

## Analisis Potensi Likuefaksi Menggunakan Metode Seed et al. di Jembatan Jurug, Bengawan Solo, Surakarta

Moch. Soleh<sup>1</sup>, Novita Anggraini<sup>2</sup>, Fuji Asema<sup>3</sup>, Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy<sup>4</sup>,  
Muhammad Tri Aditya<sup>5</sup>, Muhammad Farhan Putra Samakata<sup>6</sup>, Nur Anwaril Jamil<sup>7</sup>

<sup>1-7</sup> Politeknik Negeri Malang

### Article Info

#### Article history:

Received Jun, 2026

Revised Jun, 2026

Accepted Jun, 2026

#### Kata Kunci:

Likuefaksi, Seed et al., Faktor Keamanan, Indeks Potensi Likuefaksi, Jembatan Jurug, Surakarta

#### Keywords:

Liquefaction, Seed et al., Factor of Safety, Liquefaction Potential Index, Jurug Bridge, Surakarta

### ABSTRAK

Penilaian risiko geoteknik ini menginvestigasi kerentanan likuefaksi pada lokasi kritis Jembatan Jurug di Surakarta, sebuah wilayah yang diklasifikasikan sebagai Kelas Situs SE (Tanah Lunak) dengan potensi seismik tinggi yang dipengaruhi oleh Sesar Kendeng. Lapisan bawah permukaan dicirikan oleh endapan aluvial muda berupa pasir halus dan lanau berpasir dengan kepadatan rendah hingga sedang, serta muka air tanah yang dangkal (2 hingga 6 m). Analisis menggunakan metode semi-empiris Seed et al. (1985) dengan nilai N-SPT terkoreksi (N160) untuk menghitung Faktor Keamanan (FS) dan Indeks Potensi Likuefaksi (LPI) hingga kedalaman 20 m guna mengukur tingkat keparahan manifestasi permukaan. Hasil menunjukkan variasi spasial kerentanan yang signifikan: Titik Bor 02 (BH-02) merupakan zona paling kritis dengan potensi likuefaksi tertinggi, ditunjukkan oleh nilai FS terendah dan LPI tertinggi, yang terkonsentrasi pada lapisan dangkal hingga menengah (0 hingga 18 m) di mana  $FS < 1$  terjadi secara konsisten. Sebaliknya, BH-01, BH-04, dan BH-05 menunjukkan potensi likuefaksi sedang yang terpusat pada lapisan permukaan (0 hingga 10 m), sementara BH-03 merupakan area paling stabil dengan FS tinggi dan LPI rendah yang konsisten. Hal ini mengharuskan adanya mitigasi geoteknik mendesak pada zona dangkal berisiko tinggi, seperti teknik pemadatan (compaction grouting/vibro compaction) atau metode berbasis drainase (PVD), guna memastikan integritas struktural jembatan terhadap pembebanan seismic.

### ABSTRACT

This geotechnical risk assessment investigates the liquefaction susceptibility of the critical Jurug Bridge site in Surakarta, a region classified as Site Class SE (Soft Soil) with high seismic potential influenced by the Kendeng Fault. The subsurface is characterized by young alluvial deposits of low-to-medium density fine sand and sandy silt with a shallow groundwater table (2 to 6 m). The analysis employed the Seed et al. (1985) semi-empirical method using corrected SPT N-values (N160) to calculate the Factor of Safety (FS) and the Liquefaction Potential Index (LPI) down to 20 m to quantify surface manifestation severity. Results reveal significant spatial variations in vulnerability: Bore Hole 02 (BH-02) is the most critical zone, exhibiting the highest liquefaction potential with the lowest overall SF and highest LPI, concentrated in the shallow to intermediate layers (0 to 18 m) where  $SF < 1$  is persistent. Conversely, BH-01, BH-04, and BH-05 show moderate liquefaction potential focused on the surface layers (0 to 10 m), while BH-03 is the most stable area, displaying consistently high SF and low LPI. This mandates urgent geotechnical mitigation in the

shallow zones of high risk, such as densification techniques (compaction grouting/vibro compaction) or drainage-based methods (PVDs), to ensure the structural integrity of the bridge against seismic loading.

*This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.*



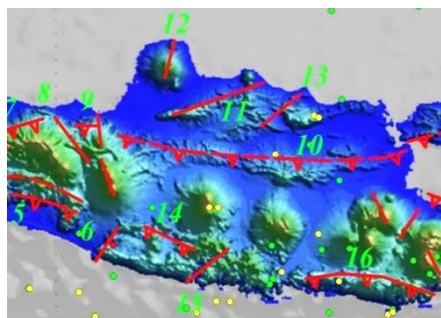
*Corresponding Author:*

Name: Fuji Asema, S.Pd., M.T.  
Institution: Politeknik Negeri Malang  
Email: [fuji.asema@polinema.ac.id](mailto:fuji.asema@polinema.ac.id)

## 1. PENDAHULUAN

Likuefaksi diakui sebagai salah satu fenomena geoteknik paling berbahaya, yang terjadi ketika tanah jenuh kehilangan kekuatan dan kekakuannya akibat peningkatan tekanan air pori yang signifikan selama kejadian seismik (Bolt, 2001). Kondisi ini menyebabkan tanah berperilaku seperti cairan kental, sehingga menimbulkan ancaman besar terhadap infrastruktur di atasnya. Sebagai negara yang terletak di Cincin Api Pasifik, Indonesia secara inheren memiliki kerentanan tinggi terhadap gempa bumi dan likuefaksi (Hidayat & Santoso, 1997). Peristiwa bersejarah besar, seperti likuefaksi di Padang pada tahun 2009 dan Palu pada tahun 2018, menjadi bukti nyata kerusakan katastropik yang ditimbulkan oleh fenomena ini (Wirabuana, 2023). Oleh karena itu, penilaian potensi likuefaksi merupakan aspek vital dalam proses perencanaan maupun evaluasi struktural fasilitas yang berlokasi di wilayah rawan seismik dan bencana.

Wilayah Surakarta dikategorikan sebagai daerah dengan potensi seismik tinggi, karena kedekatannya dengan Sesar Kendeng dan aktivitas seismik yang dipengaruhi oleh Gunung Lawu dan Gunung Merapi. Karakteristik tanah aluvial lepas dan jenuh yang dominan di sekitar Sungai Bengawan Solo semakin meningkatkan kemungkinan terjadinya likuefaksi (Hakam, 2020). Kondisi kritis ini perlu mendapat perhatian khusus mengingat keberadaan Jembatan Jurug sebagai aset infrastruktur vital yang menghubungkan Kota Surakarta dan Kabupaten Karanganyar. Kerusakan pada jembatan ini akibat likuefaksi akan berdampak parah terhadap mobilitas masyarakat dan perekonomian regional. Dalam konteks ini, penilaian risiko geoteknik memainkan peran krusial tidak hanya dalam menjaga integritas struktural jembatan, tetapi juga dalam mendukung keberlanjutan pembangunan regional (Afandi, 2020).



Gambar 1. Peta Sesar Aktif Indonesia (Badan Geologi Kementerian ESDM)

Untuk mengevaluasi tingkat kerentanan, penelitian ini menggunakan metode Seed et al. yang banyak diterapkan dalam analisis likuefaksi. Pendekatan ini memanfaatkan parameter yang diperoleh dari pengujian lapangan, khususnya nilai N-SPT, untuk menghitung Cyclic Stress Ratio (CSR), Cyclic Resistance Ratio (CRR), dan Faktor Keamanan (FS). Selanjutnya, tingkat keparahan likuefaksi dinilai menggunakan Indeks Potensi Likuefaksi (LPI). Melalui metodologi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan delineasi yang jelas mengenai potensi likuefaksi di lokasi kajian dan sekaligus mengusulkan rekomendasi mitigasi yang diperlukan untuk perencanaan dan pemeliharaan infrastruktur jembatan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Gempa Bumi dan Sumber Beban Dinamis*

Gempa bumi didefinisikan sebagai getaran permukaan bumi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba di bawah permukaan (hiposenter), yang merambat dalam bentuk gelombang seismik (Lutgens, Tarbuck, & Tasa, 2014). Gempa bumi umumnya diklasifikasikan menjadi tipe vulkanik dan tektonik. Gempa tektonik, yang disebabkan oleh pergerakan relatif sepanjang zona sesar di kerak bumi, merupakan sumber utama pembebanan dinamis yang memicu kegagalan geoteknik. Sesar-sesar ini, yang umumnya dikategorikan sebagai Sesar Normal, Sesar Naik, dan Sesar Geser, mengakumulasi regangan elastis yang dilepaskan secara tiba-tiba ketika melampaui batas kekuatan batuan (Baxter, 2000). Pelepasan energi ini menghasilkan Percepatan Puncak Tanah (PGA) dan Magnitudo Momen (Mw), yang berfungsi sebagai parameter masukan krusial dalam analisis potensi likuefaksi.

### 2.2 *Mekanisme dan Faktor Pemicu Likuefaksi*

Likuefaksi merupakan fenomena geoteknik kritis di mana tanah jenuh yang non-kohefif, terutama pasir lepas hingga medium-padat atau lanau, mengalami penurunan drastis pada kekuatan geser dan kekakuannya, bertransisi dari perilaku padat menjadi cair (Division, 1978). Proses ini dipicu oleh beban dinamis siklik akibat gempa bumi, yang menghasilkan peningkatan tekanan air pori berlebih ( $u$ ) secara cepat. Sesuai prinsip tegangan efektif Terzaghi, tegangan efektif tanah ( $\sigma'$ ) merupakan selisih antara tegangan total ( $\sigma$ ) dan tekanan air pori ( $u$ ).

Ketika tekanan pori ( $u$ ) meningkat mendekati tegangan total ( $\sigma$ ), tegangan efektif ( $\sigma'$ ) akan berkurang menuju nol. Kondisi  $\sigma' \approx 0$  ini secara efektif menghilangkan kekuatan geser tanah, sehingga memicu likuefaksi. Dua tipe utama likuefaksi yang dikenal adalah Likuefaksi Siklik dan Likuefaksi Aliran. Akibatnya beragam, antara lain penyebaran lateral, kegagalan aliran, dan hilangnya kapasitas dukung, yang terbukti merugikan infrastruktur seperti pada kasus Palu (2018), Padang (2009), dan Alaska (1964) (Seed, 1982).

### 2.3 *Metodologi Analisis Potensi Likuefaksi*

Evaluasi potensi likuefaksi dalam penelitian ini menggunakan Metode Semi-Empiris, yang dianggap sebagai pendekatan standar industri. Metode ini secara fundamental didasarkan pada perbandingan dua parameter utama:

- 1) Cyclic Stress Ratio (CSR) :  
yang mewakili beban tegangan geser siklik akibat gempa, dan
- 2) Cyclic Resistance Ratio (CRR) :

yang menggambarkan resistansi siklik inherent tanah, diestimasi dari nilai SPT terkoreksi menjadi  $(N1)_{60}$ .

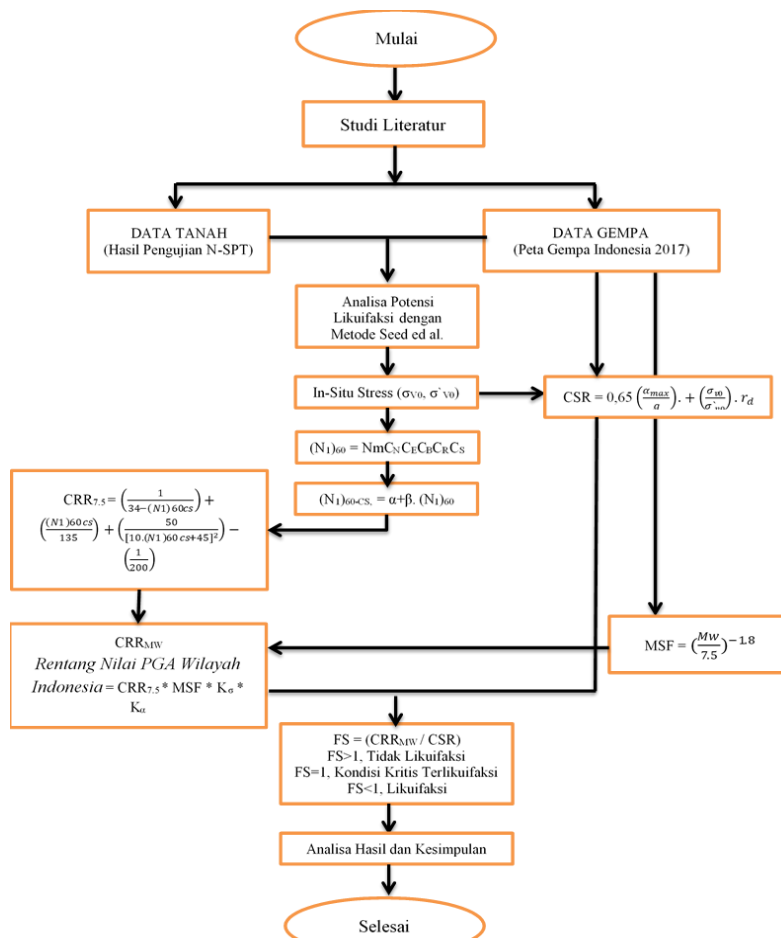
Potensi likuefaksi ditentukan oleh Faktor Keamanan (FS), dihitung sebagai rasio CRR/CSR. Nilai  $FS < 1,0$  mengindikasikan bahwa tanah pada kedalaman tersebut rentan terhadap likuefaksi. Untuk penilaian risiko yang lebih komprehensif, penelitian ini mengadopsi Indeks Potensi Likuefaksi (LPI) (Iwasaki, 1978), yang mengintegrasikan FS sepanjang profil kedalaman tanah.

### 3. METODE PENELITIAN

#### 2.1 Desain Penelitian

Analisis potensi likuefaksi didasarkan pada data Uji Penetrasi Standar (SPT) yang telah dikoreksi menjadi  $(N1)_{60}$  sesuai prosedur evaluasi tanah standar (SHIDDIQIE, 2022). Metode Seed et al. (1985) digunakan untuk menentukan Faktor Keamanan (FS), Cyclic Stress Ratio (CSR), dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) sebagai indikator utama potensi likuefaksi.

Kondisi  $FS < 1$  mengindikasikan bahwa lapisan tanah rentan terhadap likuefaksi, sedangkan  $FS > 1$  menandakan kondisi aman. Untuk mengkuantifikasi tingkat keparahan, Indeks Potensi Likuefaksi (LPI) digunakan hingga kedalaman 20 meter (Anggraini, 2023). Temuan ini selanjutnya menjadi dasar rekomendasi remediasi bagi infrastruktur di area kajian.

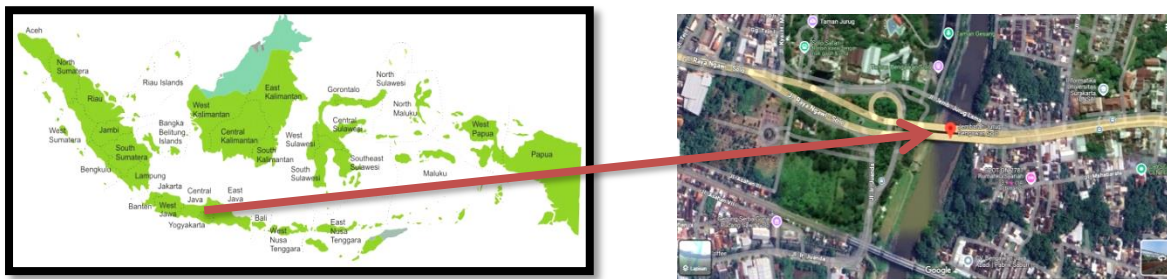


Gambar 2. Diagram Penelitian

(peneliti, 2025)

### 3.2 Pengambilan Data

Uji Penetrasi Standar (SPT) dilakukan pada lima titik bor (BH-01 hingga BH-05) di wilayah kajian. Lokasi titik bor tersebut dipilih untuk mewakili kondisi tanah di sekitar fondasi jembatan dan tepi sungai, sehingga hasilnya mencerminkan keseluruhan stratifikasi tanah (Asema, 2023). Hasil SPT menunjukkan bahwa lapisan atas didominasi oleh tanah lepas dengan jumlah pukulan rendah, sedangkan nilai SPT meningkat pada kedalaman yang lebih besar, menandakan tanah yang lebih padat.



Gambar 3. Peta Lokasi Jembatan Jurug Begawan Solo

(Peneliti, 2025)

### 3.3 Analisis Data

Potensi likuefaksi dianalisis berdasarkan nilai Faktor Keamanan (FS) yang diturunkan dari perbandingan antara CSR dan CRR. Faktor keamanan terhadap likuefaksi dapat dinyatakan sebagai:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \tag{1}$$

Dimana :

FS = Faktor Keamanan

#### 3.3.1 Cyclic Stress Ratio (CSR)

$$CSR = 0,65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \times r_d \tag{2}$$

Dimana :

$a_{max}$  = Percepatan gempa bumi

$g$  = Percepatan gravitasi

$\sigma_{vo}$  = Total tegangan lapisan penutup vertikal

$\sigma'_{vo}$  = Tegangan lapisan penutup vertikal yang efektif

$r_d$  = Koefisien pengurangan stres

#### 3.3.2 Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Nilai CRR diperoleh dengan menghitung beberapa parameter dari hasil nilai N-SPT. Apabila  $(N_1)_{60cs} > 37,5$ , tanah dianggap tahan terhadap pembebanan seismik dengan  $CRR_{7,5} = 2$ .

$$CRR_{7,5} = \left( \frac{1}{34 - (N1)_{60}cs} \right) + \left( \frac{(N1)_{60}cs}{135} \right) + \left( \frac{50}{[10 \cdot (N1)_{60}cs + 45]^2} \right) - \left( \frac{1}{200} \right) \tag{3}$$

**3.3.3 Magnitudo Gempa Bumi**

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^{-1.8} \tag{4}$$

Dimana :

MSF = Faktor skala magnitudo

Mw = Besaran momen

**3.3.4 Nilai (N1)<sub>60</sub>**

Nilai (N1)<sub>60</sub> mewakili nilai penetrasi yang telah dikoreksi terhadap tekanan overburden dan dapat dihitung menggunakan faktor koreksi dan normalisasi sebagai berikut :

$$N_{60} = N_m \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R \cdot C_E \tag{5}$$

$$(N1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \tag{6}$$

$$(N1)_{60} = N_{60} \cdot C_N \tag{7}$$

Dimana :

Nm = Nilai SPT

Istilah CN, CE, CB, CR, dan CS mewakili faktor koreksi yang diperoleh dari pengujian SPT, yang meliputi faktor koreksi rasio energi (CE), faktor koreksi diameter lubang bor (CB), faktor koreksi panjang batang (CR), dan faktor koreksi metode pengambilan sampel (CS). Sementara itu, faktor koreksi tekanan lapisan penutup (CN) dapat ditentukan menggunakan persamaan Seed dan Idriss sebagai berikut :

$$C_N = \frac{2,2}{\left( 1,2 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right)} \tag{8}$$

Dimana :

σ'vo = Tekanan lapisan penutup yang efektif

Pa = Tekanan Atmosfer (1 atm)

**3.3.5 Liquefaction Potential Index (LPI)**

$$LPI = \int_0^{20m} Fw(z) dz \tag{9}$$

Dimana :

LPI = Indeks Potensi Pencairan

F = Faktor bobot untuk Faktor Keamanan (SF), di mana F = (1-SF) jika SF < 1, dan F = 0 jika SF ≥ 1

$w(z)$  = Faktor bobot kedalaman, yang didefinisikan sebagai  $w(z) = 10-0,5z$ , di mana  $z$  mewakili kedalaman dalam meter, dengan kedalaman analisis maksimum 20 m

Tabel 1. Indeks Potensi Likuefaksi

No	LPI Value	Degree of Liquefaction Potential
1	LPI = 0	Very Low
2	$0 < LPI < 5$	Low
3	$0 < LPI < 15$	High
4	LPI > 15	Very High

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Karakteristik Tanah dan Data Nilai N-SPT

Investigasi bawah permukaan dilakukan pada lima titik bor (BH-01 hingga BH-05) di sekitar Jembatan Jurug, Surakarta. Profil tanah didominasi oleh lapisan lempung, lanau berpasir, dan pasir, dengan muka air tanah (MAT) pada kedalaman 2 hingga 6 m di bawah permukaan. Nilai N-SPT dicatat hingga kedalaman 30 m. Nilai SPT terkoreksi,  $(N1)60$ , dihitung dengan memperhitungkan faktor koreksi tekanan overburden dan peralatan, sesuai metode Seed et al. (1985).

Tabel 2. Hasil Nilai Uji N-SPT

Depth (m)	$(N1)60$				
	BH-01	BH-02	BH-03	BH-04	BH-05
0	38.5	18.33	0	0	0
2	34.78	16.37	0	6.64	45.32
4	40.38	18.86	0	18.49	33.99
6	31.45	5.75	24.9	39.17	21.79
8	29.08	5.95	21.77	33.08	19.05
10	23.91	4.19	12.16	26.11	24.44
12	17.1	4.79	9.81	9.39	22.22
14	25.6	9.87	4.87	15.57	19.58
16	15.36	11.99	4.15	8.18	15.49
18	12.92	9.42	19.01	5.44	9.8
20	10.78	10.08	15.07	5.55	9.25
22	10.69	6.78	12.17	7.76	10.05
24	8.48	7.41	10	3.71	9.34
26	6.48	7.42	8.34	5.11	6.58
28	5.94	5.45	7.05	3.97	7.17
30	5.28	4.62	6.18	4.24	5.83

(Peneliti, 2025)

##### 4.2 Klasifikasi Situs dan Parameter Seismik

Rata-rata harmonik nilai N-SPT dari seluruh titik bor mengklasifikasikan situs ini sebagai Kelas Situs SE (Tanah Lunak) sesuai SNI 1726:2019. Berdasarkan Analisis Spektrum Respons Indonesia (RSA PUPR), diperoleh parameter seismik sebagai berikut:

Tabel 3. Parameter Gempa

Parameter	Nilai
PGA MCEr	0,3489

Ss MCEr	0,7974
S1 MCEr	0,3863
Kelas Situs	SE (Tanah Lunak)
TL	20 detik
Sds	0,67
Sd1	0,63
T0	0,19
Ts	0,94

(RSA PUPR, 2025)

### 4.3 Cyclic Stress Ratio (CSR)

Berdasarkan nilai CSR yang dihitung di seluruh lokasi titik bor, diperoleh rentang nilai antara 0,05 hingga 1,31 (Sjahrain, Rondonuwu, & Riogilang, 2021). Perbedaan nilai CSR ini mengindikasikan variasi kondisi tanah dan respons lapisan terhadap efek pembebanan seismik di area kajian.

Tabel 4. Hasil Nilai CSR

Lokasi Titik Bor	Rentang CSR
BH-01	0,27 – 1,31
BH-02	0,26 – 1,05
BH-03	0,06 – 0,71
BH-04	0,05 – 0,18
BH-05	0,27 – 0,86

(Peneliti, 2025)

### 4.4 Cyclic Resistance Ratio (CRR)

CRR diperoleh dari nilai (N1)60 terkoreksi dan kandungan halus (FC%) menggunakan korelasi empiris Seed et al. (1985) (Bolton Seed, Tokimatsu, Harder, & Chung, 1985), yang selanjutnya disesuaikan dengan Faktor Skala Magnitudo (MSF). Nilai CRR bervariasi signifikan terhadap kedalaman, dengan BH-01 menunjukkan resistansi tertinggi dan BH-02 terendah pada lapisan dangkal.

Tabel 5. Hasil Nilai CRR

Lokasi Titik Bor	Rentang CRR
BH-01	0,09 – 5,13
BH-02	0,04 – 3,47
BH-03	0,00 – 1,92
BH-04	0,02 – 3,52
BH-05	0,00 – 2,88

(Peneliti, 2025)

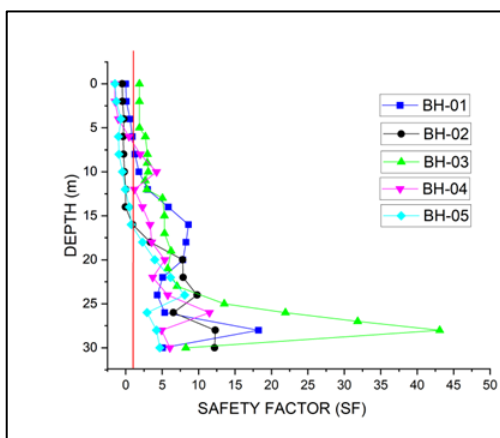
**4.5 Faktor Keamanan (FS)**

Lapisan tanah dengan  $FS < 1$  diidentifikasi sebagai rentan terhadap likuefaksi (Baxter, 2000). Hasil menunjukkan bahwa lapisan dangkal (0-10 m) pada sebagian besar lokasi titik bor memiliki potensi likuefaksi. Sebaliknya, lapisan yang lebih dalam (di bawah 20 m) umumnya menunjukkan  $FS > 1$  yang mengindikasikan kondisi stabil.

Tabel 6. Hasil Nilai FS

Lokasi Titik Bor	Rentang FS
BH-01	0,00 – 18,22
BH-02	0,00 – 12,64
BH-03	0,00 – 47,11
BH-04	0,00 – 12,58
BH-05	0,00 – 9,29

(Peneliti, 2025)



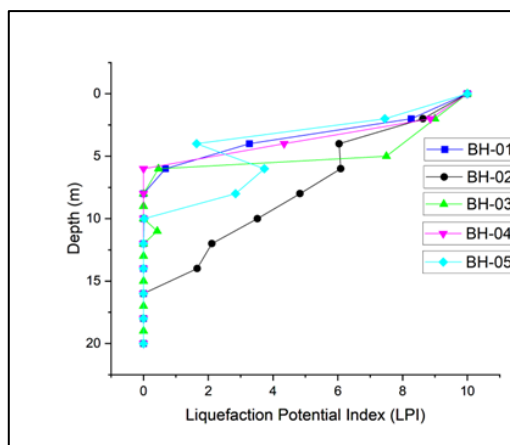
Gambar 4. FS vs Kedalaman

(Peneliti, 2025)

Berdasarkan grafik rekapitulasi nilai FK terhadap kedalaman untuk BH-1 hingga BH-5, terlihat bahwa nilai FK bervariasi pada setiap lapisan tanah. Garis batas likuefaksi ditunjukkan pada  $FK = 1$  sebagai kriteria penilaian apakah suatu lapisan tanah rentan terhadap likuefaksi.

**4.6 Liquefaction Potential Index (LPI)**

Perhitungan IPL didasarkan pada distribusi nilai FK terhadap kedalaman tanah, di mana lapisan dengan  $FK < 1,0$  berkontribusi signifikan terhadap indeks ini. Lapisan tanah dangkal diberi bobot lebih besar dibandingkan lapisan dalam, karena efek likuefaksi di dekat permukaan diperkirakan menimbulkan kerusakan lebih parah pada infrastruktur di atasnya.



Gambar 5. LPI vs Kedalaman

*(Peneliti, 2025)*

BH-02 menunjukkan nilai IPL tertinggi, mengindikasikan risiko likuefaksi sangat tinggi. BH-01, BH-04, dan BH-05 menunjukkan risiko sedang, sementara BH-03 relatif stabil (Zakariya, Nurdiansyah, Galag, & Situmorang, 2022).

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan pelaksanaan penelitian ini, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

- Kondisi geologi dan karakteristik tanah di lokasi kajian secara signifikan mempengaruhi potensi likuefaksi di area Jembatan Jurug atas Bengawan Solo. Lokasi tersebut berada di atas endapan aluvial muda Bengawan Solo yang didominasi pasir halus hingga lanau berpasir berkepadatan rendah hingga sedang, dengan muka air tanah (MAT) yang relatif dangkal antara 2 hingga 6 meter. Karakteristik ini menjadikan lapisan tanah non-kohesif sangat rentan terhadap peningkatan tekanan air pori ketika mengalami beban dinamis seperti gempa bumi. Klasifikasi tanah berdasarkan rata-rata harmonik nilai N-SPT menunjukkan lokasi ini termasuk Kelas Situs SE (Tanah Lunak) dengan tingkat amplifikasi gelombang seismik yang tinggi. Faktor seismotektonik juga berperan penting, mengingat wilayah Surakarta berdekatan dengan Sesar Kendeng dan dipengaruhi aktivitas seismik beberapa gunung, terutama Gunung Lawu dan Gunung Merapi. Kombinasi kondisi tanah lepas, kejenuhan tinggi, dan potensi seismik kuat menghasilkan tingkat kerentanan likuefaksi yang sangat tinggi di area Jembatan Jurug.
- Analisis potensi likuefaksi menggunakan metodologi Seed et al. (1985) mengungkapkan variasi spasial dan vertikal yang signifikan dalam kerentanan situs. BH-02 diidentifikasi sebagai zona paling kritis dengan potensi likuefaksi tertinggi, terbukti dari nilai FS terendah dan nilai LPI tertinggi. Kerentanan kritis ini terkonsentrasi pada lapisan dangkal hingga menengah (sekitar 0 hingga 18 m), di mana nilai  $FS < 1$  yang persisten menggarisbawahi probabilitas likuefaksi yang tinggi. BH-01, BH-04, dan BH-05 menunjukkan potensi likuefaksi sedang, dengan risiko utama pada lapisan permukaan (0 hingga 10 m). Sebaliknya, BH-03 merupakan area paling stabil dengan FS tinggi dan IPL rendah. Peningkatan FS yang signifikan di atas 20 m pada

sebagian besar lokasi mengkonfirmasi bahwa lapisan tanah dalam umumnya memiliki resistansi siklik yang memadai.

- c. Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi mitigasi terhadap likuefaksi di Jembatan Jurug berfokus pada lapisan tanah dangkal hingga menengah yang menunjukkan  $FS < 1$  dan berkontribusi signifikan pada nilai LPI. Perbaikan tanah dapat diterapkan melalui metode pemadatan seperti compaction grouting, vibro compaction, atau dynamic compaction, untuk meningkatkan kepadatan dan kapasitas geser tanah berpasir. Alternatifnya adalah menggunakan metode perbaikan berbasis drainase seperti pemasangan Prefabricated Vertical Drains (PVD) atau kolom batu untuk mempercepat disipasi tekanan air pori selama kejadian seismik. Dari segi struktural, pemilihan sistem fondasi yang mentransfer beban ke lapisan tanah keras pada kedalaman lebih dari 20 m akan relatif lebih aman terhadap dampak likuefaksi. Selain itu, pemantauan geoteknik berkala diperlukan di area sekitar jembatan mengingat kedekatannya dengan aliran Sungai Bengawan Solo dan tingginya aktivitas seismotektoni.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, B. P. (2020). Liquefaction Analysis Based on Liquefaction Potential Index Method in Prambanan Temple Complex of Jogjakarta. *Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering*.
- Anggraini, R. (2023). Analisis Potensi Likuefaksi Berdasarkan Data Spt Pada Proyek Pembangunan Menara Bri Kota Medan.
- Asema, F. (2023). Potensi Likuefaksi Berdasarkan Nilai N-SPT di Bandara Rokot Kepulauan Mentawai. *CIVED*, 10(2), 507-519.
- Baxter, S. (2000). Delaware Special Publication No. 23: Earthquake Basic. *Geology, University of Delaware*.
- Bolt, B. A. (2001). The nature of earthquake ground motion *The seismic design handbook* (pp. 1-45): Springer.
- Bolton Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., & Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of geotechnical engineering*, 111(12), 1425-1445.
- Division, C. o. S. D. o. t. G. E. (1978). Definition of terms related to liquefaction. *Journal of the Geotechnical engineering division*, 104(9), 1197-1200.
- Hakam, A. (2020). Analisis Praktis Potensi Likuefaksi. Padang: *Andalas Press Kampus UNAND-Limau Manis*, 25176.
- Hidayat, N., & Santoso, E. W. (1997). Gempa bumi dan mekanismenya. *Alami: Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana*, 2(3), 195-198.
- Iwasaki, T. (1978). *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*. Paper presented at the Proc. of 2nd Int. National Conf. on Microzonation, 1978.
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. (2014). *Essentials of Geology*: Pearson.
- Seed, H. B. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Earthquake engineering research insittue*.
- SHIDDIQIE, F. A. A. (2022). Analisis Potensi Likuefaksi Menggunakan Metode Seed Et Al.(1985), Cetin Et Al. 2004) Dan Hyperbolic Fuction (2012) Berdasarkan Data N-Spt Akibat Pengaruh Variasi Magnitudo Gempa Analysis Of Liquefaction Potential Using Seed Et Al.(1985), Cetin Et Al.(2004) And Hyperbolic Fuction (2012) Methods Based On N-Spt Data Due To The Effect Of Earthquake Magnitude Variations (Studi Kasus Proyek Jembatan Kretek Ii Di Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta).
- Sjahrain, U., Rondonuwu, S., & Riogilang, H. (2021). Analisis potensi likuefaksi dengan menggunakan parameter kuat geser tanah lempung. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 11(3), 189-198.
- Wirabuana, M. (2023). *STRATEGI MITIGASI TERHADAP BENCANA LIKUEFAKSI OLEH PEMERINTAH DAERAH KOTA PALU PROVINSI SULAWESI TENGAH*. IPDN.
- Zakariya, A., Nurdiansyah, F., Galag, C. T. S. A., & Situmorang, J. (2022). Analisis Kuantitatif dan Kualitatif Potensi Likuefaksi di Area Tanah Kepasiran Medium-Padat Dekat Sesar Opak. *Jurnal Jalan Jembatan*, 39(2), 74-87.