
Analisis Likuefaksi Secara Analitis Dan Numeris Dengan Variasi Beban Gempa

Arizi Majdanawan¹, Sito Ismanti*², Ahmad Rifa'i²

¹Magister Teknik Sipil, Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

e-mail: *sito.ismanti@ugm.ac.id

Abstract

Indonesia is a country located in an active tectonic zone which causes vulnerability to earthquakes. Infrastructure development in Indonesia must be planned against earthquake loads and earthquake phenomena. Liquefaction is a phenomenon that occurs as a result of an earthquake with loose to medium sand soil conditions, fine content less than 35% and a shallow water table. The liquefaction potential hazard was analyzed using the simplified procedure with the liquefaction potential index (LPI) method. Analysis of liquefaction potential was also carried out numerically using the Midas Gts Nx program using the UBC Sand soil model. Liquefaction numerical analysis can be evaluated by the value of the pore pressure ratio (PPR). The analytical results show that liquefaction potential occurs in loose to medium sand soils, with high and very high levels of liquefaction potential index. Numerical analysis results that liquefaction occurs in loose to medium sand layers when an earthquake has a maximum acceleration of 0.356g and liquefaction only occurs in the loose sand layer when an earthquake has a maximum acceleration of 0.275g.

Keywords: *ground motion, liquefaction, Midas Gts Nx, pore pressure ratio, UBC sand*

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang berada di zona tektonik aktif yang menyebabkan kerentanan terhadap gempa. Pembangunan infrastruktur di Indonesia harus direncanakan terhadap beban gempa dan fenomena dari gempa. Likuefaksi merupakan fenomena yang terjadi akibat gempa dengan kondisi tanah pasir lepas hingga sedang, butir halus kurang 35% dan muka air yang dangkal. Bahaya potensi likuefaksi dianalisis dengan metode *simplified procedure* dan *liquefaction potential index (LPI)*. Analisis potensi likuefaksi juga dilakukan secara numeris dengan program *Midas Gts Nx* dengan model tanah *UBC Sand*. Secara numeris likuefaksi dapat dievaluasi dengan melihat nilai *pore pressure ratio (PPR)*. Hasil analisis secara analitis didapatkan potensi likuefaksi terjadi dari pada tanah pasir lepas dan pasir sedang, dengan tingkat potensi likuefaksi tinggi dan sangat tinggi. Analisis secara numeris didapatkan terdapat likuefaksi pada lapisan pasir lepas dan pasir sedang apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal 0,356g dan likuefaksi hanya terjadi pada lapisan pasir lepas apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal 0,275g.

Kata kunci: *ground motion, liquefaction, Midas Gts Nx, pore pressure ratio, UBC sand*

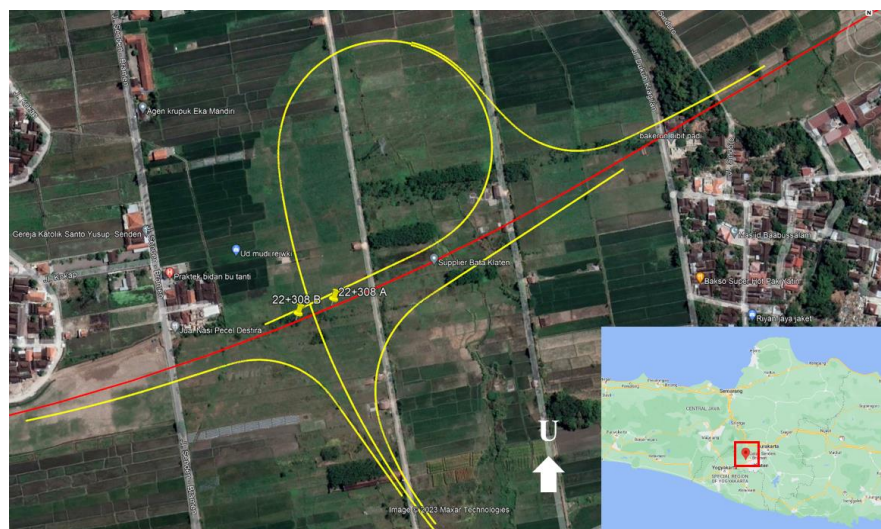
1. Pendahuluan

Wilayah Indonesia berada pada zona tektonik aktif yang memiliki tingkat kegempaan yang tinggi. Hasil monitoring BMKG menunjukkan bahwa wilayah Indonesia dalam satu tahun mengalami gempa bumi tektonik rata-rata sebanyak 6298 kali dan dalam sebulan rata-rata sebanyak 524 kali (Pusat Studi Gempa Nasional 2022). Salah satu gempa yang pernah terjadi di Pulau Jawa pada 27 Mei 2006 di Yogyakarta dengan magnitudo gempa (M_w) sebesar 6.3 telah membunuh lebih dari 5000 orang dan menyebabkan 36000 orang terluka. Durasi gempa terjadi selama 52 detik (Nichols 2007).

Jalan Tol Solo Yogyakarta Kulonprogo merupakan salah satu Proyek Strategis Nasional (PSN) yang menghubungkan Kota Solo, Yogyakarta sampai Kulonprogo sepanjang 96 kilometer. Salah satu permasalahan pada pembangunan ini adalah gempa dan lokasinya berada didekat Sesar Opak yang aktif. Salah satu fenomena yang terjadi akibat adanya gempa adalah likuefaksi. Likuefaksi merupakan fenomena yang terjadi pada tanah pasir sangat lepas hingga sedang dengan kondisi muka air dangkal akibat adanya gempa (beban dinamik).

Jalan Tol Solo Yogyakarta Kulon Progo STA 22+300 berada di Kecamatan Ngawen, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah, dapat dilihat pada Gambar 1. Jalan tol ini berada diatas litologi berupa endapan vulkanik Gunung Merapi, yaitu endapan Merapi Muda (Qml) berupa *tuf*, abu, breksi, aglomerat dan leleran lava tak terpisahkan (Rahardjo, Sukandarrumidi, and Rosidi 1995). Dari hasil penyelidikan tanah, didapatkan tanah dipermukaan berupa lanau lunak kemudian didominasi pasir lepas sampai sedang dan ada sisipan lensa pasir sangat padat dengan kondisi muka air tanah yang dangkal. Identifikasi awal Kabupaten Klaten berada di zona kerentanan likuifaksi sedang (Badan Geologi Kementerian ESDM, 2019).

Likuefaksi adalah proses hilangnya kekuatan tanah akibat guncangan yang tiba tiba sehingga meningkatkan tegangan air pori tanah. Guncangan terjadi begitu cepat menyebabkan tanah pasir berubah menjadi kondisi undrained loading. Peningkatan tegangan air pori tanah yang besar mengakibatkan aliran air tanah dapat mengubah pasir padat menjadi kondisi cair (Day 2012). Faktor pemicu terjadinya likuefaksi ada banyak hal anatara lain, intensitas dan lama gempa, muka air tanah, jenis tanah, kepadatan tanah, gradasi butiran tanah, kondisi lingkungan, tekanan pengengkekang, kondisi drainase, bentuk partikel tanah, proses pengendapan geologi, beban struktur bangunan, dan sejarah lingkungan (Day 2012).



Gambar 1. Jalan Tol Solo Yogyakarta STA 22+300

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran bahaya potensi likuifaksi pada Pembangunan Jalan Tol di Kabupaten Klaten yang berdekatan dengan Sesar Opak. Analisis potensi likuifaksi menggunakan metode yang diusulkan Seed-Idriss (1971) dengan nilai indeks potensial likuifaksi yang diusulkan Iwasaki (1981). Analisis potensi likuifaksi juga dilakukan menggunakan *finite element method* dengan model tanah *UBC sand*.

2. Metode Penelitian

2.1 Potensi Gempa Bumi

Sumber bahaya gempa di Indonesia ada tiga yaitu sumber gempa sesar, sumber gempa subdaksi dan sumber gempa background. Sesar Opak menjadi salah satu perhatian setelah adanya gempa di Yogyakarta pada tahun 2006. Sesar Opak yang berada di Sungai Opak, Kabupaten Bantul memiliki panjang sekitar 45 kilometer dengan sliprate geodetic sekitar 5 mm/tahun (Pusat Studi Gempa Nasional 2017). (Yulianisa 2023) menganalisis bahaya potensi likuifaksi pada lokasi didekat Sesar Opak dengan fungsi atenuasi Metode (NGA)-West Campbell & Bozorgnia (2014) didapatkan nilai sebesar 0.57g.

Beban gempa yang digunakan dalam analisis manual dapat ditentukan dengan Persamaan 1 (Badan Standardisasi Nasional Standar Nasional Indonesia 2016). Berdasarkan (Direktorat Jenderal Bina Marga 2023) *PGA* dengan periode ulang 7% dalam 75 tahun adalah 0,35g dan *PGA* dengan periode ulang 10% dalam 50 tahun adalah 0,265g. Nilai *PGA* berdasarkan (Direktorat Jenderal Bina Marga 2023) akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan *ground motion*. Beban gempa yang digunakan dari data *Midas Gts Nx* adalah El Centro 1940 dengan nilai percepatan maksimum 0.356g dan Loma Prieta 1989 dengan nilai percepatan maksimum 0.275g ditunjukkan pada Gambar 2.

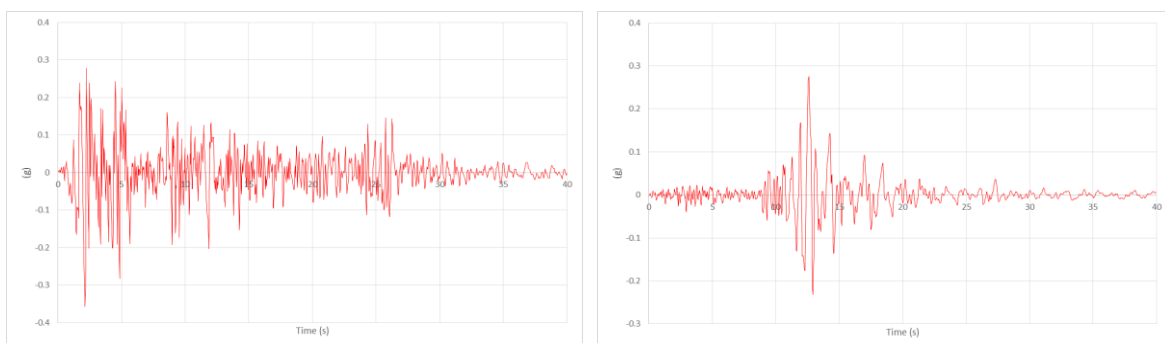
$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA \quad (1)$$

Dimana,

PGA_M = percepatan gempa maksimum yang disesuaikan

F_{PGA} = koefisien situs

PGA = percepatan puncak batuan dasar



(a)

(b)

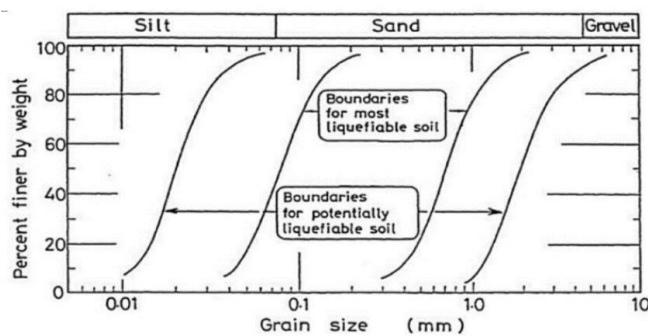
Gambar 2. Ground Motion (a) El Centro 1940 and (b) Loma Prieta 1989

Sumber: (Midas GTS NX 2019)

2.2. Analisis Distribusi Butiran

Tahap awal dalam menentukan lapisan tanah yang rentan terhadap likuifaksi didasarkan pada jenis tanahnya. Tanah dengan potensi likuifaksi adalah tanah berpasir seragam dan tanah berpasir yang mengandung butiran halus tertentu.

(H. Tsuchida 1970) memperkirakan kerentanan tanah pasir terhadap likuifaksi berdasarkan sebuah kurva distribusi butiran tanah dapat dilihat pada Gambar 3. Grafik distribusi tersebut menunjukkan bahwa kondisi tanah yang rentang terhadap likuifaksi umumnya mengandung fraksi butiran halus kurang dari 30-35%. Likuefaksi jarang terjadi pada kondisi pasir yang memiliki fraksi butiran halus lebih dari 35%.



Gambar 3. Rentang Distribusi Tanah Berpotensi Likuefaksi

Sumber: (H. Tsuchida 1970)

2.3. Analisis Likuefaksi Secara Analitis

Cyclic stress ratio (CSR) digunakan untuk mengestimasi tegang geser tanah akibat gempa, Seed dan Idris (1971) mengusulkan Persamaan 2. Dalam penentuan *CSR* terdapat reduksi tegangan geser yang merupakan fungsi kedalaman terhadap *magnitude* gempa (M_w) yang dapat dilihat pada Gambar 4 yang jelaskan pada Persamaan 3 untuk mendapatkan nilai reduksi tegangan geser. Nilai reduksi tegangan geser dijabarkan dalam persamaan 4 dan Persamaan 5.

$$CSR = 0.65 \times \frac{amx}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \times rd \quad (2)$$

$$rd = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M) \quad (3)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (4)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (5)$$

Dimana,

amx = nilai percepatan gempa dipermukaan (PGA_M)

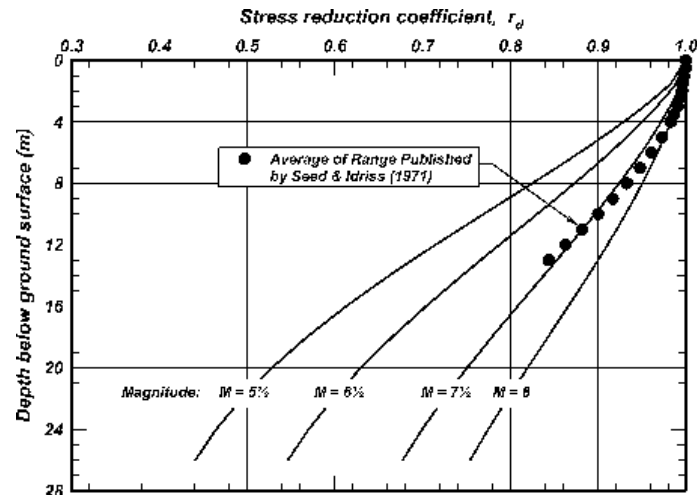
rd = koefisien reduksi tegangan

σ_v = tegangan *overburden*

σ_v' = tegangan efektif *overburden*

z = kedalaman lapisan

M = *magnitude* gempa



Gambar 4. Reduksi Tegangan Geser

Sumber: (Idriss and Boulanger 2008)

Cyclic resistance ratio merupakan rasio tahanan siklis tanah terhadap gempa (beban dinamik) yang mengakibatkan likuefaksi. Idriss & Boulanger (2004) mengusulkan Persamaan 6 untuk memperkirakan rasio tahanan siklis tanah (CRR) dari pendekatan N -SPT. Nilai N -SPT dikoreksi pada Persamaan 7, koreksi *overburden pressure* dengan Persamaan 8 dan koreksi butiran halus dengan Persamaan 9 yang didapatkan dari Persamaan 10.

$$CRR_{M=7.5, \sigma_{vc}=1} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (6)$$

$$N_{60} = N_{spt} \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (7)$$

$$(N_1)_{60} = N_{60} \times C_N \quad (8)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (9)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right) \quad (10)$$

Dimana,

N_{60} = N -SPT terkoreksi energi 60%

$(N_1)_{60}$ = N -SPT terkoreksi *overburden pressure*

C_N = koreksi *overburden pressure*

$(N_1)_{60cs}$ = N -SPT terkoreksi butiran halus

$\Delta(N_1)_{60}$ = koreksi butiran halus

FC = persentase butiran halus

Nilai *cyclic resistance ratio* (CRR) pada Persamaan 11 dikoreksi terhadap faktor skala *magnitude* pada Persamaan 12 yang diusulkan Idriss (1999) dan faktor koreksi *overburden pressure* pada Persamaan 13 yang dijabarkan dalam Persamaan 14 diusulkan oleh Boulanger (2003). Sehingga didapatkan rasio tahanan siklis tanah (CRR) dengan Persamaan 11.

$$CRR_{M,\sigma_{vc}} = CRR_{M=7.5,\sigma_{vc}=1} \times MSF \times K_{\sigma} \quad (11)$$

$$MSF = 6.9 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058; MSF \leq 1.8 \quad (12)$$

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma'_{vc}}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (13)$$

$$C_{\sigma} = \left(\frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}}\right) \leq 0,3 \quad (14)$$

Dimana,

MSF = faktor skala gempa

M = *magnitude* gempa

K_{σ} = faktor koreksi *overburden*

P_a = tekanan atmosfer (atm)

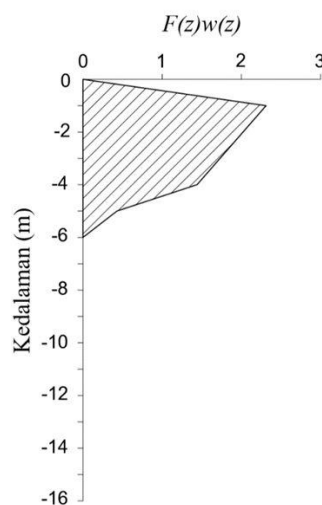
C_{σ} = *CRR* terkoreksi *overburden*

Faktor aman terhadap likuefaksi dapat ditentukan dengan Persamaan 13 dengan membandingkan tahanan siklis geser tanah (*CRR*) dengan rasio tegangan siklis (*CSR*). Suatu lapisan tanah berpotensi mengalami likuefaksi apabila faktor aman (FS) kurang dari 1,0.

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M,\sigma_{vc}}}{CSR} < 1 \quad (13)$$

2.4. Likuefaksi Potensial Indeks (LPI)

Liquefaction potential indeks (LPI) merupakan metode untuk memperkirakan suatu kerusakan suatu lokasi akibat likuefaksi (Iwasaki, Tokida, and Tatsuoka 1981). *LPI* dianalisis berdasarkan integrasi luas ketebalan lapisan terlikuefaksi dengan faktor keamanan dapat dilihat pada Gambar 5 yang dijelaskan pada Persamaan 14 dengan nilai angka aman pada Persamaan 15. Nilai faktor kedalaman didapatkan dari 16 dan Persamaan 17. Klasifikasi resiko potensi likuifaski berdasarkan *LPI* yang diberikan Iwasaki (1981) dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 5. Grafik Integrasi Fungsi Kedalaman Dengan $F(z) \times w(z)$

Sumber: (Rahman et al. 2020)

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \times w(z) \times dz \quad (14)$$

$$F(z) = 0 \text{ untuk } FS_{liq} > 1 \quad (15)$$

$$w(z) = 10 - 0.5z \text{ untuk } z < 20 \quad (16)$$

$$w(z) = 0 \text{ untuk } z \geq 20 \quad (17)$$

Dimana,

dz = integrase luasan area (dijelaskan pada Gambar 6)

$F(z)$ = faktor angka aman pada lapisan ($1 - FS_{liq}$)

$w(z)$ = faktor kedalaman lapisan

z = kedalaman lapisan

Tabel 1. Kategori Potensi Likuefaksi Berdasarkan LPI

LPI	Kategori
0	Sangat rendah
0-5	Rendah
5-15	Tinggi
≥ 15	Sangat tinggi

Sumber: (Iwasaki et al. 1981)

Berdasarkan metode penentuan tingkat likuefaksi yang diusulkan Iwasaki (1986), potensi likuefaksi hanya terjadi sampai kedalaman 20 meter. Analisis potensi likuefaksi pada kedalaman dibawah 20 meter jarang sekali dilakukan.

2.5. Analisis Likuefaksi Secara Numeris

Model *UBC Sand* dikembangkan oleh Puebla dan Byrne (1997) untuk menghasilkan respon likuefaksi, sementara (Beaty and Byrne 1998) mengadaptsi model ini untuk mengevaluasi seismik dan diterapkan pada analisis respon. Model ini diterima secara umum dan digunakan dalam masalah dan fenomena berbasis likuefaksi di kalangan *engineer* geoteknik. Parameter *UBC sand* dapat ditentukan berdasarkan pengujian *cyclic triaxial* (Tuna and Altun 2015). (Prabhakar and Rangaswamy 2023) melakukan analisis 3D stabilitas seismik struktur bendungan urugan tanah menggunakan program *Midas Gts Nx* yang berfokus pada evaluasi analisis likuefaksi, perpindahan vertikal, perpindahan horizontal dan tekanan air pori berlebih menggunakan *UBC Sand*.

Model ini merupakan model tegangan efektif untuk memprediksi perilaku likuefaksi tanah pasir akibat beban gempa. Didaerah elastis, perilaku elastis *nonlinier* dapat disimulasikan, modulus elastis berubah sesuai dengan tekanan efektif yang ditetapkan. Didaerah plastis, perilaku ditentukan oleh tiga jenis fungsi lentur yaitu *shear (shear hardening)*, *compression (cap hardening)* dan *pressure cut-off*. Parameter *UBCSand* dapat dilihat pada Tabel 2.

Penentuan lapisan tanah berpotensi likuefaksi dengan program *Midas Gts Nx* dengan model tanah *UBC sand* dapat dilakukan dengan melihat nilai *pore pressure ratio (PPR)*. *PPR* dapat dihitung dengan Persamaan 18 dengan membandingkan perubahan *excess pore pressure* dengan *initial effective pressure*. Nilai *PPR* mendekati atau melebihi satu menunjukkan lapisan tanah mengalami likuefaksi.

$$PPR = - \frac{\Delta P_w}{P_{initial}} \quad (18)$$

Dimana,

ΔP_w = excess pore pressure

$P_{initial}$ = initial effective pressure

Tabel 2. Parameter UBC Sand

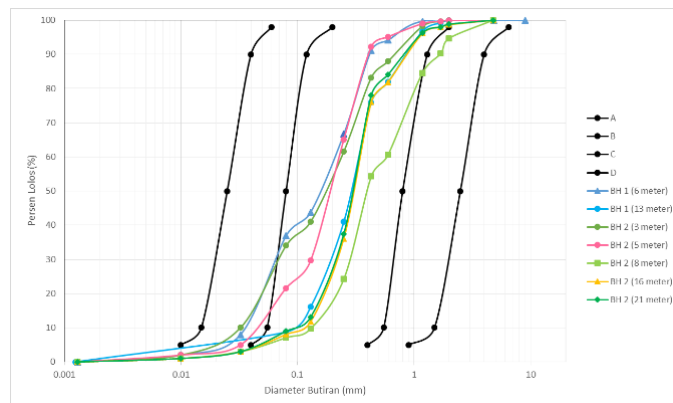
Parameter	Diskripsi	Metode	Default
P_{ref}	Reference Pressure	-	100 kPa
Elastic (Power Law)			
K_G^e	Elastic shear modulus number	Curve Fit	-
n_e	Elastic shear modulus exponent	Curve Fit	0.5
Pastic/Shear			
ϕ_p	Peak friction angle	CD TxC or DSS	-
ϕ_{cv}	Constant volume friction angle	CD TxC or DSS	-
c	cohesion	CD TxC or DSS	0
K_G^p	Plastic shear modulus number	Curve Fit	-
n_p	Plastic shear modulus exponent	Curve Fit	0.5
R_f	Failure ratio (q_f/q_a)	Curve Fit	0.7-0.98 (<1)
F_{post}	Post liquefaction calibration factor	Curve Fit	0
F_{dens}	Soil densification calibration factor	Curve Fit	1

Sumber: (Tuna and Altun 2015)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Data

Digunakan dua data penyelidikan tanah BH 1 dan BH 2. Hasil penyelidikan tanah didapatkan elevasi air tanah BH 1 pada kedalaman -2 meter dan BH 2 pada kedalaman -3 meter. Beban gempa dipermukaan (a_{max}) yang digunakan dalam analisis sebesar 0.395g dengan magnitude gempa (M_w) sebesar 6.3 sesuai gempa Yogyakarta tahun 2006. Hasil gradasi butiran tanah yang dimasukkan pada kurva kerentanan likuefaksi dari Tsuchida (1970) dapat dilihat pada Gambar 6. Didapatkan hasil kurva gradasi butir tanah berada didalam rentang yang diindikasikan berpotensi likuefaksi.



Gambar 6. Rentang Distribusi Tanah Berpotensi Likuefaksi

3.2. Analisis Potensi Likuefaksi

Analisis potensi likuefaksi dilakukan pada jenis tanah pasir yang berada dibawah permukaan air tanah. Pada lapisan lempung tidak perlu dilakukan analisis potensi likuefaksi. Hasil analisis potensi likuefaksi dengan metode simplified procedure dititik BH 1 dan BH 2 didapatkan potensi likuefaksi terjadi. Potensi likuefaksi di BH 1 terjadi pada kedalaman 2-6 meter ($N-SPT = 11-15$) dan kedalaman

12-20 meter ($N-SPT = 19-24$) dapat dilihat pada Tabel 3. Likuefaksi tidak terjadi pada lapisan tanah pasir dengan nilai $N-SPT$ 36 dan 29. Potensi likuefaksi di BH 2 terjadi pada kedalaman 3-5 meter ($N-SPT = 9$), kedalaman 7-11.5 meter ($N-SPT = 5-7$) dan kedalaman 11.5-20 meter ($N-SPT = 15-25$) dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Analisis Likuefaksi BH 1

<i>Depth (m)</i>	<i>N-SPT</i>	<i>Type</i>	<i>Fine Content (%)</i>	<i>N₆₀</i>	<i>NI₆₀</i>	<i>NI_{60cs}</i>	<i>CSR</i>	<i>CRR</i>	<i>SF</i>
2	4	Clay	79.66	3	4.9	10.5	0.249	2.74	n.a
4	11	Sand	36.9	9	13.0	18.5	0.346	0.26	0.8
6	15	Sand	7.08	14	17.5	17.6	0.383	0.25	0.6
8	36	Sand	7.08	33	41.8	42.0	0.517	2.74	5.3
11	13	Clay	72.8	12	15.1	20.7	0.476	2.74	n.a
12	29	Sand	8.7	28	31.3	31.9	0.463	0.87	1.9
14	19	Sand	8.7	18	19.5	20.1	0.436	0.28	0.7
16	19	Sand	8.7	18	18.2	18.8	0.410	0.26	0.6
18	15	Sand	8.7	14	13.4	14.1	0.386	0.20	0.5
20	20	Sand	8.7	19	17.0	17.7	0.364	0.25	0.7

Tabel 4. Hasil Analisis Likuefaksi BH 2

<i>Depth (m)</i>	<i>N-SPT</i>	<i>Type</i>	<i>Fine Content (%)</i>	<i>N₆₀</i>	<i>NI₆₀</i>	<i>NI_{60cs}</i>	<i>CSR</i>	<i>CRR</i>	<i>SF</i>
2	3	Clay	79.66	2	3.7	9.2	0.249	2.74	n.a
3	9	Sand	34	6	9.6	15.1	0.244	0.21	0.9
5	9	Sand	34	7	9.8	15.3	0.318	0.22	0.7
7	63	Sand	21.6	57	64.4	69.2	0.417	2.74	6.6
9	5	Sand	7.08	5	6.4	6.6	0.436	0.13	0.3
11,5	7	Sand	7.08	7	8.3	8.4	0.438	0.15	0.3
12	20	Sand	8.07	19	22.0	22.4	0.433	0.33	0.8
14	23	Sand	8.07	22	23.4	23.8	0.413	0.36	0.9
16	15	Sand	8.07	14	14.3	14.7	0.391	0.21	0.5
18	24	Sand	8.07	23	21.6	22.0	0.371	0.32	0.9
20	25	Sand	8.07	24	21.5	21.8	0.351	0.32	0.9

3.3. Analisis Indeks Potensi Likuefaksi LPI

Nilai indeks potensi likuefaksi (LPI) didapatkan dari lapisan tanah yang mengalami likuefaksi yang dihitung secara integrasi terhadap kedalaman. Nilai LPI dipengaruhi banyaknya lapisan yang berpotensi likuefaksi dan besarnya angka aman (SF) pada lapisan tersebut. Analisis indeks potensi likuefaksi hanya dilakukan sampai kedalaman 20 meter. Hasil analisis didapatkan nilai LPI pada kedua lokasi penelitian didapatkan sebesar 13.5 dan 21.8 dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6. Nilai ini tergolong dalam kategori tinggi dan sangat tinggi berdasarkan kategori yang diusulkan Iwasaki (1981).

Tabel 5. Hasil Analisis LPI BH 1

<i>Depth (m)</i>	<i>NSPT</i>	<i>Type</i>	<i>SF</i>	<i>Fz</i>	<i>Wz</i>	<i>Fz Wz</i>	<i>Area</i>	<i>LPI</i>	<i>Kategori</i>
0 - 2	4	Clay	n.a	0.00	9	0.00	0.00		
2 - 4	11	Sand	0.8	0.25	8	2.00	2.00		
4 - 6	15	Sand	0.6	0.36	7	2.49	4.49		
6 - 8	36	Sand	5.3	0.00	6	0.00	2.49		
8 - 11	13	Clay	n.a	0.00	4.5	0.00	0.00	13.5	High
11 - 12	29	Sand	1.9	0.00	4	0.00	0.00		
12 - 14	19	Sand	0.7	0.35	3	1.05	1.05		
14 - 16	19	Sand	0.6	0.36	2	0.72	1.76		
16 - 18	15	Sand	0.5	0.47	1	0.47	1.19		
18 - 20	20	Sand	0.7	0.32	0	0.00	0.47		

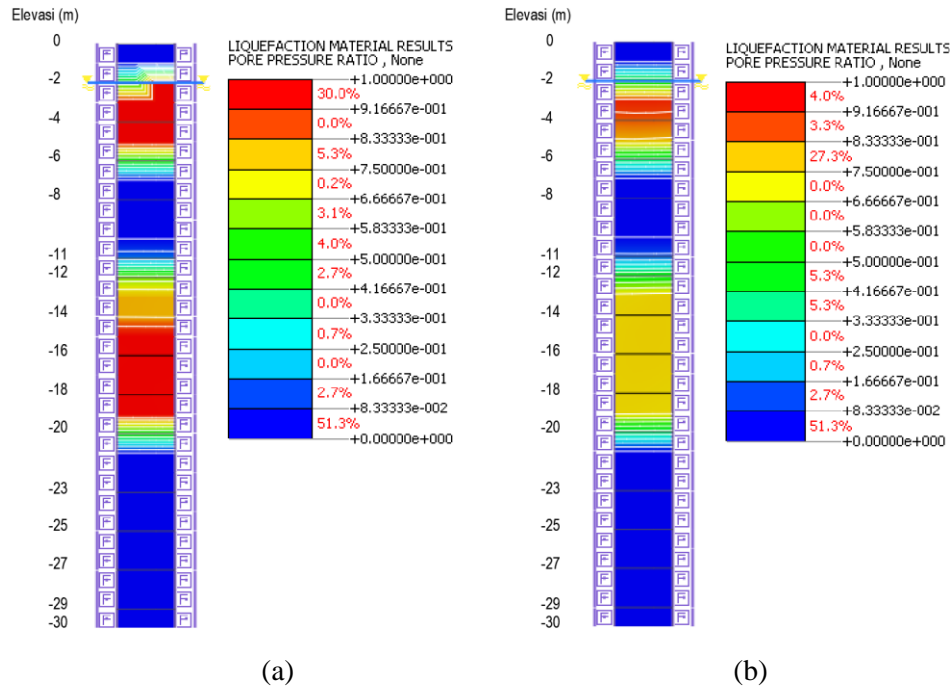
Tabel 6. Hasil Analisis LPI BH 2

<i>Depth (m)</i>	<i>NSPT</i>	<i>Type</i>	<i>SF</i>	<i>Fz</i>	<i>Wz</i>	<i>Fz Wz</i>	<i>Area</i>	<i>LPI</i>	<i>Kategori</i>
0 - 2	3	Clay	n.a	0.00	9	0.00	0.00		
2 - 3	9	Sand	0.9	0.00	8.5	0.00	0.00		
3 - 5	9	Sand	0.7	0.32	7.5	2.38	2.38		
5 - 7	63	Sand	6.6	0.00	6.5	0.00	2.38		
7 - 9	5	Sand	0.3	0.70	5.5	3.85	3.85		
9 - 11	7	Sand	0.3	0.66	4.25	2.82	8.34	21.8	V. High
11 - 12	20	Sand	0.8	0.25	4	0.98	0.95		
12 - 14	23	Sand	0.9	0.13	3	0.38	1.36		
14 - 16	15	Sand	0.5	0.46	2	0.92	1.30		
16 - 18	24	Sand	0.9	0.14	1	0.14	1.06		
18 - 20	25	Sand	0.9	0.10	0	0.00	0.14		

3.4. Pore Pressure Ratio

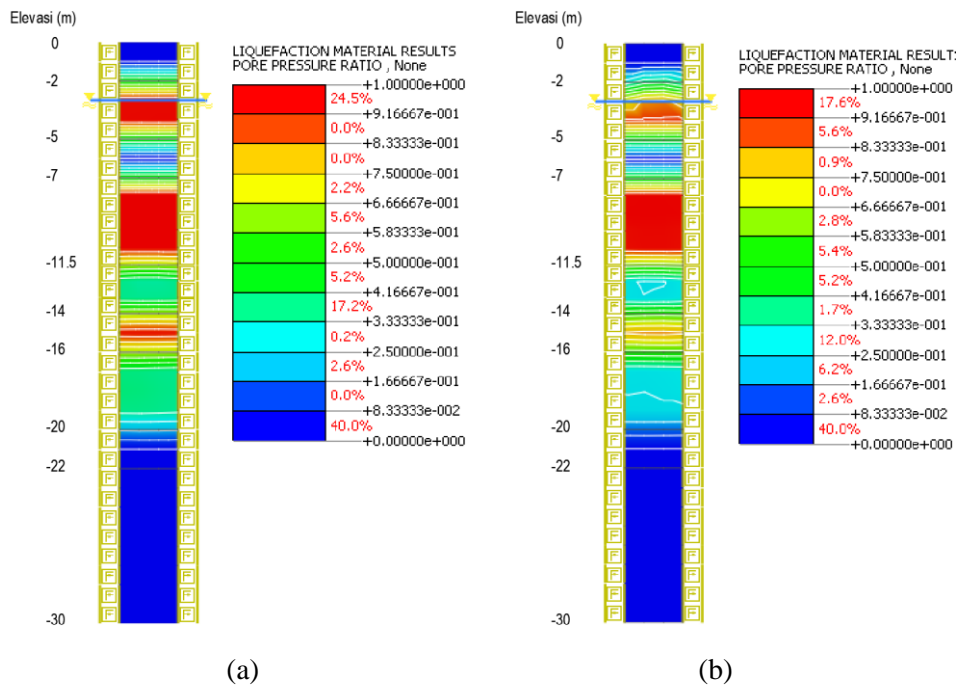
Beban gempa yang digunakan dalam analisis sangat sensitif terhadap hasil yang terjadi. Digunakan beban gempa dari data Midas Gts Nx yaitu El Centro 1940 dengan nilai percepatan maksimal sebesar 0,356g dan Loma Prieta 1989 dengan nilai percepatan maksimum sebesar 0,275g.

Hasil analisis likuefaksi secara numeris lokasi BH 1 dengan program Midas Gts Nx dengan model tanah *UBC Sand* dapat dilihat pada Gambar 7. Likuefaksi terjadi pada lapisan pasir lepas pada kedalaman 2-4 meter dan pasir sedang pada kedalaman 14-20 meter apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal sebesar 0,356g (Gempa El Centro, 1940). Apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal sebesar 0,275g (Gempa Loma Prieta 1989) likuefaksi terjadi hanya pada lapisan tanah pasir lepas pada kedalaman 2-4 meter.



Gambar 7. Nilai *Pore Pressure Ratio* BH 1 (a) El Centro 1940 dan (b) Loma Prieta 1989

Hasil analisis likuefaksi secara numeris lokasi BH 2 dapat dilihat pada Gambar 8. Likuefaksi terjadi pada lapisan pasir lepas pada kedalaman 3-5 meter dan kedalaman 7-11,5 meter. Sedangkan pada lapisan pasir sedang terjadi likuefaksi pada kedalaman 14-16 meter apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal sebesar 0,356g (Gempa El Centro, 1940). Apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal sebesar 0,275g (Gempa Loma Prieta 1989) likuefaksi terjadi hanya pada lapisan tanah pasir lepas pada kedalaman 7-11,5 meter.



Gambar 8. Nilai *Pore Pressure Ratio* BH 2 (a) El Centro 1940 dan (b) Loma Prieta 1989

4. Kesimpulan

Pada lokasi penelitian di Kabupaten Klaten Provinsi Jawa Tengah terdapat potensi likuifaksi yang dievaluasi secara analitis dan numeris pada titik BH 1 dan BH 2. Secara analitis dengan metode *simplified procedure* Seed & Idriss (1981) potensi likuifaksi terjadi pada lapisan tanah pasir lepas hingga pasir sedang apabila terjadi gempa dengan percepatan dipermukaan sebesar 0,39g. Didapatkan nilai *LPI* sebesar 13,5 dan 21,8 dengan kategori tinggi dan sangat tinggi.

Hasil analisis secara numeris dengan program *Midas Gts Nx* dengan model tanah *UBC sand* terdapat potensi likuifaksi. Apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal 0,356g (Gempa El Centro 1940) akan terjadi likuifaksi pada lapisan tanah pasir lepas hingga pasir sedang ($N-SPT < 20$). Akan tetapi apabila terjadi gempa dengan percepatan maksimal 0,275g (Gempa Loma Prieta 1989) likuifaksi hanya terjadi pada lapisan pasir lepas.

Likuifaksi merupakan salah satu fenomena yang terjadi akibat adanya gempa, sehingga dalam analisis potensi likuifaksi beban gempa sangatlah sensitif. Hasil analisis secara numeris yang sudah dilakukan dengan *ground motion* yang berbeda akan sangat mempengaruhi hasil analisis. Hal ini juga berlaku dalam evaluasi likuifaksi secara analitis.

Daftar Pustaka

- Badan Geologi Kementerian ESDM. 2019. *Atlas Zona Likuifaksi Indonesia*.
- Badan Standardisasi Nasional Standar Nasional Indonesia. 2016. *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*.
- Beatty, M., and P. M. Byrne. 1998. "An Effective Stress Model for Predicting Liquefaction Behavior of Sand." *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* 75 ; 766-777 ; 1998.
- Day, Robert W. 2012. *GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING HANDBOOK*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2023. "Aplikasi Lini." Retrieved June 26, 2023 (<https://lini.binamarga.pu.go.id/>).
- H. Tsuchida. 1970. "Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits." *Abstract of the Seminar of the Port and Harbour Research Institute. Ministry of Transport, Yokosuka, Japan, Pp. 3.1-3.33*.
- Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. 2008. *SOIL LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES*.
- Iwasaki, T., K. Tokida, and F. Tatsuoka. 1981. "Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure Procedure." *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* .
- Midas GTS NX. 2019. *ANALYSIS REFERENCE Elastic Material Properties*.
- Nichols, J. M. 2007. "The 2006 Yogyakarta Earthquake - A Preliminary Study of Deaths." Pp. 207–13 in *WIT Transactions on the Built Environment*. Vol. 93.
- Prabhakar, Neetha, and K. Rangaswamy. 2023. "Liquefaction Analysis of Earth Embankment Dam Structure." Pp. 579–86 in *Soil Dynamics, Earthquake and Computational Geotechnical Engineering pp 579–586*.

- Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *PETA SUMBER DAN BAHAYA GEMPA INDONESIA TAHUN 2017*.
- Pusat Studi Gempa Nasional. 2022. *PETA DEAGREGASI BAHAYA GEMPA INDONESIA PERENCANAAN DAN EVALUASI TAHAN GEMPA*.
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, and Rosidi. 1995. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta Jawa Skala 1:100000*. Bandung.
- Rahman, Muhamad Agung, Teuku Faisal Fathani, Ahmad Rifa'i, and Mochammad Syidik Hidayat. 2020. "Analisis Tingkat Potensi Likuifaksi Di Kawasan Underpass Yogyakarta International Airpor." *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)* 16(2):91. doi: 10.25077/jrs.16.2.91-104.2020.
- Tuna, S. C., and S. Altun. 2015. *Modern Approaches in Soil Liquefaction Analysis*.
- Yulianisa. 2023. "PENGARUH LIKUEFAKSI TERHADAP STABILITAS FONDASI TIANG BOR PADA PEMBANGUNAN JALAN TOL SOLO – YOGYAKARTA - NYIA KULON PROGO STA. 16+700 – 22+500." Gadjah Mada University, Yogyakarta.