

Analisis Likuifaksi Tanah pada Anjungan Lepas Pantai di Daerah Selat Madura

Fajar Maynard (NIM 15512001)

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
fajar.maynard@gmail.com

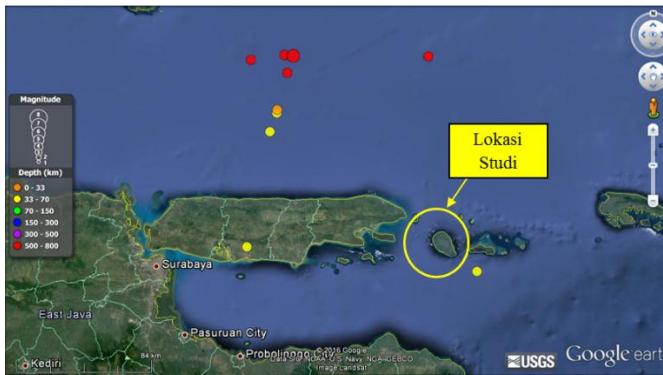
Kata Kunci: Likuifaksi, Gempa, Mitigasi

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan daerah rawan gempa bumi karena dilalui oleh jalur pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu: Lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Beberapa fenomena yang dapat disebabkan oleh gempa adalah kegagalan struktur, tanah longsor, gelombang tsunami dan likuifaksi. Gempa tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada struktur yang akan dibangun di atas tanah. Salah satu fenomena akibat gempa yang dapat menyebabkan kerusakan tersebut adalah likuifaksi. Definisi likuifaksi secara umum adalah perubahan perilaku tanah yang pada awalnya berperilaku seperti benda padat menjadi berperilaku seperti benda cair.

Likuifaksi umumnya terjadi pada tanah pasir lepas (tidak padat) dan berada dalam kondisi jenuh atau tersaturasi. Pasir lepas ini tidak memiliki kohesi yang kuat sehingga saat terjadi gempa, air pori yang terdapat dalam kandungan tanah akan mendorong partikel tanah dan membuat ikatan antar partikel tanah melemah dan terjadilah likuifaksi tanah. Tanah yang berperilaku seperti benda cair ini akan kehilangan kekuatannya untuk menahan struktur yang dipasang di atasnya sehingga struktur tersebut berpotensi untuk runtuh.

Pada pengerjaan tugas akhir ini, kasus yang diambil adalah *jacket platform* di daerah Selat Madura. Dari data gempa bumi yang diambil sebesar radius 100 kilometer didapatkan beberapa kejadian gempa bumi yang kemungkinan akan memunculkan potensi terjadinya likuifaksi tanah dapat dilihat pada Gambar 1. Hal ini menyebabkan daerah tersebut rawan terhadap potensi tanah terlikuifaksi. Maka analisis potensi likuifaksi perlu dilakukan untuk mengantisipasi peristiwa tanah terlikuifaksi ini terjadi. Analisis potensi likuifaksi dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif.



Gambar 1 Lokasi Studi dengan Beberapa Kejadian Gempa dalam Radius 100

TEORI DAN METODOLOGI

Metodologi dalam penelitian studi kasus ini diawali dengan studi literatur. Setelah itu pengumpulan data berupa data lapisan tanah, data karakteristik tanah, data historis gempa, data CPT, dan data percepatan puncak gempa permukaan. Kemudian dilakukan analisis kualitatif dengan menggunakan data lapisan tanah, data karakteristik tanah, dan data historis gempa. Apabila berpotensi terlikuifaksi, maka dilakukan analisis kuantitatif yang menggunakan data tanah, data CPT, dan data percepatan puncak gempa permukaan. Setelah analisis selesai dilakukan dan kembali berpotensi terlikuifaksi, maka dilakukan rekomendasi mitigasi likuifaksi yang sesuai.

Analisis potensi likuifaksi secara kualitatif meliputi analisis menggunakan kriteria historis gempa dan kriteria karakteristik tanah. Analisis

kriteria historis gempa dilakukan berdasarkan penelitian pascagempa, likuifaksi sering terjadi pada lokasi yang sama dimana kondisi tanah dan muka airnya tidak berubah (Youd, 1984a). Ambraseys (1988) mengumpulkan data gempa dangkal dari seluruh dunia untuk mengestimasi batas jarak sumber gempa dengan lokasi terjadinya likuifaksi dan membuat dalam bentuk grafik. Persamaan grafik tersebut adalah:

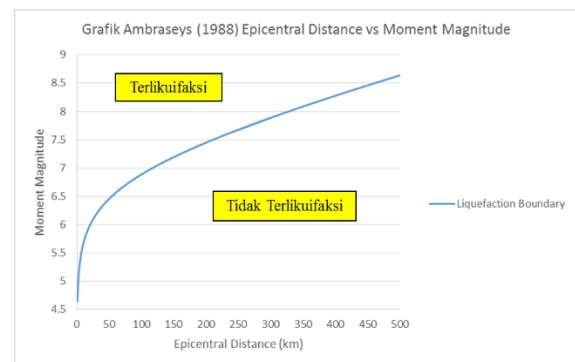
$$M_w = -0.31 + 2.65 \times 10^{-8} R_e + 0.99 \log(R_e) \quad (1)$$

Dimana:

M_w = Besar gempa yang terjadi

R_e = Jarak episentral gempa (cm)

Kemudian apabila diplotkan dimana jarak episentral dikonversi menjadi satuan kilometer akan didapatkan grafik seperti pada Gambar 3.



Gambar 2 Grafik Epicentral Distance vs Moment Magnitude

Selain dengan data historis, analisis likuifaksi secara kualitatif dapat dilakukan dengan melihat dari karakteristik tanahnya berdasarkan data yang telah didapatkan. Apabila *fines content* atau butiran halus (*silt* dan *clay*) bernilai kurang

dari 35% maka tanah tersebut berpotensi terlikuifaksi.

Jika analisis secara kualitatif menentukan bahwa tanah berpotensi mengalami likuifaksi maka perlu dilakukan analisis secara kuantitatif. Analisis potensi likuifaksi secara kuantitatif disebut juga dengan *simplified procedure* yang dikembangkan oleh Seed & Idriss (1971). Metode *simplified procedure* ini dikerjakan dengan menggunakan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR).

Nilai CSR merupakan sebuah variabel yang digunakan untuk mendefinisikan gejala kegempaan yang terjadi pada lapisan tanah. Seed dan Idriss (1971) mengusulkan sebuah prosedur untuk mengevaluasi ketahanan likuifaksi menggunakan pendekatan tegangan. CSR pada kedalaman tertentu oleh Seed dan Idriss (1971) bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = \frac{0,65 \cdot \tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (2)$$

Dimana:

τ_{av} = tegangan geser rata-rata

a_{max} = percepatan puncak gempa di permukaan

g = percepatan gravitasi

σ_v = tegangan *overburden* total

σ'_v = tegangan *overburden* efektif

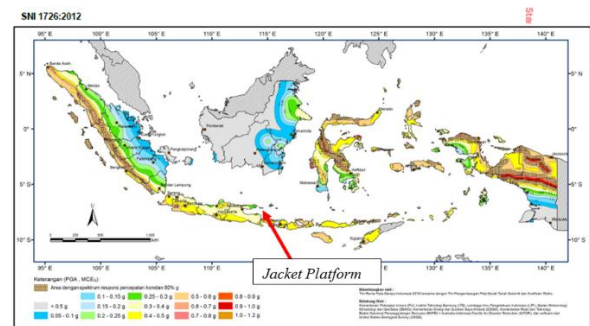
r_d = faktor reduksi tegangan

Nilai r_d merupakan faktor reduksi tegangan pada suatu kedalaman yang dirumuskan untuk mengestimasi besarnya koefisien reduksi besaran CSR. Nilai r_d dirumuskan oleh Seed dan Idriss (1971) sebagai berikut:

$$r_d = 1 - 0,00765 z, \text{ untuk } z \leq 9,15 \text{ m} \quad (3)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 z, \text{ untuk } 9,15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (4)$$

Nilai 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. Berdasarkan SNI-1726-2012, percepatan puncak di batuan dasar dapat didapatkan dari peta percepatan puncak yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3 Wilayah Gempa Indonesia dengan Percepatan Puncak Batuan Dasar

Klasifikasi tanah didapatkan dari SNI-1726-2012 dapat dilihat pada Tabel 1. 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 2.

Tabel 1 Jenis-Jenis Klasifikasi Tanah

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (Batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (Tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (Tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indek plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir, $\bar{s}_u < 25$ kPa		

SF (Tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik)	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 tersementasi tanah 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) 3. Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa
--	--

Tabel 2 Faktor Amplifikasi

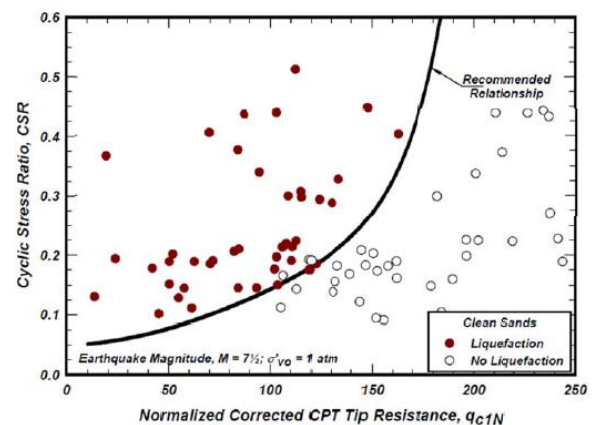
(Sumber: SNI-1726-2012)

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	Lihat 6.9				

CATATAN Gunakan interpolasi linier untuk mendapatkan nilai PGA antara.

Nilai CRR adalah ketahanan tanah untuk menahan likuifaksi. Kurva CRR yang terdapat dalam grafik CSR adalah nilai kapasitas tanah yang diizinkan. Apabila nilai CSR berada di atas garis kurva CRR maka dikatakan terlikuifaksi, namun apabila nilai CSR berada di bawah garis kurva CRR maka dikatakan tidak terlikuifaksi.

Penaksiran likuifaksi dengan menggunakan data CPT dilakukan berdasarkan pada grafik yang diusulkan Idriss dan Boulanger (2004). Grafik tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4 Hubungan Nilai q_{c1N} dengan CSR

Kurva CSR- q_{c1N} di atas didapatkan dengan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Idriss dan Boulanger (2004). Persamaan untuk mencari nilai q_{c1N} adalah sebagai berikut:

$$q_{c1N} = q_{c1}/P_a \quad (5)$$

Dimana:

$$q_{c1} = C_N \cdot q_c \quad (6)$$

$$C_N = \text{Faktor koreksi nilai CPT} = \left[\frac{P_a}{\sigma'_v} \right]^m \leq 1,7 \quad (7)$$

$$m = 1,338 - 0,249(q_{c1N})^{0,264} \quad (8)$$

q_c = Cone Resistance (KPa)

P_a = Tekanan satu atmosfer (101 KPa)

Sedangkan persamaan untuk mendapatkan nilai CRR berdasarkan data CPT adalah sebagai berikut:

$$CRR = \exp \left[\frac{q_{c1N}}{540} + \left(\frac{q_{c1N}}{67} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right] \quad (9)$$

Penaksiran likuifaksi dengan menggunakan data V_s harus menggunakan nilai V_s yang dikoreksi. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{0,25} \quad (10)$$

Dimana:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}}$$

$\overline{\sigma_v}$ = Tegangan overburden rata-rata

ρ = Massa jenis lapisan tanah

P_a = Tekanan satu atmosfer (101 kPa)

σ'_v = Tegangan vertikal efektif

Untuk tanah pasir persamaan mencari $G_{\max}$ adalah sebagai berikut:

$$G_{\max} = 1000 \cdot K_{2\max} (\overline{\sigma_v})^{0,5} \quad (11)$$

$K_{2\max}$ adalah nilai *shear modulus number*.

Nilai $K_{2\max}$ didapatkan dari Tabel 3 yang menunjukkan hubungan *relative density* dengan $K_{2\max}$.

Tabel 3 Hubungan Relative Density dengan $K_{2\max}$

(Sumber: Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential)

Relative Density D_r %0	$K_{2\max}$
30	34
40	40
45	43
60	52
75	61
90	70

Sebelumnya untuk mendapatkan nilai dari *relative density* perlu diketahui terlebih dahulu klasifikasi dari tanah pasir. Hubungan antara klasifikasi tanah pasir dengan *relative density* dapat ditunjukkan pada Tabel II.4.

Tabel 4 Hubungan Klasifikasi Tanah Pasir dengan Relative Density

(Sumber: Correlations of Soil Properties)

D_r	Classification	$N(\sigma'_v = 0.75)$	N_1	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60}/D_r^2$
0.15	Very loose	4	4.4	3	—
	Loose				
0.35	Medium	10	11	8	65
0.5		(18)	20	15	60
0.65	Dense	30	33	25	59
0.85		50	55	42	58
1.0	Very dense	(70)	77	58	58

* $C_u = 1.1$; $ER_d/60 = 0.75$.

Sedangkan untuk tanah lempung persamaan mencari $G_{\max}$ dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Hubungan G_{max} dengan S_u

(Sumber: Seed, H.B. & Idriss, I.M. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential")

References	Correlation	Remarks
Seed and Idriss (1970)	$G_{max} = 1000 \text{ to } 3000 S_u$	
Hara et al. (1974)	$G_{max} = 516 S_u^{1.012}$	G_{max} and S_u in kg/cm^2
Arango (1978)	$G_{max} = 1790 S_u$	From UCS test
	$G_{max} = 1163 S_u$	From UU test
	$G_{max} = 813 S_u$	From CU test
Anderson et al. (1978)	$G_{max} = 1200 \text{ to } 1800 S_u$	
Locat & Beausejour (1987)	$G_{max} = 0.379 S_u^{1.05}$	G_{max} in MPa and S_u in Kpa
Paoliani et al (1989)	$G_{max} = 500 \text{ to } 600 S_u$	From UU test and Lab. Vane Shear
Bouckovalas et al. (1989)	$G_{max} = 800 S_u$	From insitu Vane Shear
	$G_{max} = 1800 S_u$	From UU test

Nilai S_u (*Undrained Strength*) diperlukan untuk mendapatkan nilai hubungan dengan G_{max} . Persamaan G_{max} yang diambil tergantung pada pemakai berdasarkan referensi yang ada. Formulasi CRR berdasarkan kecepatan gelombang geser oleh Andrus dan Stokoe (2000) adalah sebagai berikut:

$$CRR = \left[0.022 \left(\frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + 2,8 \left(\frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right] \quad (12)$$

Dimana:

$V_{s1} = V_s$ yang sudah dikoreksi

Nilai V_{s1}^* adalah sebagai berikut:

$V_{s1}^* = 215 \text{ m/s}$, untuk tanah pasir dengan $FC \leq 5\%$

$V_{s1}^* = 215 - 0.5(FC - 5) \text{ m/s}$, untuk tanah pasir dengan $5\% < FC \leq 35\%$

$V_{s1}^* = 200 \text{ m/s}$, untuk tanah pasir dan lanau dengan $FC \geq 35\%$

FC adalah *finest content* atau partikel tanah halus.

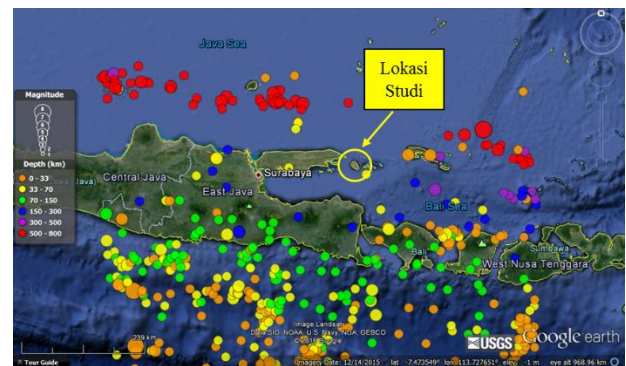
Setelah mendapatkan nilai CSR dan CRR maka bisa ditentukan apakah suatu lokasi tanah terlikuifaksi atau tidak. Cara menentukannya adalah dengan mencari nilai *safety factor* yang dirumuskan pada persamaan berikut:

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \quad (13)$$

Apabila nilai $SF < 1$, maka berpotensi likuifaksi sedangkan jika nilai $SF > 1$ maka tidak berpotensi likuifaksi.

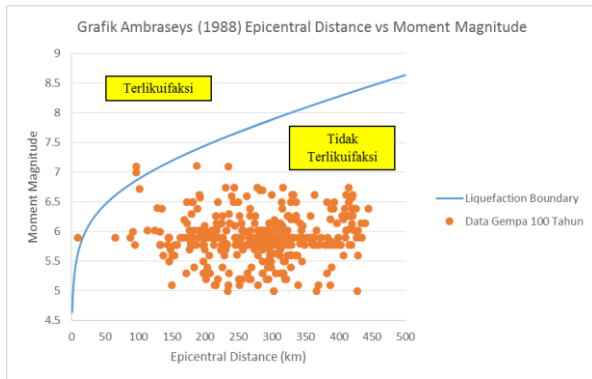
HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan analisis kualitatif secara historis gempa yang dibantu oleh situs earthquake.usgs.gov/earthquakes/map didapatkan gempa sebanyak 341 kejadian selama 100 tahun terakhir



Gambar 5 Data Gempa yang Tercatat Selama 100 Tahun

(Sumber: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>)



Gambar 6 Hasil Plot Data Gempa pada Grafik Ambraseys (1988)

Selain dengan data historis, analisis likuifaksi secara kualitatif dapat dilakukan dengan melihat dari karakteristik tanahnya berdasarkan data yang telah didapatkan. Apabila *finer content* atau butiran halus (*silt* dan *clay*) bernilai kurang dari 35% maka tanah tersebut berpotensi terlikuifaksi.

Tabel 6 Tabel Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data *Fines Content*

Kedalaman (m)	Tipe Tanah	FC (%)	L/NL
1	Soft Clay	75.68	-
2	Soft Clay	39.58	-
3	Soft Clay	61.53	-
4	Medium Dense Sand	41.71	NL
5	Medium Dense Sand	21.89	L
6	Medium Dense Sand	21.89	L
7	Medium Dense Sand	29.245	L
8	Medium Dense Sand	29.245	L
9	Medium Dense Sand	29.245	L
10	Medium Dense Sand	36.6	NL

11	Soft Clay	36.6	-
12	Soft Clay	25.07	-
13	Medium Dense Sand	55.845	NL
14	Medium Dense Sand	55.845	NL
15	Medium Dense Sand	86.62	NL
16	Clay	97.29	-
17	Clay	38.2	-
18	Medium Dense Sand	91.73	NL
19	Clay	91.73	-
20	Clay	52.485	-

Keterangan: L = Terlikuifaksi ; NL = Tidak terlikuifaksi

Terdapat potensi tanah terlikuifaksi dengan analisis kualitatif, maka diperlukan analisis kuantitatif. Dalam analisis kuantitatif, salah satu parameter penting yang diperlukan yaitu percepatan puncak permukaan. Nilai percepatan permukaan didapatkan berdasarkan kelas situs tanah. Tanah pada lokasi studi adalah tanah lunak. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa tanah lunak bisa didapatkan dengan mengambil tiga karakteristik yang disebutkan dan ketiganya memenuhi. Kemudian dengan bantuan dari situs:

http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/ akan didapatkan nilai percepatan puncak maksimumnya yaitu 0.364g.

Setelah mendapatkan nilai percepatan maksimum, maka bisa dicari nilai CSR pada tanah. Rangkuman nilai CSR dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Rangkuman Nilai CSR

Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CSR
1	Soft Clay	N/A
2	Soft Clay	N/A
3	Soft Clay	N/A
4	Medium Dense Sand	0.611
5	Medium Dense Sand	0.607
6	Medium Dense Sand	0.602
7	Medium Dense Sand	0.597
8	Medium Dense Sand	0.592
9	Medium Dense Sand	0.587
10	Medium Dense Sand	0.572
11	Soft Clay	N/A
12	Soft Clay	N/A
13	Medium Dense Sand	0.474
14	Medium Dense Sand	0.459
15	Medium Dense Sand	0.444
16	Clay	N/A
17	Clay	N/A
18	Medium Dense Sand	0.347
19	Clay	N/A
20	Clay	N/A

Nilai CRR untuk data CPT dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8 Rangkuman CRR "CPT 05"

CPT 05		
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CRR
1	Clay	N/A
2	Clay	N/A
3	Clay	N/A
4	Silty Clay	N/A
5	Silty Sands	0.062

Tabel 9 Rangkuman CRR "CPT 06"

CPT 06		
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CRR
1	Clay	N/A
2	Clay	N/A
3	Clay	N/A
4	Clay	N/A
5	Clay	N/A

Nilai CRR untuk data V_s dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10 Rangkuman CRR Data V_s

Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CRR
1	Soft Clay	N/A
2	Soft Clay	N/A
3	Soft Clay	N/A
4	Medium Dense Sand	0.935526
5	Medium Dense Sand	0.834463
6	Medium Dense Sand	0.759511
7	Medium Dense Sand	0.701019
8	Medium Dense Sand	0.653958
9	Medium Dense Sand	0.61493
10	Medium Dense Sand	0.581752

11	Soft Clay	N/A
12	Soft Clay	N/A
13	Medium Dense Sand	0.472053
14	Medium Dense Sand	0.453668
15	Medium Dense Sand	0.437129
16	Clay	N/A
17	Clay	N/A
18	Medium Dense Sand	0.325348
19	Clay	N/A
20	Clay	N/A

Rangkuman hasil potensi likuifaksi dapat dilihat pada Tabel 11, Tabel 12, dan Tabel 13.

Tabel 11 Rangkuman Potensi Likuifaksi Data CPT 05

CPT 05					
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CSR	CRR	SF	L/NL
1	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
2	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
3	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
4	Silty Clay	N/A	N/A	N/A	NL
5	Silty Sands	0.675	0.062	0.092	L

Tabel 12 Rangkuman Potensi Likuifaksi Data CPT 06

CPT 06					
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CSR	CRR	SF	L/NL
1	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
2	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
3	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
4	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
5	Clay	N/A	N/A	N/A	NL

Tabel 13 Rangkuman Hasil Potensi Likuifaksi Data Vs

Shear Wave Velocity					
Kedalaman (m)	Tipe Tanah	CSR	CRR	SF	L/NL
1	Soft Clay	N/A	N/A	N/A	NL
2	Soft Clay	N/A	N/A	N/A	NL
3	Soft Clay	N/A	N/A	N/A	NL
4	Medium Dense Sand	0.611	0.936	1.530	NL
5	Medium Dense Sand	0.607	0.834	1.376	NL
6	Medium Dense Sand	0.602	0.760	1.262	NL
7	Medium Dense Sand	0.597	0.701	1.174	NL
8	Medium Dense Sand	0.592	0.654	1.105	NL
9	Medium Dense Sand	0.587	0.615	1.047	NL
10	Medium Dense Sand	0.572	0.582	1.017	NL

11	Soft Clay	N/A	N/A	N/A	NL
12	Soft Clay	N/A	N/A	N/A	NL
13	Medium Dense Sand	0.474	0.472	0.995	L
14	Medium Dense Sand	0.459	0.454	0.989	L
15	Medium Dense Sand	0.444	0.437	0.985	L
16	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
17	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
18	Medium Dense Sand	0.347	0.325	0.937	L
19	Clay	N/A	N/A	N/A	NL
20	Clay	N/A	N/A	N/A	NL

Mitigasi likuifaksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori:

1. Perbaikan tanah
2. Modifikasi desain struktur

Mitigasi yang diambil adalah kategori ke dua karena jauh lebih *feasible* atau dapat dilakukan. Saat terjadi likuifaksi, kapasitas lateral dari *pile* akan berkurang yang menjadi potensi penyebab kegagalan struktur. Perbesaran ukuran diameter *pile* dan juga penebalan dinding *pile* adalah mitigasi yang cocok dilakukan untuk memperkaku dan menambah kapasitas lateral dari *pile* itu sendiri. Dengan memperbesar ukuran *pile* maka kapasitas beban lateralnya pun meningkat sehingga struktur kemungkinan tidak gagal saat dikenai beban lateral.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari hasil analisis-analisis yang telah dilakukan pada pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Secara kualitatif, berdasarkan analisis yang dilakukan dengan kriteria secara historis, didapatkan tiga kejadian gempa di masa lampau yang berpotensi mengakibatkan adanya kembali likuifaksi tanah.
2. Berdasarkan analisis yang dilakukan dengan kriteria karakteristik tanah, terdapat lima kedalaman tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi tanah, yaitu kedalaman 5 – 9 meter.
3. Diperlukan adanya analisis lebih lanjut yaitu analisis secara kuantitatif.

4. Nilai percepatan puncak di permukaan tanah yang dipakai adalah 0.364g.
5. Berdasarkan analisis dengan data CPT, pada data CPT-05 terdapat satu kedalaman yang berpotensi terjadi likuifaksi tanah yaitu pada kedalaman 5 meter.
6. Sedangkan pada data CPT-06 tidak ada tanah yang berpotensi terjadinya likuifaksi tanah.
7. Berdasarkan analisis dengan data V_s atau kecepatan geser gelombang, terdapat empat kedalaman yang berpotensi terjadi likuifaksi tanah yaitu pada kedalaman 13 – 15 meter dan kedalaman 18 meter.
8. Rekomendasi mitigasi likuifaksi dalam studi kasus ini adalah menambah ketebalan *pile*, karena lokasi studi tidak memungkinkan untuk melakukan mitigasi yang biasa dilakukan pada *onshore* atau *coastal*

Beberapa usulan untuk menjadikan tugas akhir ini menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Data yang diperlukan untuk memperkuat analisis kualitatif seperti grafik *grain size* sebaiknya ditambahkan juga agar analisis yang dilakukan lebih teliti.
2. Data yang dipakai seperti data *borhole log* dan data CPT harus diperbanyak, karena apabila hanya memakai satu atau

dua data saja, hasil yang didapatkan menjadi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2012). “Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung”. Departemen Perencanaan Umum. SNI-1726-2012.
- Carter, Michael., and Bentley, Stephen P. (1991). “Correlations of Soil Properties”. Pentech Press. London.
- G, Papathanassiou et al. (2004). “Liquefaction Phenomena in the Aegean Broader Area and Empirical Relations of Magnitude Versus Distance”. Dept. of Geology, Aristotle University. Greece.
- Kramer, Steven L. (1996). “Geotechnical Earthquake Engineering”, *Prentice Hall*. New Jersey.
- Port and Harbour Research Institute. (1997). “Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land”. Ministry of Transport. Japan.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. (1971). “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE.