

Analisis Likuifaksi di Paisubololi, Sulawesi Tengah

William Tehputra¹ dan Dr. Ir. Hendriyawan, MT.²

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

¹williamtehputra@ymail.com dan ²hendriyawan@ocean.itb.ac.id

Pendahuluan

Gempa adalah salah satu fenomena alam dalam bentuk guncangan tanah yang dapat menyebabkan kerusakan pada alam, infrastruktur, dan membahayakan nyawa manusia. Beberapa fenomena yang dapat disebabkan oleh gempa adalah kegagalan struktur, likuifaksi, tanah longsor, dan gelombang tsunami. Salah satu fenomena yang dapat menyebabkan kerusakan yang parah adalah likuifaksi.

Likuifaksi adalah perubahan sifat tanah menjadi seperti benda cair akibat peningkatan tekanan air pori yang menyebabkan tanah kehilangan ketahanan gesernya. Analisis secara kualitatif digunakan untuk mengklasifikasikan apakah tanah pada suatu lokasi rentan atau tidak terhadap likuifaksi. Jika tanah diklasifikasikan sebagai tanah yang tidak rentan terhadap likuifaksi, maka tidak perlu dilakukan analisis lebih lanjut. Namun jika sebaliknya, perlu dilakukan analisis lebih lanjut secara kuantitatif untuk mengetahui tingkat kerentanan tanah tersebut terhadap likuifaksi dan memperkirakan langkah mitigasi yang perlu diambil. Dalam studi ini akan dilakukan analisis likuifaksi pada Desa Paisubololi, Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah.

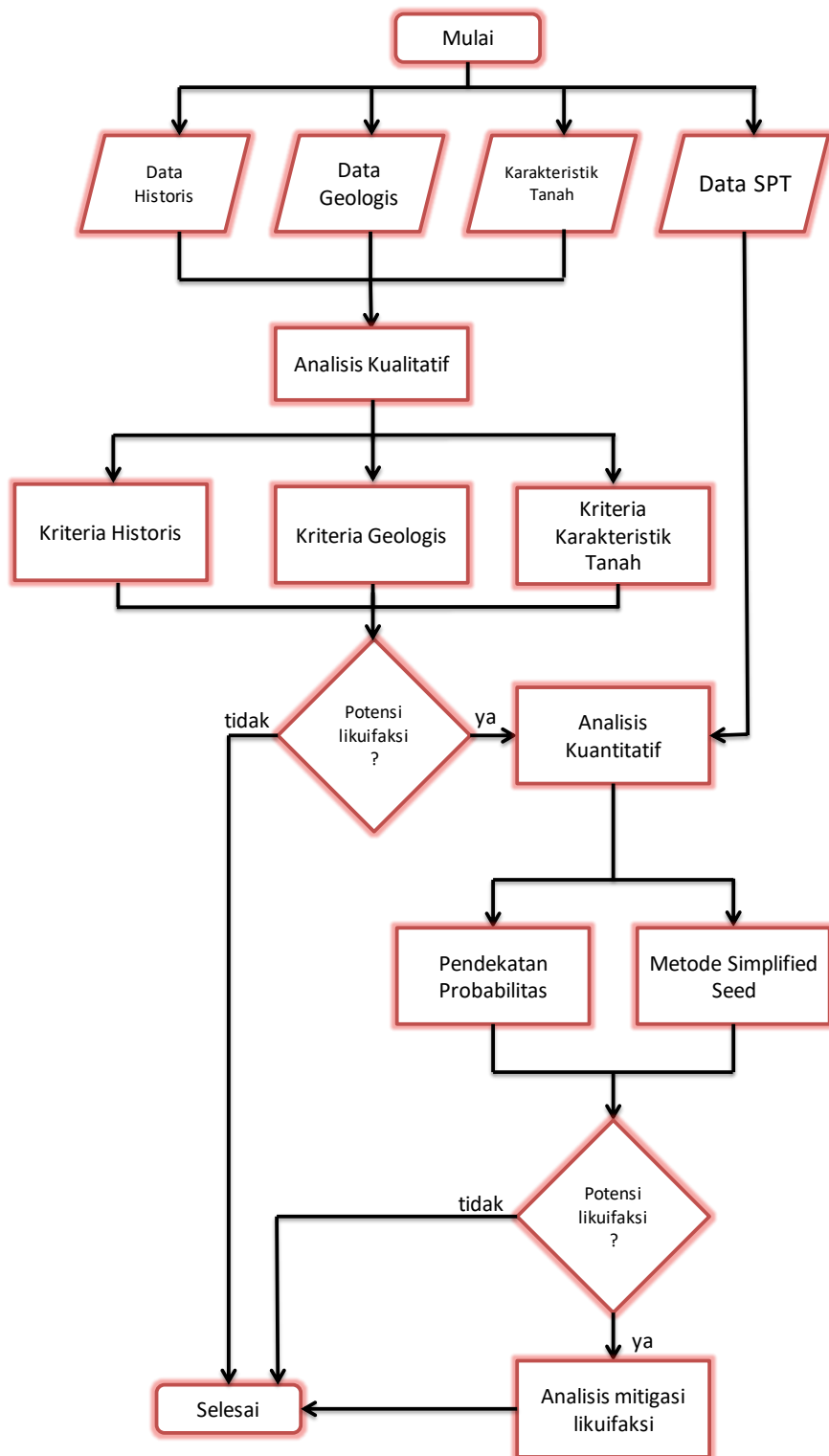
Dalam studi ini akan dilakukan analisis likuifaksi pada Desa Paisubololi, Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah (Gambar 1). Daerah tersebut berpotensi sebagai pusat eksplorasi dan pemrosesan minyak dan gas. Namun karena terletak pada daerah rawan gempa dan desa tersebut berada pada daerah delta, analisis kerentanan tanah terhadap likuifaksi perlu dilakukan.



**Gambar 1 Lokasi studi, Paisubololi, Sulawesi Tengah
(Sumber: Google Earth)**

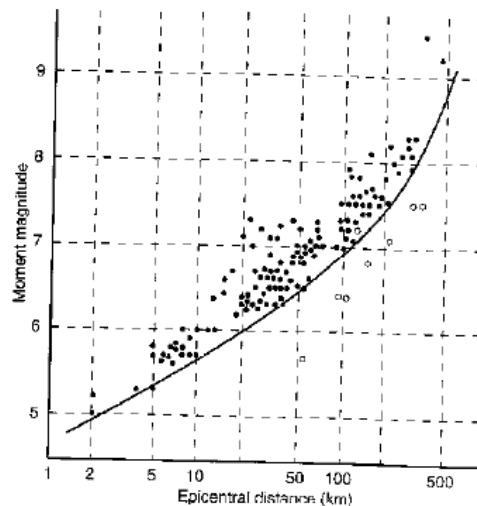
Metodologi dan Teori

Metodologi yang digunakan dalam studi ini dijelaskan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Metodologi studi

Analisis potensi likuifaksi secara kualitatif meliputi analisis menggunakan kriteria historis, kriteria geologis, dan kriteria karakteristik tanah. Analisis kriteria historis menggunakan penelitian pasca-gempa, ditemukan bahwa likuifaksi sering terjadi pada lokasi yang sama jika kondisi tanah tidak berubah (Youd, 1984). Penelitian kasus historis tersebut dapat digunakan untuk mengetahui kerentanan likuifaksi (Gambar 3).



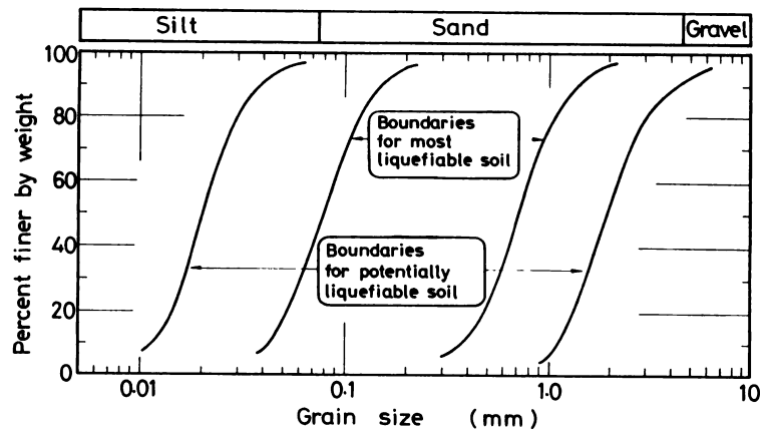
Gambar 3 Kurva kriteria historis
(Sumber: Earthquake Geotechnical Engineering)

Kriteria geologis meliputi proses terbentuknya tanah dan usia endapan tanah tersebut. Pembentukan tanah secara fluvial, colluvial, dan aeolian dianggap sebagai pembentukan tanah yang menghasilkan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi. Potensi likuifaksi berdasarkan umur endapan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel potensi likuifaksi berdasarkan umur endapan tanah
(Sumber: Liquefaction of Soils During Earthquakes)

Umur endapan tanah	Kedalaman muka air tanah (feet)		
	D<10	10≤D<30	D>30
Holosen baru	Tinggi	Rendah	Tidak ada
Holosen lama	Sedang	Rendah	Tidak ada
Pleistosen akhir	Rendah	Tidak ada	Tidak ada

Kriteria karakteristik tanah meninjau komposisi butiran tanah. Tanah yang dianggap berpotensi tinggi mengalami likuifaksi adalah tanah pasir, meskipun tidak menutup kemungkinan tanah jenis lain dapat mengalami likuifaksi jika syaratnya terpenuhi. Tanah dengan partikel bulat dan seragam juga dianggap berpotensi mengalami likuifaksi karena memiliki volume pori yang tinggi. Analisis karakteristik tanah dapat dilakukan menggunakan kurva yang digagaskan oleh Tsuchida (1970) yang dapat digunakan pada hasil tes saringan tanah (Gambar 4).



Gambar 4 Kurva gradasi tanah tsuchida (1970)
(Sumber: Liquefaction of Soils During Earthquake)

Jika analisis secara kualitatif menentukan bahwa tanah berpotensi mengalami likuifaksi maka perlu dilakukan analisis secara kuantitatif. Analisis yang akan digunakan pada studi ini adalah analisis *Simplified Seed* dan analisis pendekatan probabilitas. Analisis *Simplified Seed* menggunakan kurva perbandingan *cyclic stress ratio* dengan nilai $(N_1)_{60}$ (Gambar 5).

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{o}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_o}{\sigma'_{o}} r_d \quad (1)$$

Dimana:

τ_{av} = tegangan geser rata – rata (kN/m^2)

a_{max} = percepatan puncak gempa di permukaan tanah (g)

σ_o = *overburden stress* total pada kedalaman yang ditinjau (kN/m^2)

σ'_{o} = *overburden stress* efektif pada kedalaman yang ditinjau (kN/m^2)

r_d = *stress reduction factor*

g = percepatan gravitasi (g)

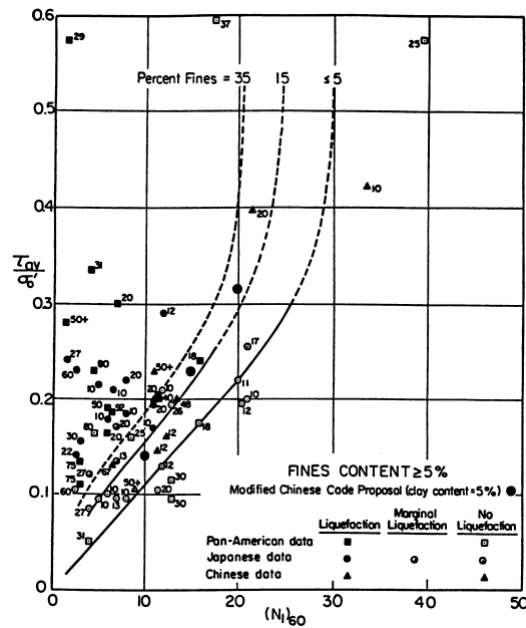
$$(N_1)_{60} = \frac{C_N ER_m N_m}{60} \quad (2)$$

Dimana:

C_N = Faktor koreksi tegangan efektif *overburden*

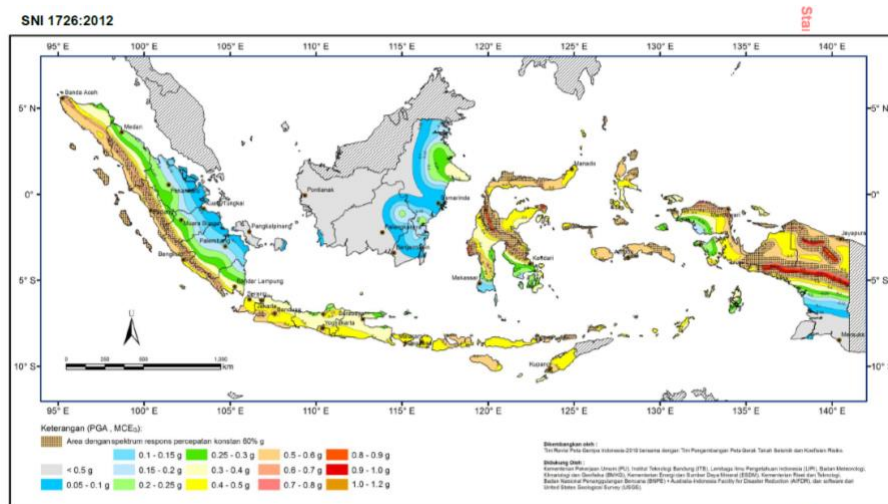
ER_m = Rasio energi pemukul

N_m = Jumlah pukulan pada prosedur SPT



Gambar 5 Kurva hubungan antara τ_v/σ'_v dan $(N_1)_{60}$ untuk tanah berpasir pada gempa berkekuatan 7.5 SR pada tanah dengan komposisi tanah halus yang berbeda ($\geq 5\%$, 15%, dan 35%)
(Sumber: Liquefaction of Soils During Earthquake)

Percepatan puncak gempa di permukaan adalah percepatan tertinggi saat gempa terjadi di permukaan tanah. Perambatan gelombang dari pusat gempa akan mengalami amplifikasi saat melewati lapisan – lapisan tanah sehingga nilai percepatan di pusat gempa dan di permukaan akan berbeda. Variabel yang diperlukan untuk mendapatkan percepatan puncak gempa di permukaan tanah adalah percepatan puncak gempa di batuan dasar dan klasifikasi tanah untuk faktor amplifikasi percepatan. Percepatan puncak di batuan dasar didapatkan dari peta percepatan puncak dari SNI-1726-2012 (Gambar 6).



Gambar 6 Peta percepatan puncak gempa di batuan dasar
(Sumber: SNI-1726-2012)

Klasifikasi tanah didapatkan dari SNI-1726-2012 (Tabel 2). Tanah diklasifikasikan menjadi empat jenis yaitu batuan keras, batuan, tanah keras, tanah sedang, tanah lunak, dan tanah khusus. Faktor amplifikasi percepatan untuk tiap jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 3. Percepatan puncak maksimum di permukaan tanah kemudian dikalikan faktor desain sebesar 2/3.

Tabel 2 Jenis – jenis klasifikasi tanah
(Sumber: SNI-1726-2012)

Kelas situs	Kecepatan rambat gelombang geser rata - rata (m/s)	Nilai hasil N-SPT rata - rata	Kuat geser nir alir rata - rata (kPa)
SA (Batuan keras)	$v_s > 1500$	N/A	N/A
SB (Batuan)	$750 \leq v_s \leq 1500$	N/A	N/A
SC (Tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	$350 \leq v_s < 750$	$N \geq 50$	$S_u \geq 100$
SD (tanah sedang)	$175 \leq v_s < 350$	$15 \leq N < 50$	$50 \leq S_u < 100$
SE (tanah lunak)	$v_s < 175$	$N < 15$	$S_u < 50$
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir < 25 kPa		
SF (Tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut 1. rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah bersementasi lemah 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3m$) 3. Lempung berplastisitas sangat tinggi (Ketebalan $H > 7.5$ m dengan $PI > 75$) 4. Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35m$ dengan geser niralir $< 50kPa$		

Tabel 3 Faktor amplifikasi percepatan puncak gempa di permukaan
(Sumber: SNI-1726-2012)

Kelas Situs	$PGA \leq 1$	$PGA = 2$	$PGA = 3$	$PGA = 4$	$PGA \geq 5$
SA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SB	1	1	1	1	1
SC	1.2	1.2	1.1	1	1
SD	1.6	1.4	1.2	1.1	1
SE	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
SF	Perlu tinjauan lebih lanjut				

Analisis pendekatan probabilitas yang akan digunakan dalam studi ini adalah pendekatan probabilitas oleh Liao et al. (1988) yang menggunakan 278 studi kasus untuk mendapatkan persamaan:

$$P_L = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_1 \ln(CSR) + \beta_2 (N_1)_{60})]} \quad (3)$$

Dimana:

P_L = Probabilitas likuifaksi

β = Parameter regresi (Tabel 4)

Tabel 4 Parameter Regresi Liao (1988)

Data	Jumlah kasus	β_0	β_1	β_2
Semua kasus	278	10.167	4.1933	-0.24375
Kasus pasir murni saja	182	16.447	6.4603	-0.3976
Kasus pasir lanau saja	96	6.4831	2.6854	-0.18190

Setelah mendapatkan hasil analisis kuantitatif berupa lapisan – lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi, dilakukan evaluasi untuk menentukan apakah lapisan – lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi dapat menyebabkan kerusakan akibat likuifaksi. Evaluasi yang digunakan adalah evaluasi *Liquefaction Potential Index* dan evaluasi Ishihara (1985).

Evaluasi yang akan dilakukan menggunakan konsep *Liquefaction Potential Index* yang dikembangkan oleh Iwasaki et al. (1978). Konsep LPI ini mempertimbangkan 3 variabel yaitu:

1. Ketebalan tanah yang ditinjau
2. Jarak dari tiap lapisan tanah ke permukaan
3. *Safety factor* dari tiap lapisan yang ditinjau menggunakan analisis *Simplified Seed*

Persamaan yang digunakan adalah:

$$LPI = \int_0^{15m} Fw(d) dd \quad (4)$$

Dimana:

LPI = *Liquefaction Potential Index*

F = *Safety factor* yang telah dikoreksi

$w(d)$ = Faktor kedalaman

Nilai F didapatkan menggunakan persamaan:

$$F = 1 - FS \text{ untuk } FS < 1 \quad (5)$$

$$F = 0 \text{ untuk } FS \geq 1 \quad (6)$$

Nilai $w(d)$ didapatkan menggunakan persamaan:

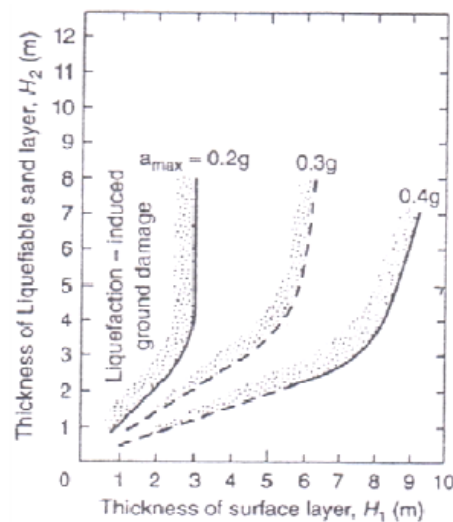
$$w(d) = 10 - 0.5d \quad (7)$$

Kerusakan akibat likuifaksi ditinjau menggunakan Tabel 5 dimana Toprak dan Holzer (2003) mengagaskan bahwa kerusakan akibat likuifaksi terjadi pada tanah dengan nilai LPI lebih besar daripada 5 (kerentanan sedang).

Tabel 5 Tabel nilai LPI terhadap potensi terjadinya likuifaksi

Kerentanan Likuifaksi	Tidak ada	Rendah	Sedang	Tinggi
LPI	0	$0 < LPI \leq 5$	$5 < LPI \leq 15$	$15 < LPI$

Metode evaluasi yang digagaskan oleh Ishihara (1985) menggunakan perbandingan tebal tanah di permukaan yang tidak berpotensi mengalami likuifaksi terhadap tebal tanah di bawah lapisan tanah tersebut yang dapat mengalami likuifaksi (Gambar 7). Untuk setiap percepatan puncak gempa di permukaan tanah yang berbeda, maka kurva yang digunakan akan berbeda.



Gambar 7 Grafik kriteria likuifaksi Ishihara
(sumber: *Stability of Natural Deposits*, 1985)

Mitigasi yang akan diperhitungkan untuk studi ini adalah metode perbaikan tanah yang meliputi *vibroreplacement*, *dynamic compaction*, *compaction grouting*, *soil mixing*, dan *soil replacement*. Kriteria tanah yang dapat diperbaiki dan kedalaman efektif dari metode perbaikan tanah yang telah disebutkan dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Rangkuman metode perbaikan tanah

Metode	Jenis tanah	Kedalaman efektif (m)
<i>Vibroreplacement</i>	Pasir berlempung, lempung berpasir	$D < 30$
<i>Dynamic compaction</i>	Pasir, pasir berlempung	$9 < D$
<i>Compaction grouting</i>	Pasir lepas	$6 < D$
<i>Soil mixing</i>	Hampir semua jenis tanah	$D < 20$
<i>Soil eplacement</i>	Semua jenis tanah	$D < 5$

Hasil dan Analisis

Dari analisis historis didapatkan 2 dari 7 data gempa memenuhi kriteria historis untuk tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi (Tabel 7). Dari analisis geologis didapatkan bahwa tanah di Paisubololi berjenis aluvial, terbentuk pada holosen baru dengan kedalaman muka air tanah 0.6 m sehingga berpotensi mengalami likuifaksi. Dari analisis kurva gradasi tanah didapatkan bahwa 24 sampel dari 55 sampel tanah berpotensi mengalami likuifaksi. Analisis kualitatif menunjukkan tanah di Paisubololi berpotensi mengalami likuifaksi sehingga perlu dilakukan analisis kuantitatif.

Tabel 7 Hasil Analisis Potensi Likuifaksi Kriteria Historis

Gempa	Magnitudo (SR)	Jarak episenter (km)	Terjadi likuifaksi?
1	5.0	11.7	Tidak
2	6.8	43.8	Ya
3	6.1	51.2	Tidak
4	7.5	139.3	Ya
5	7.4	179.7	Tidak
6	7.3	241.9	Tidak
7	8.2	476.9	Tidak

Analisis kuantitatif menggunakan metode *Simplified Seed* dan metode pendekatan probabilitas menunjukkan hasil bahwa terdapat lapisan – lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi sehingga perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut. Hasil perhitungan menggunakan metode *Simplified Seed* dapat dilihat pada Tabel 8 dan hasil perhitungan menggunakan metode pendekatan probabilitas dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 8 Rangkuman analisis *simplified Seed*

D	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9
m	L/X	L/X	L/X	L/X	L/X	L/X	L/X	L/X	L/X
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	L	X	X	X
3	L	X	X	L	X	X	X	X	X
4	L	X	X	L	X	X	X	X	X
5	L	L	X	X	L	X	X	X	L
6	X	X	X	L	L	X	X	X	L
7	X	X	X	L	L	X	X	X	L
8	X	X	X	L	L	L	X	X	X
9	X	X	X	L	X	L	X	X	L
10	X	L	L	L	X	L	L	X	X
11	X	L	L	L	L	L	L	X	L
12	X	L	L	L	L	X	L	X	L
13	X	L	X	L	L	X	L	X	L
14	X	L	X	X	L	X	L	X	X
15	X	L	X	X	L	X	L	X	X
T (m)	3	7	3	10	9	5	6	0	7

Tabel 9 Rangkuman analisis pendekatan probabilitas

D	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6	BH-7	BH-8	BH-9
m									
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	0.94	0.01	-	-
3	0.99	-	-	0.99	-	0.02	0.10	-	-
4	0.70	-	-	0.99	-	0.08	0.04	-	-
5	0.80	0.86	0.17	0.04	0.99	0.02	0.02	-	0.99
6	0.21	0.06	0.27	0.35	0.99	0.03	0.05	-	0.99
7	0.09	0.04	0.11	0.47	0.99	0.06	0.07	-	0.97
8	0.14	0.07	0.01	0.97	0.35	0.37	0.08	-	0.26
9	0.00	0.01	0.02	0.99	0.19	0.45	0.12	-	0.35
10	0.00	0.68	0.95	0.99	0.23	0.49	0.90	-	0.10
11	0.00	0.71	0.40	0.98	0.58	0.64	0.82	-	0.97
12	-	0.84	0.42	0.97	0.80	0.18	0.82	-	0.97
13	-	0.87	-	0.97	0.80	0.20	0.94	-	0.99
14	-	0.85	-	0.00	0.61	-	0.75	-	-
15	-	0.87	-	0.00	0.90	-	0.74	-	-

Hasil evaluasi LPI dan Ishihara menunjukkan terdapat beberapa zona yang berpotensi mengalami likuifaksi, namun terdapat juga zona yang memiliki lapisan berpotensi likuifaksi

namun memenuhi kriteria tidak mengalami likuifaksi. Dengan hasil evaluasi tersebut, analisis kedalaman tanah yang perlu diperbaiki dapat dilakukan.

Tabel 10 Rangkuman analisis perbaikan tanah metode LPI untuk tiap zona

Zona	Lapisan yang berpotensi likuifaksi	Lapisan yang perlu diperbaiki	Tebal lapisan yang perlu diperbaiki (m)	Tebal lapisan yang tidak perlu diperbaiki (m)
BH-1	3,4,5	3,4	2	1
BH-2	5,10,11,12,13,14,15	5,10,11,12	4	3
BH-3	10,11,12	-	0	3
BH-4	3,4,6,7,8,9,10,11,12,13	3,4,6,7,8,9,10,11	8	2
BH-5	5,6,7,8,11,12,13	5,6,7	3	4
BH-6	2,8,9,10,11	2	1	4
BH-7	10,11,12,13,14,15	10,11,12	3	3
BH-8	-	-	0	0
BH-9	5,6,7,9,11,12,13	5,6,7,9,11,12	6	1

Tabel 11 Rangkuman analisis perbaikan tanah metode Ishihara untuk tiap zona

Zona	Lapisan yang berpotensi likuifaksi	Lapisan yang perlu diperbaiki	Tebal lapisan yang perlu diperbaiki (m)	Tebal lapisan yang tidak perlu diperbaiki (m)
BH-1	3,4,5	3,4	2	1
BH-2	5,10,11,12,13,14,15	-	0	7
BH-3	10,11,12	-	0	3
BH-4	3,4,6,7,8,9,10,11,12,13	3,4,6,7	4	6
BH-5	5,6,7,8,11,12,13	5,6,7	3	4
BH-6	2,8,9,10,11	2	1	4
BH-7	10,11,12,13,14,15	-	0	6
BH-8	-	-	0	0
BH-9	5,6,7,9,11,12,13	5,6,7	3	4

Langkah mitigasi yang akan diambil dipertimbangkan menggunakan hasil dari evaluasi LPI dan Ishihara (Tabel 12). Terdapat dua metode yang memenuhi yaitu metode *vibroreplacement* dan metode *soil mixing*. Namun metode *soil mixing* yang membentuk kolom – kolom campuran tanah dan semen sangat rentan mengalami kerusakan akibat gempa, sehingga metode yang dianjurkan adalah metode *vibroreplacement*. Metode *vibroreplacement* tidak hanya meningkatkan kekuatan tanah, *stone column* yang dibentuk juga berfungsi sebagai drainase untuk meningkatkan disipasi tekanan air pori saat terjadi peningkatan tekana air pori.

Tabel 12 Rangkuman mitigasi yang dapat diambil

Zona	Lapisan yang perlu diperbaiki		Vibroreplacement		Deep dynamic compaction		Compaction grouting		Deep soil mixing		Replacement	
	LPI	Ishihara	LPI	Ishihara	LPI	Ishihara	LPI	Ishihara	LPI	Ishihara	LPI	Ishihara
BH-1	3,4	4	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya
BH-2	5,10,11,12	-	Ya	-	Tidak	-	-	-	Ya	-	Tidak	-
BH-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-4	3,4,6,7,8,9,10,11	3,4,6,7	Ya	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
BH-5	5,6,7	5,6,7	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak
BH-6	2	2	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya
BH-7	10,11,12	-	Ya	-	Tidak	-	Ya	-	Ya	-	Tidak	-
BH-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH-9	5,6,7,9,11,12	5	Ya	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak

Simpulan dan Saran

Kesimpulan yang didapat diambil setelah dilakukan analisis – analisis potensi likuifaksi dan beberapa teori pendukung adalah:

1. Analisis dengan kriteria historis menunjukkan 2 gempa di masa lalu berpotensi menghasilkan likuifaksi.
2. Analisis dengan kriteria geologis menunjukkan bahwa tanah di Paisubololi bersifat aluvial, terbentuk pada holosen awal dengan kedalaman muka air tanah paling tinggi adalah 0.6m, dan terletak di delta sungai sehingga memenuhi syarat geologis untuk tanah berpotensi mengalami likuifaksi.
3. Analisis dengan kriteria karakteristik tanah menunjukkan 24 dari 55 sampel tanah yang diuji saringan berpotensi mengalami likuifaksi.
4. Perlu dilakukan analisis secara kuantitatif.
5. Evaluasi menggunakan kriteria LPI menunjukkan bahwa zona BH-1, BH-2, BH-4, BH-5, BH-6, BH-7, dan BH-9 berpotensi mengalami likuifaksi.
6. Evaluasi menggunakan kriteria Ishihara menunjukkan bahwa zona BH-1, BH-4, BH-5, BH-6, dan BH-9 berpotensi mengalami likuifaksi.
7. Tebal tanah yang harus diperbaiki berdasarkan evaluasi menggunakan kriteria LPI berkisar antara 1-8 meter dengan kedalaman terendah 2 meter dan kedalaman tertinggi 12 meter.
8. Tebal tanah yang harus diperbaiki berdasarkan evaluasi menggunakan kriteria Ishihara berkisar antara 1-4 meter dengan kedalaman terendah 2 meter dan kedalaman tertinggi 7 meter.
9. Metode perbaikan tanah yang disarankan adalah metode *vibroreplacement* dikarenakan memenuhi kriteria kedalaman lapisan tanah yang akan diperbaiki untuk kedua evaluasi yang digunakan.

Untuk menjadikan studi ini semakin baik lagi, dapat dilakukan beberapa pengembangan sebagai berikut:

1. Perhitungan yang dilakukan masih menggunakan perhitungan manual, sebaiknya dilakukan juga analisis yang lebih detil menggunakan *software* seperti Shake90. Hasil yang didapatkan bisa dibandingkan untuk analisis lebih lanjut.

2. Karena keterbatasan data, evaluasi menggunakan kriteria Ishihara masih menggunakan kurva percepatan puncak gempa 0.3g sedangkan percepatan puncak gempa yang digunakan untuk analisis perhitungan adalah 0.24g dan 0.29g. Untuk mendapatkan perhitungan yang akurat sebaiknya menggunakan kurva dengan nilai percepatan puncak gempa yang sama dengan percepatan puncak gempa desain.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional (2012). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung. Departemen Perencanaan Umum. SNI-1726-2012.
- Housner, George W. (1985). Liquefaction of Soils During Earthquakes, *National Academy Press*. Washington DC.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., and Takahi, Y. (1978). "Shear Modulus of Sands Under Torsional Shear Loading" *Soils and Foundation*, Vol. 18.
- Ishihara, K. (1985). Stability of Natural Deposits During Earthquakes.
- Kramer, Steven L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice Hall*. New Jersey.
- Liao, S.S.C., Veneziano D., and Whitman, R.V. (1988). "Regression Models for Evaluating Liquefaction Probability" *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114.
- Seed, H. B. dan Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, New York. 1249-1273.
- Seto, P. (2012) : Evaluasi Potensi Likuifaksi dan Usaha Mitigasinya Menggunakan Bantuan Program Nera dan Shake 2000. Bandung.
- Tsuchida, H. (1970) : Prediction and Countermeasure Against the Liquefaction in Sand Deposits. *Seminar in the Port and Harbor Research Institute*.
- Youd, T. L. dan Idriss, I. M. (2001) : Liquefaction Resistance of Soils : Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF .