Penilaian Geoteknik terhadap Struktur Tanah Wilayah Pantai Puger Jember dalam Rangka Mitigasi Likuifaksi

Arief Alihudien[1, 2*], Nanang Saiful Rizal[1, 2], Latifa Mirzatika Al-Rosyid[1], Relova Rayya Agastya Hyrae[1], Zinda Aufa Taskia[1]

[1]Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121
[2]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

*Korespondensi: ariefalihudien@unmuhjember.ac.id

Abstrak. Penilaian geoteknik adalah komponen penting dalam proyek konstruksi modern, yang tidak hanya memastikan stabilitas struktur tetapi juga meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan memahami karakteristik tanah dan batuan, insinyur geoteknik dapat merancang solusi yang berkelanjutan dan berkontribusi pada pembangunan yang lebih ramah lingkungan. Puger Jember adalah suatu wilayah strategis terhadap pengembangan infrastruktur, karena merupakan wilayah yang dilewati jalan lintas selatan pulau Jawa. Mengingat pentingnya lokasi tersebut dalam artikel ini akan dikaji struktur tanah wilayah pantai Puger terhadap potensi likuifaksi. Likuifaksi adalah tanah pasir jenuh kehilangan kekuatan akibat getaran. Adapun metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan observasi lapangan terhadap 1 titik uji *bore*. Hasil analisa tanah dapat digambarkan bahwa tanah memiliki karakteristik dan potensi likuifaksi. Mitigasi terhadap potensi likuifaksi yang ada akan sangat tergantung infrastruktur yang dibangun. Mitigasi terhadap pembangunan infrastruktur jalan dapat menggunakan *stone column* dan *cement grouting*.

Kata Kunci: likuifaksi, Pantai Puger, penilaian geoteknik

1. PENDAHULUAN

Fenomena likuifaksi merupakan salah satu dampak serius dari gempa bumi yang terjadi pada tanah berpasir jenuh. Ketika getaran seismik mengenai lapisan tanah dengan karakteristik butiran lepas dan kadar air tinggi, kekuatan geser tanah dapat menurun drastis sehingga tanah berperilaku menyerupai fluida. Kondisi ini menimbulkan kerusakan struktural yang signifikan, seperti penurunan permukaan tanah, keruntuhan fondasi, serta gangguan pada infrastruktur vital.

Indonesia, yang terletak di kawasan *Ring of Fire*, memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap gempa bumi dan likuifaksi. Salah satu wilayah yang patut mendapat perhatian adalah Pantai Puger di Kabupaten Jember, Jawa Timur. Secara geologi, kawasan ini didominasi oleh endapan pasir pantai, aluvial, serta material sedimen lepas dengan muka air tanah relatif dangkal. Selain itu, letaknya yang berdekatan dengan zona subduksi selatan Jawa meningkatkan potensi terjadinya guncangan kuat yang berpeluang memicu likuifaksi. (Adri et al., 2020)

Pantai Puger merupakan kawasan pesisir yang memiliki fungsi strategis, baik sebagai pusat aktivitas nelayan, pelabuhan perikanan, maupun kawasan permukiman. Kerentanan terhadap

likuifaksi di daerah ini tidak hanya menimbulkan risiko kerusakan fisik, tetapi juga mengancam keberlanjutan aktivitas ekonomi dan keselamatan masyarakat pesisir. Oleh karena itu, kajian struktur tanah di Pantai Puger menjadi penting untuk dilakukan sebagai langkah awal dalam memahami tingkat kerawanan serta merumuskan strategi mitigasi yang tepat.

Kajian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik fisik dan mekanik tanah di Pantai Puger, potensi terjadinya likuifaksi, serta rekomendasi langkah mitigasi yang dapat diterapkan. Dengan adanya pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi tanah, maka upaya mitigasi bencana dapat dirancang lebih efektif, baik melalui pendekatan teknis, rekayasa fondasi, maupun pengelolaan tata ruang wilayah pesisir.

2. METODE PENELITIAN

Kajian struktur tanah di Pantai Puger dilakukan melalui beberapa tahapan penelitian yang meliputi studi literatur, investigasi lapangan, uji laboratorium, dan analisis geoteknik.

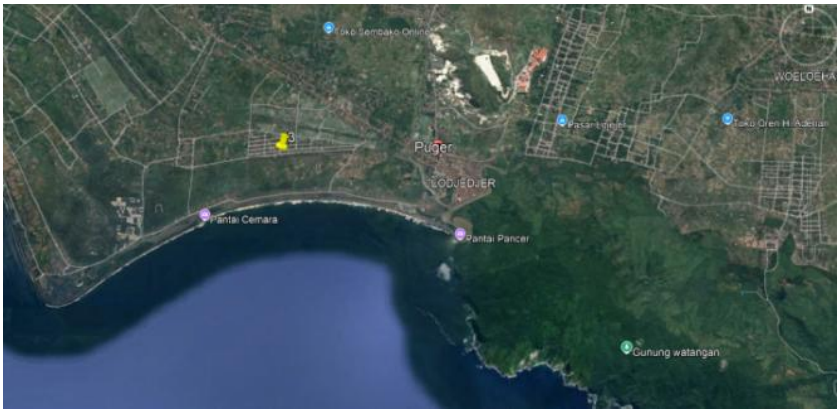
2.1 Studi Literatur

Tahap awal dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder berupa peta geologi, peta topografi, data seismotektonik, serta catatan kejadian gempa di wilayah selatan Jawa. Literatur terkait fenomena likuifaksi dan metode analisis kerawanan tanah juga dijadikan dasar dalam merancang metode penelitian.

2.2 Investigasi Lapangan

Pengambilan data lapangan dilakukan dengan tujuan memperoleh informasi kondisi tanah aktual di Pantai Puger. Tahapan ini meliputi:

- Survei lokasi, untuk mengidentifikasi karakteristik geomorfologi dan kondisi hidrogeologi.
- Pengambilan sampel tanah dengan metode bor tangan (*hand boring*) atau bor mesin pada beberapa titik representatif.
- Pengukuran muka air tanah, untuk mengetahui kedalaman jenuh air.
- Pengujian lapangan menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) guna memperoleh data resistensi tanah terhadap penetrasi.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan sampel (8°22'8" S, 113°26'9" T)

2.3 Uji Laboratorium

Sampel tanah dianalisis di laboratorium untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik tanah berikut:

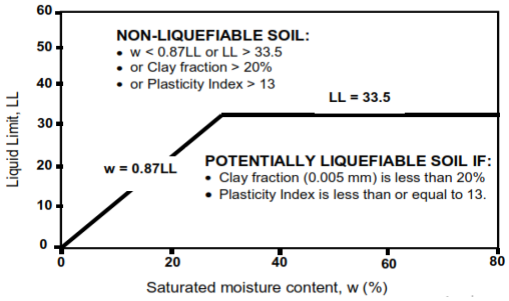
- Analisis gradasi butiran (*sieve analysis* dan *hydrometer test*).
- Kadar air, berat jenis, dan kepadatan tanah.
- Uji batas Atterberg untuk mengetahui plastisitas tanah.

2.4 Analisis Potensi Likuifaksi

Analisis dilakukan dengan mengacu pada metode *Simplified Procedure Seed & Idriss* (1971) yang membandingkan *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dengan *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*. Parameter utama diperoleh dari hasil uji SPT dan data percepatan gempa rencana (PGA). Hasil analisis digunakan untuk menentukan faktor keamanan (FS) terhadap likuifaksi pada setiap kedalaman lapisan tanah.

Analisis terhadap jenis tanah yang memungkinkan terjadi likuifaksi adalah pasir jenuh air, berdiameter halus sampai agak kasar maupun tanah pasir kelanauan, terutama apabila sistem drainasenya tidak baik, sebagaimana tampak dalam Gambar 2. Menurut Youd & Gilstrap (1999), beberapa kriteria yang membuat jenis tanah berpotensi mengalami likuifaksi adalah:

1. koefisien keseragaman (Cu) = $D_{60}/D_{10} < 10$
2. diameter tengah berada di antara 0,02 mm dan 1 mm (0,02 mm < D_{50} < 1 mm)
3. kandungan fines < 20%
4. kepadatan relatif (DR) < 75%
5. indeks plastisitas (IP) < 13%



Gambar 2. Kriteria Cina Disesuaikan dengan ASTM

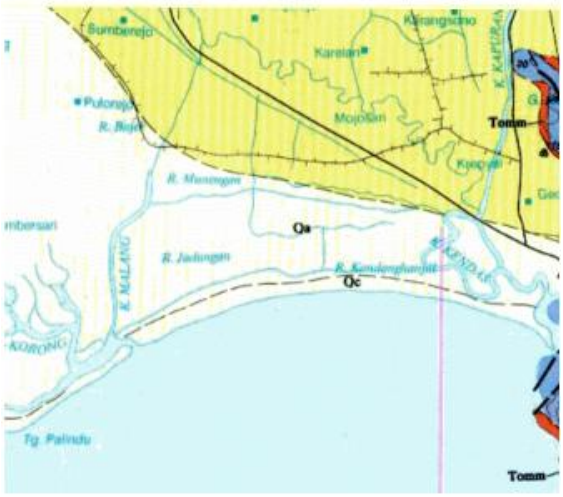
2.5 Penyusunan Rekomendasi Mitigasi

Berdasarkan hasil kajian, dirumuskan rekomendasi langkah mitigasi struktural dan non-struktural, seperti teknik perbaikan tanah, desain fondasi adaptif, serta pengelolaan tata ruang wilayah pesisir.

3. HASIL

3.1. Karakteristik Geologi dan Tanah di Pantai Puger

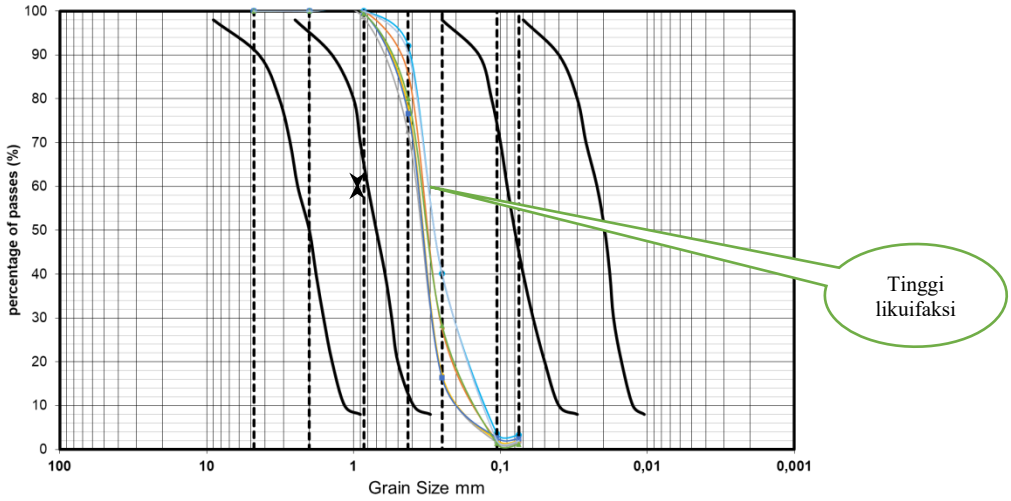
Hasil investigasi menunjukkan bahwa Pantai Puger tersusun oleh endapan pasir pantai, aluvial, serta material sedimen lepas yang berasal dari aktivitas marin dan fluvial. Tanah di kawasan ini memiliki distribusi butiran didominasi pasir dengan fraksi halus yang relatif rendah. Sifat ini menjadikan tanah berpermeabilitas tinggi dan mudah jenuh oleh air laut maupun air tanah dangkal. Kedalaman muka air tanah yang berkisar 1–3 meter memperkuat indikasi kerentanan terhadap likuifaksi, terutama pada lapisan pasir lepas.



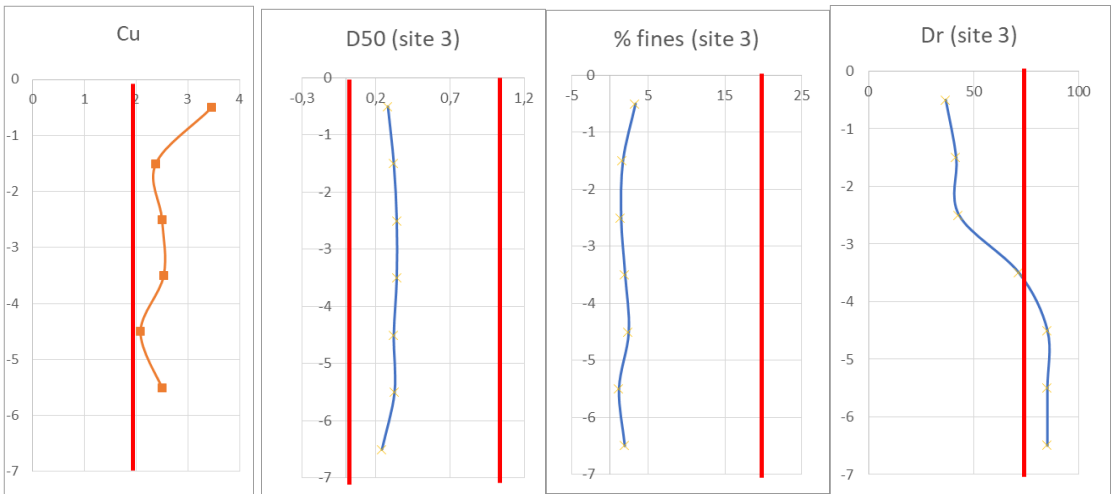
Gambar 3. Peta geologi daerah Jember Selatan disusun dari gabungan peta geologi (Noor et al., 2017)

3.2. Potensi Likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi berdasarkan karakteristik butiran dapat dilakukan dengan melihat hasil uji gradasi, uji batas batas konsistensi, dan kepadatan tanah (Hakam, 2016). Hasil uji gradasi dapat dilihat pada Gambar 4 yang menunjukan grafik distribusi butiran tanah pada beberapa kedalaman berada pada wilayah potensi yang tinggi. Sementara itu, nilai koefisien keseragaman Cu, diameter tengah D_{50}, kandungan fines (%), dan kepadatan relatif (DR) untuk masing-masing kedalaman menunjukkan berpotensi likuifaksi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Jenis tanah secara keseluruhan merupakan tanah pasir. Dengan demikian dapat disebutkan bahwa tanah tersebut memiliki plastisitas rendah.

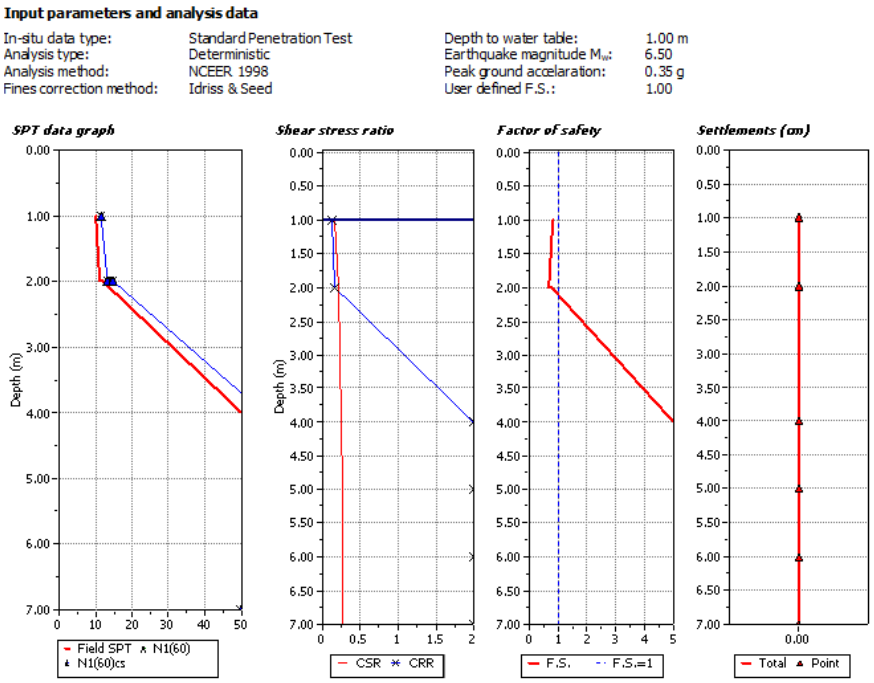


Gambar 4. Hasil analisis gradasi butiran tanah



Gambar 5. Analisis Potensi Likuifaksi berdasar Data Laboratorium (koefisien keseragaman Cu, diameter tengah D_{50}, kandungan fines %, dan kepadatan relatif DR).

Hasil analisis potensi likuifaksi tanah menggunakan metode *Simplified Procedure* (Seed & Idriss, 1971) menunjukkan bahwa beberapa lapisan tanah pada kedalaman dangkal (1,0 m – 2,5 m) memiliki faktor keamanan (FS) < 1,0 (Gambar 6), yang berarti sangat rentan terhadap likuifaksi. Faktor kerentanan semakin meningkat ketika dikaitkan dengan percepatan gempa rencana (PGA) dari zona subduksi selatan Jawa yang dapat mencapai 0,3–0,4 g. Hal ini sejalan dengan kajian terdahulu yang menyebutkan bahwa wilayah pesisir selatan Jawa Timur memiliki' potensi tinggi terhadap deformasi tanah akibat gempa berkekuatan besar (Alihudien et al., 2019).



Gambar 6. Analisis Potensi Likuifaksi berdasar Uji SPT (*Standat Penetration Test*)

Tabel 1. Hasil perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR telah di-*adjust* dan dinormalisasi)

Titik	Depth (m)	Sigma (kPa)	u (kPa)	Sigma' (kPa)	r_d	CSR	MSF	$CSR_{eq,M=7,5}$	K_{sigma}	CSR^*
1	1,00	19	0,00	19,00	0,99	0,23	1,14	0,16	1,00	0,16
2	2,00	38	9,81	28,19	0,98	0,30	1,14	0,21	1,00	0,21
3	2,00	38	9,81	28,19	0,98	0,30	1,14	0,21	1,00	0,21
4	4,00	76	29,43	46,57	0,97	0,36	1,14	0,25	1,00	0,25
5	5,00	95	39,25	55,76	0,96	0,37	1,14	0,26	1,00	0,26
6	6,00	114	49,05	64,95	0,95	0,38	1,14	0,26	1,00	0,26
7	7,00	133	58,86	74,14	0,95	0,39	1,14	0,27	1,00	0,27

Keterangan:
Depth : *Depth from free surface, at which SPT was performed* (m)
Sigma : *Total overburden pressure at test point* (kPa)
u : *Water pressure at test point, during earthquake* (kPa)
Sigma' : *Effective overburden pressure, during earthquake* (kPa)
r_d : *Non-linear shear mass factor*
CSR : *Cyclic Stress Ratio*
MSF : *Magnitude scalling factor*
CSReq,M=7,5 : *CSR adjusted for* M=7,5
Ksigma : *Effective overburden stress factor*
CSR* : *CSR fully adjusted*

3.3 Dampak yang Ditimbulkan

Apabila likuifaksi terjadi di Pantai Puger, dampak potensial yang dapat timbul antara lain:

- penurunan permukaan tanah *(settlement*) yang dapat merusak bangunan permukiman pesisir;
- hilangnya daya dukung fondasi tiang dan dangkal, sehingga infrastruktur seperti jalan akses, pelabuhan perikanan, dan fasilitas publik berpotensi mengalami kerusakan;
- deformasi lateral tanah yang dapat menggeser struktur bangunan maupun jaringan utilitas bawah tanah; dan
- gangguan terhadap aktivitas ekonomi nelayan yang bergantung pada pelabuhan dan infrastruktur pesisir.

3.4. Strategi Mitigasi

Berdasarkan hasil kajian (Yasuda et al., 1996; Sayehvand & Kalantari, 2012; Andrus & Chung, 1995), berikut strategi mitigasi yang relevan untuk mengurangi risiko likuifaksi di Pantai Puger:

- rekayasa tanah (*soil improvement*): metode *vibroflotation*, *stone column*, atau *compaction grouting* untuk meningkatkan kepadatan relatif lapisan pasir.
- desain fondasi adaptif: penggunaan fondasi dalam seperti tiang pancang yang menembus lapisan rentan likuifaksi menuju tanah keras.
- pengolahan pengendalian muka air tanah: penerapan sistem drainase vertikal (*drainage well*) atau drainase horizontal untuk menurunkan tekanan pori berlebih saat gempa.
- pengelolaan tata ruang pesisir: pembangunan infrastruktur vital ditempatkan di zona aman atau diperkuat dengan teknologi fondasi tahan likuifaksi.
- mitigasi non-struktural: peningkatan kesadaran masyarakat pesisir melalui edukasi kebencanaan, simulasi evakuasi, serta integrasi mitigasi likuifaksi dalam rencana pembangunan daerah.

4. DISKUSI

Hasil kajian ini menegaskan bahwa wilayah Pantai Puger memiliki potensi kerentanan yang tinggi terhadap terjadinya likuifaksi, terutama karena karakteristik tanah berlapis pasir lepas dengan kedalaman muka air tanah yang relatif dangkal. Kondisi ini semakin diperparah oleh letak geografis Puger yang berdekatan dengan zona seismik aktif di selatan Jawa, sehingga guncangan gempa dengan intensitas sedang hingga kuat berpotensi besar memicu terjadinya likuifaksi. Meski demikian, tingkat risiko nyata tidak hanya ditentukan oleh kondisi tanah semata, tetapi juga dipengaruhi oleh kombinasi berbagai faktor, seperti intensitas gempa yang terjadi, kondisi hidrogeologi setempat, kedalaman muka air tanah, serta distribusi infrastruktur vital dan permukiman di kawasan rawan. Oleh sebab itu, pemahaman potensi bahaya perlu diikuti dengan penilaian risiko yang lebih terintegrasi, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan strategi mitigasi.

Lebih lanjut, pendekatan multidisiplin sangat diperlukan dalam menanggulangi ancaman likuifaksi di Puger. Ilmu geoteknik berperan dalam analisis kondisi tanah dan rekomendasi teknik perbaikan, geologi berkontribusi dalam pemetaan zona rawan gempa, sedangkan ilmu perencanaan tata ruang dan kebijakan mitigasi bencana penting dalam menentukan pemanfaatan lahan yang aman serta tata kelola risiko. Integrasi keempat aspek ini akan menghasilkan strategi mitigasi yang lebih komprehensif, tidak hanya berupa intervensi teknis di lapangan, tetapi juga penguatan kebijakan pembangunan berkelanjutan di kawasan pesisir.

Di sisi lain, meskipun metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini—berdasarkan data uji lapangan dan laboratorium—telah mampu memberikan gambaran awal potensi likuifaksi, keterbatasan data menjadi salah satu kendala utama yang perlu diperhatikan. Jumlah titik bor yang masih terbatas, kedalaman investigasi yang belum merata di seluruh area studi, serta keterbatasan parameter laboratorium dapat memengaruhi tingkat akurasi hasil analisis. Kondisi ini dapat menyebabkan adanya bias dalam penentuan zona kerentanan, sehingga perlu dikoreksi dengan data tambahan yang lebih detail dan menyeluruh.

Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat dianjurkan dengan cakupan wilayah yang lebih luas serta integrasi metode analisis yang lebih beragam, termasuk pemodelan numerik berbasis perangkat lunak geoteknik untuk mensimulasikan respon tanah terhadap berbagai skenario gempa. Dengan adanya kajian lanjutan tersebut, hasil penelitian tidak hanya memberikan peta kerentanan, tetapi juga mampu menyajikan rekomendasi teknis perbaikan tanah serta strategi mitigasi yang lebih aplikatif. Pada akhirnya, penguatan basis data dan integrasi kajian multidisiplin akan mendukung upaya pemerintah daerah maupun masyarakat dalam mengurangi dampak bencana likuifaksi di wilayah Pantai Puger.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kondisi geologi dan tanah Pantai Puger didominasi oleh material pasir lepas dan sedimen aluvial dengan muka air tanah dangkal (1–3 meter). Karakteristik ini membuat kawasan pesisir Pantai Puger memiliki kerentanan tinggi terhadap likuifaksi.
2. Analisis potensi likuifaksi menunjukkan bahwa lapisan tanah pada kedalaman dangkal (0–10 meter) memiliki nilai faktor keamanan < 1, sehingga berisiko mengalami kehilangan kekuatan geser saat terjadi gempa. Hal ini dapat berdampak pada penurunan permukaan tanah, deformasi lateral, serta kerusakan fondasi bangunan dan infrastruktur pesisir.

3. Mitigasi likuifaksi di Pantai Puger dapat dilakukan melalui kombinasi pendekatan struktural dan non-struktural, meliputi:
   - perbaikan tanah (*ground improvement*) untuk meningkatkan kepadatan tanah,
   - penggunaan pondasi tiang dalam pada infrastruktur vital,
   - pengendalian muka air tanah dengan sistem drainase, dan
   - pengaturan tata ruang serta edukasi masyarakat terkait risiko likuifaksi.

Dengan demikian, kajian struktur tanah di Pantai Puger memberikan dasar penting dalam perencanaan mitigasi bencana. Implementasi rekomendasi teknis dan non-teknis diharapkan mampu mengurangi risiko kerusakan infrastruktur serta melindungi masyarakat pesisir dari dampak likuifaksi akibat gempa bumi di masa mendatang.

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penilaian geoteknik terhadap struktur tanah di wilayah Pantai Puger, Jember, terdapat beberapa hal yang dapat disarankan untuk penelitian maupun implementasi selanjutnya. Pertama, cakupan lokasi penelitian sebaiknya diperluas hingga ke kawasan permukiman dan infrastruktur penting, sehingga potensi likuifaksi dapat dipetakan secara lebih komprehensif. Kedua, metode pengujian geoteknik yang digunakan dapat lebih diperkaya, misalnya dengan menambahkan uji geofisika seperti *shear wave velocity (Vs30)*, *MASW*, atau *microtremor* guna memperkuat analisis. Selanjutnya, aspek hidrogeologi, khususnya pengaruh muka air tanah dan fluktuasi pasang surut, perlu dimasukkan dalam analisis untuk menghasilkan pemodelan yang lebih realistis.

Di samping itu, pengembangan model numerik dengan perangkat lunak geoteknik seperti PLAXIS atau FLAC disarankan agar dapat memprediksi respon tanah terhadap berbagai skenario gempa. Kajian mitigasi juga perlu dilengkapi, baik dari sisi struktural melalui teknik perbaikan tanah (*densification*, *grouting*, atau stabilisasi material), maupun non-struktural seperti pemetaan zona rawan, pengaturan tata ruang, serta sosialisasi mitigasi kepada masyarakat. Penelitian selanjutnya diharapkan melibatkan kolaborasi lintas disiplin dengan bidang geologi, oseanografi, dan perencanaan wilayah agar strategi mitigasi lebih terpadu. Terakhir, monitoring jangka panjang melalui pemasangan sensor getaran tanah maupun pengamatan muka air tanah sangat dianjurkan untuk menyediakan data berkelanjutan sebagai dasar kebijakan pembangunan dan mitigasi bencana di wilayah pesisir Puger.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jember atas dukungan fasilitas dan data yang diberikan.

REFERENSI

Adri, W., Sabri, L., & Wahyuddin, Y. (2020). Pembuatan peta jalur evakuasi bencana gunung api dan persebaran lokasi shelter menggunakan metode network analyst (Studi Kasus: Gunung Merapi, Boyolali-Magelang). *Jurnal Geodesi UNDIP, 10*(1), 189–196. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/29693

Alihudien, A., Suhartinah, S., & Warnana, D. (2019). Analysis of liquefaction potential based on standard penetration test (SPT) in Puger, Jember, Indonesia. *102–108*. https://doi.org/10.4108/eai.24-10-2018.2280508

Andrus, R. D., & Chung, R. M. (1995). Ground improvement techniques for liquefaction remediation near existing lifelines. *National Institute of Standards and Technology Report NISTIR 5714*, 1–82. https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NIST/PB96128111.pdf

Hakam, A. (2016). Laboratory liquefaction test of sand based on grain size and relative density. *Journal of Engineering and Technological Sciences, 48*(3), 334–344. https://doi.org/10.5614/J.ENG.TECHNOL.SCI.2016.48.3.7

Noor, M. R. S., Warnana, D. D., Widodo, A., & Alihudien, A. (2017). Profiling kecepatan gelombang geser (Vs) berdasarkan pengukuran mikrotremor studi kasus Kecamatan Puger, Jember. *Jurnal Teknik ITS, 6*(2), 2–5. https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.23578

Sayehvand, S., & Kalantari, B. (2012). Use of grouting method to improve soil stability against liquefaction: A review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17*(K), 1559–1566.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97*(9), 1249–1273. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662

Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K., & Shinkawa, N. (1996). Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction. *Soils and Foundations, Special*, 99–107. https://doi.org/10.3208/sandf.36.special_99

Youd, T. L., & Gilstrap, S. D. (1999). Liquefaction and deformation of silty and fine-grained soils. *Proceedings of the 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, V.3*, 1013–1020.