



Simulasi Kenaikan Tekanan Air Pori Akibat Beban Timbunan Saat Fase Konstruksi Pembangunan Tanggul

*Togani Cahyadi Upomo¹, Dian Eka Aryanti², Rini Kusumawardani¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Semarang

²Politeknik Energi dan Pertambangan (PEP), Bandung

*togani.cahyadi@mail.unnes.ac.id

Received: 23 Oktober 2021 Revised: 19 Januari 2023 Accepted: 20 Januari 2023

Abstract

Flood is an annual problem in Indonesia that has economic, social and environmental impacts. One of the structural measures in the flood control is to construct levee. During the levee construction phase, the geotechnical problem that arises is the increase in pore water pressure when the levee sit on saturated clay. To prevent the slope of levee become unstable during construction phase, the stability of levee should be predicted during design. The B-bar method combined with the slope stability analysis could be used to predict the excess pore water pressure and the realistic safety factor. The results show that the slope stability analysis without considering the increase in pore water pressure causes a relatively larger safety factor, hence giving incorrect results. In addition, by considering the excess pore pressure, the stability of levee that sit on saturated soft clay become critical during the construction phase.

Keywords: *Excess pore pressure, metode B-bar, slope stability analysis*

Abstrak

Banjir merupakan masalah tahunan di Indonesia yang menimbulkan dampak ekonomi, sosial maupun lingkungan. Salah satu upaya struktural pengendalian banjir adalah dengan membangun tanggul. Ketika membangun tanggul, permasalahan geoteknik yang muncul adalah meningkatnya tekanan air pori pada tanah fondasi tanggul yang berupa lempung jenuh. Untuk menghindari kelongsoran tanggul saat konstruksi, stabilitas tanggul harus dapat diprediksi saat tahap perencanaan. Metode B-bar yang dikombinasikan dengan analisis stabilitas lereng metode Bishop dapat digunakan untuk memprediksi besarnya perubahan tekanan air pori dan angka keamanan yang realistis. Hasil analisis menunjukkan bahwa analisis stabilitas lereng tanpa memperhatikan kenaikan tekanan air pori menyebabkan faktor keamanan yang relatif lebih besar, sehingga memberikan hasil perhitungan yang tidak realistis. Selain itu, dengan memperhatikan kenaikan tekanan air pori, stabilitas tanggul diatas lempung jenuh lunak menjadi kritis pada saat fase konstruksi.

Kata kunci: *Kenaikan tekanan air pori, metode B-bar, analisis kestabilan lereng*

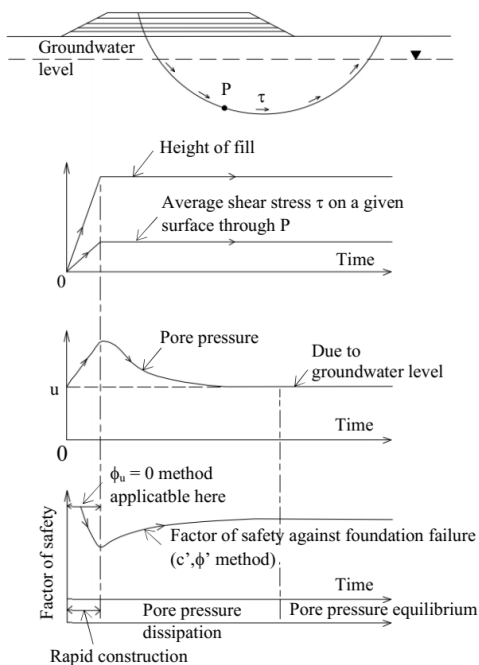
Pendahuluan

Banjir merupakan masalah tahunan di Indonesia yang berdampak terhadap ekonomi, sosial maupun lingkungan. Perubahan tata guna lahan dan hilangnya daerah resapan akibat konsep pembangunan yang tidak berkelanjutan dapat menyebabkan semakin banyak lokasi yang mengalami masalah banjir baik frekuensi maupun intensitasnya (Nugroho, 2008). Pengendalian banjir dapat dilakukan melalui upaya struktural maupun non struktural. Salah satu upaya struktural adalah membangun tanggul atau meninggikan tanggul

yang telah ada dengan material berupa urugan tanah. Sutopo (2006) melakukan simulasi di Sungai Garang Semarang dengan hasil peninggian/pembangunan tanggul mampu menampung debit air Q_{100} . Pada kasus lain, Maulana *et al.* (2017) juga telah melakukan simulasi bahwa pembuatan tanggul cukup efektif dalam pengendalian banjir di Sungai Tuntang.

Permasalahan geoteknik yang timbul dalam masa konstruksi tanggul adalah bertambahnya tekanan air pori pada tanah pondasi tanggul yang berupa tanah lempung (Law & Bazozuk, 1979). Tanah lempung

mempunyai butiran halus dan permeabilitas rendah, sehingga ketika ada penambahan beban di atasnya, tekanan air pori meningkat tiba-tiba serta turun secara perlahan sampai dengan kondisi seimbang seperti terlihat pada Gambar 1 (Badarinath & El Naggar, 2021), Bishop dan Bjerrum, 1960). Kenaikan tekanan air pori ini akan menurunkan faktor keamanan dari lereng secara tiba-tiba, sehingga dapat menimbulkan kelongsoran saat fase konstruksi.



Gambar 1. Variasi kuat geser, tekanan pori dan faktor keamanan pada urugan diatas lempung jenuh (Bishop dan Bjerrum, 1960)

Pada artikel ini, telah dilakukan simulasi pengaruh beban tambahan berupa urugan tanggul baru terhadap perubahan tekanan air pori dan penurunan faktor keamanan lereng pada fase konstruksi pembangunan di atas tanah lempung jenuh. Analisis stabilitas lereng menggunakan metode Bishop, sedangkan untuk mempertimbangkan pengaruh perubahan tekanan air pori menggunakan metode B-bar (\bar{B}).

Metode

Untuk mengetahui perbedaan pengaruh perubahan tekanan air pori, maka dalam analisis stabilitas lereng dilakukan dengan dua skenario, yaitu: pertama mempertimbangkan perubahan tekanan air pori pada fondasi tanggul, dan kedua tidak mempertimbangkan perubahan tekanan air pori pada fondasi tanggul. Pengaruh kondisi tanah lempung jenuh dan implementasi dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi juga dibahas dalam penelitian ini.

Faktor keamanan

Faktor keamanan suatu lereng didefinisikan sebagai perbandingan dari tegangan geser maksimum tanah dengan tegangan geser yang terjadi (Duncan *et al.*, 2014) atau dapat ditulis sebagai berikut:

$$F = \frac{\tau_{ff}}{\tau} \quad (1)$$

dengan F = faktor keamanan, τ_{ff} = tegangan geser maksimum tanah dalam kN/m^2 , τ = tegangan geser yang terjadi dalam kN/m^2 .

Untuk menentukan faktor keamanan, salah satu metode yang digunakan adalah metode Bishop. Meskipun metode Bishop bukanlah yang terbaik tetapi kesederhanaan konsep dan kemudahan dalam analisis menyebabkan metode ini banyak digunakan dalam kepentingan praktis (Duncan *et al.*, 2014). Selain itu, perbedaan hasil perhitungan faktor keamanan dengan metode lain tidak terlalu signifikan (Fredlund dan Krahn, 1977). Pada metode Bishop, perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan mengasumsikan letak bidang gelincir serta dengan bentuk melingkar seperti terlihat pada Gambar 2. Asumsi lainnya yaitu tegangan geser antar pias dianggap tidak ada, karena gaya antar pias dianggap horizontal, sehingga gaya normal, (P) dapat dicari dengan Persamaan 2.

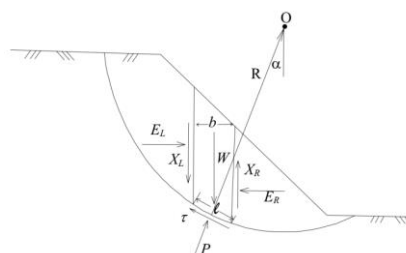
$$P = \frac{\left[W - \frac{1}{F}(c' l \sin \alpha - u l \tan \phi' \sin \alpha) \right]}{m_\alpha} \quad (2)$$

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{[\sin \alpha \tan \phi']}{F} \quad (3)$$

dengan P = gaya normal total di dasar pias dalam kN , W = berat total pias dengan lebar b dan tinggi h dalam kN/m^3 , α = sudut kemiringan dasar pias ($^\circ$), u = tekanan air pori dalam kN/m^2 , l = lebar dasar pias dalam m , c' = kohesi efektif dalam kN/m^2 , ϕ' = sudut geser dalam efektif ($^\circ$).

Dengan mengambil momen pada titik pusat lingkaran, O , seperti pada Gambar 2, maka faktor keamanan dapat diperoleh dengan Persamaan 4.

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c' l \cos \alpha + (w - u l) \tan \phi'}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (4)$$



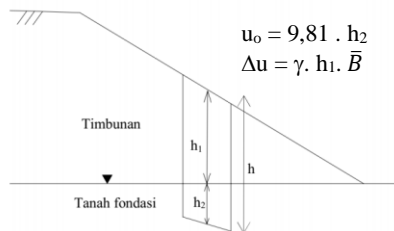
Gambar 2. Metode Bishop (Anderson and Richards 1987)

Faktor keamanan juga dapat ditentukan dengan metode B-bar. Konsep metode B-bar (\bar{B}) diperkenalkan oleh Skempton (1954) seperti dalam Persamaan 5.

$$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} \quad (5)$$

dengan \bar{B} = B-bar atau nilai B, Δu = perubahan tekanan air pori dalam kN/m², $\Delta \sigma_v$ = perubahan tegangan vertikal dalam kN/m².

Black and Lee (1973) meneliti nilai B teoritis berdasarkan tipe tanah ketika jenuh. Hasil penelitiannya menunjukkan tanah jenuh mempunyai nilai B mendekati 1. Tetapi, untuk tanah pasir padat dan lempung sangat kaku, nilai B turun menjadi sekitar 0,9. Pada penelitian ini, ketika kondisi jenuh air, asumsi nilai B-bar (\bar{B}) = 1, sehingga setiap penambahan beban (σ_v) akan meningkatkan tekanan air pori (u) dengan nilai yang sama. Gambar 3 menunjukkan lokasi salah satu pias dalam analisis stabilitas lereng.



Gambar 3. Ilustrasi perhitungan tekanan air pori awal (u_0) dan perubahan tekanan air pori (Δu).

Total tinggi pias tersebut adalah h , sedangkan h_1 merupakan tinggi pias pada timbunan dan h_2 adalah kedalaman tanah fondasi pada pias. Apabila berat isi air = 9,81 kN/m³ dan berat isi tanah timbunan adalah γ , maka tekanan air pori awal (u_0) = 9,81 · (h_2) dan perubahan tekanan air pori yang terjadi (Δu) = $\gamma \cdot h_1 \cdot \bar{B}$. Oleh karena kondisi tanah fondasi jenuh air maka nilai $\Delta u = \gamma \cdot h_1$.

Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah dipengaruhi oleh tekanan air pori yang terjadi. Apabila terjadi kenaikan tekanan air pori maka akan mengakibatkan turunnya kuat geser tanah (Butalia *et al.*, 2003; Al-Karni, 2001). Persamaan 6 menunjukkan hubungan antara kuat geser tanah dengan tekanan air pori.

$$\tau' = c' + (\sigma'_n - u) \tan \phi' \quad (6)$$

dengan τ' = kuat geser efektif dalam kN/m², σ'_n = tegangan efektif tanah dalam kN/m².

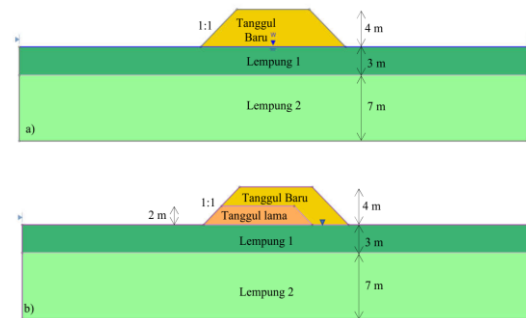
Ketika terjadi kenaikan tekanan air pori sebesar Δu , maka kuat geser tanah (τ') akan berkurang, sehingga Persamaan 6 menjadi Persamaan 7.

$$\tau' = c' + (\sigma'_n - [u + \Delta u]) \tan \phi' \quad (7)$$

Model geometri dan parameter tanah

Simulasi dilakukan pada dua kasus. Kasus pertama, pembuatan tanggul baru yang dibangun di atas tanah lempung (Gambar 4a) dan kasus kedua, peninggian tanggul di atas tanggul lama (Gambar 4b). Kemiringan lereng untuk kasus 1 dan 2 dibuat sama, yaitu 45° terhadap horizontal.

Ketinggian tanggul sebesar 4 m dari permukaan tanah pondasi. Pada kasus 2, tanggul lama mempunyai ketinggian awal sebesar 2 m dan selanjutnya ketinggiannya ditambah menjadi 4 m (Gambar 4b). Muka air tanah terletak di permukaan pondasi tanggul.



Gambar 4. Model Simulasi a) kasus pembuatan tanggul baru dan b) kasus peninggian tanggul.

Parameter berat isi tanah dan kuat geser pada masing-masing lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan untuk kasus 2, timbunan lama diasumsikan mempunyai faktor $r_u = 0,1$ karena tanah dianggap mempunyai tekanan air pori awal meskipun tidak dalam kondisi jenuh.

Prosedur analisis

Prosedur analisis dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama adalah kondisi awal. Pada kondisi ini tekanan pori awal (u_0) ditentukan dari muka air tanah dengan prosedur perhitungan seperti pada Gambar 3.

Tahap kedua adalah perhitungan perubahan tekanan air pori akibat penambahan beban timbunan tanggul. Prosedur perhitungan menggunakan B-bar sesuai dengan Persamaan 5, serta diilustrasikan pada Gambar 3.

Tahap ketiga adalah penentuan faktor keamanan yang dilakukan dengan cara mempertimbangkan penambahan tekanan air pori dalam perhitungan. Prosedur perhitungan ketiga tahap tersebut dilakukan secara otomatis dengan bantuan perangkat lunak *Slide* 2018.

Tabel 1. Parameter Tanah

| Parameter | Simbol | Satuan | Lempung 1 | Lempung 2 | Tanggul Lama | Tanggul Baru |
|-------------------|--------------|----------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| Berat isi tanah | (γ) | (kN/m ³) | 17 | 17 | 18 | 18 |
| Kohesi | (c) | (kN/m ²) | 15 | 18 | 20 | 15 |
| Sudut geser dalam | (ϕ) | ($^{\circ}$) | 20 | 25 | 25 | 25 |

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh perubahan tekanan air pori

Pada kasus 1 dan kasus 2 telah dilakukan simulasi dengan dua skenario seperti terlihat dalam Tabel 2. Skenario 1, analisis stabilitas lereng dilakukan tanpa memperhatikan pengaruh penambahan beban akibat timbunan. Sedangkan pada skenario 2, penambahan beban mempengaruhi perubahan tekanan air pori fondasi tanggul. Selanjutnya, tekanan air pori awal dan perubahan tekanan air pori digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Jumlah pias untuk masing-masing kasus ditentukan sebanyak 15.

Tabel 2. Skenario dalam simulasi analisis kestabilan lereng

| Deskripsi | Skenario 1 | Skenario 2 |
|-----------|--|---|
| Kasus 1 | - Geometri Gambar 4(a) | - Geometri Gambar 4(a) |
| | - Tanpa memperhatikan perubahan tekanan air pori | - Perubahan tekanan air pori dengan B-bar |
| Kasus 2 | - Geometri Gambar 4(b) | - Geometri Gambar 4(b) |
| | - Tanpa memperhatikan perubahan tekanan air pori | - Perubahan tekanan air pori dengan B-bar |

Hasil analisis kestabilan lereng kasus 1 tanpa perubahan tekanan air pori menunjukkan faktor keamanan sebesar 2,152. Sedangkan faktor keamanan ketika mempertimbangkan perubahan tekanan air pori sebesar 1,563. Bidang gelincir, faktor keamanan dan pusat rotasi pada kasus 1 dapat dilihat pada Gambar 5(a) dan 5(b). Pada kasus 2, fenomena turunnya faktor keamanan juga terjadi. Ketika analisis tanpa memperhatikan perubahan tekanan air pori, diperoleh faktor keamanan sebesar 2,283. Sedangkan ketika memperhatikan perubahan tekanan air pori faktor keamanan adalah sebesar 1,757. Gambar 6(a) dan 6(b) menunjukkan hasil analisis stabilitas lereng pada kasus 2. Sedangkan rekapitulasi faktor keamanan pada kasus 1 dan 2 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Faktor Keamanan pada Analisis Stabilitas Lereng Kasus 1 dan 2

| Deskripsi | FK (skenario 1) | FK (Skenario 2) |
|-----------|-----------------|-----------------|
| Kasus 1 | 2,152 | 1,563 |
| Kasus 2 | 2,283 | 1,757 |

Gambar 5(c) dan 6(c) menunjukkan grafik tekanan pori awal dan perubahan tekanan air pori skenario 2 pada kasus 1 dan 2. Tekanan pori awal hanya terjadi pada pias yang melewati muka air tanah. Sedangkan perubahan tekanan air pori hanya terjadi pada lokasi masa longsor yang bidang gelincirnya menembus lapisan lempung serta mendapatkan pembebanan dari material urugan. Fenomena turunnya faktor keamanan merupakan akibat dari penambahan tekanan air pori oleh beban timbunan yang terjadi di masa tanah bidang gelincir. Ketika tanah lempung mendapatkan pembebanan, air dalam pori tidak dapat keluar karena permeabilitas lempung yang kecil, sehingga menyebabkan tekanan air pori meningkat. Kondisi ini merupakan representasi kondisi ketika fase konstruksi.

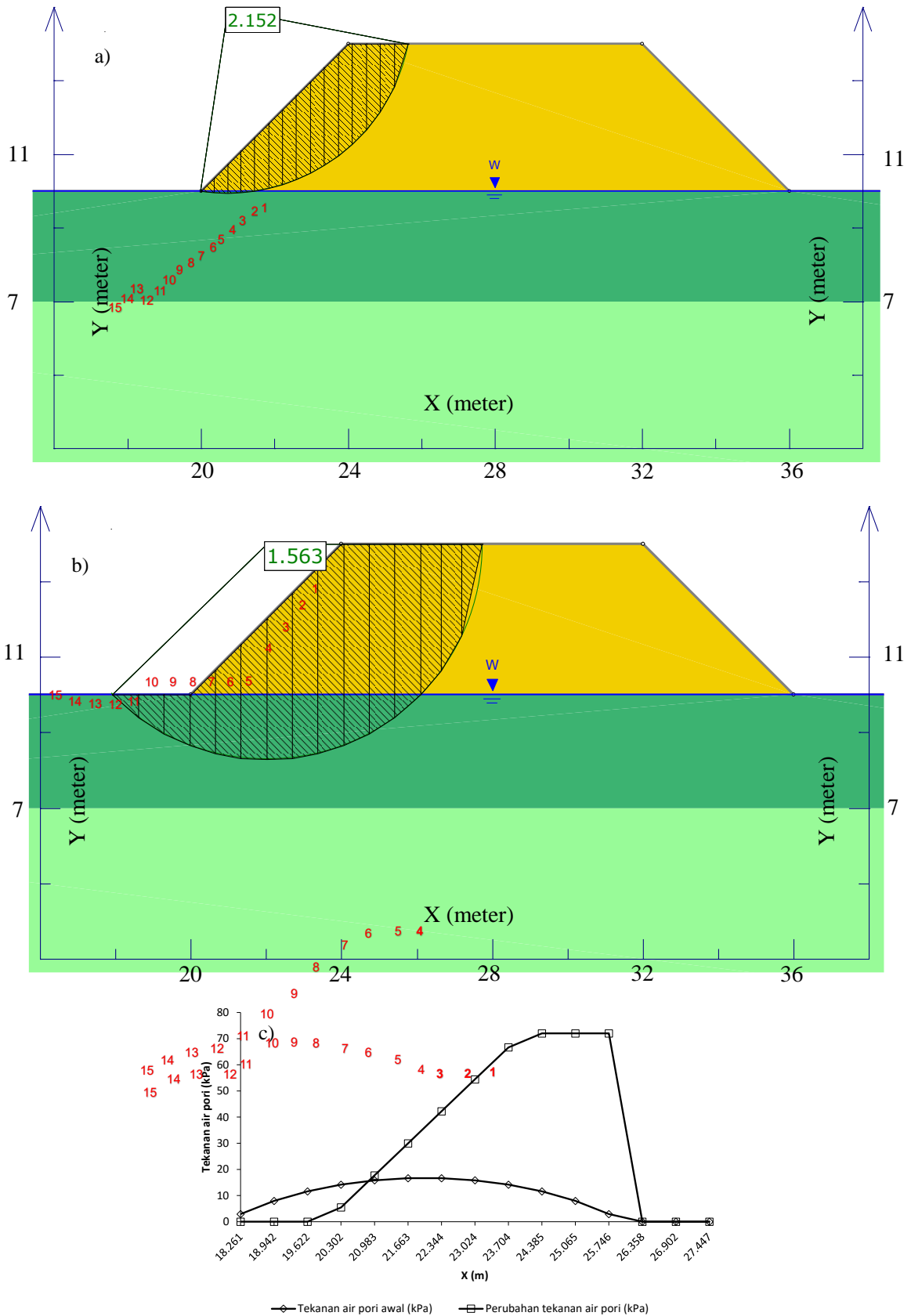
Pengaruh kondisi tanah lempung

Untuk mengetahui pengaruh kondisi tanah lempung dilakukan dengan cara mengubah parameter lapisan lempung 1 dengan parameter tanah lempung lunak dan kaku Bangkok, Thailand. Parameter tanah lempung Bangkok menggunakan hasil pengujian triaxial CIU yang telah dilakukan oleh Chanaton *et al.* (2012). Berat isi tanah dan kuat geser tanah lempung lunak dan kaku Bangkok dapat dilihat pada Tabel 4.

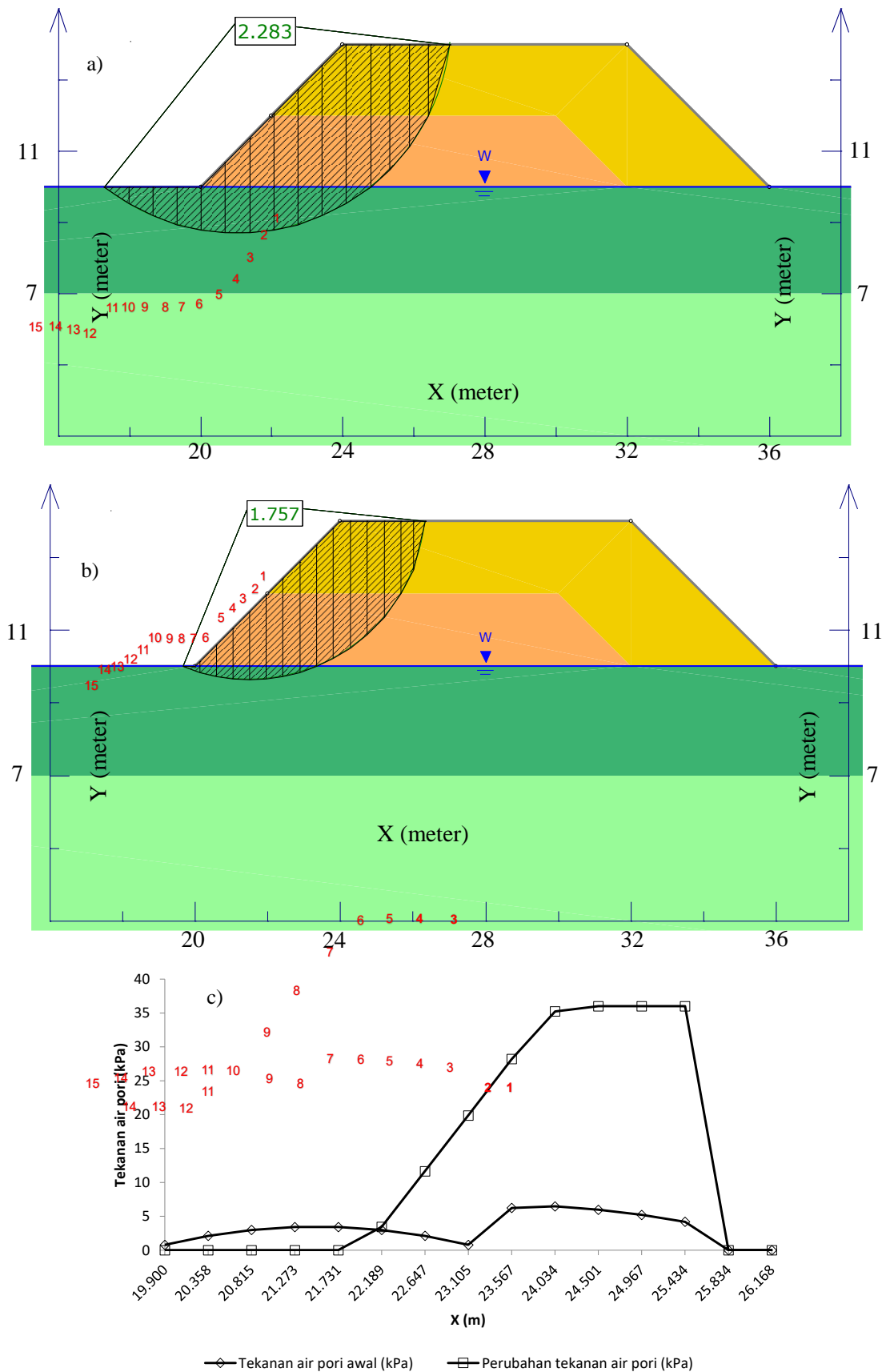
Tabel 4. Parameter tanah lempung Bangkok (Surarak *et al.*, 2012)

| Parameter | Lempung lunak | Lempung kaku |
|--------------------------------------|---------------|--------------|
| Berat isi tanah (kN/m ³) | 17,5 | 17,5 |
| c' (kPa) | 0 | 28,1 |
| ϕ' ($^{\circ}$) | 27 | 11,4 |

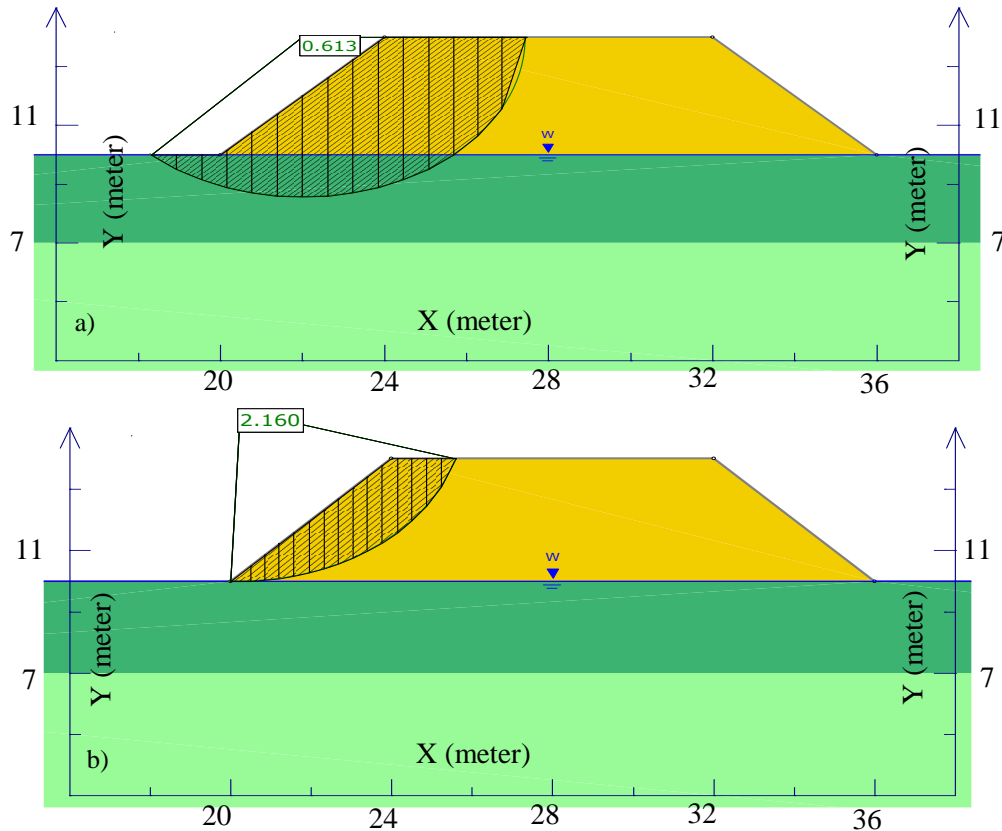
Hasil perhitungan faktor keamanan untuk lempung lunak pada kasus 1 sebesar 0,613 dan kasus 2 sebesar 1,024. Sedangkan faktor keamanan untuk lempung kaku pada kasus 1 sebesar 2,160 dan kasus 2 sebesar 1,951.



Gambar 5. Hasil analisis stabilitas lereng kasus 1, a) tanpa mempertimbangkan perubahan tekanan air pori, b) mempertimbangkan perubahan tekanan air pori, c) grafik tekanan air pori awal dan perubahan tekanan air pori pada masing-masing pias masa longsor skenario 2.



Gambar 6. Hasil analisis stabilitas lereng kasus 2, a) tanpa mempertimbangkan perubahan tekanan air pori, b) mempertimbangkan perubahan tekanan air pori, c) grafik tekanan air pori awal dan perubahan tekanan air pori pada masing-masing pias masa longsoran skenario 2.



Gambar 7. Hasil Analisis stabilitas lereng kasus 1 dengan mengubah, a) lempung 1 dengan lempung lunak Bangkok, c) lempung 1 dengan lempung kaku Bangkok.

Hasil analisis stabilitas lereng kasus 1 serta mengubah parameter lempung 1 dengan lempung Bangkok dan perbandingan letak bidang gelincir antara lempung lunak dan kaku dapat dilihat pada Gambar 7. Kuat geser tanah (τ') pada lempung lunak lebih kecil dibandingkan lempung kaku. Apabila terjadi kenaikan tekanan air pori ini, maka akan menurunkan kuat geser tanah yang berakibat bidang gelincir menembus lapisan lempung lunak sehingga terjadilah kelongsoran. Sedangkan pada lempung kaku, karena kuat geser tanah awal sudah cukup besar maka kenaikan tekanan air pori yang terjadi tidak banyak berpengaruh terhadap stabilitas lereng, meskipun pada timbunan yang sangat tinggi mempunyai potensi seperti halnya yang terjadi pada lempung lunak.

Implikasi dalam desain dan konstruksi tanggul

Banjir merupakan masalah serius di beberapa negara. Manajemen mitigasi bencana melalui upaya non-struktural dan struktural telah dilakukan (Kim *et al.*, 2019; Velasco *et al.*, 2018). Di beberapa lokasi, pembangunan tanggul baru maupun peninggian tanggul dilakukan dalam proyek pengendalian banjir. Beberapa daerah kota besar di Indonesia, pembangunan tanggul menghadapi masalah karena harus berdiri diatas tanah lunak. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, tanah

lunak mempunyai pengaruh yang paling besar terhadap perubahan tekanan air pori selama fase konstruksi. Untuk menghindari terjadinya longoran, ketika fase desain perlu memperhatikan efek perubahan tekanan air pori. Kombinasi analisis stabilitas lereng dengan keseimbangan batas dan metode B-bar dapat digunakan dalam fase desain. Metode tersebut cukup efektif, sederhana dan mudah dipahami sehingga dapat digunakan untuk praktisi. Brown dan Gillani (2016) juga menyarankan penggunaan metode B-bar dalam perhitungan faktor keamanan pada masa konstruksi pembangunan bendungan *tailing*. Setelah fase desain dan memasuki fase konstruksi, pemantauan perubahan tekanan pori pada tanah lunak juga perlu dilakukan dengan cara memasang instrumentasi berupa piezometer. Pengurangan yang terlalu cepat akan mengakibatkan tekanan air pori meningkat dalam durasi cepat, sehingga mengakibatkan kuat geser tanah berkurang serta dapat menyebabkan kelongsoran (Badarinath dan El Naggari, 2021).

Kesimpulan

Pembangunan tanggul baru dan peninggian tanggul sering dilakukan dalam proyek pengendalian banjir. Dalam pembangunan tanggul tersebut, seringkali tanggul harus dibangun diatas tanah lempung jenuh air. Karena lempung mempunyai permeabilitas

kecil, maka pada saat diberikan pembebanan mengakibatkan tekanan air pori meningkat secara tiba-tiba sehingga kuat geser tanah turun. Kondisi tersebut terjadi ketika fase konstruksi. Hasil simulasi menunjukkan terjadi penurunan faktor keamanan ketika dalam analisis dilakukan dengan memperhatikan perubahan tekanan air pori. Faktor keamanan tersebut turun cukup signifikan ketika kuat geser tanah pada fondasi tanggul kecil atau fondasi tanggul berupa lempung lunak. Untuk menghindari kelongsoran selama konstruksi, pada saat fase desain tanggul, perhitungan stabilitas lereng harus memperhatikan perubahan tekanan air pori dan ketika fase konstruksi, instrumentasi berupa piezometer harus dipasang dan selalu dimonitor secara berkala. Kontrol kecepatan penimbunan dan perubahan tekanan air pori harus dilakukan selama konstruksi untuk menghindari peningkatan air pori yang berlebih.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih, kami tujukan kepada Fakultas Teknik UNNES yang telah memberikan dukungan dana dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

Al-Karni, A. A. (2001). Shear strength reduction due to excess pore water pressure. In *Proceedings of the 4th International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics: San Diego, CA* (pp. 1-2).

Anderson, M. G., & Richards, K. S. (1987). Modelling slope stability: the complimentary nature of geotechnical and geomorphological approaches. *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*. John Wiley and Sons New York. 1987. p 1-9, 27 ref.

Badarinath, R., El Naggar, H. (2021). Effects of construction sequence and pace on the stability of high embankments founded on soft marine clay. *Transportation Geotechnics*, 30(21). 1-13.

Bishop, A. W., and Bjerrum, L. (1960). *The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems*, Proceedings of the ASCE Research Conference of Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder. CO, 437-501.

Black, K. D. and Lee, K. L. (1973) Saturating laboratory samples by back pressure, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (ASCE)* 99 (1973), 75-93.

Brown, B., & Gillani, I. (2016). Common errors in the slope stability analyses of tailings dams. In *APSSIM 2016: Proceedings of the First Asia*

Pacific Slope Stability in Mining Conference (pp. 545-556). Australian Centre for Geomechanics.

Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon T.L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability (2nd ed.)*. John Wiley & Sons, NJ: Hoboken.

Fredlund, Delwyn & Krahn, J. (2011). Comparison of slope stability methods. *Canadian Geotechnical Journal*, 14. 429-439.

Kim, K., Han, D., Kim, D., Wang, W., Jung, J., Kim, J., & Kim, H. S. (2019). Combination of structural measures for flood prevention in Anyangcheon River Basin, South Korea. *Water*, 11(11), 2268.

Law, K.T., Bozozuk, M. (1979). A method of estimating excess pore pressures beneath embankments on sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 16 (4). 691-702.

Maulana, I., Lukito, S. A., Suharyanto, S., & Pranoto, S. (2017). Perencanaan pengendalian banjir sungai Tuntang di Desa Trimulyo Kabupaten Demak. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(4), 447-459.

Nugroho, S. (2008). Analisis curah hujan penyebab banjir besar di Jakarta pada awal Februari 2007. *Jurnal Air Indonesia*, 4 (1). 50-55.

Skempton, A.W. (1954). *The pore-pressure coefficients A and B*. *Geotechnique*, 4 (4). 143-147.

Surarak, C., Likitlesuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*, 52(4). 682-697.

Sutopo, Y. (2006). Pengendalian banjir sungai Garang melalui upaya peningkatan elevasi mercu tanggul, luas penampang basah sungai dan pengurangan debit banjir. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 8 (2). 103-114.

Butalia, T., Huang, J., Kim, D., Croft, F. (2003). Effect of Moisture Content and Pore Water Pressure Buildup on Resilient Modulus of Cohesive Soils in Ohio. *Resilient Modulus Testing for Pavement Components*, 1437. 70-84.

Velasco, M., Russo, B., Cabello, A., Termes, M., Sunyer, D., Malgrat, P. (2018). *Assessment of the effectiveness of structural and nonstructural measures to cope with global change impacts in Barcelona*. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2018). S55-S68.