

# Analisis Metode Kuantitatif LSI dan LPI untuk Menentukan Zonasi Kerentanan Likuefaksi Pembangunan Jalan Tol Yogyakarta - Bawen Seksi 3 STA 49+700 – 50+900

R. Maulana<sup>1</sup>, A. Rifa'i<sup>1\*</sup>, S. Ismanti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: ahmad.rifai@ugm.ac.id

## INTISARI

Jalan Tol Yogyakarta-Bawen seksi 3 terletak di wilayah Kabupaten Magelang yang didominasi oleh lapisan lanau pasiran hingga pasir sedang yang rentan mengalami likuefaksi. Tujuan penelitian ini adalah pemetaan hasil analisis potensi likuefaksi di area pembangunan jalan tol Yogyakarta-Bawen seksi 3. Analisis likuefaksi dilakukan berdasarkan 7 data bor dan 3 data sondir. Penentuan desain seismik untuk analisis likuefaksi dilakukan berdasarkan SNI 1726:2019. Analisis potensi likuefaksi menggunakan metode *simplified procedure*, sedangkan tingkat kerentanan dan derajat kerusakan akibat likuefaksi dianalisis menggunakan *liquefaction severity index (LSI)* dan *liquefaction potential index (LPI)*. Hasil analisis desain seismik menunjukkan percepatan tanah puncak area penelitian sebesar 0.446g untuk kelas situs SD dan 0.533g untuk kelas situs SE. Analisis distribusi butiran menunjukkan bahwa di STA 49+700 – STA 50+900 rentan terhadap likuefaksi akibat *finer content* kurang dari 15%. Berdasarkan analisis likuefaksi diperoleh lapisan tanah di titik BH-22 rentan mengalami likuefaksi dengan nilai *LSI* 89.70 dan nilai *LPI* 68.51 berderajat kerusakan sangat tinggi. Interpolasi hasil perhitungan *LSI* dan *LPI* digunakan untuk zonasi potensi likuefaksi pada area tinjauan menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Hasil zonasi menunjukkan bahwa area di sekitar titik BH-22 memiliki kerentanan likuefaksi tinggi, zona BH-10, BH-11, dan BH-88 memiliki kerentanan rendah, zona kerentanan sedang di BH-07, BH-08, dan S-06, sedangkan zona kerentanan rendah berada di titik S-04 dan S-05.

Kata kunci: desain seismik, *simplified procedure*, *liquefaction severity index*, *liquefaction potential index*, ArcGIS

## 1 PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng utama dunia, yaitu lempeng Eurasia, India-Australia, dan Pasifik. Lokasi geografis Indonesia yang terapat oleh lempeng besar dunia menyebabkan Indonesia masuk ke dalam zona gempa utama *circum-pacific belt* dan *alpine belt*. Indonesia tercatat pernah mengalami kejadian gempa besar, seperti gempa di Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta tahun 2006 dengan  $M_w$  6.3 dan gempa di Palu, Sulawesi Tengah tahun 2018 dengan  $M_w$  7.5. Gempa yang terjadi tersebut selain menyebabkan kerusakan struktur bangunan, juga menyebabkan kejadian likuefaksi pada titik-titik tertentu.

Likuefaksi merupakan suatu fenomena saat tanah berubah menjadi cairan akibat kehilangan kekuatan geser (Lee, et al., 2004). Fenomena likuefaksi terjadi dalam waktu yang sangat singkat namun dapat menyebabkan kerusakan yang masif (Patriaman, et al., 2021). Kenaikan tekanan air pori berlebih menyebabkan reduksi tegangan efektif hingga mendekati nol, menyebabkan tanah bersifat menjadi seperti cairan (Kramer, 1996). Likuefaksi dapat menyebabkan kerusakan struktur, *sand boils*, kerusakan tanah, stabilitas lereng, penurunan tanah, dan deformasi permanen (Day, 2012; Kramer, 1996). Area basah dengan muka air tanah dangkal, seperti area irigasi dan badan sungai rawan terjadi likuefaksi akibat mudahnya kenaikan tekanan air pori akibat adanya getaran gempa (Pratama, et al., 2021). Dampak kejadian likuefaksi baik secara material maupun non-material terjadi pada likuefaksi akibat gempa Palu 2018 yang menyebabkan kerusakan pada bangunan utama irigasi. Sehingga, analisis potensi likuefaksi pada area rencana pembangunan menjadi krusial karena dampak yang dihasilkan akibat likuefaksi sangat signifikan.

Berdasarkan hasil investigasi Badan Geologi Kementerian ESDM (ESDM, 2019), terdapat potensi likuefaksi di lokasi pembangunan jalan tol seksi 3 Yogyakarta – Bawen pada STA 49+700 - 50+900. Badan Geologi Kementerian ESDM menjelaskan bahwa kawasan ini memiliki kerentanan sedang terhadap likuefaksi sehingga berpotensi menyebabkan terjadinya kerusakan struktur pada tanah dasar. Penelitian likuefaksi di area rencana jalan tol Yogyakarta – Bawen seksi 1 dan 2 pernah dilakukan oleh Kevin & Muhrozi (2023) menggunakan metode kuantitatif *LSI* dan *LPI* untuk memperkirakan kerentanan likuefaksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa area lokasi jalan tol Yogyakarta – Bawen di seksi 1 dan 2 memiliki kerentanan likuefaksi sangat rendah hingga sedang. Namun, penelitian terkait potensi likuefaksi di STA 49+700 – 50+900 belum pernah dilakukan.

Analisis potensi likuefaksi dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, seperti metode *simplified procedure* yang diusulkan oleh Seed & Idriss (1971) yang disempurnakan oleh Idriss & Boulanger (2008), *liquefaction severity index (LSI)* yang diusulkan oleh Sonmez & Gokceoglu (2005) dan *liquefaction potential index (LPI)* oleh Iwasaki, et al. (1982). Analisis potensi likuefaksi dilakukan menggunakan metode *simplified procedure* dengan nilai *Safety Factor* sebagai acuan kerawanan likuefaksi. Metode *simplified procedure* umum digunakan untuk analisis potensi likuefaksi karena relatif sederhana dengan memerhitungkan variabel yang diperoleh berdasarkan uji geoteknik lapangan, seperti pengujian SPT dan CPT. Metode *LSI* digunakan untuk mengklasifikasikan derajat kerusakan akibat likuefaksi menjadi enam jenis, dari sangat rendah hingga sangat tinggi. Sedangkan *LPI* merupakan klasifikasi yang digunakan sebagai parameter suatu area memiliki potensi likuefaksi dengan membagi kategori menjadi tiga parameter (Zakariya, et al., 2023). Sehingga, metode *simplified procedure*, *LSI*, dan *LPI* dapat digunakan secara efektif untuk menganalisis potensi likuefaksi di rencana jalan tol Yogyakarta – Bawen seksi 3.

Analisis potensi likuefaksi yang saat ini berkembang umumnya menggunakan data pengujian lapangan, seperti SPT dan CPT (Patriaman, et al., 2021). Likuefaksi juga dapat terjadi pada area yang sangat luas yang terdistribusi secara spasial (Hartono & Fathani, 2022). Sehingga, pemetaan potensi likuefaksi merupakan langkah yang sangat penting sebagai langkah awal untuk mengurangi risiko bencana likuefaksi. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan zona kerentanan likuefaksi berdasarkan nilai *LSI* dan *LPI*. Zonasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS berbasis *Geographic Information System (GIS)*. Perangkat lunak ini berfungsi untuk interpolasi nilai *LSI* dan *LPI* pada masing-masing titik pengujian untuk membentuk suatu zona kerentanan likuefaksi. Penelitian ini bermanfaat untuk merencanakan infrastruktur yang berkelanjutan terutama dalam perencanaan metode perbaikan tanah yang sesuai.

## 2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data penyelidikan lapangan dan laboratorium yang diperoleh dari konsultan perencanaan jalan tol pada tahun 2021. Kondisi bentang alam lokasi penelitian divalidasi oleh penulis melalui kunjungan langsung di lapangan pada STA tinjauan. Analisis kerentanan potensi likuefaksi menggunakan 7 data bor dan 3 data sondir di sepanjang lokasi penelitian di Gambar 2. Likuefaksi dianalisis menggunakan nilai N-SPT yang diperoleh dari pengujian bor dalam serta nilai tahanan ujung konus ( $q_c$ ) yang diperoleh dari pengujian CPT. Hasil analisis berupa nilai *safety factor (FS)* terhadap potensi likuefaksi. Pemetaan atau zonasi kerentanan likuefaksi dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.3 dengan metode interpolasi nilai *LSI* dan *LPI*. Zona diklasifikasikan berdasarkan tiap rentang kerentanan likuefaksi. Kondisi batas sebagai variabel input *vector layer* adalah nilai *LSI* dan *LPI* sebagai atribut interpolasi.

### 2.1 Kondisi Geologi dan Geoteknik

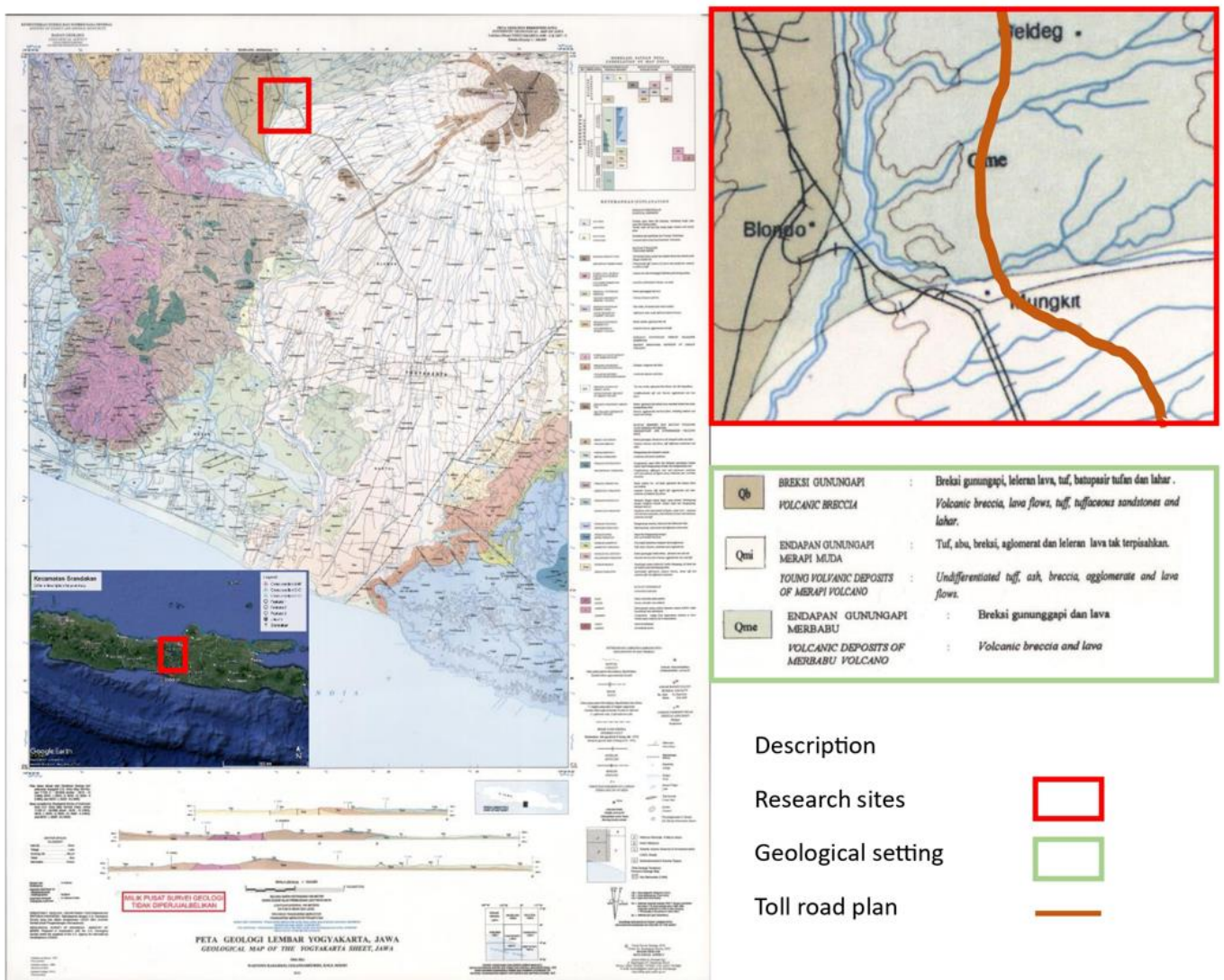
Kondisi regional lokasi Pembangunan Jalan Tol Yogyakarta – Bawen seksi 3 berada pada zona fisiografi Gunungapi Kuarter yang tersusun atas endapan primer maupun sekunder dari aktivitas gunung berapi. Zona fisiografi secara umum dekat dengan Gunungapi Merapi dan Gunungapi Merbabu. Berdasarkan peta geologi yang bersumber dari Kementerian ESDM (2022), zona penelitian berada dalam formasi endapan Gunungapi Merapi muda (Qmi), breksi gunungapi (Qb), dan Gunungapi Merbabu (Qme) dengan tipe lapisan penyusun berupa breksi dan tufa. Batuan tersingkap pada formasi Qmi berupa tufa berukuran pasir, dengan warna lapuk cokelat keabuan, dan batuan segar berwarna cokelat muda. Batuan pada formasi Qme terdapat adanya singkapan berupa endapan breksi vulkanik, secara deskriptif memiliki warna segar abu-abu, warna lapuk coklat gelap sampai kehitaman, dengan matriks berupa pasir tuffan, memiliki ukuran butir pasir halus hingga pasir sedang, fragmen berupa batuan beku, berukuran kerikil hingga boulder, bentuk fragmen menyudut. Peta geologi regional untuk area lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.

Pengujian lapangan untuk mengetahui karakteristik geoteknik dilakukan menggunakan metode bor dalam dan sondir. Lokasi pengujian tanah ditampilkan pada Gambar 2 (a). Area lokasi penelitian STA 49+700 – STA 50+900 terdapat 7 titik bor dan 3 titik sondir, yaitu BH-07, BH-08, BH-09, BH-10, BH-11, BH-22, dan BH-88 dengan titik sondir di titik S-04, S-05, dan S-06.

Berdasarkan potongan melintang sepanjang trase jalan tol yang memotong titik pengujian bor, stratifikasi lapisan tanah didominasi pasir lanauan dengan sisipan lapisan lanau pasiran. Lapisan permukaan didominasi oleh pasir lanauan yang diikuti oleh lanau pasiran dengan sisipan *gravel* dan *boulder*. Lapisan dasar disusun oleh lapisan tanah lempungan dengan konsistensi sangat kaku hingga keras dengan rentang nilai N-SPT sebesar 27 - 60. Muka air relatif dangkal, dengan kedalaman terendah sebesar 0,40 m di titik BH-22 dan kedalaman terdalam sebesar 13,00 m di titik BH-11. Stratigrafi tanah pada lokasi tinjauan ditampilkan pada Gambar 2 (b).

2.2 Desain Seismik

Berdasarkan data dari USGS, gempa yang digunakan untuk analisis adalah gempa Yogyakarta tahun 2006 dengan  $M_w$  6,3. Gempa ini memiliki karakteristik gempa dangkal dengan titik *epicenter* gempa berada relatif dekat dengan lokasi penelitian. Percepatan tanah maksimum atau *peak ground acceleration* (PGA) merupakan parameter awal untuk menentukan parameter perhitungan *cyclic stress ratio* (CSR). Berdasarkan peta gempa Indonesia tahun 2017 penentuan PGA dapat menggunakan metode *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) dan *Site-Specific Response Analysis* (SSRA). Probabilitas gempa yang digunakan adalah 7% dalam kala ulang 75 tahun yang sesuai dengan gempa kala ulang 1000 tahun. Kelas situs ditentukan berdasarkan pembacaan nilai N-SPT pada kedalaman bor minimum sebesar 30 m sesuai SNI 1726:2019 (BSN, 2019) dan SNI 8460-2017 (BSN, 2017). Kelas situs yang diperoleh berdasarkan data 7 titik bor, yaitu BH-07, BH-08, BH-09, dan BH-10 merupakan kelas batuan sedang (SD) BH-11, BH-22, dan BH-88 adalah batuan lunak (SE). Nilai percepatan maksimum untuk kelas situs SD adalah 0,446g dan kelas situs SE adalah 0,533g.

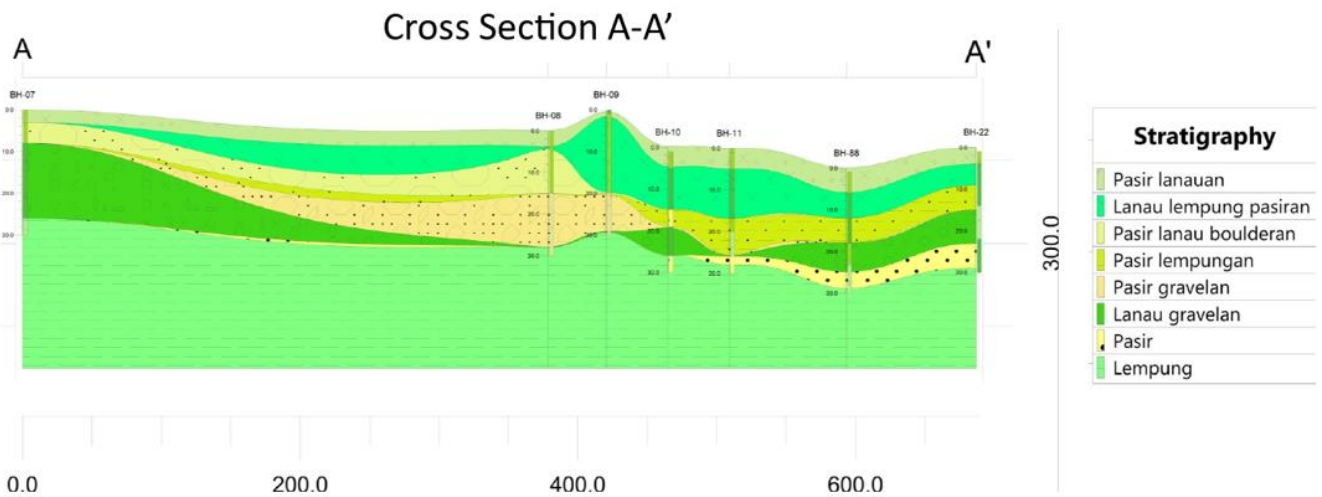


Gambar 1 Peta Geologi lembar Yogyakarta hasil modifikasi (ESDM, 2022).





(a)



(b)

Gambar 2 Lokasi penelitian (a) titik pengujian bor, dan (b) stratigrafi di area penelitian.

### 3 ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI

Analisis potensi likuefaksi menggunakan *simplified method* dilakukan berdasarkan data pengujian SPT dan CPT untuk memperhitungkan *CSR*. Selain data-data tersebut, percepatan tanah dasar maksimum ( $a_{max}$ ) dan parameter tegangan overburden tanah ( $\sigma_{v0}$ ) juga diperlukan dalam perhitungan *CSR*. *Metode Simplified Procedure*, Seed dkk. (1975) mengubah rekaman gempa irregular menjadi tegangan siklis yang seragam dengan asumsi tegangan yang disebabkan oleh gempa memiliki nilai sebesar 65% dari tegangan siklis puncak. Idriss & Boulanger (2008) memberikan tambahan variabel berupa faktor koreksi overburden ( $K_{\sigma}$ ). Persamaan *simplified procedure* untuk menghitung nilai *CSR* dikalkulasikan pada Persamaan (1).

$$CSR = 0,65 r_d \left( \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (1)$$

dengan  $r_d$  merupakan koefisien reduksi tegangan geser,  $\sigma_{v0}$  merupakan tegangan overburden total ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\sigma'_{v0}$  merupakan tegangan efektif tanah ( $\text{kN/m}^2$ ),  $g$  adalah percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $MSF$  adalah *magnitude scaling factor*, sedangkan nilai  $a_{max}$  diperoleh melalui data Desain Respon Spektra tahun 2021.

$CRR$  dapat dinyatakan sebagai tahanan tanah dalam melawan gaya seismik yang dapat menyebabkan likuefaksi. Evaluasi potensi likuefaksi dengan menggunakan N-SPT diawali dengan mengetahui nilai  $(N_1)_{60}$  berdasarkan data N-SPT yang didapatkan. Seed, et al. (1985) meneliti bahwa terdapat pengaruh  $(N_1)_{60}$  terhadap potensi kerusakan tanah akibat likuefaksi. Perancangan geoteknik saat ini telah banyak menggunakan korelasi dengan mengubah  $N$  terukur menjadi  $N_{60}$  yang menyatakan nilai N-SPT dengan efisiensi energi 60%. Nilai  $CRR$  dapat dikalkulasikan menggunakan Persamaan (2).

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{vc}=1 atm} = \exp \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2,8 \right) \quad (2)$$

dengan  $(N_1)_{60cs} = \text{N-SPT terkoreksi fines content}$ .

Selain menggunakan data pengujian SPT, nilai  $CRR$  juga dapat ditentukan berdasarkan data pengujian sondir atau CPT sesuai dengan persamaan yang diusulkan oleh Idriss dan Boulanger (2014). menggunakan Persamaan (3) dengan  $q_{c1Ncs}$  merupakan tahanan ujung konus terkoreksi *fines content*.

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{vc}=1 atm} = \exp \left( \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right) \quad (3)$$

Angka aman terhadap likuefaksi ditentukan dengan membandingkan nilai *cyclic resistance ratio* ( $CRR$ ) dengan nilai *cyclic stress ratio* ( $CSR$ ) yang diformulasikan menggunakan Persamaan (4).

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \quad (4)$$

Tanah akan mengalami likuefaksi apabila angka  $SF$  yang diperoleh  $< 1$  sedangkan angka  $SF \geq 1$  mengindikasikan bahwa tidak terjadi likuefaksi. Angka  $SF$  menunjukkan kerentanan kejadian likuefaksi pada tiap kedalaman.

*Liquefaction Severity Index* ( $LSI$ ) merupakan salah satu metode untuk memprediksi kerentanan derajat kerusakan akibat terjadinya likuefaksi yang diciptakan oleh Sonmez & Gokceoglu (2005). Perhitungan  $LSI$  dilakukan menggunakan Persamaan (5).

$$LSI = \int_0^{20} P_L(z) \cdot w(z) dz \quad (5)$$

$$P_L(z) = \frac{1}{1 + \left( \frac{SF}{0.96} \right)^{4.5}}, \text{ untuk } SF \leq 1,411; P_L(z) = 0, \text{ untuk } SF > 1,411; w(z) = 10 - 0.5 z$$

$LSI$  adalah *Liquefaction Severity Index*,  $w(z)$  adalah faktor bobot kedalaman tanah,  $z$  adalah kedalaman tanah ( $\leq 20$  m), serta  $P_L(z)$  merupakan nilai probabilitas likuefaksi berdasarkan fungsi kedalaman. Nilai  $LSI$  berada pada rentang 0 – 100. Terdapat enam kategori derajat kerusakan  $LSI$  yang diusulkan oleh Sonmez dan Gokceoglu (2005) seperti pada Tabel 2.

Analisis menggunakan metode  $LPI$  dapat digunakan sebagai analisis awal suatu area mengalami kerentanan likuefaksi karena penggolongan hanya berupa berpotensi tinggi dan rendah saja (Zakariya, et al., 2023). Asumsi di dalam pengembangan analisis tingkat keparahan likuefaksi dengan metode  $LPI$  antara lain kedalaman tanah yang terlikuefaksi berada pada rentang 0 – 20 m. Metode  $LPI$  juga menganggap bahwa semakin dalam lokasi lapisan tanah yang terlikuefaksi, maka kerusakan yang ditimbulkan relatif kecil. Nilai dari  $LPI$  dapat ditentukan menggunakan Persamaan (6).

$$LPI = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz \quad (6)$$

$F = 1 - SF$ , untuk  $SF < 1$ ;  $F = 0$ , untuk  $SF \geq 1$ ;  $w(z) = 10 - 0.5z$ , untuk  $0 \leq z < 20$  m;  $w(z) = 0$ , untuk  $z \geq 20$  m, dengan  $LPI$  adalah *liquefaction potential index*,  $F$  representasi dari nilai  $SF$  (*safety factor*), dan  $w(z)$  representasi dari faktor kedalaman lapisan tanah yang ditinjau.  $LPI$  memiliki rentang nilai antara 0 hingga 100, dengan klasifikasi potensi likuefaksi ditampilkan pada Tabel 1. Analisis lebih detail terhadap kerentanan likuefaksi dapat menggunakan  $LSI$  yang memiliki nilai rentang lebih kecil dan klasifikasi kerentanan lebih banyak.

Tabel 2 Klasifikasi  $LPI$  dan  $LSI$

<i>Liquefaction severity index (LSI)</i>	<i>Liquefaction potential</i>	<i>Liquefaction potential index (LSI)</i>	<i>Liquefaction potential</i>
$LSI = 0$	<i>Non-liquified</i>	$LPI = 0$	<i>Very low</i>
$0 < LSI \leq 15$	<i>Very low</i>	$0 < LPI \leq 5$	<i>Low</i>
$15 < LSI \leq 35$	<i>Low</i>	$5 < LPI \leq 15$	<i>High</i>
$35 < LSI \leq 65$	<i>Moderate</i>	$LPI > 15$	<i>Very high</i>
$65 < LSI \leq 85$	<i>High</i>		
$85 < LSI \leq 100$	<i>Very high</i>		

#### 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Potensi likuefaksi sangat tinggi yang terjadi pada BH-22 disebabkan karena nilai N-SPT rendah dengan rentang nilai N-SPT sebesar 4 sampai 11 hingga kedalaman 16 m. Tanah dikategorikan secara umum sebagai *medium sand* dengan sisipan material lempung hingga kedalaman 20 m. Faktor penyebab lain yaitu kedalaman muka air tanah yang cukup dangkal sebesar 0,40 m. Meskipun terdapat lapisan pasir dengan kategori *very dense sand* dan lapisan lempung yang lebih mampu melawan beban siklik (Boulanger & Idriss, 2014), namun lapisan tersebut berada pada kedalaman >20 m sehingga tidak signifikan dalam memberikan perlawanan terhadap beban siklik yang dapat terjadi pada kedalaman dangkal (Iwasaki, et al., 1982). Area yang terlikuefaksi cukup dalam hingga kedalaman 18 m akibat dari lapis tanah pasiran jenuh air dengan densitas relatif lepas pada kedalaman tersebut. Hal tersebut selaras dengan karakteristik endapan muda dilihat dari posisi titik bor yang berada dekat dengan Sungai Elo (Gambar 1). Area yang tidak mengalami potensi likuefaksi adalah BH-09 dengan kerentanan likuefaksi sangat rendah. Nilai  $LSI$  dan  $LPI$  berturut-turut pada titik ini adalah 0,48 dan 0 sehingga masuk dalam klasifikasi tidak terlikuefaksi berdasarkan  $LPI$ . Hal ini disebabkan karena stratigrafi bawah permukaan pada titik ini berupa pasir lanauan sisipan gravel dengan densitas padat hingga sangat padat dengan rentang nilai N-SPT sebesar 32 - 60. Muka air tanah relatif dangkal sebesar 1,0 m namun memiliki nilai N-SPT terkecil sebesar 32 pada tiap rentang pengujian SPT hingga kedalaman 30 m.

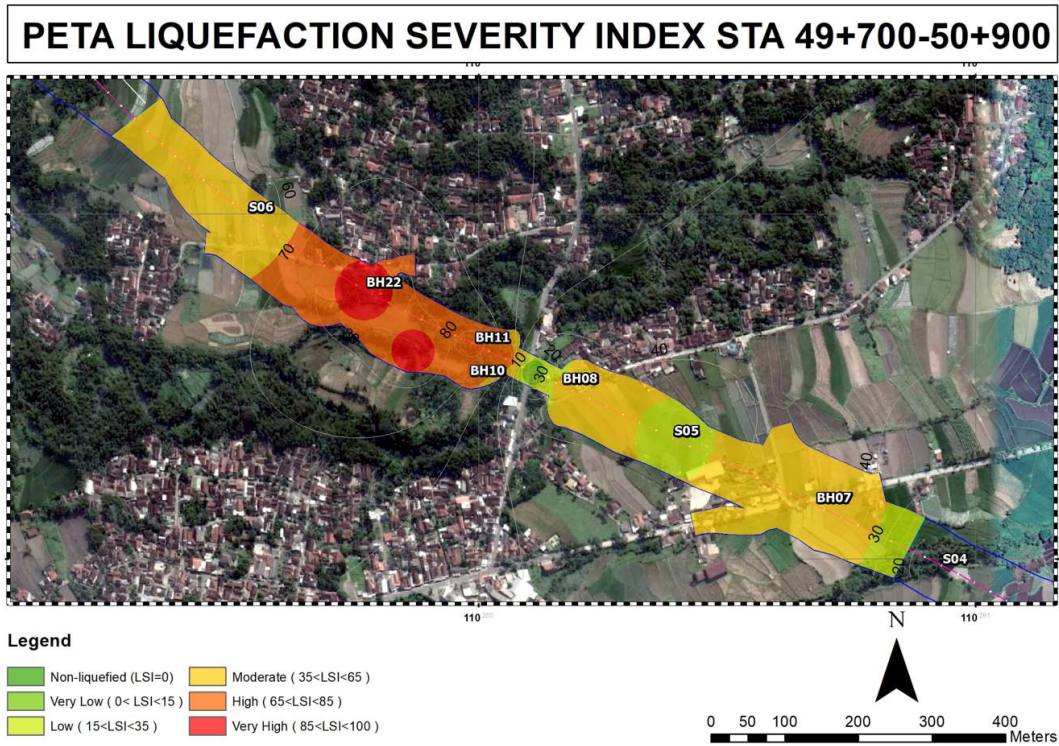
Tabel 3 Nilai  $LSI$  dan  $LPI$  untuk masing-masing titik pengujian

Titik	$LSI$	Kerentanan	$LPI$	Potensi
BH-07	46,97	Sedang	26,17	Rendah
BH-08	37,49	Sedang	14,01	Sangat Rendah
BH-09	0,48	Sangat Rendah	0,00	Tidak Terlikuefaksi
BH-10	76,83	Tinggi	44,41	Sedang
BH-11	83,76	Tinggi	63,20	Sedang
BH-22	89,70	Sangat Tinggi	68,51	Tinggi
BH-88	81,33	Tinggi	55,54	Tinggi
S-04	16,79	Rendah	7,56	Sangat Rendah
S-05	30,81	Rendah	14,44	Sangat Rendah
S-06	57,21	Sedang	36,26	Sedang

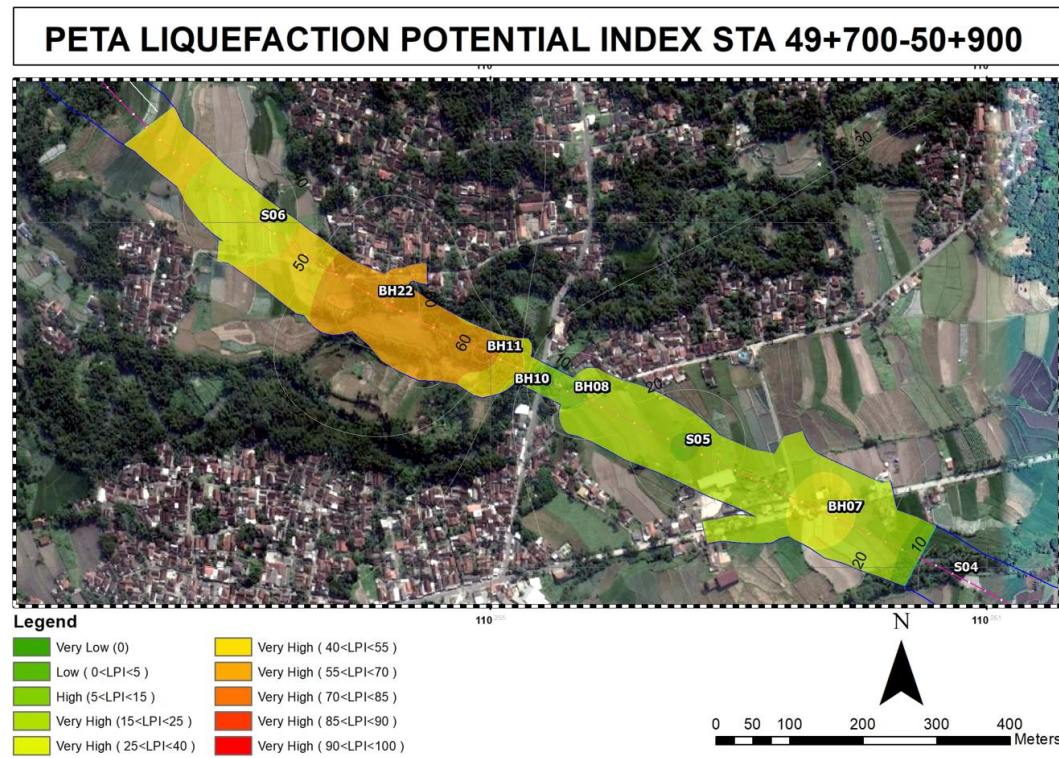
Rekap hasil analisis potensi likuefaksi untuk masing-masing titik pengujian ditampilkan pada Tabel 3. Hasil pemetaan potensi likuefaksi berdasarkan nilai  $LSI$  dan  $LPI$  untuk masing-masing zona di dalam ROW rencana jalan tol ditampilkan pada Gambar 3. Hasil analisis  $LSI$  dan  $LPI$  menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan, hal ini terkait dengan fungsi persamaan (Persamaan 5 dan 6) yang berbeda.  $LSI$  memberikan klasifikasi yang detail karena memberikan enam tingkatan klasifikasi sehingga lebih sesuai digunakan sebagai parameter penentuan zonasi, sedangkan  $LPI$  dapat digunakan untuk untuk menjawab ya atau tidak area tersebut rentan mengalami likuefaksi (Zakariya, et al., 2023). Klasifikasi tingkat kerentanan likuefaksi menggunakan metode  $LSI$  dan  $LPI$  merupakan metode yang general, sehingga relevan digunakan untuk menentukan kerentanan likuefaksi di Indonesia. Beberapa



penelitian telah menggunakan metode *LSI* dan *LPI* untuk menentukan potensi likuefaksi, baik untuk pemetaan potensi likuefaksi maupun perencanaan metode perbaikan tanah pada suatu area seperti Hartono & Fathani (2022) dan Patriaman, et al. (2021).



(a)



(b)

Gambar 3 Peta potensi likuefaksi STA 49+700 - STA 50+900 (a) peta *LSI*, dan (b) peta *LPI*.

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data bor di lokasi penyelidikan, tanah pada area STA 49+700-STA 50+900 oleh lapisan pasir lanauan dengan densitas sedang hingga padat. Area dengan dominasi tanah pasiran dan muka air tanah dangkal berpotensi tinggi terjadi likuefaksi. Formasi batuan penyusun terdiri atas batuan breksi gunungapi (Qb) dan endapan gunungapi Merapi muda (Qme).

Berdasarkan analisis potensi likuefaksi menggunakan data gempa Yogyakarta 2006 dengan  $M_w$  6,3, area yang lebih dekat dengan sungai memiliki potensi likuefaksi tinggi hingga sangat tinggi. Kedalaman area likuefaksi bervariasi khususnya pada area BH-08, sedangkan pada area lain tanah yang berpotensi likuefaksi berada pada area permukaan hingga kedalaman 20 m. Analisis derajat kerusakan menggunakan metode *LSI* menunjukkan bahwa area BH-09 memiliki derajat kerusakan sangat rendah sedangkan pada titik lain memiliki derajat kerusakan tinggi hingga sangat tinggi. Nilai *LSI* terendah terjadi pada BH-09 dengan nilai *LSI* sebesar 0,48 sedangkan nilai *LSI* tertinggi sebesar 89,70 di titik BH-22. Nilai *LPI* terendah berada pada titik BH-09 dengan nilai *LPI* sebesar 0 dan nilai *LSI* tertinggi sebesar 68,51 di titik BH-22. Pembangunan jalan tol Yogyakarta – Bawen seksi 3 sebagai salah satu area pengembangan konektivitas jalan tol trans Jawa perlu memerhitungkan adanya potensi likuefaksi. Peta sebaran potensi likuefaksi dapat digunakan sebagai salah satu upaya preventif untuk stabilitas lereng dan timbunan di sepanjang rencana jalan tol.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ahmad Rifa'i dan Dr. Eng. Sito Ismanti untuk ilmu pengetahuan yang tidak ternilai. Tidak lupa ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan serta Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada untuk kesempatan menempuh pendidikan pascasarjana. PT Jasamarga Jogja Bawen atas ketersediaan data yang diberikan untuk keperluan analisis likuefaksi.

## REFERENSI

- Boulanger, R. & Idriss, I., 2014. *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*, Davis: University of California at Davis.
- BSN, 2017. *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN, 2019. *SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional .
- Day, R. W., 2012. *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- ESDM, 2019. *Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia*. Bandung: Badan Geologi.
- ESDM, 2022. *GeoMap*. [Online] Available at: <https://geologi.esdm.go.id/geomap/pages/preview/peta-geologi-lembar-kebumen-jawa>
- Hartono, N. & Fathani, T., 2022. The Using of GIS to Delineate the Liquefaction Susceptibility Zones at Yogyakarta International Airport. *Civil Engineering Dimension*, 24(1), pp. 62-70.
- Idriss, I. & Boulanger, R., 2008. *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute.
- Iwasaki, T., Arakawa, T. & Tokida, K., 1982. *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Southampton, Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 925-939.
- Kevin, P. & Muhrozi, 2023. The Preliminary Study of Liquefaction Susceptibility Map in the Yogyakarta-Bawen Toll Road Sections I and II, Indonesia. *Civil Engineering Dimension*, 25(1), pp. 29-36.
- Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lee, D.-H., Ku, C.-S. & Yuan, H., 2004. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan. *Engineering Geology*, 71(1-2), pp. 97-117.
- Patriaman, F., Fathani, T. F. & Wilopo, W., 2021. Liquefaction potential analysis in Palu Bay area. *Earth and Environmental Science*, Volume 930, p. 012077.
- Pratama, A., Fathani, T. & Satyarno, I., 2021. Liquefaction potential analysis on Gumbasa Irrigation Area in Central Sulawesi Province after 2018 earthquake. *Earth and Environmental Science*, Volume 930, p. 012093.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 97(9), pp. 1249 - 1273.



- Seed, H. B., Idriss, I. M., Makdisi, F. & Banerjee, N., 1975. *Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses*, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, CA.
- 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), pp. 1425-1445.
- Sonmez, H. & Gokceoglu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, Volume 48, pp. 81-91.
- Zakariya, Ali, Rifai, A. & Ismanti, S., 2023. Comparative analysis of quantitative indices for evaluating the liquefaction potential of medium-dense cohesionless soil. *Journal of GeoEngineering*, 18(3), pp. 93-102.