

Evaluasi Risiko Likuefaksi pada Infrastruktur Vital di Kabupaten Bantul Berdasarkan Data *Cone Penetration Test* (CPT)

Yuli Fajarwati^{1,*}, Febriana Arum Dewi¹, Dian Eksana Wibowo¹

¹Departemen Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta

Koresponden*, Email: yulifajarwati@uny.ac.id

Info Artikel	Abstract
Diajukan : 25 Juli 2024 Diperbaiki : 7 Agustus 2024 Disetujui : 10 Agustus 2024	<i>This study aims to evaluate the potential of liquefaction in Bantul Regency, Special Region of Yogyakarta (DIY). The analysis was conducted by calculating the Factor of Safety (FS) and Liquefaction Potential Index (LPI) based on the method of Robertson and Write (1998), updated by Robertson (2009). Data was obtained through the Cone Penetration Test (CPT) at five strategic locations selected based on the presence of vital infrastructure. The results show variations in liquefaction risk levels at the test locations. Very High-Risk Zones were identified at CPT-01 (LPI: 40), CPT-03 (LPI: 24), and CPT-05 (LPI: 17), with susceptible soil layers reaching depths of up to 7.20 meters. High Risk Zones were detected at CPT-02 (LPI: 15), with susceptible soil layers reaching depths of up to 2.60 meters. Meanwhile, Low Risk Zones were identified at CPT-04 (LPI: 5), with susceptible layers limited to depths of 0.20 to 0.80 meters.</i>
Keywords: CPT, Liquefaction, Geotechnics	Abstrak Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi likuefaksi di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Analisis dilakukan dengan menghitung nilai Factor of Safety (FS) dan Liquefaction Potential Index (LPI) berdasarkan metode Robertson dan Write (1998) yang diperbarui oleh Robertson (2009). Data diperoleh melalui pengujian Cone Penetration Test (CPT) di lima lokasi strategis yang dipilih berdasarkan keberadaan infrastruktur vital. Hasil penelitian menunjukkan variasi tingkat risiko likuefaksi pada lokasi pengujian. Zona risiko Sangat Tinggi ditemukan di CPT-01 (LPI: 40), CPT-03 (LPI: 24), dan CPT-05 (LPI: 17), dengan kedalaman lapisan rentan hingga 7,20 meter. Zona risiko Tinggi terdeteksi di CPT-02 (LPI: 15), dengan kedalaman lapisan rentan hingga 2,60 meter. Sementara itu, zona risiko Rendah teridentifikasi di CPT-04 (LPI: 5), dengan lapisan rentan terbatas pada kedalaman 0,20 hingga 0,80 meter.
Kata kunci: CPT, Likuefaksi, Geoteknik.	

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas gempa bumi tertinggi di dunia karena lokasinya yang berada di jalur pertemuan tiga lempeng tektonik utama: Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik [1], [2], [3]. Gempa bumi sering terjadi akibat pergeseran mendadak pada sesar aktif, yang dapat memicu dampak sekunder seperti likuefaksi [4]. Likuefaksi adalah fenomena ketika tanah kehilangan kekuatan gesernya akibat beban seismik, menyebabkan tanah berperilaku seperti fluida dan mengancam stabilitas infrastruktur di atasnya [5], [6], [7].

Salah satu peristiwa gempa bumi besar di Indonesia terjadi pada 27 Mei 2006, mengguncang wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) dengan kekuatan 5,9 skala Richter. Kabupaten Bantul menjadi wilayah yang paling terdampak, dengan lebih dari 4.000 korban jiwa dan kerusakan infrastruktur yang signifikan, termasuk 132.432 rumah yang rusak berat. Dampak parah ini disebabkan oleh kedekatan Kabupaten Bantul dengan Sesar Opak, yang merupakan sesar aktif di wilayah tersebut [8]. Selain itu, Bantul memiliki variasi geologi, termasuk tanah aluvial jenuh air yang rentan terhadap fenomena likuefaksi.

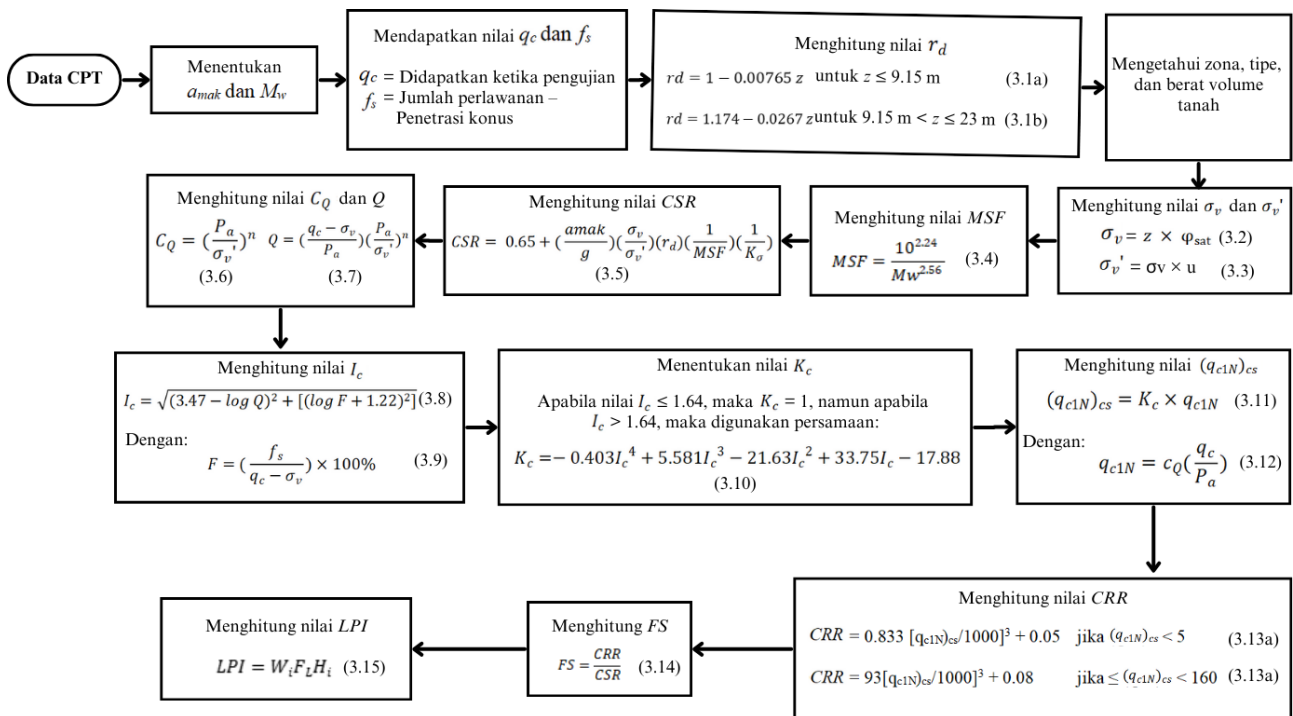
Keberadaan infrastruktur vital seperti jembatan, jalan raya, dan fasilitas publik di Bantul menjadikan analisis risiko likuefaksi sebagai prioritas. Evaluasi risiko ini penting untuk memastikan stabilitas dan keamanan

infrastruktur di daerah yang berpotensi terdampak. Salah satu metode yang paling efektif dalam analisis likuefaksi adalah *Cone Penetration Test* (CPT), yang dapat memberikan data akurat tentang sifat mekanika tanah, termasuk daya dukung tanah dan kerentanannya terhadap likuefaksi [9], [10], [11].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko likuefaksi di sekitar infrastruktur vital di Kabupaten Bantul menggunakan data CPT. Pendekatan ini dilakukan dengan memilih titik pengujian yang strategis berdasarkan keberadaan infrastruktur yang berpotensi terdampak. Hasil penelitian diharapkan memberikan gambaran risiko likuefaksi di wilayah tersebut dan mendukung upaya mitigasi bencana.

2. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi likuefaksi pada infrastruktur vital di Kabupaten Bantul menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT). Prosedur analisis mengacu pada metode Robertson dan Write (1998) yang telah diperbarui oleh Robertson (2009) [12]. Langkah-langkah analisis adalah sebagai berikut:



Gambar 1 Alur analisis likuefaksi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

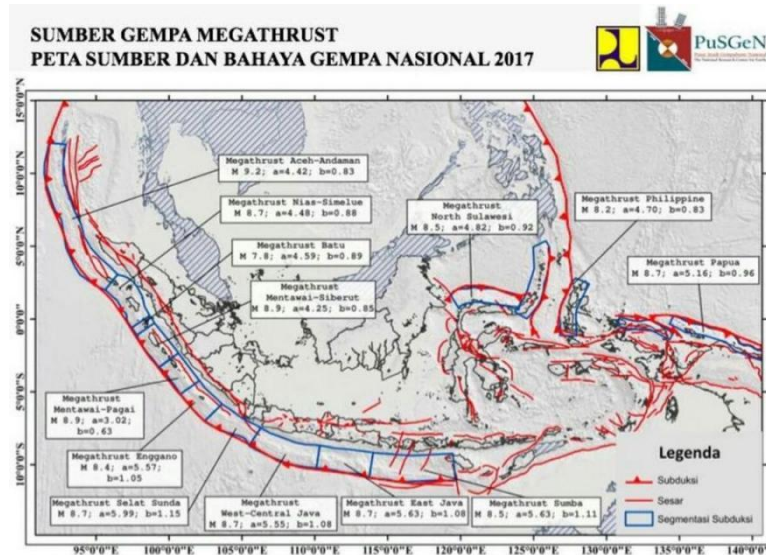
Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi likuefaksi di beberapa lokasi strategis di Kabupaten Bantul menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT). Hasil analisis difokuskan pada parameter seismik, kondisi geoteknik, dan potensi likuefaksi berdasarkan *Liquefaction Potential Index* (LPI) [13].

3.1 Parameter Seismik dan Geoteknik

Kabupaten Bantul memiliki nilai percepatan puncak tanah (*Peak Ground Acceleration*, PGA) yang berkisar antara 0,5 hingga 0,6 g, mencerminkan aktivitas seismik yang signifikan. Nilai ini menunjukkan potensi tinggi untuk memicu fenomena likuefaksi, terutama pada tanah yang rentan seperti pasir jenuh.

Skenario gempa yang digunakan dalam evaluasi ini didasarkan pada peristiwa Megathrust West-Central Java, dengan magnitudo Mw 8,7. Gempa dengan magnitudo besar seperti ini menghasilkan energi yang cukup untuk memengaruhi kestabilan lapisan tanah di wilayah penelitian.

Tanah di lokasi penelitian diklasifikasikan sebagai SP (*Sand Poorly*) menurut sistem klasifikasi tanah USCS. Tanah bergradasi buruk seperti ini memiliki karakteristik yang membuatnya rentan terhadap likuefaksi, terutama saat jenuh air. Berat jenis tanah (γ) berkisar antara 16 hingga 20 kN/m³, yang merupakan nilai khas untuk jenis tanah ini.



Gambar 2 Peta Gempa *Megathrust* Indonesia [14]

3.2 Analisis Potensi Likuefaksi

Potensi likuefaksi dianalisis berdasarkan kedalaman lapisan tanah yang rentan dan nilai total *LPI*. Data dari titik pengujian CPT memberikan gambaran risiko likuefaksi pada beberapa Lokasi. Hasil analisis potensi likuefaksi berdasarkan data CPT-01 adalah sebagai berikut:

$$H_i = 0,2 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$a_{mak} = 0,6$$

$$M.A.T = -0,60 \text{ m}$$

- 1) Membuat profil tahanan penetrasi konus (q_c) dan profil tahanan gesek satuan selimut (f_s) dalam tanah lokasi penelitian.

$$q_c = 3 \text{ kg/m}^2 = 300 \text{ kPa} ; f_s = 1 \text{ kg/cm}^2 = 100 \text{ kPa}$$

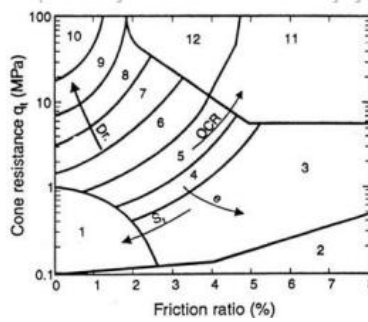
- 2) Menentukan koefisien reduksi tegangan geser (r_d).

$$r_d = 1 - 0,00765 z \tag{1}$$

$$r_d = 1 - 0,00765 \times 0,20$$

$$r_d = 0.998$$

- 3) Menghitung nilai tekanan *overburden vertikal* total (σ_v) dan tekanan *overburden vertikal efektif* (σ_v'). Sebelum menghitung σ_v dan σ_v' , perlu diketahui zona, tipe, dan berat volume tanah.



Gambar 3 Grafik Perilaku Tanah berdasarkan Data Sondir [9]

Apabila ditarik garis q_c dan FR pada Gambar 3, diketahui tanah pada kedalaman 0,2 m masuk kedalam zona 5 ($q_c = 3 \text{ kg/cm}^2$ dan $FR = 3,33\%$), dengan tipe tanah lanau liat hingga lempung berlumpur, oleh karena itu maka nilai ϕ_{sat} adalah 0,0018.

Selanjutnya yaitu menghitung σ_v dan σ_v'

$$\sigma_v = z \times \phi_{sat} \quad (2) \quad \sigma_v' = \sigma_v - u \quad (3)$$

$$\sigma_v = 20 \text{ cm} \times 0,0018 \quad \sigma_v' = 0,036 - 0$$

$$\sigma_v = 0,036 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma_v' = 0,036 \text{ kg/cm}^2$$

Nilai u didapatkan dari: $u = z - M.A.T \times g$, tetapi karena kedalaman yang dihitung lebih kecil dari $M.A.T$ yaitu 0,6 m, maka nilai $u = 0$

4) Menghitung nilai MSF

Karena magnitudo gempa yang dipilih adalah 7,5, maka $MSF = 1$

Tabel 1 Faktor Skala Magnitudo (MSF) [2]

M	MSF
5,25	1,5
6	1,32
6,25	1,13
7,5	1
8,5	0,89
Secara pendekatan: $MSF = 9,53 \times M^{1,12}$	

5) Menghitung nilai CSR

$$CSR = 0,65 + \left(\frac{a_{mak}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\right) (r_d) \left(\frac{1}{MSF}\right) \left(\frac{1}{K_\sigma}\right) \quad (4)$$

$$CSR = 0,65 + \left(\frac{0,6 \times 9,81 \text{ m/s}^2}{9,81 \text{ m/s}^2}\right) \left(\frac{3,6 \text{ kPa}}{3,6 \text{ kPa}}\right) (0,998) \left(\frac{1}{1}\right) \left(\frac{1}{1}\right)$$

$$CSR = 0,389$$

Nilai $K_\sigma = 1$ karena $\sigma_v' < 100 \text{ kPa}$

6) Menghitung nilai C_Q dan Q

$$C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^n \quad (5) \quad Q = \left(\frac{q_c - \sigma_v}{P_a}\right) \left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^n \quad (6)$$

$$C_Q = \left(\frac{100 \text{ kPa}}{3,6 \text{ kPa}}\right)^{0,5} \quad Q = \left(\frac{300 \text{ kPa} - 3,6 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}}\right) \left(\frac{100 \text{ kPa}}{3,6 \text{ kPa}}\right)^{0,5}$$

$$C_Q = 5,27 \quad Q = 15,62$$

7) Menghitung nilai I_c

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_v}\right) \times 100\% \quad (7)$$

$$F = \left(\frac{100 \text{ kPa}}{300 \text{ kPa} - 3,6 \text{ kPa}}\right) \times 100\%$$

$$F = 0,337 \%$$

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q)^2 + [(\log F + 1,22)^2]} \quad (8)$$

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log 15,62)^2 + [(\log 0,337 + 1,22)^2]}$$

$$I_c = 2,396$$

8) Menentukan nilai K_c

$$K_c = -0,403I_c^4 + 5,581I_c^3 - 21,63I_c^2 + 33,75I_c - 17,88 \quad (9)$$

$$K_c = -0,403 \times 2,396^4 + 5,581 \times 2,396^3 - 21,63 \times 2,396^2 + 33,75 \times 2,396 - 17,88$$

$$K_c = 2,30$$

9) Menghitung nilai $(q_{c1N})_{cs}$

$$q_{c1N} = c_Q \left(\frac{q_c}{P_a}\right) \quad (10) \quad (q_{c1N})_{cs} = K_c \times q_{c1N} \quad (11)$$

$$q_{c1N} = 5,27 \left(\frac{300 \text{ kPa}}{100 \text{ kPa}}\right) \quad (q_{c1N})_{cs} = 2,30 \times 15,811$$

$$q_{c1N} = 15,811 \quad (q_{c1N})_{cs} = 36$$

10) Menghitung CRR

$$CRR = 0,833[(q_{c1N})_{cs}/1000]^3 + 0,05 \quad (12)$$

$$CRR = 0,833[(36/1000)^3 + 0,05]$$

$$CRR = 0,050$$

11) Menghitung FS

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

$$FS = \frac{0,050}{0,389}$$

$$FS = 0,1 < 1 \rightarrow L \text{ (Likuefaksi)}$$

12) Menghitung nilai LPI

$$LPI = W_i F_L H_i \quad (14)$$

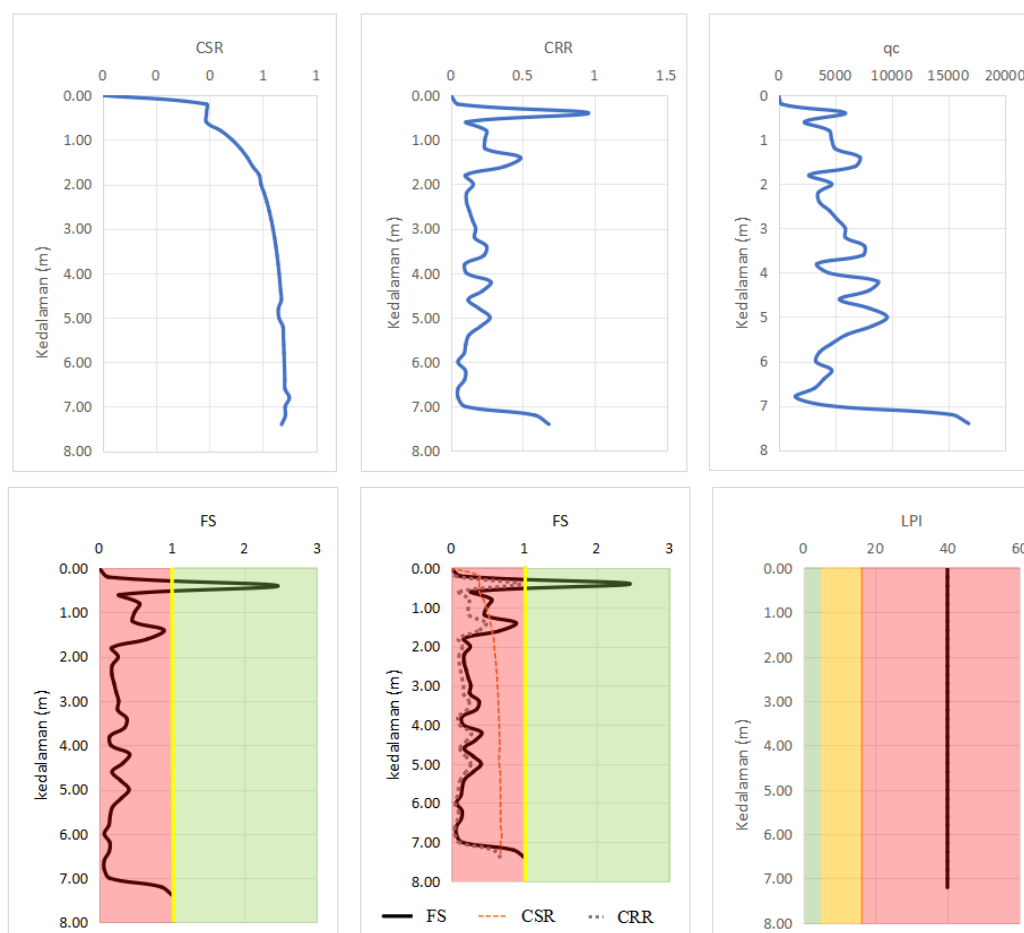
$$LPI = 9,9 \times 0,9 \times 0,2$$

$LPI = 1,7$

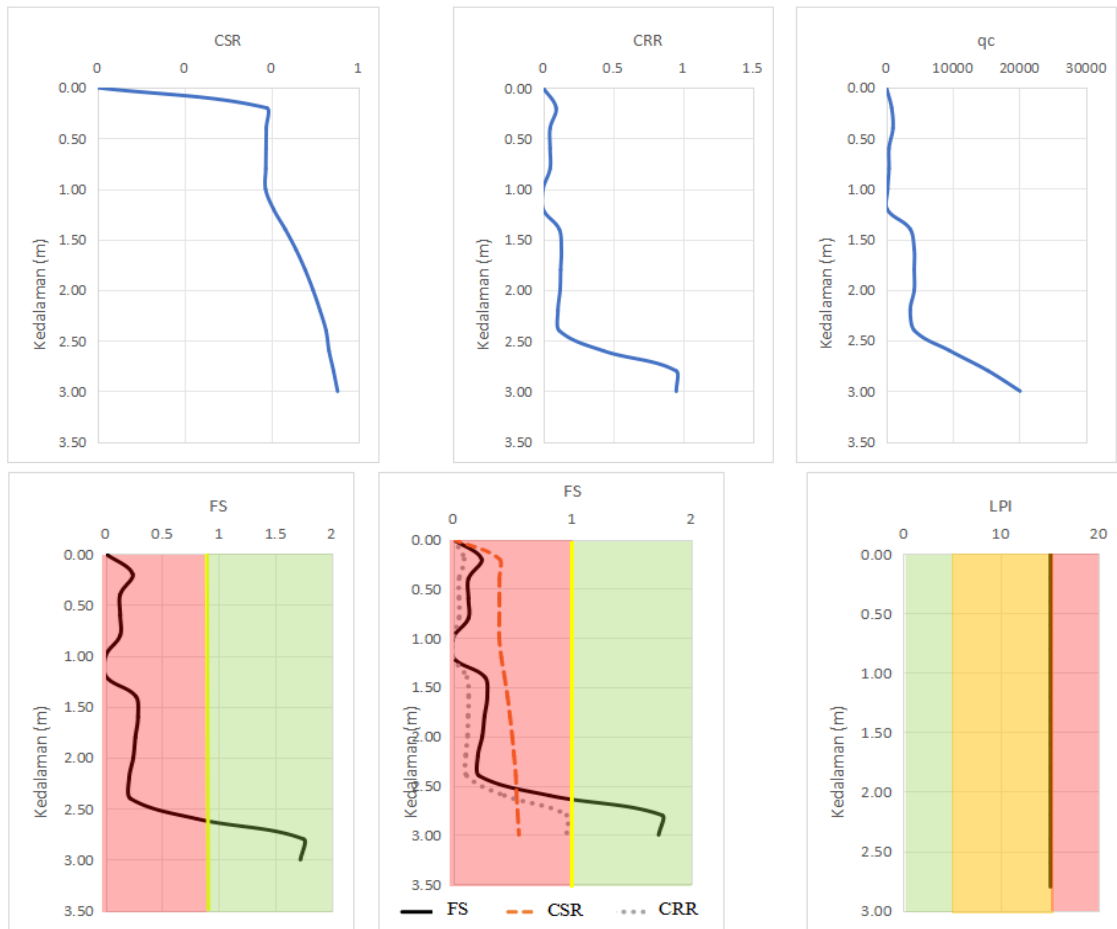
Tabel 2 Indeks Potensi Likuefaksi [2]

Indeks LPI	Risiko dan Penyelidikan yang diperlukan
$LPI = 0$	Sangat rendah. Penyelidikan detail umumnya tidak diperlukan
$0 < LPI \leq 5$	rendah. Penyelidikan lanjutan diperlukan khususnya untuk struktur penting.
$5 < LPI \leq 15$	Tinggi. Penyelidikan lanjutan lebih detail diperlukan khususnya untuk struktur. Tindakan pencegahan umumnya dibutuhkan.
$LPI > 15$	Sangat tinggi. Penyelidikan detail dan tindakan pencegahan dibutuhkan

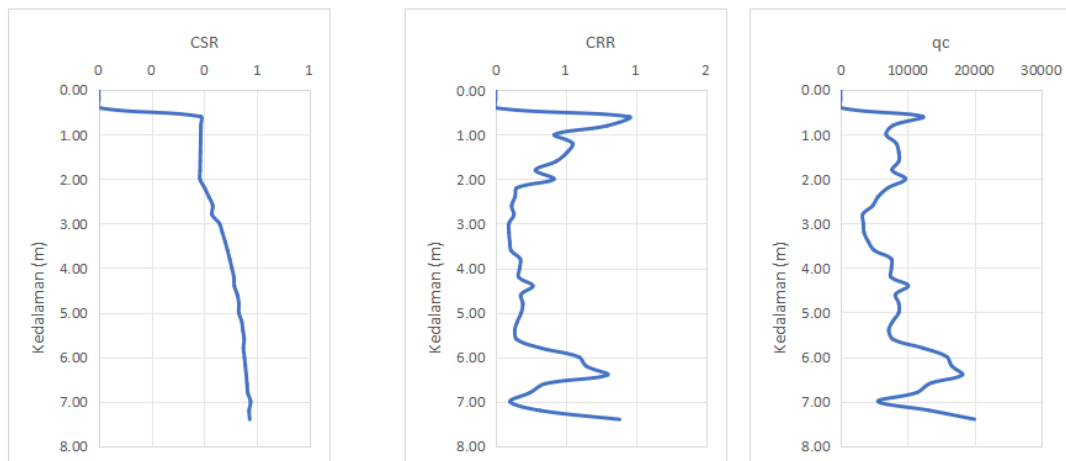
Pada hasil analisis yang sudah dihitung di atas, didapatkan bahwa CPT-01 kedalaman 0,20 m dengan gempa 7,5 SR menghasilkan nilai FS 0,1, hal tersebut menunjukkan tanah pada kedalaman tersebut berpotensi terjadi likuefaksi. Sedangkan untuk nilai LPI didapatkan hasil sebesar 1,7.

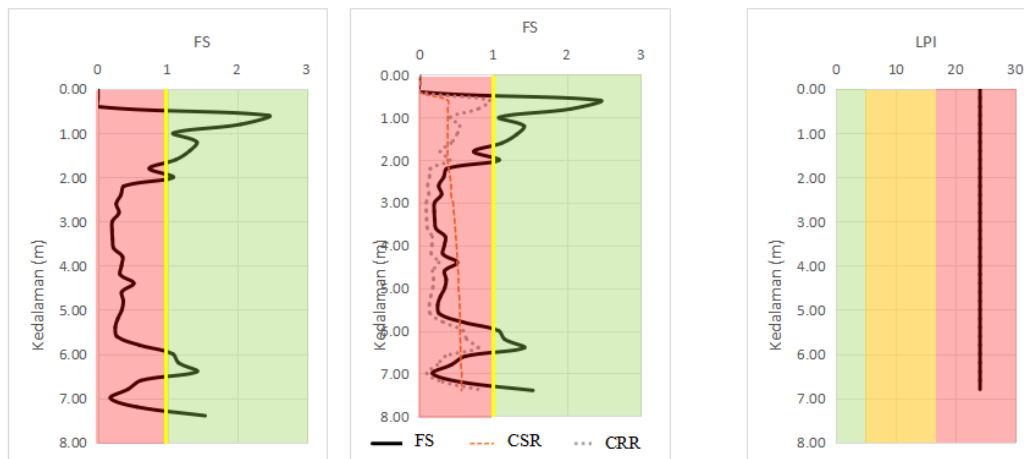


Gambar 4 Grafik hubungan kedalaman vs CRS , CRR , qc , FS dan LPI CPT-01

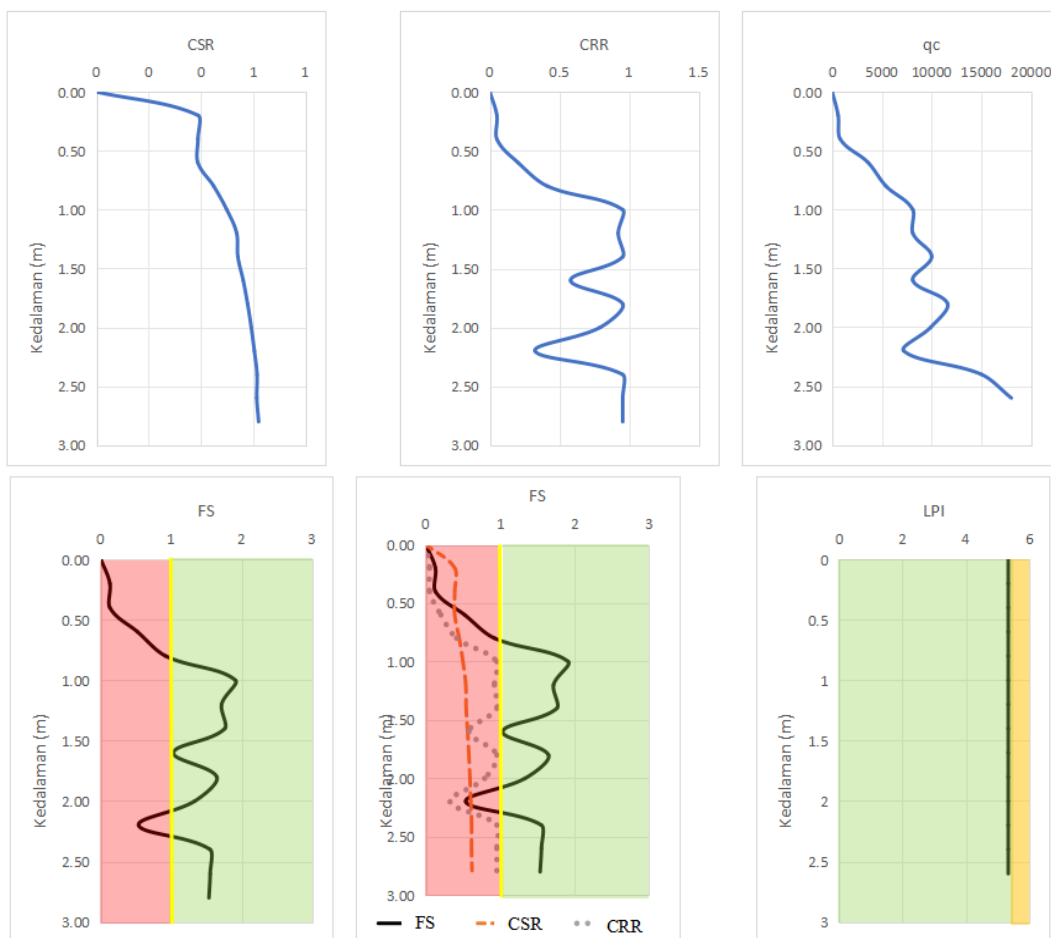


Gambar 5 Grafik hubungan kedalaman vs *CRS*, *CRR*, *qc*, *FS* dan *LPI* CPT-02

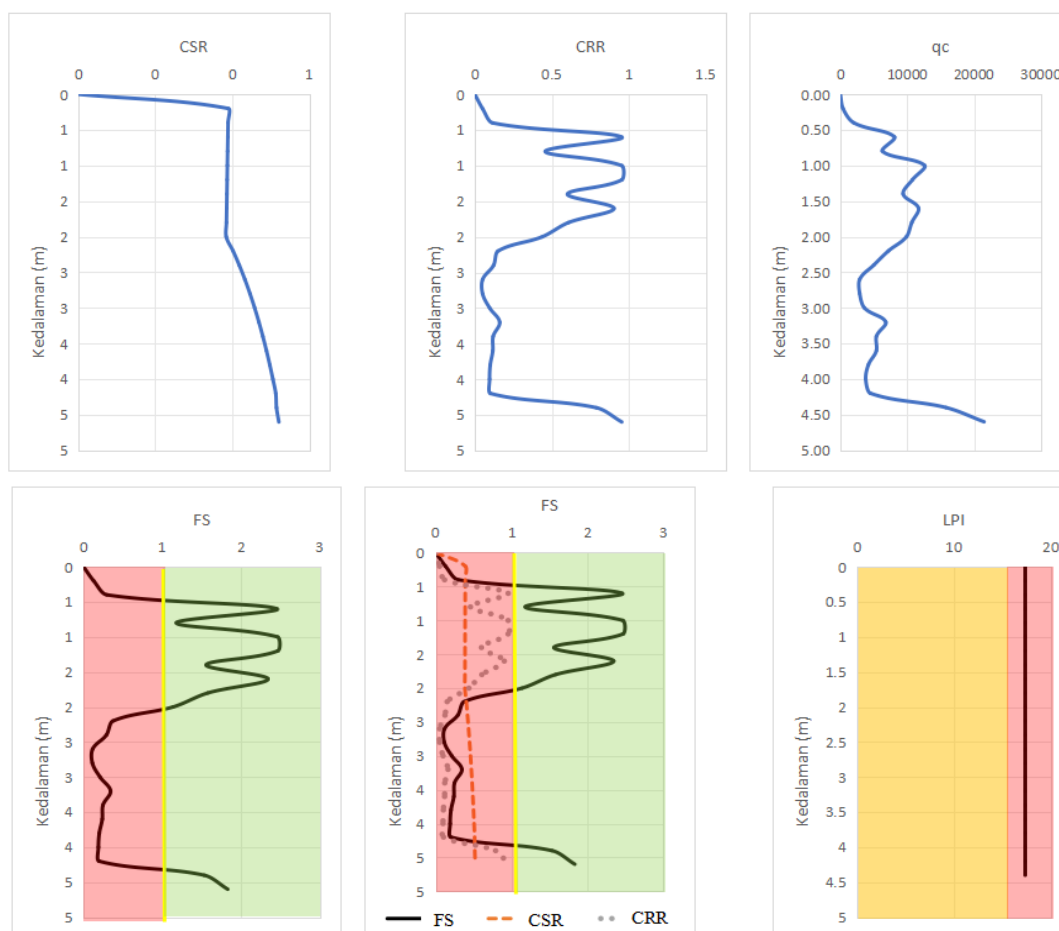




Gambar 6 Grafik hubungan kedalaman vs *CRS*, *CRR*, *qc*, *FS* dan *LPI* CPT-03



Gambar 7 Grafik hubungan kedalaman vs *CRS*, *CRR*, *qc*, *FS* dan *LPI* CPT-04



Gambar 8 Grafik hubungan kedalaman vs *CRS*, *CRR*, *qc*, *FS* dan *LPI* CPT-05

CPT-01 (Gambar 4) dan CPT-03 (Gambar 6) menunjukkan nilai Liquefaction Potential Index (*LPI*) masing-masing sebesar 40 dan 24, yang termasuk kategori Sangat Tinggi. Kedalaman lapisan tanah yang rentan terhadap likuefaksi mencapai 7,20 meter, mengindikasikan keberadaan tanah bergradasi buruk yang jenuh air dengan kerentanan tinggi terhadap likuefaksi. Kondisi ini menjadi perhatian utama, terutama karena lokasi ini mungkin terdapat infrastruktur vital seperti jembatan atau bangunan strategis yang memerlukan stabilitas tanah yang tinggi.

Berdasarkan Gambar 5, CPT-02 memiliki nilai *LPI* sebesar 15 (kategori Tinggi) dengan kedalaman lapisan berpotensi likuefaksi hingga 2,60 meter, yang lebih dangkal dibandingkan lokasi lain. Namun, meskipun kedalaman lapisan rentan lebih kecil, risiko tetap signifikan karena lapisan dangkal ini berada di zona interaksi langsung dengan fondasi bangunan atau infrastruktur. Oleh karena itu, desain fondasi yang tepat menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak likuefaksi di lokasi ini.

CPT-04, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, memiliki nilai *LPI* sebesar 5 (kategori Rendah). Lapisan tanah berpotensi likuefaksi ditemukan hanya pada kedalaman 0,20 hingga 0,80 meter, yang relatif kecil. Risiko di lokasi ini dianggap minim dibandingkan dengan lokasi lainnya. Namun demikian, penguatan tanah tetap diperlukan untuk memastikan stabilitas infrastruktur, terutama jika terdapat bangunan yang sensitif terhadap deformasi tanah.

Hasil data dari CPT-05 (Gambar 8) menunjukkan potensi likuefaksi pada kedalaman 2,20 hingga 4,20 meter, dengan nilai *LPI* sebesar 17 (kategori Sangat Tinggi). Kondisi ini mengindikasikan adanya variasi kedalaman tanah yang rentan likuefaksi di lokasi berbeda. Variasi ini memerlukan pendekatan yang disesuaikan untuk setiap lokasi untuk mengurangi risiko kerusakan pada infrastruktur yang ada.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis potensi likuefaksi di beberapa lokasi strategis di Kabupaten Bantul menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT), diperoleh variasi tingkat risiko likuefaksi berdasarkan nilai Liquefaction Potential Index (*LPI*) sebagai berikut:

1. Zona Risiko Sangat Tinggi
Ditemukan di CPT-01 (*LPI*: 40), CPT-03 (*LPI*: 24), dan CPT-05 (*LPI*: 17), dengan kedalaman lapisan rentan likuefaksi hingga 7,20 meter. Lokasi ini menunjukkan tingkat kerentanan yang sangat tinggi terhadap likuefaksi dan memerlukan perhatian khusus dalam mitigasi.
2. Zona Risiko Tinggi
Terdapat pada CPT-02 (*LPI*: 15), dengan kedalaman lapisan rentan likuefaksi hingga 2,60 meter. Risiko di lokasi ini cukup signifikan karena lapisan dangkal yang rentan berinteraksi langsung dengan fondasi bangunan atau infrastruktur.
3. Zona Risiko Rendah
Teridentifikasi di CPT-04 (*LPI*: 5), dengan lapisan rentan likuefaksi terbatas pada kedalaman 0,20 hingga 0,80 meter. Risiko di lokasi ini relatif kecil, namun pengawasan tetap diperlukan untuk memastikan stabilitas jangka panjang.

Daftar Pustaka

- [1] N. Priyanto, F. Faris, and H. Setiawan, "Liquefaction potential and severity analysis on road embankment in Serang-Panimbang Toll Road Section 3," *E3S Web of Conferences*, vol. 576, p. 03005, Oct. 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202457603005.
- [2] M. F. Qodri, V. D. A. Anggorowati, and L. Z. Mase, "Site-Specific Analysis to Investigate Response and Liquefaction Potential during the Megathrust Earthquake at Banten Province Indonesia," *Engineering Journal*, vol. 26, no. 9, pp. 1–10, 2022, doi: 10.4186/ej.2022.26.9.1.
- [3] W. P. Setiadi, F. Faris, and H. Setiawan, "Liquefaction potential hazard assessment and its effect on toll road construction in Seyegan Subdistrict, Yogyakarta," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1755-1315/1314/1/012120.
- [4] D. Al-Enezi, W. Abdullah, and H. Kamal, "Assessing Soil Liquefaction Potential for Urban Cities of Kuwait," *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, doi: 10.1007/s10706-024-02950-x.
- [5] A. Tohari and D. D. Wardhana, "Evaluation of liquefaction potential in flow liquefaction area in Palu City after the 28th September 2018 Donggala-Palu Earthquake," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202346402011.
- [6] G. Padmanabhan, B. K. Maheshwari, and P. Muley, "A Review on Liquefaction Potential Assessment with a Case Study on Roorkee Region, Uttarakhand," *Indian Geotechnical Journal*, 2024, doi: 10.1007/s40098-024-00915-8.
- [7] Y. Fajarwati and R. I. Kusuma, "Analisis Potensi Likuefaksi dan Perbaikan Tanah dengan Stone Column: Studi Kasus pada Coal Shelter PLTU Lontar, Banten," *INERSIA: Informasi dan Ekspose hasil Riset teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 17, no. 1, pp. 27–35, May 2021, doi: 10.21831/inersia.v17i1.40570.
- [8] A. Wicaksono, H. C. Hardiyatmo, and I. Satyarno, "Analysis of liquefaction potential in Opak Fault nearby area (case study: Solo-Yogyakarta-NYIA Kulon Progo Toll Road construction section I.2)," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202342904008.

- [9] R. W. Boulanger, I. M. Idriss, and R. W. Boulanger, “CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES,” 2014.
- [10] G. Du, C. Gao, S. Liu, Q. Guo, and T. Luo, “Evaluation method for the liquefaction potential using the standard penetration test value based on the CPTU soil behavior type index,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/5612857.
- [11] E. Soebowo, A. Tohari, and D. Sarah, “POTENSI LIKUIFAKSI AKIBAT GEMPABUMI BERDASARKAN DATA CPT DAN N-SPT DI DAERAH PATALAN BANTUL, YOGYAKARTA,” 2009.
- [12] M. Yoshimine, P. K. Robertson, and C. E. Wride, “Undrained shear strength of clean sands to trigger flow liquefaction,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, no. 5, pp. 891–906, 1999, doi: 10.1139/t99-047.
- [13] L. Z. Mase, “Cumulative Liquefaction Susceptibility Index to Estimate Integrated Liquefaction at Bengkulu City, Indonesia,” *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2024, doi: 10.1007/s40515-024-00417-3.
- [14] M. F. Qodri, V. D. A. Anggorowati, and L. Z. Mase, “Cone Penetration Test-based Analysis for Shallow Liquefaction Potential Evaluation Due to Maximum Credible Earthquakes of Cimandiri Fault in Sukabumi, West Java, Indonesia,” *Iraqi Geological Journal*, vol. 57, no. 1F, pp. 1–16, Jun. 2024, doi: 10.46717/igj.57.1F.1ms-2024-6-10.

Halaman ini sengaja dikosongkan