

**ANALISIS KUANTITATIF DAN KUALITATIF POTENSI
LIKUEFAKSI DI AREA TANAH KEPASIRAN MEDIUM-PADAT
DEKAT SESAR OPAK
(QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS OF LIQUEFACTION
POTENTIAL IN MEDIUM-DENSE SANDY SOIL AREA NEAR OPAK
FAULT)**

Ali Zakariya¹⁾, Febryan Nurdiansyah²⁾, Clairino T. S. A. Galag³⁾, Julian Situmorang⁴⁾

¹⁾²⁾³⁾Karyasiswa Super Spesialis Teknik Mitigasi Bencana Alam Likuefaksi, Universitas Gadjah Mada

⁴⁾Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Nasional Wilayah Provinsi D.I. Yogyakarta

¹⁾²⁾³⁾Jl. Grafika No.2, Sendowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

⁴⁾Jl. Ring Road Utara No.70, Maguwoharjo, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

e-mail: ¹⁾ali.zakariya@pu.go.id, ²⁾febryanurdiansyah89@pu.go.id, ³⁾clairino.galag@pu.go.id, ⁴⁾julian@pu.go.id

Diterima: 05 September 2022 ; direvisi: 23 Desember 2022; diterbitkan online: 30 Desember 2022.

ABSTRAK

Pada Mei 2006 telah terjadi gempa bumi di Kabupaten Bantul dan menunjukkan fenomena likuefaksi seperti lateral spreading dan sand boiling. Berdasarkan Peta Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia Tahun 2019, Pantai di Bantul diidentifikasi berada dalam zona bahaya likuefaksi sedang-tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi likuefaksi di area pembangunan Jembatan Kretek 2, Kabupaten Bantul, D.I Yogyakarta yang dekat dengan sumber gempa, sesar opak. Pendekatan studi awal menggunakan pendekatan analisis gradasi butiran oleh Tsuchida (1970) dengan secara dominan termasuk kategori paling mudah terlikuefaksi dan sebagian lainnya termasuk kategori berpotensi terlikuefaksi. Dengan menggunakan pendekatan Youd et al. (1979), dan pendekatan Hakam (2020) juga terlihat kerentanan likuefaksi tersebar sebagian besar borehole. Hasil analisis simplified procedure Idriss and Boulanger (2008) menunjukkan potensi likuefaksi di kedalaman 0-16,5 m dengan ketebalan antara 1.5-9 m kecuali BH-4 yang tidak terdapat sama sekali potensi likuefaksi. Sementara itu hasil analisis kuantitatif dan kualitatif menggunakan liquefaction severity index menunjukkan pada BH-3, BH-9, BH-12, dan BH-13 memiliki kategori sangat rendah. Pada BH-1, BH-2, BH-5, BH-6, BH-7, BH-8, dan BH-14 memiliki kategori rendah. Sementara pada BH-11 termasuk kategori moderat dan BH-10 yang termasuk kategori tinggi. Hasil analisis kuantitatif dan kualitatif kemudian dituangkan ke dalam bentuk Peta mikrozonasi liquefaction severity area Jembatan Kretek 2 untuk memudahkan pengambil kebijakan dalam memastikan keamanan sistem fondasi yang digunakan.

Kata kunci: jembatan kretek 2, preliminary, simplified procedure, liquefaction severity index, peta mikrozonasi

ABSTRACT

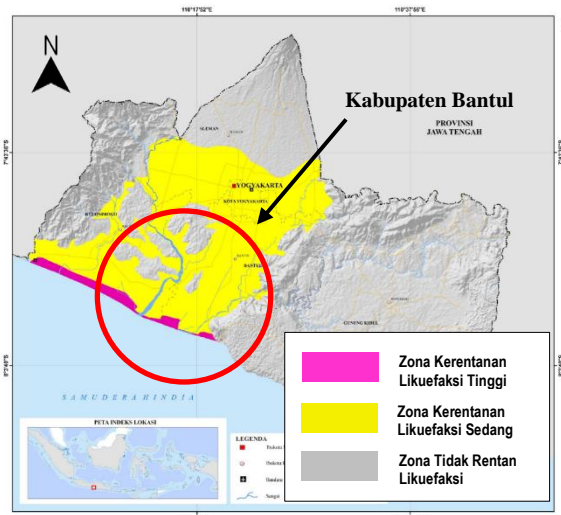
In May 2006, an earthquake occurred in Bantul Regency and showed liquefaction phenomena like lateral spreading and sand boiling. The 2019 Indonesia Liquefaction Vulnerability Zones Map identified the Bantul coast as a moderate to high liquefaction risk zone. This research aims to determine the potential for liquefaction due to soil movement in the Kretek 2 Bridge construction area, Bantul Regency, D.I Yogyakarta, nearby the opak fault as a seismic source. The preliminary study used the grain size analysis approach by Tsuchida (1970) shows soils predominantly in the most liquefiable category and others in the potential liquefaction category. Youd et al. (1979) and Hakam (2020) approaches also show that liquefaction vulnerabilities extend through most of the boreholes. The simplified procedure by Idriss and Boulanger's (2008) analysis shows a liquefaction potential at a depth of 0 to 16.5 m with a thickness of 1.5 to 9 m, except for BH-4, which does not have any liquefaction potential. Meanwhile, the quantitative and qualitative analysis results using the liquefaction severity index showed that BH-3, BH-9, BH-12, and BH-13 had very low categories. In BH-1, BH-2, BH-5, BH-6, BH-7, BH-8, and BH-14 had low category. While BH-11 is in the moderate category and BH-10 is in the high category. The quantitative and qualitative analysis results were then drawn into a microzonation map of the Kretek Bridge 2 liquefaction severity area to facilitate stakeholders in ensuring the safety of the foundation system used.

Keywords: kretek 2 bridge, preliminary, simplified procedure, liquefaction severity index, microzonation map

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pasca gempa Palu tahun 2018, likuefaksi menjadi topik penelitian yang dominan dalam kaitan dampaknya terhadap infrastruktur seperti gedung, jalan, dan jembatan di Indonesia. Pada tahun 2019, Badan Geologi, Kementerian ESDM menerbitkan Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia dengan pembagian klasifikasi zona menjadi kerentanan tinggi, sedang, dan zona tidak rentan likuefaksi per wilayah administratif Provinsi (Gambar 1). Secara historis, kejadian likuefaksi juga pernah terjadi saat gempa Bantul tahun 2006 dengan skala magnitudo M_w 6,2 dan kedalaman gempa 17,2 km bersumber dari pergerakan Sesar Opak yang bertipe *strike slip* (Gambar 2 dan 3). Bukti terjadinya likuefaksi terlihat dengan munculnya pasir halus di sepanjang retakan tanah yang diamati terjadi pada Kelurahan Sanggrahan Kecamatan Prambanan, Desa Sambisari Kecamatan Depok, Desa Paseban Kecamatan Bayat, dan Desa Kembangsari Kecamatan Piyungan dan ditandai keruhnya air sumur warga di daerah tersebut. Selain dipengaruhi oleh gempa dan jenis tanah kepasiran, di daerah tersebut memiliki muka air tanah yang dangkal dengan kedalaman 1 – 2 m di bawah permukaan tanah (Supartoyo 2006). Selain itu, mengacu pada Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi, Kabupaten Bantul secara dominan memiliki kerentanan sedang hingga tinggi terhadap potensi likuefaksi.



Gambar 1. Zona Kerentanan Likuefaksi Provinsi D.I. Yogyakarta (Buana dkk. 2019)

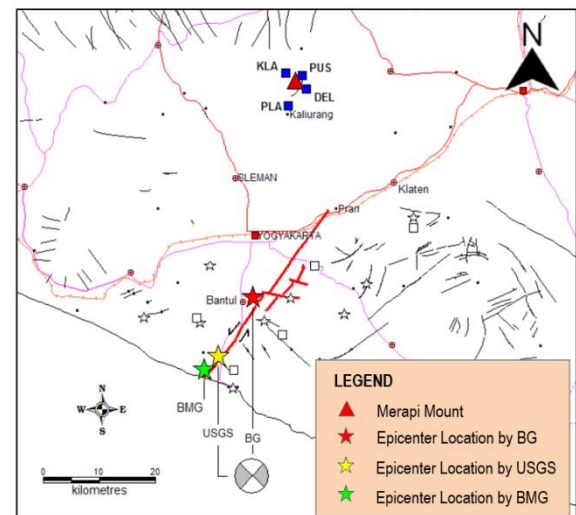


(a) *sand boiling* pada sumur warga



(b) *lateral spreading* pada sudut jalan

Gambar 2. Dampak likuefaksi di Bantul (Mase 2017)



Gambar 3. Lokasi episenter Gempa Bantul 2006 berdasarkan Badan Geologi, Badan Meteorologi dan Geofisika, dan USGS dengan perubahan (Supartoyo 2006)

Dalam rangka memitigasi dampak likuefaksi pada infrastruktur khususnya jembatan, perlu mengacu ketentuan desain SNI

1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap beban gempa. Kedua peraturan tersebut telah mensyaratkan perhitungan analisis likuefaksi pada desain jembatan namun belum dijelaskan metode perhitungannya, begitu pula bila mengacu Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Marga nomor 17/SE/Db/2017 tentang penyampaian Perubahan *Bridge Management Systems* (BMS) Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan Volume 1 (*Bridge Design code Section 3, 4 & 5*) yang menjelaskan terkait pemicu dan perlunya analisis, likuefaksi serta pengaruhnya terhadap lereng dan pondasi. Kemudian, pada tahun 2021 Direktur Jenderal Bina Marga menerbitkan Surat Edaran nomor 06/SE/Db/2021 tentang Penyampaian Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan nomor 02/M/BM/2021 dimana dijelaskan perhitungan potensi likuefaksi menggunakan pendekatan Seed and Idriss (1971) dan Idriss and Boulanger (2008) yang menggunakan nilai SPT dan/atau CPT untuk mengestimasi *safety factor* potensi likuefaksi sehingga dengan terbitnya aturan ini menjadi acuan bagi perhitungan desain jembatan yang dilaksanakan di seluruh wilayah Indonesia.

Penelitian ini mencoba mengkaji potensi likuefaksi di area Jembatan Kretek 2 yang melintasi Sungai Opak. Perencanaan Jembatan Kretek 2 dilakukan pada tahun 2015 dimana belum diatur secara rigid ketentuan perhitungan likuefaksi sehingga analisis potensi likuefaksi diperlukan untuk mengetahui kedalaman lapisan terlikuefaksi. Keluaran analisis ini nantinya dapat digunakan sebagai evaluasi pelaksanaan.

HIPOTESIS

Terdapat potensi lapisan tanah yang dapat terlikuefaksi di area Jembatan Kretek 2 karena memiliki kondisi tanah berjenis kepasiran (non kohesif), keberadaan air tanah dangkal, dan berada di dekat sumber gempa yaitu sesar Opak.

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Pembangunan Jembatan Kretek 2 di Kabupaten Bantul dilakukan sejak tahun 2021 dengan tujuan pengembangan Koridor Jalan Lintas Selatan Selatan (JLSS) Pulau Jawa di 3 Provinsi (Jawa Tengah, Yogyakarta, dan Jawa

Timur). Pengembangan koridor baru ini bertujuan untuk mendorong pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan, meningkatkan mobilitas, dan mengurangi kemiskinan di bagian selatan Jawa. Secara persisnya, Jembatan ini berlokasi di Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Provinsi D.I. Yogyakarta, melintasi muara gabungan Sungai Opak dan Oyo dan menghubungkan Pantai Parangtritis dan Pantai Depok di bagian Timur dan Pantai Samas di bagian Barat (Gambar 4 dan Gambar 5). Lokasi Jembatan melintasi sesar Opak dan berjenis tanah kepasiran sehingga memiliki potensi tinggi terhadap kejadian gempa dan likuefaksi.



Gambar 4. Tampak atas rencana pembangunan Jembatan Kretek 2 (Zakariya 2022)



Gambar 5. Bird view pembangunan Jembatan Kretek 2 (Zakariya 2022)

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *action research* dengan cara menguraikan permasalahan yang ada di lokasi penelitian kemudian dilakukan analisis menggunakan teori dan literatur terkini untuk mendapatkan sintesis dan penyelesaian atas permasalahan tersebut. Penelitian menggunakan data sekunder diantaranya, data penyelidikan tanah berupa nilai N-SPT sebanyak 14 titik *borehole*, hasil uji laboratorium *soil properties*, dan data umum

yang bersumber dari Pembangunan LOT3 – Jembatan Kretek 2.

Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Mengolah data sekunder yang terdiri dari hasil soil investigation N-SPT, hasil laboratorium tanah dan data umum Jembatan Kretek 2.
2. Menentukan sumber gempa rencana menggunakan aplikasi LINI Binamarga untuk mendapatkan probabilitas gempa terlampaui 7% dalam periode 75 tahun atau setara dengan 1000 tahun.
3. Melakukan studi preliminary potensi likuefaksi dengan menggunakan pendekatan gradasi butiran (Tsucida 1976), kedalaman muka air tanah (Youd et al. 1979), dan korelasi D_{50} , kepadatan relatif, dan a_{max} (Hakam 2020) untuk kemudian dikualitatifkan.
4. Menganalisis potensi terjadinya likuefaksi menggunakan metode *simplified procedure* dengan menghitung nilai *cyclic stress ratio* (Seed and Idriss 1982), *cyclic resistance ratio* (Idriss and Boulanger 2008) dan *safety factor* hingga didapatkan tebal lapisan tanah yang berpotensi terjadi likuefaksi.
5. Melakukan kualitatif dan kuantitatif potensi likuefaksi dengan menggunakan pendekatan *liquefaction severity index* (Sonmez and Gokceoglu 2005).
6. Melakukan pemetaan mikrozonasi menggunakan Quantum GIS/QGIS terhadap hasil kualitatif potensi likuefaksi. aplikasi QGIS berjenis *opensource* yang bersifat *free licensed*. Aplikasi ini dikembangkan oleh Free Software Foundation.

Sejarah Kegempaan di Bantul

Sejarah gempabumi yang pernah terjadi di Kabupaten Bantul tercatat pada Katalog Gempa Signifikan dan Bencana (1821-2018) yang diterbitkan oleh Pusat Gempabumi dan Tsunami, BMKG tahun 2019. Mengacu catatan tersebut, gempa tercatat sejak tahun 1867 dengan skala VIII-IX MMI. Histori kejadian gempa di area Kabupaten Bantul terangkum pada Tabel 1.

Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) merupakan metode prediksi besaran gempa masa datang dengan menggunakan data kejadian gempa masa silam. Untuk meminimalkan penyimpangan, PSHA mempertimbangkan sumber seismik, frekuensi kejadian, dan deagregasi data. Saat ini, berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa tahun 2017, terdapat aplikasi berbasis web yang *user-friendly*: LINI Binamarga dan Desain Spektra Indonesia. LINI Binamarga dikembangkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga yang dirancang untuk mendapatkan nilai *peak ground acceleration* (PGA) di batuan dasar dengan probabilitas terlampaui 7% dalam periode 75 tahun atau setara dengan 1000 tahun khusus untuk jembatan. Sementara itu, desain spektra indonesia dikembangkan oleh Pusat Studi Gempa (PUSGEN) khusus bangunan gedung dan nongedung yang menggunakan nilai PGA dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun atau setara dengan periode ulang 2500 tahun

Tabel 1. Histori kejadian gempa kuat di wilayah Kabupaten Bantul

Nama Gempa	Tahun	Koordinat	Kedalaman (km)	Skala Magnitudo
Jawa Tengah	1867	-	-	-
Jawa Tengah	1937	8.70°LS – 110.80°BT	-	-
Yogyakarta	1943	8.60°LS – 109.90°BT	-	-
Yogyakarta	1981	8.76°LS – 110.43°BT	51	5.6 SR
Kulon Progo	2001	7.87°LS – 110.18°BT	143	6.3 SR
Bantul	2006	8.01°LS – 110.18°BT	17,2	6.2 M _w
Jawa Barat	2007	6.13°LS – 107.68°BT	284	6.9 SR
Yogyakarta	2010	8.03°LS – 110.30°BT	10	5.0 SR
Kebumen	2014	8.48°LS – 109.17°BT	48	6.5 SR

Sumber: BMKG (2018)

Studi Preliminary

Studi *preliminary* likuefaksi bisa dituliskan berdasarkan analisis gradasi butiran, kedalaman muka air tanah, dan korelasi antara ukuran butiran D_{50} dengan percepatan tanah maksimum dipermukaan yang menyebabkan likuefaksi di

lokasi tersebut. Studi *preliminary* diperlukan untuk memberikan gambaran awal terhadap potensi likuefaksi di suatu lokasi. Untuk faktor tanah, Tsuchida (1970) telah merangkum hasil analisis saringan butiran pada tanah yang diketahui memiliki tanah yang *liquifiable* dan *non-liquifiable* saat terjadi gempa kuat. Semakin kecil ukuran butir berpengaruh terhadap tahanan gesek dan sifat kohesi tanah. Tsuchida (1970) mengusulkan kisaran gradasi ukuran butir yang mencakup tanah yang berpotensi likuefaksi dan paling dapat terjadi likuefaksi.

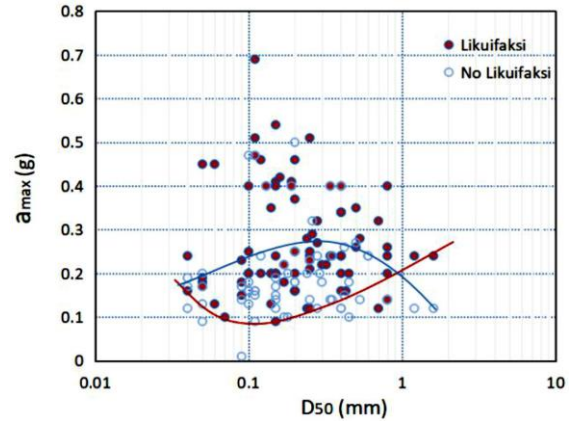
Faktor kedalaman air tanah juga merupakan salah satu faktor kerentanan likuefaksi karena semakin dalam muka air maka semakin besar tegangan efektif normal yang bekerja pada sedimen jenuh di kedalaman tertentu dan begitu pula sebaliknya. Youd et al. (1979) mengusulkan kerentanan likuefaksi terhadap kedalaman air tanah pada Tabel 2.

Tabel 2. Kemungkinan kerawanan tanah likuefaksi berdasarkan kedalaman muka air tanah

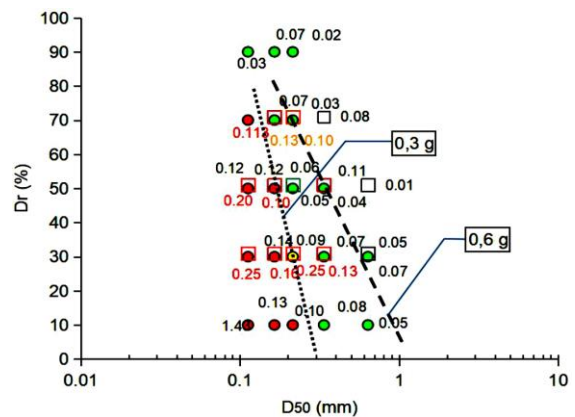
Ground Water Level/GWL (m)	Maximum Possible Susceptibility
<3.0	Very High
3.0-9.1	High
9.1-15.2	Low
>15.2	Very Low

Sumber: (Youd et al., 1979)

Faktor berikutnya, kuatnya gempabumi yang terjadi dapat dikorelasikan secara empirik terhadap kejadian likuefaksi. Berdasarkan laporan dari Cetin et al. (2000) terkait 53 data kejadian likuefaksi di seluruh dunia dari tahun 1944 hingga 1995, peneliti Hakam (2020) membuat rekapitulasi data tentang korelasi kumulatif 50% ukuran partikel lolos ayakan (D_{50}) dengan percepatan puncak pada permukaan tanah (a_{max}) (lihat Gambar 6). Kejadian likuefaksi terbanyak untuk $D_{50} = 0,075$ mm membutuhkan a_{max} sebesar 0,04–0,1 g dengan jumlah 18 kejadian, untuk $D_{50} = 0,2$ mm membutuhkan $a_{max} = 0,1-0,3$ g dengan jumlah 50 kejadian, dan untuk $D_{50} = 0,5$ mm membutuhkan $a_{max} = 0,3-0,7$ g dengan jumlah 21 kejadian. Setelah itu, nilai tersebut dikorelasikan terhadap kerapatan relatif tanah (Dr) dengan melakukan uji coba meja getar/*shaking table test* dengan a_{max} sebesar 0,3 dan 0,6 g (lihat Gambar 7).



Gambar 6. Korelasi D_{50} dengan a_{max} untuk kejadian likuefaksi (Hakam, 2020)



Gambar 7. Korelasi D_{50} dan kerapatan relatif, dengan a_{max} untuk kejadian likuefaksi (Hakam, 2020)

Nilai kerapatan relatif dapat diestimasi dengan persamaan empirik berikut:

$$Dr = 0,0006N^3 - 0,075N^2 + 3N \dots \dots \dots (1)$$

dimana Dr adalah nilai kerapatan relatif, N adalah jumlah pukulan dari uji *standard penetration* pada penyelidikan tanah, Peneliti Gibbs and Holtz (1957) menggunakan nilai N_{SPR} dari bacaan lapangan sementara Terzaghi et al. (1996) menggunakan nilai N_{60} . Penelitian uji meja getar terhadap contoh pasir juga pernah dilakukan oleh Mase (2017) menggunakan pasir sungai Opak untuk nilai kerapatan relatif tanah sebesar 26,402% dengan kesimpulan tanah terlikuefaksi saat percepatan uji meja berjalan masing-masing sebesar 0,3, 0,35, 0,4 g. Berdasarkan hasil korelasi tersebut telah mengungkapkan hubungan yang khas; ketika nilai D_{50} dan Dr meningkat maka kemungkinan resistensi terhadap kejadian likuefaksi juga meningkat.

Pada studi ini mencoba menggabungkan ketiga pendekatan *preliminary* tersebut dengan bobot penilaian terbesar pada *Grain size* dan Korelasi antara D_{50} , kerapatan relatif, dan a_{max} dikarenakan kedua faktor tersebut dihasilkan atas hubungan empirik kejadian likuefaksi seluruh dunia. Berdasarkan Tabel 3, hasil *preliminary* dapat dikelompokkan secara kualitatif menjadi tinggi dan rendah potensi likuefaksi sehingga menjadi *reliable* untuk dikomparasikan dengan pendekatan potensi likuefaksi lainnya.

Tabel 3. Klasifikasi pendekatan *preliminary*

<i>Grain size</i>	<i>GWL</i>	<i>D₅₀, Dr dan a_{max}</i>	<i>Class</i>
Yes	High-Very high	Yes	High
Yes	Low-Very low	Yes	High
No	High-Very high	Yes	Low
No	Low-Very low	Yes	Low
Yes	High-Very high	No	Low
Yes	Low-Very low	No	Low
No	High-Very high	No	Low
No	Low-Very low	No	Low

Simplified Procedure

Metode *simplified procedure* dikembangkan oleh Seed and Idriss (1971) dengan mempertimbangkan penyelidikan laboratorium dan pengamatan kinerja lapangan. Mereka menyimpulkan bahwa potensi likuefaksi dari endapan tanah terhadap seismik tergantung pada karakteristik jenis tanah, tegangan awal yang bekerja pada tanah, dan gempa yang bekerja. *Cyclic stress ratio* (CSR) diestimasi menggunakan persamaan berikut:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vc}}{\sigma'_{vc}} \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_{\sigma}} r_d \dots\dots\dots(2)$$

dimana koefisien 0.65 merupakan nilai yang setara dengan 65% dari tegangan siklik puncak, a_{max} adalah percepatan tanah puncak, σ_{vc} adalah *total stress*, σ'_{vc} adalah *effective stress*, dan r_d adalah *stress reduction coefficient*. Idriss (1999) memperbarui persamaan dengan mengalikan faktor skala besaran magnitud (MSF) dan Idriss and Boulanger (2004) kemudian memperbarui persamaan dengan menambahkan *overburden correction factor* (K_{σ}).

Cyclic resistance ratio (CRR) merupakan nilai ketahanan tanah terhadap tegangan siklik saat terjadi gempa. Perhitungan CRR kemudian

diperbarui oleh Idriss and Boulanger (2008) dengan mempertimbangkan nilai N-SPT setelah dilakukan koreksi terhadap peralatan bor penyelidikan tanah, kandungan tanah halus, dan koreksi *effective overburden pressure* ($(N_1)_{60cs}$). Nilai CRR didapat menggunakan persamaan berikut:

$$CRR = exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right) \dots\dots\dots(3)$$

Setelah itu, nilai *safety factor* (SF) terhadap potensi terjadinya likuefaksi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$SF = CRR/CSR \dots\dots\dots(4)$$

Salah satu perangkat lunak yang dapat digunakan untuk membantu perhitungan potensi likuefaksi adalah aplikasi Settle3 dari Rocscience. Settle3 dapat menganalisis menggunakan beberapa metode pendekatan empiris, salah satunya adalah metode Idriss dan Boulanger (2004). Peneliti lainnya, Maulana, Rifa dan Faris (2021) telah menggunakan Settle3 untuk membandingkan antara perangkat lunak dan perhitungan manual dengan hasil yang relatif mirip. Selain membutuhkan data N-SPT dan berat jenis satuan tanah, Settle3 juga membutuhkan data tinggi muka air tanah, persentase kandungan halus dan ukuran butir pasir D_{50} . Aplikasi Settle3 juga dapat dimanfaatkan untuk menggambar lapisan stratigrafi tanah.

Penentuan Kelas Situs dan Besaran Gempa

Mengacu pada SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, penentuan kelas situs tanah dapat menggunakan kecepatan gelombang geser rata-rata, nilai N-SPT lapisan rata-rata, dan/atau nilai kuat geser niralir lapisan rata-rata. Pada penelitian ini, terdapat data kecepatan gelombang geser hasil uji *downhole seismic* di lapangan. Berdasarkan nilai N-SPT rata-rata maupun nilai V_{S30} rata-rata (lihat Tabel 4), lokasi situs termasuk ke dalam kelas situs Tanah Sedang (SD).

Tabel 4. Shear wave velocity dari down hole seismic test pada BH-9

Depth (m)	N-SPT	Soil Type	V _{S30} (m/s)
1.5	45	SP	310.900
3.0	60	SP	327.590
4.5	35	SP	392.745
6.0	38	SP	360.750
7.5	60	SP	224.755
9.0	55	SP	234.440
10.5	52	SP	283.530
12.0	53	SP	386.740
13.5	50	SP	208.120
15.0	52	SP	236.840
16.5	24	SP	272.645
18.0	34	SP	394.170
19.5	41	SP	167.610
21.0	30	SP	355.180
22.5	33	SP	159.240
24.0	43	SP	368.660
25.5	44	SM	269.265
27.0	30	SM	373.820
28.5	36	SM	410.360
30.0	39	SM	374.430
Average	42.7		305.590

Dalam penelitian ini digunakan aplikasi LINI Binamarga dengan nilai PGA untuk Kabupaten Bantul (lokasi koordinat 110.3256°BT – 7.8775°LS) didapatkan 0,558 g. Nilai PGA yang dihasilkan merupakan nilai percepatan tanah pada batuan dasar sehingga harus mempertimbangkan *site class amplification factor* (F_{PGA}) agar mendapatkan percepatan tanah puncak maksimum di permukaan (PGA_M). Faktor amplifikasi kelas situs ditentukan dengan rata-rata nilai N-SPT atau rata-rata V_{S30} (lihat Tabel 5). Untuk hasil prediksi gerakan tanah pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 6. Hasil perkalian nilai F_{PGA} sebesar 1.0 dengan nilai PGA sebesar 0.558 g menghasilkan nilai PGA_M sebesar 0.558 g.

Tabel 5. Kelas situs faktor amplifikasi untuk Jembatan terhadap N-SPT

Site Class	N _{SPT}	PGA				
		≤0.1	0.2	0.3	0.4	≥0.5
SA	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
SB	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
SC	>50	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
SD	15-50	2.5	1.7	1.2	1.1	1.0
SE	<15	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

Sumber: SNI 8460:2017

Tabel 6. Nilai percepatan tanah puncak maksimum di permukaan

Metode	Sumber	PGA	F _{PGA}	PGA _M
Aplikasi LINI Bina- marga	Peta dan Sumber Bahaya Gempa 2017	0.558	1.0	0.558

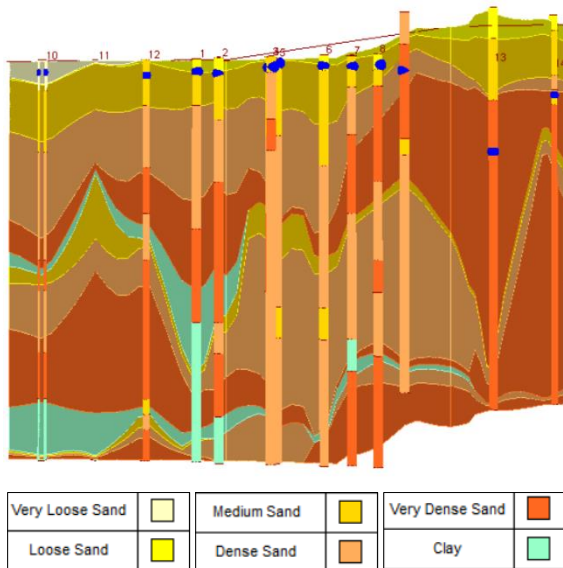
HASIL DAN ANALISIS

Hasil Preliminary Likuefaksi

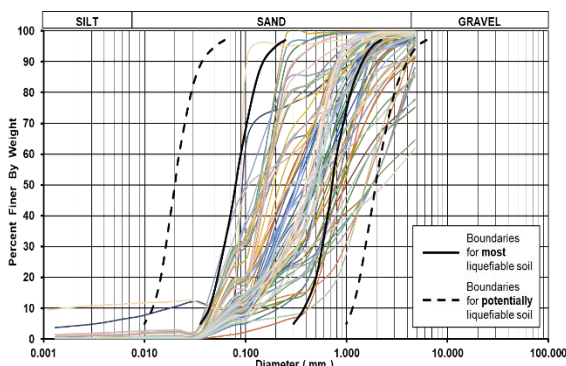
Penelitian ini menggunakan data uji penetrasi standar sebanyak 14 titik *borehole* termasuk hasil analisis distribusi ukuran butir di laboratorium. Lokasi *borehole* dan hasil stratigrafi dari nilai N-SPT (lihat Tabel 7 dan Gambar 8). Hasil penggambaran grafik gradasi butiran menunjukkan bahwa tanah secara dominan termasuk tanah yang paling mudah terlikuefaksi dan untuk sebagian lain termasuk dalam tanah yang berpotensi terlikuefaksi, sebagian kecil sisanya berada di luar garis *boundary* yang ditentukan (lihat Gambar 9).

Tabel 7. Lokasi *borehole*

Borehole	Location	GWL
BH-01	110.2930°E - 8.0073°S	-1.2 m
BH-02	110.2929°E - 8.0077°S	-1.5 m
BH-03	110.2931°E - 8.0084°S	-1.0 m
BH-04	110.2931°E - 8.0084°S	-1.0 m
BH-05	110.2933°E - 8.0084°S	-0.5 m
BH-06	110.2933°E - 8.0092°S	-1.0 m
BH-07	110.2935°E - 8.0095°S	-1.0 m
BH-08	110.2934°E - 8.0100°S	-1.0 m
BH-09	110.2937°E - 8.0103°S	-1.5 m
BH-10	110.2922°E - 8.0051°S	-1.2 m
BH-11	110.2925°E - 8.0058°S	-1.5 m
BH-12	110.2928°E - 8.0065°S	-1.5 m
BH-13	110.2948°E - 8.0113°S	-9.0 m
BH-14	110.2961°E - 8.0118°S	-3.0 m



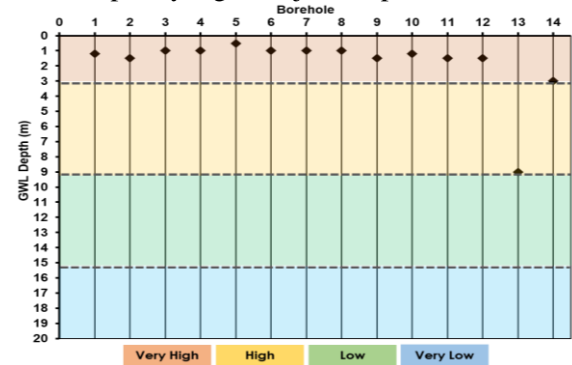
Gambar 8. Hasil stratigrafi lapisan tanah menggunakan aplikasi Settle3



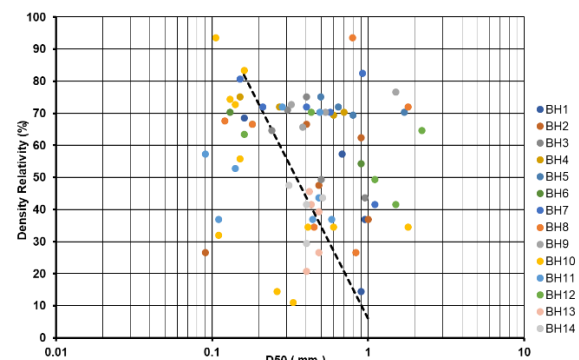
Gambar 9. Hasil distribusi analisis saringan

Untuk muka air tanah, pada semua lubang bor memiliki kedalaman <1.5 m, kecuali BH-13 dan BH-14. Hal ini menunjukkan kerentanan likuefaksi sangat tinggi pada daerah sekitar sungai Opak. Sementara di BH-13 dan BH-14, titik *borehole* sudah menjauhi bibir sungai dengan kenaikan elevasi permukaan tanah +5 m terhadap level muka air sungai dan memiliki level muka air tanah di 9 m dan 3 m berturut-turut (Gambar 10). Sedangkan, untuk korelasi D_{50} terhadap *density relativity* untuk $a_{max} < 0,6g$ dengan pendekatan Hakam (2020) terlihat bahwa kerentanan likuefaksi menyebar di BH-1 pada kedalaman 0-3 m, BH-2 pada kedalaman 0-4,5 m, BH-3 pada kedalaman 2,5-3 m, BH-4 tidak memiliki tanah yang tercairkan, BH-5 pada kedalaman 2,5-4,5 m, BH-6 tidak memiliki tanah yang tercairkan, BH-7 pada kedalaman 1-1,5 m, BH-8 pada kedalaman 1-3 m, BH-9 tidak memiliki tanah terlikuefaksi, BH-10 pada

kedalaman 1-3 m dan 7-18 m, BH-11 pada kedalaman 1.5-2 m, 11.5-12 m, dan 34-34.5 m, BH-12 pada kedalaman 10-10.5 m, BH-13 pada kedalaman 1-3 m, dan BH-14 pada kedalaman 1-4.5 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 10. Hasil kedalaman muka air tanah



Gambar 11. Hasil korelasi D_{50} terhadap *density relativity* (dengan $a_{max} < 0,6 g$)

Hasil Potensi Likuefaksi

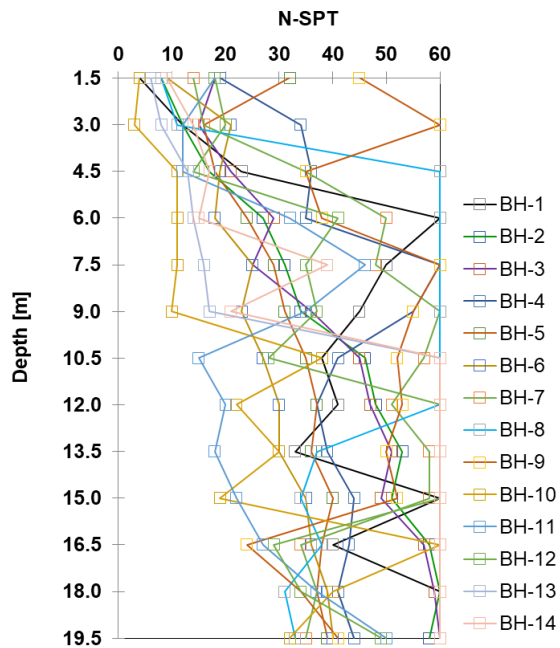
Analisis potensi likuefaksi menggunakan *simplified procedure* membutuhkan data berat jenis tanah hasil uji laboratorium. Dikarenakan keterbatasan data, nilai berat jenis tanah didapatkan dari korelasi empirik (Bowles 1977) mengacu pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8. Korelasi properties tanah non-koheusif

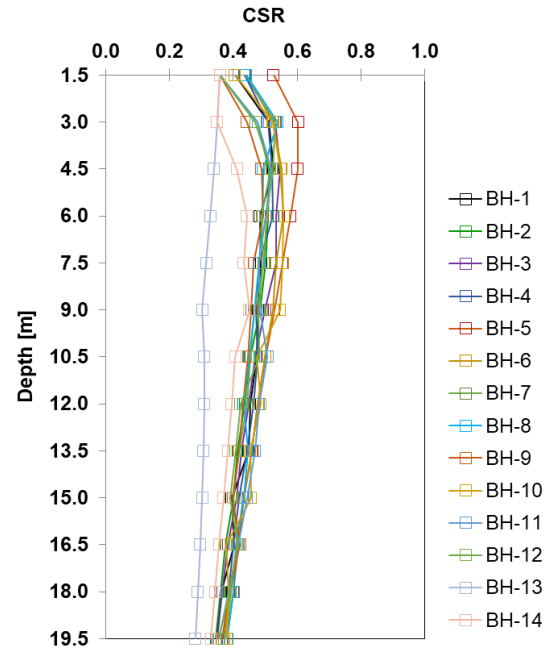
<i>Compactness</i>	<i>Very Loose</i>	<i>Loose</i>	<i>Medium Dense</i>	<i>Dense</i>	<i>Very Dense</i>
SPT N-value	0-4	4-10	10-30	30-50	>50
<i>Relative Density, Dr (%)</i>	0-15	15-35	35-65	65-85	85-100
<i>Internal Friction, φ (°)</i>	<28	28-30	30-36	36-41	>41
<i>Bulk unit weight (kN/m)</i>	<15.7	14.9-19.6	17.3-20.4	17.3-22.0	>20.4
<i>Submerged unit weight (kN/m)</i>	<9.4	8.6-10.2	9.4-11.0	10.5-13.4	>11.8

Sumber: Bowles (1977)

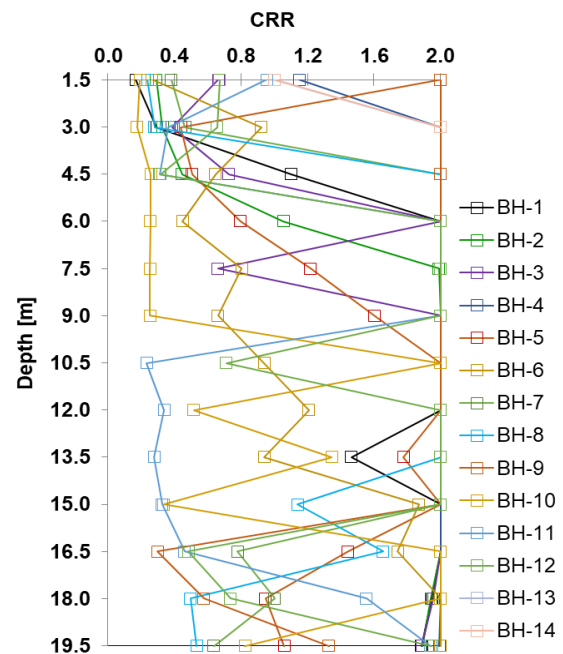
Besaran magnitud gempa yang digunakan berdasarkan kejadian Gempa Bantul 2006 dengan nilai magnitud Mw 6,2 dan nilai PGA ditentukan dari pembahasan sebelumnya adalah 0,558 g. Gambar 12 menunjukkan nilai N-SPT untuk semua titik *borehole*, sementara Gambar 13 dan 14 menunjukkan nilai CSR dan CRR berturut-turut untuk semua titik *borehole*. Sementara itu, untuk *safety factor*, terlihat bahwa sebaran nilai SF <1.0 secara dominan berada di kedalaman 1.5-6 m dan di beberapa lokasi tertentu juga terdapat di kedalaman >10.5 m (Gambar 14). Hasil ini selaras dengan stratigrafi tanah dimana lapisan teratas cenderung bertipe kepasiran lepas-medium. lapisan tengah dan bawah cenderung bertipe kepasiran medium-padat hingga sangat padat serta sedikit lapisan lempung di beberapa titik.



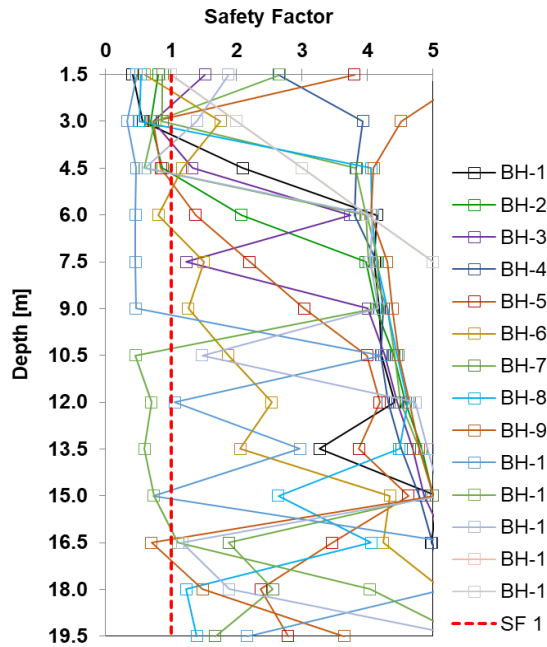
Gambar 12. Nilai N-SPT 14 titik *borehole*



Gambar 13. Nilai CSR 14 titik *borehole*



Gambar 14. Nilai CRR 14 titik *borehole*



Gambar 15. Nilai SF 14 titik borehole

Hasil Kuantitatif dan Kualitatif

Dalam upaya melakukan kuantitatif dan kualitatif potensi likuefaksi sebelumnya dilakukan oleh Iwasaki, Tokida, and Tatsuoka (1981) dengan menggunakan nilai *safety factor* terhadap potensi likuefaksi dan faktor kedalaman sebagai bobot. Kedalaman yang digunakan dalam perhitungan dibatasi hingga 20 m di bawah permukaan tanah. Metode tersebut dikenal dengan *liquefaction potential index* (LPI) yang didapatkan dari persamaan berikut:

$$LPI = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz \dots\dots\dots(5)$$

dimana *F* adalah faktor bobot untuk nilai *safety factor* dan *w(z)* adalah faktor bobot terhadap kedalaman, dan *z* merupakan kedalaman (m). Peneliti lainnya, Sonmez and Gokceuglu (2005) mengajukan pendekatan *liquefaction severity index* (LSI) seperti terlihat pada Gambar 16.

Sonmez and Gokceuglu (2005) melakukan pengembangan metode sebelumnya dengan mempertimbangkan data kejadian likuefaksi pada situs yang tidak terlikuefaksi padahal sebelumnya diprediksi berpotensi terjadi. Adapun perhitungannya mengacu pada persamaan berikut:

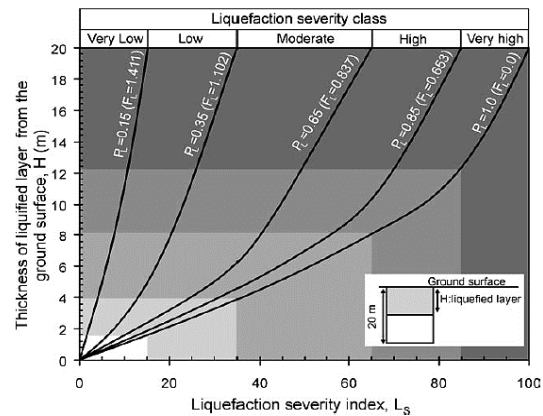
$$LSI = \int_0^{20} P_L(z) \cdot w(z) dz \dots\dots\dots(6)$$

$$P_L(z) = \frac{1}{1+(FS/0.96)^{4.5}} \text{ for } FS \leq 1.411$$

$$P_L(z) = 0 \text{ for } FS > 1.411 \dots\dots\dots(7)$$

$$w(z) = 10 - 0.5z \dots\dots\dots(8)$$

dimana *LSI* adalah *liquefaction severity index*, *P_L(z)* adalah probabilitas terjadinya likuefaksi dengan mempertimbangkan nilai *safety factor* dan *w(z)* adalah faktor bobot terhadap kedalaman ($\leq 20m$), dan *z* merupakan kedalaman ($\leq 20m$). metode ini membatasi nilai SF yang digunakan maksimum 1.411, di atas nilai tersebut *P_L(z)* dianggap 0. Sonmez and Gokceuglu (2005) juga melakukan kualitatif terhadap total nilai akhir yang didapat dari hasil kuantitatif dengan mengklasifikasikan menjadi 6 kelas (Tabel 9).



Gambar 16. Hubungan antara *liquefaction severity* dan ketebalan lapisan terlikuefaksi dari permukaan (Sonmez and Gokceuglu 2005)

Tabel 9. *Liquefaction Severity Classification*

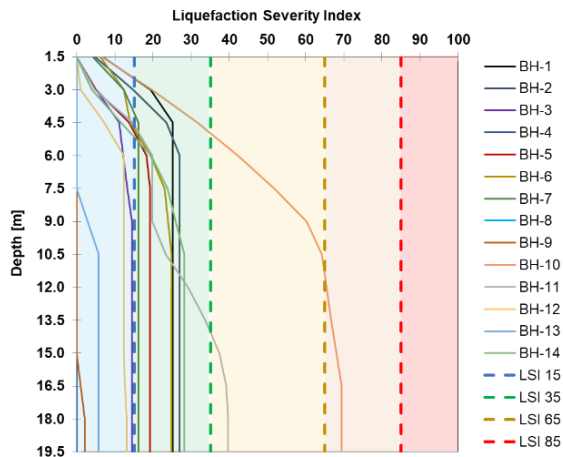
<i>LSI Range</i>	<i>Class</i>
LSI = 0	<i>Non-liquified</i>
0 < LSI ≤ 15	<i>Very low</i>
15 < LSI ≤ 35	<i>Low</i>
35 < LSI ≤ 65	<i>Moderate</i>
65 < LSI ≤ 85	<i>High</i>
85 < LSI ≤ 100	<i>Very high</i>

Sumber: Sonmez and Gokceuglu (2005)

Keluaran nilai LSI baik kuantitatif maupun kualitatif dapat digunakan untuk pemetaan mikrozonasi terhadap area yang ditinjau dengan menggunakan aplikasi QGIS.

Hasil pendekatan *liquefaction severity index* memiliki nilai klasifikasi yang lebih beragam dibandingkan metode lainnya. Dengan enam klasifikasi yang tersedia, hasil kualitatif menjadi lebih detail. Pada penelitian ini, hasil menunjukkan sebagian besar area Jembatan Kretek 2 berada di kategori rendah dan sangat rendah. terkhusus pada BH-4 masuk kategori tidak ada likuefaksi, BH-11 masuk kategori moderat, BH-10 masuk kategori tinggi. Nilai *liquefaction severity* paling kecil berada di BH-

4 sebesar 0.0 dan nilai paling besar di BH-10 sebesar 69.497. (Gambar 17 dan Tabel 10).



Gambar 17. Grafik hubungan nilai LSI dengan kedalaman tanah

Tabel 10. Hubungan ketebalan lapisan terlikuefaksi dengan nilai LSI.

Bore-hole	Liquefaction Thickness (m)	LSI	
		LS	Remark
BH-01	3.0	25.181	Low
BH-02	4.5	26.987	Low
BH-03	1.5	14.440	Very Low
BH-04	-	0.000	Non Liquefied
BH-05	3.0	19.160	Low
BH-06	3.0	24.813	Low
BH-07	1.5	16.148	Low
BH-08	3.0	25.317	Low
BH-09	1.5	2.104	Very Low
BH-10	10.5	69.497	High
BH-11	9.0	39.688	Moderate
BH-12	1.5	13.067	Very Low
BH-13	1.5	5.719	Very Low
BH-14	6.0	28.241	Low

PEMBAHASAN

Studi *preliminary* likuefaksi pada penelitian ini menggunakan nilai distribusi ukuran butir, kedalaman air tanah, dan korelasi D_{50} terhadap *density relativity* (dengan $a_{max} < 0,6$ g) dengan keluaran adanya kerentanan likuefaksi tinggi di setiap lokasi lubang bor kecuali pada BH-04, BH-06, dan BH-09 yang memiliki kerentanan likuefaksi rendah (Tabel 11). Sebagai metode deteksi awal untuk mengetahui kerentanan likuefaksi, studi *preliminary* bisa digunakan namun memiliki kelemahan yaitu tidak diketahui berapa besaran potensi

terjadinya, sehingga untuk menilai secara kuantitatif dan kualitatif potensi likuefaksi tetap diperlukan kajian lanjutan salah satunya *simplified procedure*.

Tabel 11. Rekapitulasi hasil *preliminary* likuefaksi

Bore-hole	Preliminary			Result
	Grain size	GWL	D50, DR dan a_{max}	
BH-01	Yes	Very high	Yes	High
BH-02	Yes	Very high	Yes	High
BH-03	Yes	Very high	Yes	High
BH-04	Yes	Very high	No	Low
BH-05	Yes	Very high	Yes	High
BH-06	Yes	Very high	No	Low
BH-07	Yes	Very high	Yes	High
BH-08	Yes	Very high	Yes	High
BH-09	Yes	Very high	No	Low
BH-10	Yes	Very high	Yes	High
BH-11	Yes	Very high	Yes	High
BH-12	Yes	Very high	Yes	High
BH-13	Yes	High	Yes	High
BH-14	Yes	Very high	Yes	High

Hasil analisis *simplified procedure* menunjukkan lapisan yang berpotensi likuefaksi terjadi di kedalaman antara 0-16.5 m dengan ketebalan likuefaksi antara 1.5-9 m, kecuali BH-4, tidak memiliki sama sekali lapisan likuefaksi karena seluruh lapisan masuk ke dalam pasir padat hingga sangat padat di sebagian besar lapisan tanah. Lapisan yang paling tebal terjadi likuefaksi adalah BH-10 dan BH-11 dengan ketebalan lapisan terlikuefaksi mencapai 9 m dan 6 m berturut-turut (Tabel 12). Besaran potensi likuefaksi yang dihasilkan selain bergantung pada stratigrafi tanah yang mempengaruhi nilai CRR, juga bergantung pada besarnya sumber seismik, semakin besar nilai M_w dan PGA maka akan semakin besar nilai CSR dan nantinya juga akan berdampak pada semakin kecilnya nilai SF.

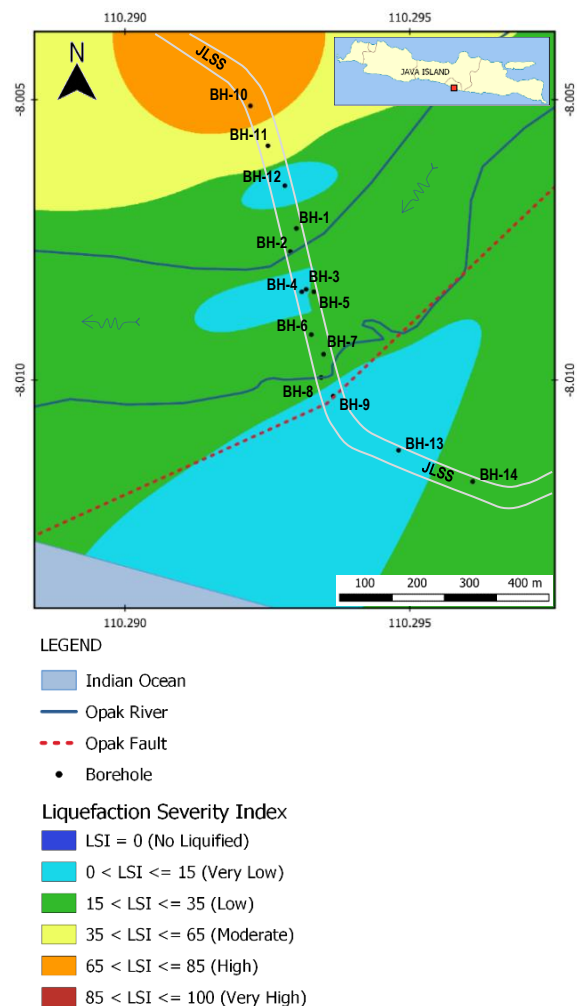
Tabel 12. Hasil analisis potensial likuefaksi

Bore-hole	Depth (m)	CSR	CRR	SF	Potential
BH-1	0.0-1.5	0.358	0.147	0.452	Yes
	1.5-3.0	0.349	0.244	0.756	
BH-2	0.0-1.5	0.358	0.258	0.794	Yes
	1.5-3.0	0.349	0.289	0.894	Yes
	3.0-4.5	0.339	0.289	0.881	Yes
BH-3	1.5-3.0	0.349	0.308	0.955	Yes
BH-4	0.0-1.5	0.358	0.781	>2.0	No
BH-5	1.5-3.0	0.590	0.487	0.909	Yes
	3.0-4.5	0.599	0.408	0.749	Yes
BH-6	0.0-1.5	0.439	0.220	0.550	Yes
	4.5-6.0	0.562	0.444	0.839	Yes
BH-7	0.0-1.5	0.434	0.328	0.831	Yes
BH-8	0.0-1.5	0.443	0.208	0.516	Yes
	1.5-3.0	0.535	0.258	0.530	Yes
BH-9	15.0-16.5	0.419	0.308	0.666	Yes
BH-10	0.0-1.5	0.405	0.193	0.476	Yes
	1.5-3.0	0.524	0.175	0.334	
	3.0-4.5	0.548	0.259	0.472	
	4.5-6.0	0.558	0.255	0.457	
	6.0-7.5	0.555	0.254	0.457	
	7.5-9.0	0.546	0.253	0.464	
BH-11	13.5-15.0	0.456	0.334	0.734	
	1.5-3.0	0.477	0.363	0.761	Yes
	3.0-4.5	0.519	0.310	0.597	
	9-10.5	0.507	0.232	0.457	
	10.5-12.0	0.481	0.337	0.701	
BH-12	12.0-13.5	0.468	0.278	0.594	
	13.5-15.0	0.443	0.326	0.736	
BH-13	3.0-4.5	0.516	0.314	0.608	Yes
BH-14	7.5-9.0	0.303	0.243	0.801	Yes
	1.5-3.0	0.349	0.299	0.856	Yes
	3.0-4.5	0.411	0.351	0.855	
	4.5-6.0	0.443	0.311	0.702	
	7.5-9.0	0.451	0.414	0.918	

Sementara itu, Hasil *liquefaction severity* menunjukkan korelasi dengan ketebalan likuefaksi yang terjadi. Semakin tipis ketebalan likuefaksi maka semakin rendah nilai LSI, begitu juga sebaliknya. Pada *borehole* yang memiliki tebal 1.5 m lapisan terlikuefaksi (BH-3, BH-9, BH-12, dan BH-13) seluruhnya masuk ke dalam kategori sangat rendah. Pada *borehole* yang memiliki tebal 3-4.5 m lapisan terlikuefaksi (BH-1, BH-2, BH-5, BH-6, BH-7, BH-8, dan BH-14) seluruhnya masuk ke dalam kategori rendah. Sedangkan pada *borehole* yang memiliki tebal 9 m dan 10.5 lapisan terlikuefaksi (BH-11 dan BH-10) berturut-turut termasuk ke dalam kategori moderat dan tinggi.

Setelah nilai kuantitatif dan kualitatif terhadap potensi likuefaksi didapatkan kemudian dilanjutkan dengan pemetaan

mikrozonasi di sekitar area *borehole* menggunakan QGIS untuk mendapatkan penampakan nilai kualitatif secara visual. Hasilnya pada badan air sungai opak hingga ke selatan terlihat warna hijau dominan yang menandakan area tersebut dikategorikan memiliki nilai LS rendah dan pada titik-titik tertentu berwarna biru muda yang menandakan nilai LS sangat rendah. Sedangkan semakin ke utara berwarna kuning hingga jingga yang menunjukkan nilai LS moderat dan tinggi berturut-turut (Gambar 18).



Gambar 18. Peta mikrozonasi *liquefaction severity* di area Jembatan Kretek 2

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penerapan studi *preliminary* sebagai langkah awal dalam mendeteksi potensi likuefaksi menunjukkan realibilitas terhadap hasil *simplified procedure* karena keduanya menunjukkan hubungan adanya kerentanan

likuefaksi pada keseluruhan area *borehole* termasuk pada BH-4 yang dikategorikan kerentanan likuefaksi rendah pada *preliminary* dan tidak ada potensi likuefaksi pada *simplified procedure*. Meski begitu, untuk menentukan nilai *safety factor* terhadap potensi likuefaksi tetap perlu dilakukan pendekatan dengan *simplified procedure*. Hasil pendekatan *simplified procedure* pada penelitian ini menunjukkan bahwa Muara Sungai Opak memiliki potensi likuefaksi di seluruh *bored hole* kecuali BH-4. Lapisan potensi likuefaksi terjadi di kedalaman antara 0-16.5 m dengan ketebalan likuefaksi antara 1.5-9 m.

Lebih lanjut, hasil analisis kuantitatif dan kualitatif menggunakan *liquefaction severity index*, Pada BH-3, BH-9, BH-12, dan BH-13 memiliki kategori sangat rendah. Pada BH-1, BH-2, BH-5, BH-6, BH-7, BH-8, dan BH-14 memiliki kategori rendah. Pada BH-11 memiliki kategori moderat. Sedangkan pada BH-10 termasuk kategori tinggi. Terdapat korelasi yang konsisten antara tebal lapisan terlikuefaksi terhadap nilai *liquefaction severity* yang dihasilkan. Hasil ini kemudian digambarkan dalam bentuk Peta mikrozonasi *liquefaction severity* area Jembatan Kretek 2 untuk memudahkan pengambil kebijakan dalam memastikan sistem fondasi yang digunakan telah aman dari bahaya likuefaksi.

Saran

Pendekatan lainnya juga dapat digunakan untuk studi lebih lanjut diantaranya; *liquefaction potential index* oleh Iwasaki et al. (1981), *liquefaction reduction number* oleh Chung et al. (2017), dan *liquefaction risk index* oleh Lee et al. (2003), *lateral displacement index* oleh Zhang et al. (2004), dan juga nilai penurunan tanah pasca likuefaksi dengan *post-liquefaction reconsolidation settlement* oleh Idriss and Boulanger (2008).

Selain itu, setelah potensi likuefaksi diketahui, perlu dilanjutkan analisis dampak likuefaksi pada fondasi jembatan baik terhadap kapasitas dukung aksial maupun lateral tiang agar kejadian keruntuhan saat likuefaksi terjadi bisa dihindari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa terimakasih penulis sampaikan kepada Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Nasional Wilayah Provinsi D.I.

Yogyakarta, Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Tengah – D.I. Yogyakarta yang telah berkenan memberikan data teknis LOT3 - Pembangunan Jembatan Kretek 2.

DAFTAR PUSTAKA

- Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. 2004. Evaluating The Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays. *Neuroscience Letters* 339 (December): 123–26.
- Buana, Taufik W., Wawan H. Ryan Nur R., Risna W. W., Ginda H, Wiyono, dan William P. S. 2019. Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia. Bandung: Badan Geologi, Kementerian Energi Sumber Daya Mineral.
- Cetin, K. O., Raymond B. Seed, Robert E. S. Moss, and Armen Der Kiureghian. 2000. Field Case Histories for SPT-Based in Situ Liquefaction Potential Evaluation. Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT-2000/09.
- Gibbs, H., and W. Holtz. 1957. "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Pénétration Testing. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* 35–39. London: William Clowes and Sons.
- Hakam, Abdul. 2020. Analisis Praktis Potensi Likuefaksi: Referensi Untuk Peneliti Dan Praktisi. Padang: Andalas Press.
- Idriss, I. M. 1999. Presentation Notes: An Update of The Seed-Idriss Simplified Procedure For Evaluating Liquefaction Potential. In *Proceedings, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis* 37–52. Washington: FHWA
- Idriss, I. M., and Ross W Boulanger. 2008. Soil Liquefaction During Earthquakes. *Earthquake Engineering Research Institute* MNO-12, 29.
- Iwasaki, T., Tokida, K., and Tatsuoka, F. 1981. Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure. In *Proceedings: First International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/01icrageesd/session02/12>.
- Mase, Lindung Zalbuin. 2017. Experimental Liquefaction Study of Southern Yogyakarta Using Shaking Table. *Jurnal Teknik Sipil ITB* 24 (1): 11–18. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.1.2>.
- Maulana, A., Rifa Ahmad, and Faris Fikri. 2020. Liquefaction Potential Analysis on Runway Construction Based on Soil Engineering Properties. In *4th ICEEDM 2019, 02003:3–8. E3S Web of Conferences* 156, 02003.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015602003>.
- Seed, H. Bolton, and Izzat M. Idriss. 1970. A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97(9).
- Sonmez, H., and C. Gokceoglu. 2005. A Liquefaction Severity Index Suggested for Engineering Practice. *Environmental Geology* 48 (1): 81–91. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9>.
- Supartoyo. 2006. “Gempabumi Yogyakarta Tanggal 27 Mei 2006.” *Buletin Berkala Merapi* 3 (2): 36–55.
- Terzagi, Karl, Ralph B. Peck, and Gholamreza Mesri. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons Inc.
- Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against liquefaction in sand deposits. In: *The Seminar of the Port and Harbour Research Institute, Yokosuka: Ministry of Transport, Japan, January*, pp. 3.1–3.33.
- Youd, T. L., J. C. Tinsley, D. M. Perkins, E. J. King, and R. F. Preston. 1979. “Liquefaction Potential Map of San Fernando Valley, California.” *Geological Survey Circular (United States)*, no. 807: 37–48.
- Zakariya, Ali. 2022. “Laporan Kegiatan Magang : LOT 3 – Pembangunan Jembatan Kretek 2.” Universitas Gadjah Mada. Sleman.