

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut ialah beberapa kesimpulan yang dapat disampaikan.

- Penelitian difokuskan untuk mempelajari fenomena likuifaksi yang terjadi di Desa Sibalaya, Kecamatan Tanambulava, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah pasca Gempa Palu Donggala yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 yang diakibatkan oleh pergerakan sesar Palu Koro.
- Gempa bumi yang terjadi pada tanggal 28 September 20218 terdiri dari 10 gempa, namun 4 diantaranya merupakan gempa besar yaitu 1 gempa *main shock* dengan magnitudo 7.5 Mw dan 3 gempa *after shock* dengan magnitudo 6.02 Mw, 6.2 Mw, dan 6.37 Mw.
- Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dengan menggunakan formula atenuasi (metode Donovan dan Esteva), diketahui bahwa gempa yang berpotensi untuk menyebabkan terjadinya likuifaksi dan tanah longsor di Desa Sibalaya ialah gempa bumi *after shock* dengan magnitudo 6.37 Mw. Berdasarkan perhitungan atenuasi tersebut, perkiraan akselerasi yang terjadi di Desa Sibalaya ialah sebesar 0.17 g.
- Berdasarkan peta geologi lembar Palu dan sekitarnya, Desa Sibalaya berada pada daerah endapan sungai, limbah banjir, dan alur sungai purba (Q_{al}). Endapan sungai (aluvium) pada umumnya merupakan lapisan dengan butiran yang lepas

sehingga sangat rentan terhadap terjadinya likuifaksi akibat peningkatan air pori eksese.

- Berdasarkan hasil pengamatan visual terhadap kondisi material tanah pada sisi permukaan diketahui bahwa material tanah didominasi oleh material tanah pasir kelanauan dengan kepadatan lepas.
- Penyelidikan geoteknik berupa pengeboran dalam, pengujian sondir, dan pengujian CPTu telah dilakukan pada area Desa Sibalaya oleh Tim Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) dan Tim Peneliti Universitas Katolik Parahyangan (Unpar). Dari hasil penyelidikan geoteknik tersebut, diketahui bahwa material tanah didominasi oleh material pasir kelanauan sehingga hal tersebut mengkonfirmasi hasil pengamatan visual terhadap jenis material yang terlihat pada sisi permukaan.
- Berdasarkan hasil kajian potensi likuifaksi yang telah dilakukan untuk daerah Desa Sibalaya terhadap kriteria histori, kriteria geologi, kriteria komposisi, *state criteria*, diketahui bahwa aspek-aspek tersebut memenuhi kriteria untuk terjadinya likuifaksi.
- Berdasarkan hasil peninjauan terhadap tekanan air pori pada material sampel tanah pasca persiapan sampel tanah ke dalam *chamber*, diketahui bahwa terdapat tekanan air pori eksese pada material sampel tanah. Hal tersebut diduga disebabkan oleh tahap pekerjaan sampel tanah yang dibuat secara bertahap setiap 2.5 cm sehingga material butir halus menghasilkan tekanan air pori eksese ketika menerima beban tanah di atasnya.
- Berdasarkan hasil kajian perilaku material sampel tanah dalam kondisi dinamik, diketahui bahwa pemberian beban dinamik akan menghasilkan tekanan air pori

ekses yang hampir mencapai sebesar kumulatif dari tegangan vertikal efektif dan beban *surcharge* yang diberikan pada material sampel tanah. Dari hasil pengamatan terhadap tekanan air pori eksese yang terukur, diketahui bahwa tekanan air pori eksese yang terukur mencapai $\pm 94\%$ dari kumulatif dari tegangan vertikal efektif dan beban *surcharge* yang diberikan pada material sampel tanah. Hal tersebut diduga disebabkan oleh dampak dari material butiran halus yang tidak dapat menggenerasi tekanan air pori secara keseluruhan.

- Berdasarkan hasil pengamatan terhadap kurva disipasi pasca peningkatan tekanan air pori eksese setelah diberikan beban dinamik, diketahui bahwa nilai ratio tekanan air pori eksese setelah beban dinamik diberhentikan selama 12 menit masih menunjukkan angka 0.89. Nilai ratio tekanan air pori eksese yang cenderung masih tinggi tersebut, diduga disebabkan oleh permeabilitas material butiran halus yang cenderung lebih rendah sehingga tekanan air pori eksese yang muncul tidak dapat langsung terdisipasi.
- Berdasarkan hasil pengamatan terhadap nilai tahanan ujung konus pada saat material sampel tanah mengalami likuifaksi, diketahui bahwa nilai tahanan konus mengalami penurunan nilai secara signifikan yang mana hampir mendekati 0 kg/cm^2 . Hal tersebut membuktikan bahwa pada saat likuifaksi terjadi, material tanah kehilangan kekuatannya perihalnya disebabkan oleh peningkatan tekanan air pori eksese.
- Berdasarkan hasil pengamatan terhadap nilai tahanan ujung konus dan friksi selimut pada saat penusukan konus CPTu pasca beban dinamik diberikan, diketahui bahwa material sampel tanah berada dalam kondisi dengan kepadatan

yang sangat lepas dan dari hasil pengukuran terlihat bahwa pada sebagian kedalaman masih terpengaruh terhadap *boundary effect*.

- Berdasarkan nilai friksi selimut yang terukur dari penusukan konus CPTu, dapat dilakukan korelasi terhadap nilai viskositas. Pada penelitian ini, nilai viskositas rata-rata untuk material sampel tanah pada saat terlikuifaksi (nilai ratio tekanan air pori eksese sebesar 0.91) ialah sebesar 18 Pa.s.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut ialah beberapa saran yang dapat disampaikan.

- Untuk penelitian dengan *shake table*, diusulkan agar *shake table* dapat di program agar beban dinamik yang diinputkan pada material sampel tanah dapat langsung disesuaikan dengan input beban dinamik yang ingin diberikan (misalnya dengan perkiraan akselerasi gempa yang terjadi di lapangan).

Selain itu, diusulkan agar sistem data akuisisi dari input beban dinamik pada *shake table* dapat dibuat secara otomatis tersimpan pada *database*.

- Untuk penelitian dengan *chamber*, diusulkan agar pemberian *confining pressure* dapat diberikan pada keseluruhan perimeter dari material sampel tanah sehingga hasil pengujian dapat lebih mencerminkan kondisi riil di lapangan.

Selain itu, diusulkan agar diameter *chamber* dapat dibuat lebih besar untuk menghindari efek dari *boundary* dan kedalaman *chamber* dapat dibuat lebih dalam agar data valid yang terukur setelah mempertimbangkan efek *boundary* lebih banyak.

- Untuk penelitian *chamber*, diusulkan juga agar *chamber* dapat dipasang *pore water transducer* pada beberapa titik kedalaman sehingga sistem data akuisisi untuk tekanan air pori pada setiap kedalaman dapat terbaca dengan baik.
- Untuk penelitian *piezocone* pada suatu *chamber* yang memiliki material tanah dengan kepadatan tanah yang lepas, diusulkan agar kapasitas konus *piezocone* yang digunakan memiliki spesifikasi yang cukup sensitif dalam pembacaan data yang relatif kecil, misalnya dengan konus yang memiliki kapasitas 2.5 ton.
- Untuk persiapan sampel dengan metode konsolidasi, diusulkan agar material sampel tanah dapat diberi jeda waktu hingga tekanan air pori eksres pada material tanah telah terdisipasi secara keseluruhan.
- Setelah pemberian beban dinamik dilakukan, diusulkan agar pembacaan tekanan air pori eksres dapat dilakukan hingga tekanan air pori eksres tersebut terdisipasi seluruhnya. Tujuan dari pembacaan tekanan air pori eksres hingga terdisipasi seluruhnya ialah agar dapat diketahui lamanya waktu disipasi tekanan air pori eksres pasca terjadinya likuifaksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambraseys, N.N. (1988). "Engineering seismology", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 17, pp. 1-105.
- Barnes, H.A. dan Maia J.M. (2007), "Rheometry", *Rheology*, Aberystwyth University, Wales, Vol. 1.
- Bellotti, R., Crippa, V., Pedroni, S., Baldi, G., Fretti, C., Ostricati, D., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., dan Pasqualini, E. (1985), "Laboratory validation of in situ tests", *Geotechnical Engineering in Italy, an overview, A.G.I., ISSMFE Golden Jubilee*.
- Bojadjieva, J., Sesov, V., dan Edip, K. (2015), "Experimental setup for sand liquefaction studies on shaking table", *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand.
- Brookfield Engineering Labs Inc. (2010), "More solutions to sticky problems : A guide to getting more from your Brookfield viscometer", *Brookfield Eng. Labs*, pp 1-53.
- Chhabra, R. P. dan Richardson, J. F. (2008), *Non-newtonian flow and applied rheology*. 2nd ed., Butterwoth- Heinemann, Oxford, UK.

Chang, K.T. (1978), "An analysis of damage of slope sliding by earthquake on the Paiho Main Dam and its earthquake strengthening", *Tseng-hua Design Section*, Dept. of Earthquake-Resistant Design and Flood Control Command on Miyna Reservoir, Peoples Republic of China.

Chen, Y., Liu. H., dan Zhou, Y. (2006), "Analysis on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 28, pp. 1139-1143.

Chen, Y., Liu. H., dan Wu, H. (2013), "Laboratory study on flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 17, No. S1, pp. s230s32.

Chen, Y. dan Zhou, Y. (2007), "Advance in sand post-liquefaction research based on fluid mechanics method", *Journal of Hohai University*, Vol. 35, pp. 418-421.

Cooke, R. W., dan Price, G. (1973), "Strains and displacements around friction piles", *Proc. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol 2 (1), pp. 53-60.

Coulter, M. dan Migliaccio, L. (1996), "Effects of the earthquake of March 27. 1964 at Valdez, Alaska", *Professional Paper 542-C*, U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, Washington, D.C.

- De Beer, E.E. (1963), "The scale effect in the transposition of the results of deep soundings tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundation", *Geotechnique*, Vol. XI, No. 1, pp. 39-75
- Edgers, L. dan Karlsrud, K. (1985), "Viscous analysis of submarine flows", *Proceedings of the 4th International Conference on the Behaviour of Offshore Structures*, Delft, Development in Marine Technology, Vol. 2, pp. 773- 784.
- Eid, W. K. (1987), "Scaling effect in cone penetration testing in sand", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Fakher, A., Jones, C. F. J. P., dan Clarke, B. G, (1999). "Yield stress of super soft clays", *J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE*, 125 (6), pp. 499-509.
- Flaate, K. (1972), "Effects of pile driving in clays", *Canadian Geotech. J.*, 9, pp. 81-88.
- Hamada, M. dan Takahashi, Y. (2004), "An experimental study on the fluid properties of liquefied sand during its flow", *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Paper no. 641.
- Ishihara, K. (1984), "Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit", *Proceedings of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, University of Missouri, St. Louis, Vol. 3, pp. 1129-1143.

- Ishihara, K. (1985), "Stability of natural deposits during earthquake", *Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, Vol. 1, pp. 321-376
- Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, Vol. 43, Issue. 3, pp. 351-451.
- Jafarzadeh, F. (2004), "Design and evaluation concepts of laminar shear box for 1g shaking table tests", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Paper No. 1391.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., dan Lancelotta, R. (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", *Proceedings of the 11th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Fransisco, Vol. 1, pp. 57-154.
- Jefferies, M. G., dan Been, K. (2006), "Soil liquefaction - A critical state approach", *Taylor and Francis*, London.
- Karol, R. J. (2003), *Chemical grouting and soil stabilization*. 3rd ed., Marcel Dekker.
- Kerisel, J. (1961), "Foundation profondes en milieu sableux", *Proceedings of the 5th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Vol. 22, pp. 73-83.

- Kerisel, J. (1964), "Deep foundations - Basic experimental facts", *Proceedings of the North American Conference on Deep Foundations*, Mexico City.
- Komamura, F. dan Huang, R. J. (1974), "A new rheological model for soil behaviour", *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, 100(7), pp. 807-824.
- Koumoto, T. dan Houlsby, G. T. (2001), "Theory and practice of the fall cone test", *Geotechnique*, Vol. 51, Issue. 8, pp. 701-712.
- Kramer. S. L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Krizek, R. J. dan Pepper, S. F, (2004). *Slurries in geotechnical engineering*. Texas A&M University, Texas, USA.
- Kuerbis, R., Negussey, D., dan Vaid, Y.P. (1988), "Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand", ASCE Specialty Conference on Hydraulic Fill Structures, Fort Collins, Colorado.
- Ladd, R.S. (1974), "Specimen preparation and liquefaction of sands", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol 100, No. GT10, pp.1180-1184.
- Larson-Robl, K. M. (2016), "Pore pressure measurement instrumentation response to blasting", Thesis, University of Kentucky

- Last, N. (1984), "Seminar on cone penetration testing in the laboratory", *University of Southampton*, Department of Civil Engineering, November.
- Locat, J., dan Denners, D. (1988), "Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays", *Canadian Geotech. J.*, 25, pp. 799-806.
- Lunne, T., Robertson P.K., dan Powell J.J.M. (1997), *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional, London.
- Mahajan, S. P. (2006), "Viscous effects on penetrating shafts in clay", Ph.D. Dissertation, The University of Arizona.
- Marsland, A. dan Quarterman, R.S.T. (1982), "Factors affecting the measurements and interpretation of quasi static penetration tests in clays", *Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing ESOPT II*, A.A. Balkema, Amsterdam, pp. 697-702.
- Mase, L. Z. (2017), "Experimental Liquefaction Study of Southern Yogyakarta Using Shake Table", *Jurnal Teknik Sipil*, ISSN 0853-2982.
- Miura, S. dan Toki, S. (1982), "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation - strength properties of sand", *Soils and Foundation*, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77.

Mogami, T. dan Kubo, K. (1953), "The behaviour of soil during vibration", *Proceedings of 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, Vol. 1, pp. 152-155.

Mori, K., Seed, H. B., dan Chan C. K. (1978), "Influence of sample disturbance on sand response to cyclic loading", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. 3, pp. 323-340.

Nemat Nasser, S. dan Takahashi, K. (1984), "Liquefaction and fabric of sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol 110, No. GT9, pp. 1291-1306.

Newton, I. (1687), *Philosophiae naturalis principia mathematica*. (Facsimile edition (1972) Koyre, A., Cohen, I.B. eds., Cambridge University Press). First English edition (1729), translation by Andrew Motte. [The original Principia book].

Parkin, A. K., Holden, J., Aamot, K., Last, N., and Lunne, T. (1980), "Laboratory investigations of CPT's in sand", *Norwegian Geotechnical Institute*, Oslo, Report No. 52108-9.

Parkin, A. K. (1988), "The calibration of cone penetrometers", *Proceeding First International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Florida.

- Rad, N. S. dan Tumay, M.T. (1986), "Effect of Cementation on the Cone Penetration Resistance of Sand", *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering Speciality Conference*, ASCE, Blacksburg, Virginia, pp. 926-948.
- Rahardjo, P. P. (1989), "Evaluation of liquefaction potential silty sand based on cone penetration test", Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Insitute and State University.
- Rahardjo, P. P. (2019), "Rehabilitasi dan Mitigasi Bencana Gempa Palu 28 September 2018", *Prosiding Seminar Rehabilitasi dan Mitigasi Bencana Gempa Palu 28 September 2018*, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Randolph, M. F., Carter, J. O., dan Wroth, C. P. (1979), "Driven piles in clay – the effects of installation and subsequent consolidation", *Geotechnique*, Vol. 29, Issue. 4, pp. 361-393.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., dan Greig, J. (1986), "Use of piezometer cone data", *Proceedings of In Situ'86*, ASCE Speciality Conference, Blacksburg, Virginia, pp. 1263-1280.
- Sanglerat, G. (1972), *The penetrometer and soil exploration*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, the Netherlands.

- Sasaki, Y., Towhata, I., Tokida, K., Yamada, K., Matsumoto, H., Tamari, Y., dan Saya, S. (1992), "Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction", *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 3, pp. 79–96.
- Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for cone penetration tests, performance, and design", *Federal Highway Administration*, FHWA-ts-78-209.
- Seed, H.B. dan Lee, K.L. (1966), "Liquefaction of saturated sands during cycling loading", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105-134.
- Seed, H.B. dan Idriss, I.M. (1967), "Analysis of soil liquefaction", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol. 93, No. SM-3, pp 83-108.
- Senneset, K., Janbu, N., dan Svao, G. (1982), "Strength and deformation parameters from cone penetration tests", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Vol. 2, pp. 863-870.
- Shibata, T. dan Terapaksa, W. (1987), "Evaluation of CPT-based liquefaction assessment method using cyclic triaxial test", *Proceedings of the 9th South East Asian Geotechnical Conference*, Bangkok 1987.

Shields, D. H. (1981), "Should ASTM adopt the European standard?", *Cone penetration testing and experience*, edited by G.M. Norris dan R.D. Holtz, ASCE Speciality Conference, St. Louis, Missouri, pp. 383-393.

Studer, J. and Kok, L. (1980), "Blast-Induced Excess Pore Water Pressure and Liquefaction Experience and Application", *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea , pp. 581 - 593

Sweeney, B. (1987), "Liquefaction evaluation using a miniature cone penetrometer and a scale calibration chamber", PhD. Dissertation, Stanford University, California.

Terzaghi, K. dan Peck, R. B. (1967), "Soil mechanics in engineering practice", 1st Ed., *Wiley*, New York.

Tim Peneliti Unpar. (2019), *Menyelisik Untaian Bencana Palu-Sigi-Donggala (Pelajaran dari Gempa Palu-Sigi-Donggala 28 September 2018)*. Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

Tokimatsu, K. dan Yoshimi, Y. (1983), "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content", *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 56-74.

- Torrance, J. K. (1987), "Shear resistance of remoulded soils by viscometric and fall-cone methods : A comparison for Canadian sensitive marine clays", *Canadian Geotech. J.*, 24 (2), pp. 318-322.
- Towhata, I. (2008), *Geotechnical earthquake engineering*. Springer, Heidelberg.
- Tsugawa et al. (2019), "Review : Rheology concepts applied to geotechnical engineering", De Gruyter, Berlin.
- Vallejo, L.E. dan Scovazzo, V.A. (2003), "Determination of the shear strength parameters associated with mudflows", *Soils and Foundations*, Vol. 43, No. 2, pp. 129-133.
- Van der Veen, C. dan Boersma, L. (1957), "The bearing capacity of a pile predetermined by a cone penetration test", *Proceedings of the 4th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol. 2, pp. 76-78.
- Vesic, A. S. (1965), "Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand", *Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundation*, Duke University, Durham, N.C.
- Voyiadjis, G. Z. dan Song, C. R. (2003), "Determination of hydraulic conductivity using piezocone penetration test", *Int. J. Geomech.*, 3 (3/4), pp. 217-224.

Wang, W. (1979), "Some findings in soil liquefaction", Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China.

Widjaja, B. dan Lee, S.H.H. (2013), "Flow box test for viscosity of soil in plastic and viscous liquid states", *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 1, pp. 35-46.

Wong, W. (1984), "Earthquake damages to earth dams and levees in relation to soil liquefaction and weakness in soft clays", *Proceedings of International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Vol. 1, pp. 511-521.

Wu, J., Kammerer, A. M., Riemer, M. F., Seed, R. B., and Pestana, J. M. (2004), "Laboratory study of liquefaction triggering criteria", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Paper No. 2580

Yegian, M. K., Gharaman, V.G., dan Harutiunyan, R.N. (1994), "Liquefaction and embankment failure case histories, 1988 Armenia earthquake", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 3, pp. 581-596.

Youd, T.L. (1984), "Recurrence of Liquefaction at the same site", *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Fransico, Vol. 3, pp. 231-238.

Youd, T. L. et al. (1985), "The Borah Peak, Idaho earthquake of October 28, 1983 - liquefaction", *Earthquake Spectra*, Vol. 2, No. 1, pp. 71-89.

Youd, T.L. (1991), "Mapping of earthquake-induced liquefaction for seismic zonation", *Proceedings of 4th International on Seismic Zonation, Earthquake Engineering Research Institute, Stanford University, Vol. 1, pp. 111-147.*

Zeefart, L. (1948), "Discussion on effect of driving piles into soft clay". *Transactions, ASCE, Vol. 115, pp. 286-292.*

Zuidberg, H. M. (1988), "Piezocone penetration testing - probe development", *Proceedings of International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Specialty Session No. 13, 24 March. AA Balkema Publishers, The Netherlands.*

