



Analisis Pengaruh Likuifaksi Tanah Terhadap Pondasi Box dan Pondasi Raft Menggunakan Alat Simulasi Gempa Shaking Table

Claudia Angel Catoce Tanod¹, Fabian J. Manoppo², Steeva G. Rondonuwu³

Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

Email : angeltanod@gmail.com¹, fabian_jm@unsrat.ac.id²,

steeva_rondonuwu@unsrat.ac.id³

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh likuifaksi terhadap stabilitas pondasi raft dan pondasi box melalui simulasi gempa pada tanah jenuh air menggunakan shake table. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan simulasi gempa untuk menilai respons pondasi terhadap likuifaksi tanah, yang dilakukan dengan mengukur perubahan tekanan air pori dan deformasi pondasi, serta analisis SPT dan uji geser langsung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan air pori meningkat selama gempa, mengindikasikan terjadinya likuifaksi (Budhu M, 2010). Pondasi raft mengalami displacement, sementara pondasi box tetap stabil meskipun tanah sekitarnya mengalami likuifaksi. Berdasarkan pengujian SPT, nilai N SPT 15,3 menunjukkan bahwa tanah tergolong lunak. Hasil uji geser langsung menunjukkan kohesi (c) sebesar 17,81 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) 1,23°, yang mengindikasikan penurunan kemampuan geser tanah. Analisis faktor keamanan dengan NovoLiq menunjukkan bahwa tanah pada kedalaman 0,5 m – 6 m dan 9 m – 15 m memiliki faktor keamanan < 1 , sehingga dianggap tidak aman. Hasil analisis Plaxis 3D menunjukkan pondasi raft mengalami deformasi terkecil (0,008 m) dengan penurunan daya dukung hampir 50%, sedangkan pondasi box mengalami deformasi terbesar (6,38 m) dengan penurunan faktor keamanan yang drastis. Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa pondasi box lebih rentan terhadap likuifaksi dibandingkan pondasi raft, sehingga penting merancang strategi mitigasi di daerah rawan likuifaksi. Perbedaan hasil antara simulasi numerik Plaxis 3D dan eksperimen meja getar disebabkan oleh perbedaan pendekatan dalam pemodelan perilaku tanah, skala model, validitas data parameter tanah, serta kemampuan menangkap fenomena dinamis dan interaksi tanah-pondasi secara realistis. Oleh karena itu, kedua metode harus digunakan secara komplementer, dan simulasi numerik harus dikalibrasi menggunakan data eksperimen fisik agar dapat menghasilkan prediksi yang lebih akurat (Brinkgreve et al., 2017; Youd et al., 2001).

Kata Kunci: shaking table, likuifaksi, pondasi box, pondasi raft

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of liquefaction on the stability of raft and box foundations through earthquake simulation on water-saturated soil using a shake table. The method used is an experiment with earthquake simulation to assess the response of foundations to soil liquefaction, conducted by measuring pore water pressure changes, foundation deformation, as well as SPT and direct shear tests to evaluate the mechanical properties of the soil. The results show that pore water pressure increases during the earthquake, indicating liquefaction. The raft foundation experiences displacement, while the box foundation remains stable despite the surrounding soil undergoing liquefaction. Based on SPT testing, the average value of 15.3 indicates that the soil is classified as soft. Direct shear test results show cohesion (c) of 17.81 kPa and an internal friction angle (ϕ) of 1.23°, indicating a reduction in soil shear strength due to structural changes after earthquake vibrations. Safety factor analysis using NovoLiq shows that soil at depths of 0.5 m – 6 m and 9 m – 15 m has a safety factor < 1 , indicating unsafe conditions. Plaxis 3D analysis reveals that the raft foundation experiences the smallest deformation (0.008 m) with nearly a 50% reduction in bearing capacity, while the box foundation experiences the largest deformation (6.38 m) with a drastic decrease in safety factor and bearing capacity. The implications of this study show that box foundations are more vulnerable to liquefaction compared to raft foundations, highlighting the importance of designing appropriate mitigation strategies for liquefaction-prone areas. The discrepancy between the results of the Plaxis 3D numerical simulation and the shake table experiment is due to differences in modeling approaches of soil behavior, model scale, validity of soil parameter data, and the ability to

realistically capture dynamic phenomena and soil-structure interaction. Therefore, both methods should be used complementarily, and numerical simulations must be calibrated using physical experiment data to achieve more accurate predictions (Brinkgreve et al., 2017; Youd et al., 2001).

Keywords: *Shaking Table, Liquefaction, Box Foundation, Raft Foundation*

PENDAHULUAN

Dalam desain bangunan, salah satu tantangan dalam teknik sipil adalah memahami bagaimana pondasi bekerja saat tanah berubah, terutama saat terjadi likuifaksi (Fauzi et al., 2023; Mangunpraja & Prihatiningsih, 2019; Mina et al., 2018; Tarigan, 2022). Kondisi ini bisa mengurangi daya dukung tanah dan meningkatkan risiko keruntuhan bangunan. Likuifaksi biasanya terjadi pada tanah yang longgar dan jenuh air. Saat gempa, tekanan air pori meningkat, yang bisa membuat kekuatan tanah menurun drastis. Dalam situasi ini, pondasi harus mampu menopang beban bangunan dan beradaptasi dengan perubahan tanah yang tidak terduga (Muhammad Lukman Hakim & Hasibuan, 2022; Siregar & Theresia, 2023).

Pondasi box dan pondasi raft adalah dua jenis pondasi yang sering digunakan. Pondasi box berbentuk kotak dan tertanam di tanah, berfungsi untuk mendistribusikan beban secara merata. Pondasi raft adalah pelat beton besar yang menutupi seluruh area pondasi dan menyebarkan beban ke tanah di bawahnya. Kedua jenis pondasi ini memiliki cara berbeda dalam menahan beban dan merespons perubahan tanah (James Thoengsal, M.T., 2016; Soeratinoyo et al., 2022; Widagdo, 2023; Yanto, 2022).

Untuk memahami bagaimana pondasi box dan raft berperilaku saat terjadi likuifaksi, diperlukan analisis mendalam. Salah satu metode yang bisa digunakan adalah shake table earthquake simulator, yang bisa mensimulasikan getaran gempa di laboratorium. Dengan alat ini, kita bisa melihat bagaimana pondasi bereaksi terhadap gempa dan kondisi likuifaksi (Baldovino & Dadios, 2017; Bothara et al., 2021; Chaparro et al., 2019; Putra et al., 2021).

Penelitian ini berfokus pada pengaruh likuifaksi tanah terhadap kinerja pondasi box dan pondasi raft. Beberapa rumusan masalah yang dikemukakan dalam penelitian ini adalah perilaku pondasi box dan pondasi raft ketika tanah mengalami likuifaksi, pengaruh likuifaksi tanah terhadap kinerja pondasi box dan pondasi raft ketika tanah mengalami gempa bumi yang disimulasikan dengan menggunakan shake table, efek likuifaksi tanah terhadap kedua jenis pondasi tersebut, serta perbandingan respons struktural antara pondasi box dan pondasi raft yang disimulasikan di bawah kondisi likuifaksi tanah.

Pondasi bangunan berfungsi sebagai elemen struktural utama yang menopang seluruh beban bangunan (Andreas et al., 2020; Euis Amilia et al., 2022; Harahap & Manalu, 2021; Kanyawan & Zulfian, 2020; Sugiyanto & Wena, 2020). Salah satu tantangan utama dalam desain pondasi adalah bagaimana pondasi berperilaku ketika tanah mengalami likuifaksi (Tohari et al., 2019). Likuifaksi dapat mengurangi daya dukung tanah secara signifikan, yang berpotensi menyebabkan kegagalan struktural pada pondasi, terutama di daerah yang rawan likuifaksi. Fenomena ini terjadi ketika tekanan air pori pada tanah meningkat secara drastis selama gempa, yang menyebabkan tanah kehilangan kekuatan gesernya dan menjadi cair, sehingga pondasi tidak dapat bekerja secara optimal.

Penelitian ini sangat penting dilakukan mengingat potensi likuifaksi yang dapat terjadi pada banyak daerah di Indonesia, terutama di kawasan pesisir dan dataran rendah yang memiliki tanah berpasir. Meningkatnya kejadian gempa bumi di Indonesia menambah urgensi untuk memahami pengaruh likuifaksi terhadap stabilitas pondasi. Dengan menggunakan alat simulasi shake table, penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan mengenai perilaku pondasi box dan pondasi raft saat tanah mengalami likuifaksi, serta untuk memberikan solusi perencanaan yang dapat mengurangi risiko kegagalan struktural pada bangunan.

Penelitian oleh Idriss & Boulanger mengkaji dampak likuifaksi terhadap kestabilan pondasi, terutama pada tanah berpasir yang jenuh air. Mereka mengembangkan metode untuk mengevaluasi potensi likuifaksi berdasarkan data lapangan, dengan fokus pada mekanisme pergerakan tanah dan akibatnya terhadap struktur pondasi. Penelitian ini memberikan pemahaman

yang lebih baik tentang bagaimana kondisi tanah memengaruhi kestabilan pondasi, namun tidak membahas secara spesifik jenis pondasi tertentu, seperti pondasi box dan pondasi raft, yang menjadi fokus dalam penelitian ini.

Penelitian oleh Boulanger & Idriss melanjutkan kajian sebelumnya dengan mengidentifikasi hubungan antara kekuatan geser tanah dan potensi terjadinya likuifaksi. Mereka mengembangkan prosedur evaluasi risiko likuifaksi yang lebih terperinci untuk berbagai jenis tanah, dengan menggunakan parameter seperti N-SPT dan konten pasir. Namun, penelitian ini lebih berfokus pada teori dan model untuk penilaian risiko likuifaksi, sementara perbandingan antara respons pondasi yang berbeda dalam kondisi likuifaksi belum banyak dibahas secara mendalam.

Penelitian oleh Tokimatsu & Yoshimi memberikan kontribusi penting dalam memahami korelasi antara nilai N-SPT dan kerentanannya terhadap likuifaksi pada tanah berpasir. Mereka mengembangkan metode untuk menilai potensi likuifaksi berdasarkan pengujian lapangan dan karakteristik tanah. Namun, penelitian ini tidak membahas respons spesifik dari berbagai jenis pondasi, seperti pondasi box dan pondasi raft, yang memerlukan analisis lebih lanjut untuk memahami pengaruh likuifaksi terhadap kestabilan struktur tersebut dalam konteks bangunan yang lebih besar.

Meski banyak penelitian yang telah mengkaji dampak likuifaksi terhadap pondasi, masih terdapat kekosongan dalam memahami secara spesifik bagaimana jenis pondasi seperti pondasi box dan pondasi raft berperilaku di bawah kondisi tanah yang mengalami likuifaksi, terutama dalam konteks simulasi gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan membandingkan respons kedua jenis pondasi terhadap likuifaksi menggunakan metode simulasi shake table.

Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan fokus pada analisis perbandingan antara pondasi box dan pondasi raft dalam kondisi tanah yang mengalami likuifaksi, yang belum banyak dibahas secara mendalam dalam literatur sebelumnya. Selain itu, penggunaan alat simulasi shake table untuk menggambarkan dampak likuifaksi pada pondasi memberikan pendekatan yang lebih realistis dan dapat diandalkan dalam merancang solusi mitigasi untuk daerah rawan likuifaksi.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh likuifaksi tanah terhadap pondasi box dan pondasi raft dengan menggunakan shake table. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku kedua jenis pondasi saat tanah mengalami likuifaksi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan respons struktural yang terjadi antara pondasi box dan pondasi raft di bawah kondisi likuifaksi. Penelitian ini juga akan menganalisis dampak dari likuifaksi terhadap stabilitas pondasi serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja pondasi selama kondisi likuifaksi terjadi.

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang geoteknik, khususnya dalam memahami pengaruh likuifaksi terhadap stabilitas pondasi di Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam merancang pondasi yang lebih aman di daerah rawan likuifaksi. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan masukan penting bagi perencana bangunan dan pemerintah dalam merumuskan kebijakan terkait mitigasi risiko gempa dan likuifaksi untuk mengurangi kerugian yang ditimbulkan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen dan simulasi untuk menganalisis pengaruh gempa bumi terhadap kestabilan pondasi di tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi. Penelitian ini menggabungkan pengujian sifat fisis dan mekanis tanah, serta percobaan menggunakan shaking table atau meja getar untuk mensimulasikan efek getaran gempa bumi. Lokasi pengambilan sampel untuk penelitian ini berada di Jl. Sindulang 2, Sindulang Satu, Kec. Tuminting, Kota Manado, Sulawesi Utara, dengan koordinat 1°29'49.0"N 124°50'41.2"E, di samping Jembatan Megawati Manado. Pengujian sifat fisis tanah yang dilakukan meliputi analisis saringan, pemeriksaan kadar air tanah, dan pemeriksaan berat jenis tanah. Selain itu, pengujian

sifat mekanis tanah dilakukan dengan menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) dan Direct Shear Test untuk mengukur daya dukung dan karakteristik geser tanah. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan data dasar terkait sifat-sifat tanah yang menjadi subjek penelitian.

Selanjutnya, untuk mensimulasikan efek getaran gempa bumi pada tanah dan pondasi, dilakukan percobaan dengan menggunakan alat shaking table atau meja getar. Percobaan ini bertujuan untuk memahami perilaku dinamis struktur pondasi di bawah beban gempa, menguji kestabilan pondasi box dan pondasi raft, serta menilai respons tanah terhadap gempa, khususnya dalam hal potensi likuifaksi. Dengan eksperimen ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai pengaruh gempa pada pondasi dan tanah, serta memberikan data yang relevan untuk perencanaan konstruksi yang lebih aman di daerah rawan gempa.

Adapun perhitungan daya dukung pondasi dapat dihitung dengan persamaan Meyerhof (1963) dengan persamaan yang sama seperti menghitung daya dukung pondasi telapak, Adapun persamaan tersebut sebagai berikut (Bowles, 1996) :

$$q_u = cN_c s_c d_c + D_f \gamma N_q s_q d_q + 0.5 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (1)$$

Dimana :

q_u	= Daya dukung ultimit	B	= Lebar pondasi
γ	= Berat volume tanah	N_c, N_q, N_γ	= Faktor daya dukung
c	= Kohesi tanah	s_c, s_q, s_γ	= Faktor bentuk pondasi
D_f	= Kedalaman pondasi	d_c, d_q, d_γ	= Faktor kedalaman pondasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah

Dari Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian analisa saringan didapatkan 0,72% tanah tertahan saringan #200 dan 0,04% tanah yang lolos saringan #200. Sementara hasil pengujian berat jenis tanah didapatkan nilai 2,43. Dalam AASHTO dikatakan tanah berbutir apabila tanah lolos ayakan #200 $\leq 35\%$. Sementara menurut USCS dikatakan tanah berbutir kasar apabila 50% tanah tertahan ayakan #200.

Maka dari hasil pengujian sifat fisis, dapat disimpulkan bahwa tanah tersebut masuk dalam klasifikasi tanah pasir, berat jenis yang rendah menunjukkan ini adalah material granular dengan densitas ringan.

Tabel 1. Hasil Uji Sifat Fisis Tanah

Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah		
Jenis Pengujian	Nilai	Ket
Analisa Saringan	0.72 %	Tertahan Saringan #200
Kadar Air	3.35 %	
Berat Jenis	2.43	

B. Hasil Standard Penetration Test

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2 nilai standard penetrasi rata-rata adalah 15.3. Sehingga, dapat disimpulkan tanah tersebut adalah tanah lunak.

Tabel 2. Hasil Standard Penetration Test

Depth (m)	GWL	Deskripsi Jenis Tanah	SPT			Ni
			N1/15	N2/15	N3/15	
0.0	Water Level	SC, Clayed Sand, Black	0	0	0	0
0.5		SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
1.0		SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2

1.5	SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
2.5	SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
3.0	SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
3.5	SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
4.0	SC, Clayed Sand, Brown	1	1	1	2
4.5	SC, Clayed Sand, Brown	2	3	4	7
5.0	SC, Clayed Sand, Brown	4	5	5	10
5.5	SC, Clayed Sand, Brown	5	6	6	12
6.0	SC, Clayed Sand, Brown	5	8	11	19
6.5	SC, Clayed Sand, Brown	5	12	13	25
7.0	SC, Clayed Sand, Brown	5	11	14	25
7.5	SC, Clayed Sand, Brown	5	12	14	26
9.0	SC, Clayed Sand, Brown	5	12	13	25
12.0	SC, Clayed Sand, Brown	5	12	15	27
15.0	SC, Clayed Sand, Brown	7	13	16	29
18.0	SC, Clayed Sand, Brown	8	13	22	35
20.0	SC, Clayed Sand, Brown	8	14	23	37
$\bar{N}$					15,3

C. Hasil Simulasi *Shaking Table*

Dilakukan simulasi gempa pada Pondasi Box dan Pondasi Raft dengan dimensi pondasi sebagai berikut (Gambar 3) :

Tabel 3. Dimensi Pondasi Pada *Shaking Table*

Jenis Pondasi	Dimensi Pondasi		
	Panjang cm	Lebar cm	Tinggi cm
Raft	10	10	1
Box A	10	10	6
Box B	10	10	11
Box C	10	10	16

Adapun hasil dari simulasi gempa pada kondisi tanah jenuh air sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Simulasi Gempa

Jenis Pondasi	Magnitudo Max	Perpindahan Pondasi		Ket
		Arah X cm	Arah Y cm	
Raft	11	2.5	0.5	Pondasi mengalami displacement, tanah mengalami likuifaksi
Box A	11	0	0	Pondasi tidak mengalami displacement, tanah mengalami likuifaksi
Box B	11	0	0	Pondasi tidak mengalami displacement, tanah mengalami likuifaksi
Box C	11	0	0	Pondasi tidak mengalami displacement, tanah mengalami likuifaksi

D. Hasil *Direct Shear Test*

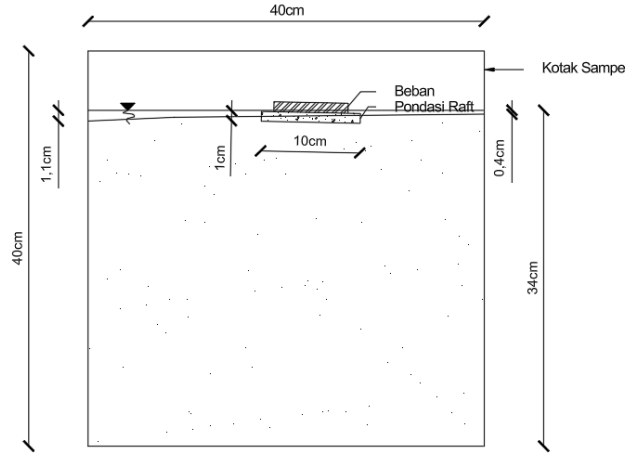
Berdasarkan hasil uji geser langsung pada sampel tanah yang diambil setelah simulasi gempa, nilai kohesi (c) sebesar 17.81 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) sebesar 1.23°. Hal ini

menunjukkan bahwa meskipun tanah pasir memiliki kohesi yang cukup tinggi pasca gempa, sudut geser dalamnya tetap rendah, yang dapat mengindikasikan penurunan kemampuan geser tanah akibat perubahan struktur atau kondisi tanah setelah mengalami getaran gempa.

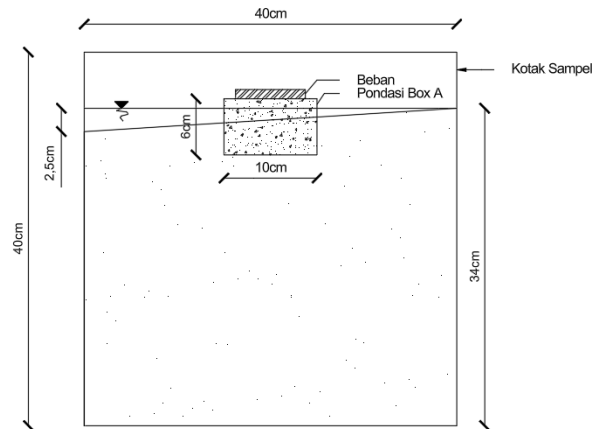
Tabel 5. Hasil Uji Geser Langsung		
Hasil Uji Geser Langsung		
Kondisi Tanah	c	ϕ
	kPa	°
Setelah simulasi gempa	17.81	1.23



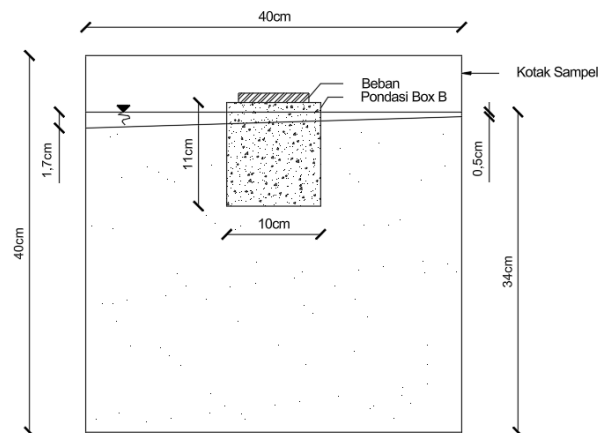
Gambar 3. Pondasi Raft dan Pondasi Box



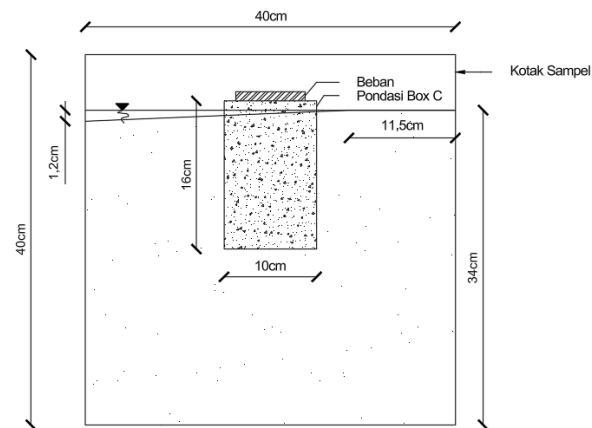
Gambar 4. Tampak Samping Pondasi Raft Pasca Simulasi Gempa



Gambar 5. Tampak Samping Pondasi Box A Pasca Simulasi Gempa



Gambar 6. Tampak Samping Pondasi Box B Pasca Simulasi Gempa



Gambar 7. Tampak Samping Pondasi Box C Pasca Simulasi Gempa

E. Hasil Analisis Likuifaksi Pada *NovoLiq*

Pada Tabel 6. didapatkan hasil perhitungan CSR dan CRR dengan metode NCEER Workshop (1997), Boulanger & Idriss (2014), Seet et al (1983) dan Tokimatsu Yoshimi (1983). Hasil ini dihitung dengan menggunakan aplikasi NovoLiq (Gambar 7).

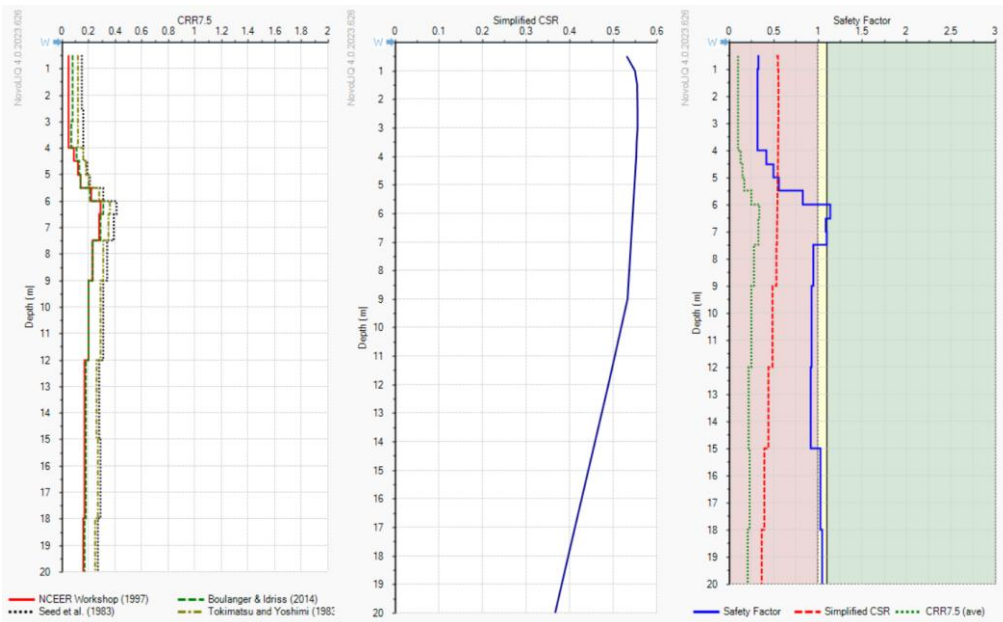
Tabel 6. Hasil Perhitungan CSR dan CRR

Depth (m)	Rd	Simplified CSR	CSR _{1&B}	CRR _{7.5}				CRR _{7.5} (ave)
				NCEER Workshop (1997)	Boulanger & Idriss (2014)	Seed et al. (1983)	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	
0.5	0.996	0.531	0.534	0.05	0.08	0.15	0.12	0.1
1	0.992	0.55	0.551	0.05	0.08	0.15	0.12	0.1
1.5	0.989	0.555	0.554	0.05	0.08	0.15	0.12	0.1
2.5	0.981	0.556	0.55	0.05	0.08	0.15	0.12	0.1
3	0.977	0.556	0.546	0.05	0.08	0.16	0.12	0.1
3.5	0.973	0.554	0.541	0.05	0.07	0.16	0.12	0.1
4	0.969	0.553	0.536	0.05	0.07	0.16	0.12	0.1
4.5	0.966	0.551	0.53	0.09	0.11	0.16	0.16	0.13
5	0.962	0.549	0.525	0.12	0.13	0.19	0.18	0.15
5.5	0.958	0.547	0.519	0.14	0.14	0.21	0.2	0.17
6	0.954	0.545	0.512	0.22	0.21	0.31	0.28	0.25
6.5	0.95	0.543	0.506	0.29	0.31	0.41	0.36	0.34
7	0.946	0.541	0.499	0.28	0.29	0.39	0.35	0.33
7.5	0.943	0.539	0.492	0.28	0.29	0.39	0.35	0.33
9	0.931	0.533	0.472	0.23	0.23	0.34	0.31	0.28
12	0.854	0.489	0.43	0.2	0.2	0.31	0.29	0.25
15	0.774	0.443	0.389	0.17	0.18	0.28	0.26	0.22
18	0.693	0.397	0.352	0.17	0.18	0.29	0.27	0.23
20	0.64	0.367	0.33	0.16	0.17	0.27	0.25	0.21

Hasil perhitungan faktor keamanan pada Tabel 7 menyatakan bahwa, pada kedalaman 0,5 m – 6 m dan kedalaman 9 m – 15 m didapatkan faktor keamanan < 1 sehingga dapat disimpulkan tidak aman. Selanjutnya, untuk kedalaman 6,5 m – 7,5 m dan kedalaman 18 m – 20 m didapatkan faktor keamanan > 1 sehingga dapat disimpulkan aman.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan

Depth (m)	Rd	Safety Factor				Safety Factor
		NCEER Workshop (1997)	Boulanger & Idriss (2014)	Seed et al. (1983)	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	
0.5	0.996	0.17	0.27	0.51	0.41	0.34
1	0.992	0.16	0.26	0.5	0.39	0.33
1.5	0.989	0.16	0.25	0.49	0.39	0.32
2.5	0.981	0.16	0.25	0.49	0.39	0.32
3	0.977	0.16	0.25	0.5	0.39	0.32
3.5	0.973	0.16	0.24	0.5	0.38	0.32
4	0.969	0.16	0.24	0.5	0.39	0.32
4.5	0.966	0.29	0.36	0.52	0.51	0.42
5	0.962	0.39	0.43	0.6	0.59	0.5
5.5	0.958	0.45	0.48	0.67	0.64	0.56
6	0.954	0.7	0.72	1	0.92	0.83
6.5	0.95	0.96	1.09	1.35	1.18	1.14
7	0.946	0.91	1.01	1.29	1.14	1.09
7.5	0.943	0.92	1.03	1.3	1.14	1.1
9	0.931	0.78	0.87	1.14	1.03	0.95
12	0.854	0.72	0.83	1.12	1.04	0.93
15	0.774	0.69	0.82	1.12	1.05	0.92
18	0.693	0.75	0.91	1.28	1.19	1.03
20	0.64	0.75	0.92	1.31	1.23	1.05



Gambar 7. Grafik CRR, CSR dan Faktor Keamanan pada NovoLiq

F. Hasil Perhitungan Daya Dukung Pondasi

Berdasarkan hasil perhitungan daya dukung vertikal Pada Tabel 8, pondasi raft memiliki daya dukung pondasi terkecil dengan faktor keamanan terendah dibandingkan pondasi Box.

Tabel 8. Perhitungan Manual Daya Dukung Pondasi Kondisi Normal

Pondasi	qult	FS
Raft	93.74 kN/m ²	65.55
Box A	105.59 kN/m ²	73.84
Box B	117.44 kN/m ²	82.13
Box C	129.29 kN/m ²	90.42

Tabel 9. Perhitungan Manual Daya Dukung Pondasi Kondisi Potensi Likuifaksi

Pondasi	qult	FS
Raft	28.02 kN/m ²	19.59
Box A	39.87 kN/m ²	27.88
Box B	51.73 kN/m ²	36.17
Box C	63.58 kN/m ²	44.46

Pada Tabel 9 menunjukan daya dukung pondasi raft dan box memiliki penurunan daya dukung dibandingkan pada kondisi normal, dan pondasi raft memiliki daya dukung terkecil dibandingkan dengan pondasi box.

G. Hasil Analisis Daya Dukung Pondasi Pada Plaxis 3D

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium, analisis daya dukung Pondasi Box dan Pondasi Raft dihitung menggunakan metode elemen hingga pada Aplikasi Plaxis 3D dengan skala yang lebih besar.

Pada Tabel 10, pondasi raft menunjukkan deformasi maksimum terkecil sebesar 0.002 m, dengan nilai Msf tertinggi 12.78 dan daya dukung (qu) terbesar 18.29 kN/m², menandakan kinerja yang lebih stabil dibanding pondasi box. Peningkatan tinggi pondasi box menyebabkan deformasi maksimum meningkat dan nilai Msf serta qu menurun drastis, menunjukkan kecenderungan deformasi lebih besar dan daya dukung lebih rendah pada tanah normal.

Tabel 10. Hasil Analisa Plaxis 3D Pada Kondisi Tanah Normal

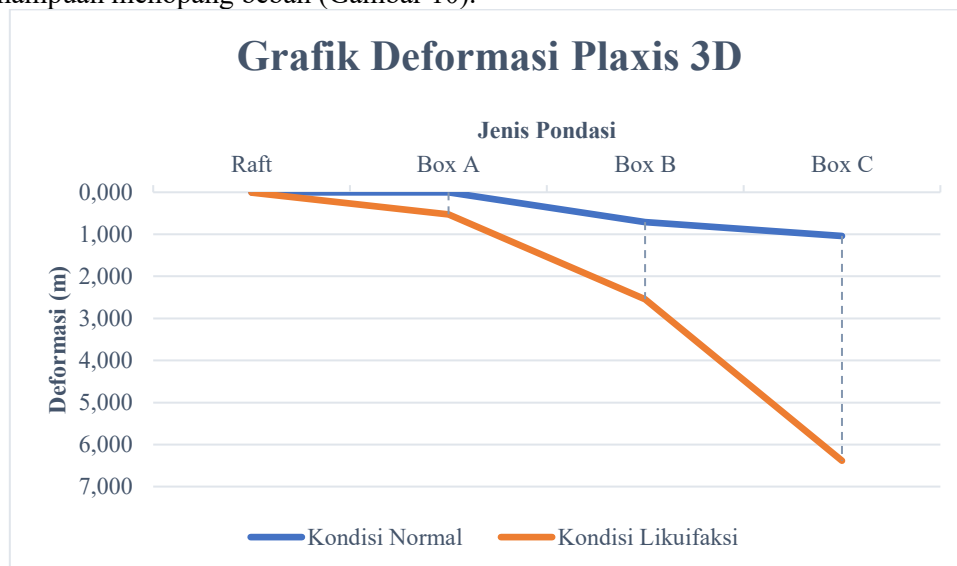
Jenis Pondasi	Dimensi (m)			Deformed Max (m)	Msf	qu (kN/m ²)
	P	L	T			
Raft	2	2	0.2	0.002	12.78	18.29
Box A	2	2	1.2	0.004	10.54	15.08
Box B	2	2	2.2	0.71	2.28	3.27
Box C	2	2	3.2	1.04	1.67	2.40

Tabel 11. Hasil Analisa Plaxis 3D Pada Kondisi Tanah Potensi Likuifaksi

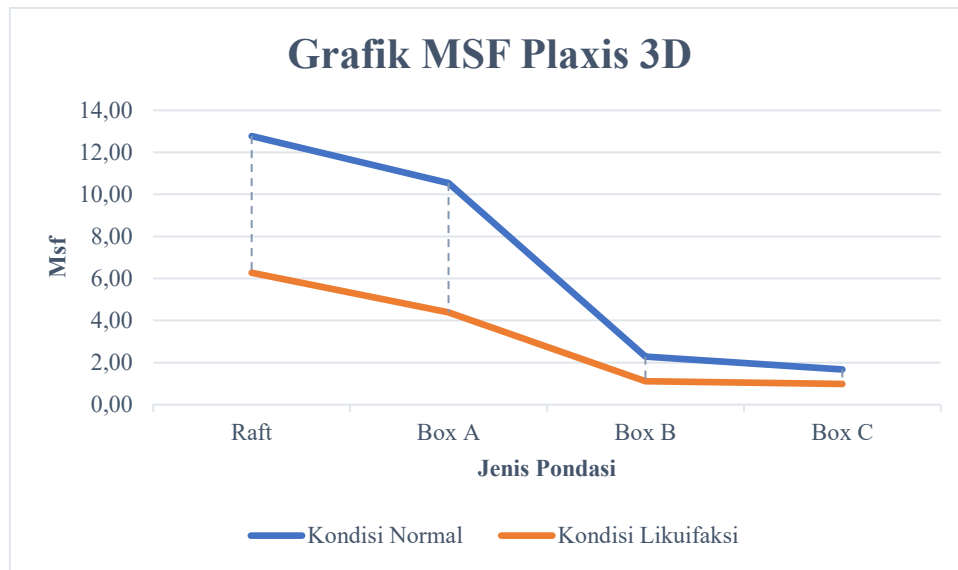
Jenis Pondasi	Dimensi (m)			Deformed Max (m)	Msf	qu (kN/m ²)
	P	L	T			
Raft	2	2	0.2	0.008	6.27	8.98
Box A	2	2	1.2	0.52	4.39	6.29
Box B	2	2	2.2	2.55	1.11	1.59
Box C	2	2	3.2	6.38	0.99	1.41

Pada Tabel 11, semua pondasi mengalami peningkatan deformasi maksimum di tanah likuifaksi. Pondasi raft tetap memiliki deformasi terkecil 0.008 m dengan Msf 6.27 dan qu tertinggi 8.98 kN/m², meskipun performanya menurun dibandingkan kondisi normal. Pondasi box, terutama Box B (2.55 m) dan Box C (6.38 m), menunjukkan deformasi signifikan dengan Msf dan qu yang sangat rendah, menandakan kecenderungan deformasi ekstrem dan kehilangan kapasitas dukung pada kondisi likuifaksi (Gambar 8).

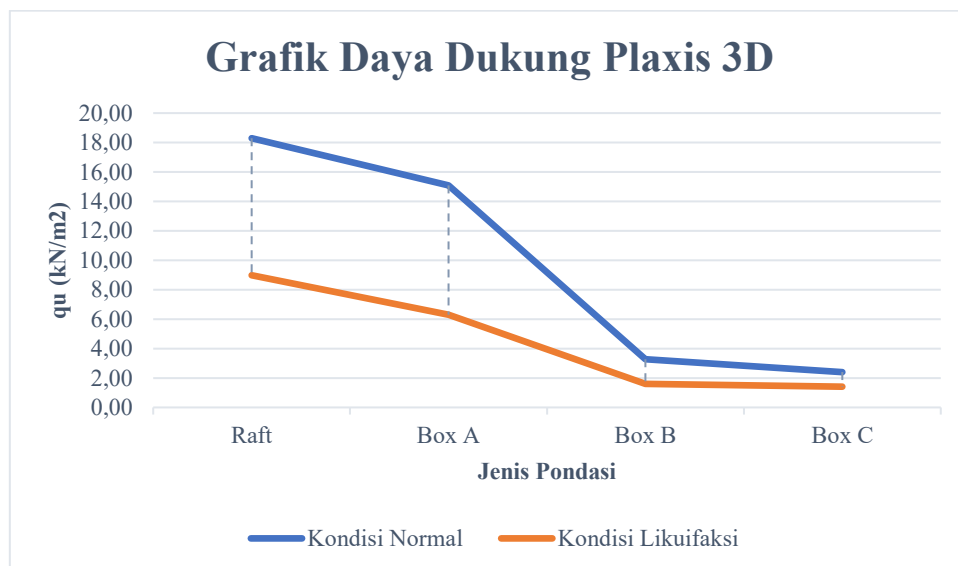
Peningkatan tinggi pondasi box meningkatkan berat dan beban ke tanah, mempercepat deformasi. Rendahnya qu dan Msf memperburuk kestabilan pondasi (Gambar 9), sementara peningkatan tekanan air pori pada tanah likuifaksi melemahkan struktur tanah, mengurangi kemampuan menopang beban (Gambar 10).



Gambar 8. Grafik Deformasi Pondasi Berdasarkan Jenis Pondasi Pada Plaxis 3D



Gambar 9. Grafik MSF Pondasi Berdasarkan Jenis Pondasi Pada Plaxis 3D



Gambar 10. Grafik Daya Dukung Pondasi Berdasarkan Jenis Pondasi Pada Plaxis 3D

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa likuifaksi tanah dapat memengaruhi kestabilan pondasi, baik pondasi box maupun pondasi raft. Berdasarkan hasil simulasi shaking table, pondasi raft mengalami displacement yang signifikan, sementara pondasi box tetap stabil meskipun tanah di sekitarnya mengalami likuifaksi. Perbandingan dengan penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Idriss & Boulanger (2008) yang menyatakan bahwa likuifaksi dapat menyebabkan kehilangan kekuatan tanah, mendukung temuan ini. Namun, pada penelitian ini, pondasi box menunjukkan stabilitas yang lebih tinggi, meskipun tanah berpotensi mengalami likuifaksi. Perbandingan dengan Boulanger & Idriss (2014) yang mengkaji perilaku tanah saat gempa juga mengindikasikan penurunan kemampuan tanah setelah likuifaksi, namun respons struktural pondasi pada penelitian ini menunjukkan perbedaan signifikan, terutama pada pondasi box.

Lebih lanjut, hasil pengujian Direct Shear Test menunjukkan penurunan kemampuan geser tanah, dengan nilai kohesi yang tetap tinggi, namun sudut geser dalam yang rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian Tokimatsu & Yoshimi (1983) yang menemukan korelasi antara nilai N-SPT dan kerentanannya terhadap likuifaksi pada tanah berpasir. Namun, penelitian ini memperlihatkan bahwa meskipun tanah mengalami penurunan kemampuan geser, pondasi box

cenderung lebih tahan terhadap perubahan tersebut dibandingkan pondasi raft, yang sejalan dengan analisis Plaxis 3D yang menunjukkan deformasi lebih besar pada pondasi raft. Temuan ini menunjukkan bahwa desain pondasi yang lebih besar seperti pondasi box mungkin lebih rentan terhadap perubahan kondisi tanah akibat likuifaksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa pengaruh likuifaksi tanah terhadap pondasi raft dan pondasi box menggunakan simulasi gempa dengan shaking table, dapat disimpulkan bahwa simulasi gempa pada tanah jenuh air menunjukkan peningkatan tekanan air pori yang mengindikasikan likuifaksi, dimana pondasi raft mengalami displacement, sementara pondasi Box A, B, dan C tidak mengalami displacement meskipun tanah di sekitarnya mengalami likuifaksi. Hasil SPT menunjukkan tanah lunak dengan nilai rata-rata 15,3, dan uji geser pasca-gempa menunjukkan penurunan kemampuan geser tanah. Perhitungan faktor keamanan dengan NovoLiq menunjukkan kedalaman tertentu yang tidak aman dengan faktor keamanan kurang dari 1, sementara kedalaman lainnya aman dengan faktor keamanan lebih dari 1. Analisis Plaxis 3D menunjukkan peningkatan deformasi signifikan pada pondasi akibat hilangnya kekuatan tanah, dengan pondasi raft mengalami deformasi terkecil, tetapi daya dukung dan faktor keamanannya menurun hampir 50%, sementara pondasi Box C mengalami deformasi tertinggi. Saran yang diberikan adalah untuk mengkombinasikan pondasi box dan raft sesuai jenis struktur dan kondisi tanah, memperkuat tanah dengan pemasangan drainase vertikal pada tanah dengan risiko tinggi likuifaksi, serta memilih pondasi dalam pada tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi untuk mencapai lapisan tanah yang lebih stabil.

DAFTAR PUSTAKA

- Andreas, L. O., Andayono, T., Oktaviani, O., Zola, P., & Zuwida, N. (2020). Sosialisasi Pemilihan Jenis Pondasi Bangunan Pada Daerah Berpotensi Bencana Di Kecamatan Alam Pauah Duo Kabupaten Solok Selatan. *Cived*, 7(2). <https://doi.org/10.24036/cived.v7i2.107183>
- Baldovino, R. G., & Dadios, E. P. (2017). Shake table system: A review on the different mechanical designs and control models. In *Advanced Science Letters* (Vol. 23, Issue 11). <https://doi.org/10.1166/asl.2017.10294>
- Banua, J., Riogilang, H., & Rondonuwu, S. G. (2021). Analisis Potensi Likuefaksi Pada Daerah Endapan Danau Tondano. *Jurnal Sipil Statik*, 9(1), 1-10.
- Bothara, J., Desai, R., Ingham, J., & Dizhur, D. (2021). Seismic simulation tools and methods appropriate for developing countries. *Structures*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.067>
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Center for Geotechnical Modeling, April, 1–138.
- Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design. In *Civil Engineering Materials* (Fifth). https://doi.org/10.1007/978-1-349-13729-9_26
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2017). *Plaxis 3D Foundation Manual*. Plaxis bv.
- Chaparro, J. M., Aviles, S. O. F., & Chica, L. A. D. J. (2019). Design and implementation of a predictive control system for a shake table of earthquake simulator. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(2). <https://doi.org/10.36478/jeasci.2019.386.398>
- Das, B. M. (1995a). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* Jilid 1. Penerbit Erlangga.
- Das, B. M. (1995b). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* Jilid 2. In Erlangga.
- Euis Amilia, E. A., Umam, C., & Heryanto, B. (2022). Analisis Struktur Pondasi Foot Plat Pada Bangunan Rumah Lantai 3 Dengan Menggunakan SAP2000. *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, 4(02). <https://doi.org/10.47080/josce.v4i02.2126>

- Fauzi, R., Mustari, A., Santoso, R., Eri Reza Tursina, M., Studi, P. S., Elektro, T., Teknik, F., Tadulako, U., & Kabupaten Sigi Sulawesi Tengah, B. (2023). Rancang Bangun Prototipe Alat Monitoring Potensi Likuifaksi Pada Suatu Daerah Berbasis Data Logger. *Seminar Nasional Teknik Elektro Dan Informatika (SNTEI)*, 8(1).
- Harahap, A. K., & Manalu, B. J. (2021). Perencanaan Struktur Pondasi Pada Bangunan Puskesmas Jawa Maraja Bah Jambi Kabupaten Simalungun Provinsi Sumatera Utara. *Jurnal Santeksipil*, 1(2). <https://doi.org/10.36985/jsl.v1i2.14>
- Iai, S. (1989). Similitude For Shaking Table Tests On Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field. *Soils and Foundations*, JGS, 29, 105–118. <http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute. <https://doi.org/10.1109/MIA.2007.322261>
- Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. Proc. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, August 1985. Vol. 1, (Balkema), 321–376.
- James Thoengsal, M.T., IPP. (2016). *Jenis-Jenis Pondasi Pada Struktur Bangunan*. 27 September 2016.
- Kanyawan, O. E., & Zulfian, Z. (2020). Identifikasi Struktur Lapisan Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis sebagai Informasi Awal Rancang Bangun Pondasi Bangunan. *PRISMA FISIKA*, 8(3). <https://doi.org/10.26418/pf.v8i3.43675>
- Linverando, E., Sandjaja, G., & Iskandar, A. (2022). Analisis Potensi Likuifaksi dan Penurunan Pada Areal Reklamasi yang Berlokasi di Jakarta Utara. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4), 723–734.
- Mangunpraja, D. M., & Prihatiningsih, A. (2019). Analisis Perbaikan Tanah Sebagai Bentuk Mitigasi Bencana Likuifaksi Yang Dapat Diaplikasikan Masyarakat Di Palu. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 2(4). <https://doi.org/10.24912/jmts.v2i4.6167>
- Mina, E., Kusuma, R. I., & Sudirman, S. (2018). Analisa Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Spt (Studi Kasusproyek Pembangunan Gedung Baru Untirta Sindang Sari). *Jurnal Fondasi*, 7(1). <https://doi.org/10.36055/jft.v7i1.3298>
- Muhammad Lukman Hakim, & Hasibuan, M. (2022). Pemanfaatan Mikrokontroler Untuk Merancang Simulasi Pendeteksi Gempa. *LOFIAN: Jurnal Teknologi Informasi Dan Komunikasi*, 2(1). <https://doi.org/10.58918/lofian.v2i1.186>
- Munsir, D. A. F., Manoppo, F. J., & Rondonuwu, S. G. (2024). Analisis Fondasi Tiang Bor Dan Fondasi Rakit Di Tanah Berpotensi Likuifaksi (Studi Kasus : Daerah Pinggiran Jembatan Megawati Kota Manado). *Tekno*, 22(89).
- Polii, V., Riogilang, H., & Manaroinsong, L. D. K. (2024). Analisis Potensi Likuifaksi Pada Ruas Jalan Tol Manado-Bitung (Sta. 9+745). *Tekno*, 22(89).
- Pusat Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber Bahaya dan Gempa Indonesia.
- Putra, N. A. I. E., Syam, R., Renreng, I., Harianto, T., & Wibowo, N. R. (2021). The Development of Earthquake Simulator. *EPI International Journal of Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.25042/10.25042/epi-ije.082021.05>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). National Technical Information Service Asimplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. In Earthquake Engineering Research Center (Issue November).
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 15.
- Siregar, A. A. I., & Theresia, C. (2023). Perancangan Simulasi Prosedur Evakuasi Darurat Gempa Bumi di Gedung X Berbasis Virtual Reality. *Journal of Integrated System*, 6(2). <https://doi.org/10.28932/jis.v6i2.7696>
- Skempton, A. W. (1955). Foundations for High Buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 4(4), 246–269. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1955.11849>

- SNI 3420:2016. (n.d.). Metode uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase. Standar Nasional Indonesia, 19.
- SNI 4153:2008. (n.d.). Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT. Badan Standardisasi Nasional.
- Soeratinoyo, A. H., Manoppo, F. J., & Mandagi, A. T. (2022). Pemodelan Pondasi Box Di Tanah Berpotensi Likuifaksi. *Tekno*, 20(81), 189–201.
- Sugiyanto, S., & Wena, M. (2020). Prediksi Produktifitas Kerja Pada Pekerjaan Tanah Dan Pondasi Bangunan Tak Bertingkat. *Bangunan*, 25(2). <https://doi.org/10.17977/um071v25i22020p11-24>
- Tarigan, R. (2022). Kajian Potensi Likuifaksi Lapisan Tanah Menggunakan Metode Korelasi Empris Nilai CSR dan CRR. *Jurnal Darma Agung*, 30(1). <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v30i1.1404>
- Tijow, K. C., Sompie, O. B. A., & Tico, J. H. (2018). Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (Spt) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 6(7), 491–500.
- Tohari, A., Syahbana, A. J., Satriyo, N. A., & ... (2019). Karakteristik likuifaksi tanah pasir di kota padang berdasarkan metode microtremor. ... *Hasil Penelitian Puslit ...*, July.
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56–74. https://doi.org/10.3208/sandf1972.23.4_56
- Tomlinson, M. J. (1995). Foundation Design & Construction. In Longman Scientific & Technical. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-01431-4>
- 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
- Widagdo, P. A. (2023). Analisis Waktu Dan Biaya Pekerjaan Pondasi Rakit (Raft Foundation) Pada Proyek Mcc Dengan Menggunakan Metode Nilai Hasil. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 7(2). <https://doi.org/10.52447/jkts.v7i2.6006>
- Yanto, R. (2022). Ketepatan Pemilihan Metode dalam Pekerjaan Erection Steel Box Girder. *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, 1(1). <https://doi.org/10.23960/snip.v1i1.126>
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. In *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (Vol. 127, Issue 4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297))
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential. *ASCE J Geotech Eng Div*, 104(4), 433–446. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0000612>