

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan kajian yang telah dilakukan, hal-hal yang dapat disimpulkan adalah sebagai berikut:

1. Salah satu cara untuk melakukan simulasi penetrasi konus dengan menggunakan metode elemen hingga adalah mengaplikasikan Metode *Press-Replace* (PRM). Metode ini merupakan teknik simplifikasi untuk menyimulasikan permasalahan penetrasi dalam, dengan pemodelan yang relatif mudah jika dibandingkan dengan metode lain yang ada saat ini. Selain itu, simulasi dapat dilakukan dengan waktu yang relatif cepat karena tidak melibatkan proses *updating mesh* atau prosedur numerik rumit yang lain.
2. Perilaku tanah lempung tak teralir akibat penetrasi konus telah diinvestigasi dengan kurva *stress path*, baik pada lokasi muka konus ( $u_1$ ) maupun pada bahu konus ( $u_2$ ). Investigasi *stress path* dilakukan pada saat penetrasi dan uji disipasi. Hasil investigasi adalah sebagai berikut:
  - Pada lokasi muka konus, penetrasi konus menyebabkan kurva *Effective Stress Path* (ESP) bergerak ke sebelah kiri hingga berpotongan dengan *Critical State Line* (CSL), sedangkan kurva *Total Stress Path* (TSP) bergerak ke sebelah kanan dengan nilai *mean total stress*,  $p$ , yang terus

meningkat. Hal ini serupa dengan kurva *stress path* yang diusulkan Chen dan Mayne pada tahun 1994.

- Pada lokasi bahu konus, penetrasi konus menyebabkan kurva ESP bergerak ke sebelah kiri hingga berpotongan dengan CSL, sedangkan kurva TSP menunjukkan arah pergerakan yang berbeda-beda pada empat titik pengamatan yang berdekatan. Hal ini diduga disebabkan karena pada lokasi bahu konus merupakan lokasi dengan konsentrasi tegangan yang tinggi sehingga mekanisme tegangan yang terjadi cukup kompleks.
  - Pada saat uji disipasi, kurva ESP bergerak ke sebelah kanan. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tegangan efektif rata-rata,  $p'$ , seiring dengan terdisipasinya tekanan air pori eksese.
3. Komparasi hasil perhitungan numerik terhadap hasil uji CPTu yang riil di lapangan telah dilakukan. Hasil perhitungan secara numerik menunjukkan bahwa untuk nilai tahanan konus,  $q_c$ , memberikan hasil yang lebih rendah 59% daripada data terukur. Hal ini diduga disebabkan karena tanah lempung lunak di Gedebage merupakan tanah dengan plastisitas sangat tinggi. Dengan demikian, semakin tinggi plastisitas maka semakin besar pula viskositas tanahnya. Besarnya viskositas tanah inilah yang menyebabkan tahanan konus yang terukur menjadi besar.

Adapun komparasi nilai tekanan air pori ( $u_2$ ) memberikan hasil yang cukup baik, dimana diferensial yang dihasilkan adalah berkisar 7.5%.

4. Komparasi nilai kuat geser tak teralir ( $s_u$ ) terprediksi menggunakan nilai faktor konus,  $N_{kt}$ , memberikan hasil yang lebih rendah 37% dibandingkan nilai kuat geser tak teralir yang terukur. Adapun kuat geser tak teralir ( $s_u$ ) juga diprediksi dengan menggunakan nilai faktor konus,  $N_{\Delta u}$ . Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan nilai  $N_{\Delta u} = 12$ , maka kuat geser tak teralir terprediksi memberikan hasil yang mendekati data terukur, yaitu dengan diferensial sebesar 3%.
5. Simulasi uji disipasi pada model numerik telah dilakukan. Dengan memasukkan nilai permeabilitas tanah, maka uji disipasi dapat disimulasikan dengan melakukan perhitungan konsolidasi. Kurva uji disipasi yang dihasilkan adalah cukup mendekati hasil uji disipasi terukur di lapangan.
6. Studi parametrik terhadap nilai tahanan konus dan kurva disipasi telah dilakukan. Berdasarkan hasil perhitungan, didapati bahwa nilai tahanan konus adalah berbanding lurus dengan nilai  $M$  dan  $k_o$ . Adapun nilai tahanan konus adalah berbanding terbalik dengan nilai  $\lambda$ ,  $\kappa$ , dan  $v_{ur}$ . Hasil ini memberikan hasil yang logis dan konsisten dengan kondisi di lapangan.  
Adapun studi parametrik pada kurva disipasi menunjukkan bahwa nilai permeabilitas tanah memberikan pengaruh yang kecil terhadap kurva disipasi.

## 5.2 Saran

Saran untuk riset lanjutan terkait dengan simulasi penetrasi konus secara numerik adalah sebagai berikut:

1. Direkomendasikan untuk melakukan validasi simulasi penetrasi konus pada tanah pasir (kondisi penetrasi *drained*).
2. Analisis dan perhitungan yang dilakukan tidak memperhitungkan faktor kondisi plastisitas tanah. Pada kasus tanah lunak dengan plastisitas tinggi, direkomendasikan untuk memasukkan faktor ini untuk memperoleh hasil yang lebih baik dan dapat diandalkan.
3. Pengujian kohesi pada tanah lunak menggunakan *vane shear* sangat dianjurkan untuk memberikan referensi nilai kuat geser tak teralir yang lebih akurat. Dengan demikian diharapkan dapat diperoleh besarnya nilai faktor konus ( $N_{kt}$ ) dengan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi.
4. Penetrasi konus riil di lapangan adalah bukan pada tanah yang homogen, melainkan kondisi tanah yang berlapis. Riset lebih lanjut dapat memasukkan faktor kondisi ini sehingga diharapkan dapat memberikan pengetahuan yang baru.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T., dan Heg, K. (1986) "Use of In Situ Tests for Foundation Design on Clay". *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, 1-30, American Society of Engineers (ASCE).
- Abu-Farsakh, M., Tumay, M., Voyiadjis, G. (2003). "Numerical Parametric Study of Piezocone Penetration Test in Clays". *International Journal of Geomechanics*. 3. 10.1061/(ASCE)1532-3641(2003)3:2(170).
- Andersen, K.H., Andresen, L., Jostad, H.P., dan Clukey, E.C. (2004). "Effect of Skirt-Tip Geometry on Set-Up Outside Suction Anchors in Soft Clay. *Proceeding of 23<sup>rd</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Volume 1, p. 1035-1044. Vancouver, Canada.
- Atkinson, J.H. (2007). *The Mechanics of Soils and Foundations – Second Edition*. Taylor & Francis, Oxon, England.
- Atkinson, J.H., dan Bransby P.L. (1978). *The Mechanics of Soil: An Introduction to Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Maidenhead, Berkshire, England, ISBN 07 084135 7.
- Baligh, M.M., Azzouz, A.S., Wissa, A.Z.E., Matyin, R.T. dan Morrison, M.H. (1981). "The Piezocone Penetrometer. Cone Penetration Testing and Experience". *Proceedings of the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Experience*. St. Louis, 247-63, American Society of Engineers (ASCE).
- Bathe, K.J., Ramm, E., dan Wilson, E.L. (1975). "Finite Element Formulations for Large Deformation Dynamic Analysis. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. Vol. 9, pp. 353-386.
- Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., dan Maniscalco, R. (1981). "Piezometer Probe Test in Cohesive Deposits. Cone Penetration Testing and Experience". *Proceedings of the Session ASCE National Convention*, St. Louis, 264-302.

- Campanella, R.G., dan Robertson, P.K. (1981). "Applied Cone Research. Cone Penetration Testing and Experience". *Proceedings of the ASCE National Convention*, St. Louis, 343-62.
- Campanella, R.G., dan Robertson, P.K. (1988). "Current Status of The Piezocone Test". *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, 1, 93-116, Balkema Pub., Rotterdam.
- Campanella, R.G., Gillespie, D., dan Robertson, P.K. (1982). "Pore Pressure During Cone Penetration Testing". *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II*, Amsterdam, 507-12, Balkema Pub., Rotterdam.
- Campanella, R.G., Sully, J.P., Greig, J.W., dan Jolly, G. (1990). "Research and Development of A Lateral Stress Piezocone". *Transportation Research Record*, No. 1278, 215-24.
- Center for Geotechnical Engineering - CGE. (2014). *Geotechnical Engineering Properties*. Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia.
- Chen, B.S., dan Mayne, P.W. (1994). *Profiling the Overconsolidation Ratio of Clays by Piezocone Tests*. Georgia Tech Research Corporation. Atlanta, USA.
- Ceccato, F., dan Simonini, P. (2017). "Numerical Study of Partially Drained Penetration and Pore Pressure Dissipation in Piezocone Test". *Acta Geotechnica*. 12:195-209 DOI 10.1007/s11440-016-0448-6.
- de Borst, R. (1982). "Calculation of Collapse Loads Using Higher Order Elements". *Proceeding of IUTAM Symposia on Deformation and Failure of Granular Materials* (eds. P.A. Vermeer and H.J. Luger), pp. 503-513.
- de Ruiter, J. (1981). "Current Penetrometer Practice: Cone Penetration Testing and Experience". *Proceedings of the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Experience*. St. Louis, 1-48.
- Engin, H.K., (2013). "Modeling Pile Installation Effects – A Numerical Approach", Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

- Engin, H. K., Brinkgreve, R. B. J., dan van Tol, A. F. (2015). "Simplified numerical modelling of pile penetration—The press-replace technique". *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 39(15), 1713–1734.
- Gillespie, D.G. (1990). "Evaluating Velocity and Pore Pressure Data from The Cone Penetration Test". Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC.
- Griffiths, D.V. (1982). "Elasto-plastic Analysis of Deep Foundation in Cohesive Soil. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. No. 6, pp. 211-218.
- Hibbit, H.D., Marcal, P.V., dan Rice, J.C. (1970). "A Finite Element Formulation for Large Strain and Large Displacement". *International Journal of Solids and Structures*. 6. Pp. 1069-1086.
- Houlsby, G.T., dan Teh, C.I. (1988) "Analysis of The Piezocone in Clay". *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, 2, 777-83, Balkema Pub., Rotterdam.
- Huntsman, S.R., Mitchell, J.K., Klejbuk, L.W., dan Shinde, S.B. (1986). "Lateral Stress Measurements During Cone Penetration". *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, Virginia, 617-34, American Society of Engineers (ASCE).
- ISSMFE (1989) Appendix A: "International Reference Test Procedure for Cone Penetration Test (CPT)". *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils -TC 16, with Reference to Test Procedures*, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Information, 7, 6-16.
- Jaky, J. (1944). "The Coefficient of Earth Pressure at Rest". *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, Vol. 7, 355-358.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., dan Lancellotta, R. (1985). "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils". State-of-the art report. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1, 57-153, Balkema Pub., Rotterdam.

- Jefferies, M.G., dan Funegard, A. (1983). "Cone Penetration Testing in The Beaufort Sea". *Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering*, Austin, Texas, 220-43, American Society of Engineers (ASCE).
- Jones, G.A., Van Zyl, D., dan Rust, E. (1981) "Mine Tailings Characterization by Piezometer Cone". *Proceedings of the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Experience*. St. Louis, 303-24, American Society of Engineers (ASCE).
- Karlsrud, K., Lunne, T., dan Brattlien, K. (1996). "Improved CPTU Correlations Based on Block Samples". Nordic Geotechnical Conference, Reykjavik, Proc. Vol. 1, pp. 195-201.
- Konrad, J.M., dan Law, K. (1987). "Undrained Shear Strength from Piezocone Tests". *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3), 392-405, Balkema Pub., Rotterdam.
- Kulhawy, F.H., dan Mayne, P.H. (1990). "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design". Electric Power Research Institute, EPRI.
- Lambe, T.W., dan Whitman, R.V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- La Rochelle, P., Zebdi, P.M., Leroueil, S., Tavenas, F., dan Virely, D. (1988). "Piezocone Tests in Sensitive Clays of Eastern Canada". *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, 2, 831-41, Balkema Pub., Rotterdam.
- Larsson, R. (1992). "CPT-sondering. Spetstrycksondering med och utan portryksmätning; en in situ method för bestämning av lagerföljd och egenskaper i jord; utförande och utvärdering". (Dalam Bahasa Swedia). *Swedish Geotechnical Institute*, Linköping, Information, 15.
- Lim, Y.X., Tan, S.A., dan Phoon, K.K. (2018). "Application of Press-Replace Method to Simulate Undrained Cone Penetration". *International Journal of Geomechanics*, 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001186.



- Lim, Y.X. (2017). "Numerical Study of Cone Penetration Test in Clays Using Press-Replace Method". Ph.D. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. National University of Singapore.
- Lu, Q., Hu, Y., Randolph, M. F., dan Bugarski, I. C. (2004). "A Numerical Study of Cone Penetration in Clay." *Geotechnique*, 54(4), 257–267.
- Lunne, T. (1976). "Results of Some Penetration Tests with Different Cones in Overconsolidated Clays". Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Internal Report 52155-4.
- Lunne, T., dan Lacasse, S. (1985). "Use of In Situ Tests in North Sea Soil Investigations". *Proceedings of the Symposium: From Theory to Practice in Deep Foundations*, Porto Allegre, Brazil, Oct. 1985, dipublikasikan di: Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication, 169.
- Lunne, T., Robertson, P.K., dan Powell, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional.
- Mahmoodzadeh, H., Randolph, M. F., dan Wang, D. (2014). "Numerical Simulation of Piezocone Dissipation Test in Clays." *Géotechnique*, 64(8), pp 657.
- Masood, T. (1990). "Comparison of In Situ Methods to Determine Lateral Earth Pressure at Rest in Soils". Ph.D. thesis, University of California, Department of Civil Engineering, Berkeley.
- Masood, T., dan Mitchell, J.K. (1993). "Estimation of In Situ Lateral Stresses in Soils by Cone Penetration Tests". *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 119(10) 1624-39.
- Massarsch, K.R. (1994). "Design Aspects of Deep Vibratory Compaction". *Proceedings of the Seminar on Ground Improvement Methods*, Hong Kong, 61-74.
- Mc. Meeking, R.M., dan Rice, J.C. (1975). "Finite Element Formulation for Problems of Large Elasto-Plastic Deformation. *International Journal of Solids and Structures*. 11, pp. 611-616.

- Mesri, G. (1989). A reevaluation of  $S_{u(mob)} = 0.22\sigma'_p$  using laboratory shear tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 162–164.
- Muromachi, T. (1981). "Cone Penetration Testing in Japan". *Proceedings of the ASCE National Convention: Cone Penetration Testing and Experience*. St. Louis, 49-75. American Society of Engineers (ASCE).
- Olsen, R.S., dan Farr, J.V. (1986) "Site Characterization Using the Cone Penetration Test". *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*. Blacksburg, 854-68, American Society of Engineers (ASCE).
- PLAXIS 2D Software. (2018). *Material Models Manual*. Plaxis BV, Netherlands.
- Potts, D.M., dan Zdravković, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering – Theory*. Thomas Telford. London, England.
- Powell, J.J.M., dan Quarterman, R.S.T. (1988). "The Interpretation of Cone Penetration Tests in Clays, with Particular Reference to Rate Effects". *Proceeding of the International Symposium on Penetration Testing, ISPT-1*, Orlando, 2, 903-10, Balkema Pub., Rotterdam.
- Quiros, G.W., dan Young, A.G. (1988). "Comparison Offield Vane, CPT, and Laboratory Strength Data at Santa Barbara Channel Site". *Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies*, ASTM Special technical publication, STP 1014, 306-17.
- Rad, N.S., dan Lunne, T. (1986). "Correlations Between Piezocone Results and Laboratory Soil Properties". Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Report 52155-39.
- Randolph, M.F., dan Wroth, C.P. (1979) "An Analytical Solution for The Consolidation Around a Driven Pile". *Proceedings of the International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 3(3), 217-29.
- Robertson, P .K. (1990). "Soil Classification Using The Cone Penetration Test". *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-8.

- Robertson, P.K., dan Campanella, R.G. (1989). "Design Manual for Use of CPT and CPTU". *University of British Columbia*, Vancouver, BC.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., dan Greig, J. (1986). "Use of Piezometer Cone Data". *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Blacksburg, 1263-80, American Society of Engineers (ASCE).
- Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M., dan Gillespie, D.G. (1992). "Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Tests". *Canadian Geotechnical Journal*., 29(4):551–557.
- Schmertmann, J.H. (1974). "Penetration Pore Pressure Effects on Quasi-static Cone Bearing,  $q_c$ ". *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT, Stockholm, 2.2, 345-51.
- Schnaid, F. (2009). *In Situ Testing in Geomechanics: The main tests*. Taylor & Francis, UK.
- Senneset K., dan Janbu, N. (1985). "Shear Strength Parameters Obtained from Static Cone Penetration Tests. Strength Testing of Marine Sediments; Laboratory and In Situ Measurements". Symposium, San Diego, 1984, ASTM Special technical publication, STP 883, 41-54.
- 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*, ESOPT-11, Amsterdam, 2, 863-70, Balkema Pub., Rotterdam.
- Sheng, D., Nazem, M., dan Carter, J.P. (2009). "Some Computational Aspects for Solving Deep Penetration Problem in Geomechanics." *Computational Mechanics*. 44(4), 549–561.
- Sheng, D., Cui, L., dan Ansari, Y. (2013). "Interpretation of Cone Factor in Undrained Soils via Full-Penetration Finite-Element Analysis". *International Journal of Geomechanics*. 2013.13:745-53.
- Silitonga, P.H. (1973). Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung, Indonesia.

- Sloan, S.W., dan Randolph, W.F. (1982). "Numerical Prediction of Collapse Loads Using Finite Elements Methods. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 6, pp. 47-76.
- Sully, J.P., dan Campanella, R.G. (1991). "Effect of Lateral Stress on CPT Penetration Pore Pressure". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(7), 1082-88.
- Tumay, M.T., Bogges, R.L. dan Acar, Y. (1981). "Subsurface Investigation with Piezocone Penetrometer". Cone Penetration Testing and Experience Session at the ASCE National Convention. St. Louis, 325-42, American Society of Engineers (ASCE).
- Tumay, M. T., Kurup, P. U. dan Boggess, R. L. (1998). "A Continuous Intrusion of Electronic Miniature Cone Penetration Test System for Site Characterization". *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Site Characterization -ISC'98*, Atlanta, USA. pp. 1183-1188
- Van den Berg, P. (1994). "Analysis of soil penetration", Ph.D. Thesis, Geo-Engineering Section, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Vertek (2015). Intro to CPTu: What Can You Learn from Pore Pressure Data, (<http://www.vertekcpt.com/blog/intro-to-cptu-what-can-you-learn-from-pore-pressure-data#.WhFRVUqWbIU>), diakses 19 November 2017.
- Vesić, A.S. (1972). "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 98(SM3), pp 265–290.
- Vesić, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 68 p.
- Wroth, C.P. (1984). "The Interpretation of In-Situ Soils Tests". *Geotechnique*, Vol. 34, No.4, 449-489.
- Wroth, C.P. (1988) "Penetration testing - A More Rigorous Approach to Interpretation". *Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, 1, 303-11, Balkema Pub., Rotterdam.

- Yu, H. S. (1993). "Discussion on: Singular plastic fields in steady penetration of rigid cone." *Journal of Applied Mechanics*. 60(4), pp 1061–1062.
- Yu, H. S., Herrmann, L. R., dan Boulanger, R. W. (2000). "Analysis of Steady Cone Penetration in Clay." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:7(594), 594–605.
- Zuidberg, H.M. (1988). "Piezocone Penetration Testing – Probe Development". *Proceeding of International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1*, Orlando, Specialty Session no. 13, 24 March. AA Balkema Publishers, The Netherlands.

