tiang.

Tabel 9. Jumlah tiang kombinasi 1 sebelum likuifaksi

Pile Length (m)	Total Piles	Pile Location			
		X1	X2	X	Y
7,50	448,00	48,33	-0,33	49,00	10,00
8,50	187,00	42,19	5,81	43,00	5,00

Tabel 10. Jumlah tiang kombinasi 2 sebelum likuifaksi

Pile Length (m)	Total Piles	Pile Location			
		X1	X2	X	Y
8,50	458,00	48,54	-0,54	49,00	10,00

Tabel 11. Jumlah tiang setelah likuifaksi

Pile Length (m)	Total Piles	Pile Location			
		X1	X2	X	Y
8,50	544,00	50,23	-2,23	51,00	11,00

Penurunan

Penurunan pada fondasi tiang rakit dapat dilihat pada tabel 12, 13 dan 14.

Tabel 12. Penurunan total fondasi tiang rakit sebelum likuifaksi

	Tepi fondasi (mm)	Tengah fondasi (mm)
Kombinasi 1	271.76	338.58
Kombinasi 2	287.48	359.41

Tabel 13. Penurunan fondasi akibat likuifaksi

Kedalaman (m)	(N ₁) ₆₀	Volumetric Strain (%)	S _v (mm)	r _b	S _{ST} (mm)
0 - 1,5	16	2	30	4	120
1,5 - 3	7	3	45	4	180
3 - 4,5	5	4	60	4	240
4,5 - 6	5	4	60	4	240
6 - 7,5	6	3,2	48	4	192
7,5 - 9	4	4	60	4	240
9 - 10,5	9	2,5	37,5	4	150
10,5-12	35	1	15	4	60

Total penambahan penurunan fondasi akibat likuifaksi yaitu, 1422 mm.

Tabel 14. Penurunan total fondasi tiang rakit sesudah likuifaksi

	Tepi fondasi (mm)	Tengah fondasi (mm)
kombinasi 1	1693,76	1760,58
kombinasi 2	1709,48	1781,41

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan. Kesimpulan diperoleh sebagai berikut.

1. Hasil analisis potensi likuifaksi secara umum menunjukkan bahwa tanah diselidiki di Sulawesi terindikasi mengalami likuifaksi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.4 sampai dengan 4.15. Hasil analisis menggunakan metode *Chinese Criteria* menunjukkan likuifaksi terjadi pada kedalaman lebih dari 3 meter. Hasil analisis metode *Tsuchida* mengungkapkan bahwa masih ada bagian yang dapat mengalami likuifaksi. Khusus metode *Bray and Sancio* potensi likuifaksi tidak terjadi pada setiap kedalaman. Untuk metode Seed et al likuifaksi masih terjadi di bawah kedalaman lebih dari 3 meter. Untuk hasil analisis CSR (*Cyclic Stress Ratio*) dan CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) disimpulkan bahwa likuifaksi terjadi pada setiap kedalaman.
2. Tiang mengalami penurunan daya dukung yang cukup signifikan ketika likuifaksi terjadi (daya dukung selimut tiang diabaikan). Daya dukung tiang pada kedalaman 12 meter berubah dari 159.98 kN menjadi 69.98 kN.
3. Jumlah tiang yang dibutuhkan pada fondasi tiang rakit bertambah cukup signifikan ketika likuifaksi terjadi. Jumlah tiang yang dibutuhkan berubah dari 187 buah menjadi 544 buah tiang.
4. Kontribusi penurunan tanah yang disebabkan oleh likuifaksi sangat signifikan, penurunan tanah total saat likuifaksi terjadi yaitu 1422 mm.
5. Penurunan fondasi tiang rakit secara keseluruhan telah melebihi penurunan yang diizinkan pada SNI 8460-2017 yaitu sudah melebihi 15 cm.

Saran

Berdasarkan hasil analisis ada beberapa saran sebagai berikut.

1. Untuk perhitungan penurunan sebaiknya dihitung secara 3 dimensi agar lebih akurat.
2. Data-data tes tanah harus diperbanyak agar data tanah tidak perlu lagi dikolerasi sehingga diperoleh data-data sesuai dengan kondisi tanah yang sebenarnya.
3. Titik-titik pengetestan tanah harus diperbanyak agar dapat mengetahui kondisi tanah di lapangandalam gambaran yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta, 2017.
- Bowles. *Foundation Analysis And Design*. Illinois: The McGraw-Hill Companies, 1996.
- Bray, J D, et al. "Liquefaction Susceptibility of Fine-grained Soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (2004).
- Fernando, Nicky and Aniek Prihatiningsih. "Analisis Potensi Cyclic Mobility pada Tanah Kohesif." (2019).
- Ishii, Yusuke and Kohji Tokimatsu. "Simplified Procedure For the Evaluation of Settlement of Structures During Earthquake." *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering* (1988): 99-100.
- Poulos, H G and E H Davis. *Pile Foundation Analysis and Design*. Canada: Rainbow Bridge Book, 1980.
- Reese, Lymon C and Stephen J Wright. *Drilled Shaft Manual*. Washington: U.S. Dept. of Transportation Federal Highway Administration, 1977.
- Seed, Bolton and Idriss. *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquake*. Berkeley: Earthquake Engineer Research Institute, 1982.
- Tsuchida, H. "Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits." *Abstract of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute* (1970).
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley, 1943.

