

STUDI STABILITAS BENDUNGAN URUGAN BATU PADA TIGA KONDISI OPERASI WADUK DAN PERUBAHAN MUKA AIR CEPAT

Anafi Minmahddun*¹

1, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

Informasi Artikel

Kata Kunci:

Bendungan urugan batu, *rapid drawdown*, *rapid rising*, stabilitas lereng

* Penulis Korespondensi.

Nama Penulis Korespondensi

Alamat E-mail:

anafi.minmahddun@uho.ac.id

Abstrak

Bendungan urugan batu sangat dipengaruhi oleh fluktuasi muka air waduk, yang berdampak pada tekanan air pori, tegangan efektif, dan stabilitas lereng. Studi ini mengevaluasi stabilitas lereng pada tiga kondisi operasi utama: Muka Air Minimum (MAM), Muka Air Normal (MAN), dan Muka Air Banjir (MAB), serta kondisi transien berupa kenaikan muka air cepat (*rapid rising*) dan penurunan muka air cepat (*rapid drawdown*). Analisis rembesan dilakukan dengan pendekatan *steady-state* untuk kondisi MWL, NWL, dan FWL, serta pendekatan transien untuk *rapid rising* dan *rapid drawdown* menggunakan metode elemen hingga. Faktor keamanan dihitung menggunakan metode Morgenstern–Price. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi *steady-state*, faktor keamanan lereng hulu masing-masing adalah 1,95 (MWL), 2,35 (NWL), dan 2,39 (FWL), sedangkan lereng hilir tetap stabil dalam kisaran 1,99–2,00 karena aliran rembesan tidak menembus inti kedap air. Pada kondisi *rapid drawdown*, faktor keamanan menurun akibat ketidakseimbangan antara tekanan hidrostatik dan tekanan air pori internal, sedangkan selama *rapid rising* faktor keamanan meningkat karena adanya tambahan tahanan dari tekanan hidrostatik. Seluruh nilai faktor keamanan memenuhi standar minimum yang dipersyaratkan, sehingga struktur dinyatakan stabil pada semua skenario operasi.

1. Pendahuluan

Bendungan urugan batu merupakan struktur penahan air yang banyak digunakan karena fleksibilitas konstruksi serta kemampuannya beradaptasi terhadap berbagai kondisi geoteknik. Dalam penerapannya, stabilitas lereng menjadi aspek utama yang harus diperhatikan untuk menjamin keselamatan operasi jangka panjang. Sebagai sistem geoteknik yang tersusun atas material granular dengan zonasi berpermeabilitas berbeda, bendungan jenis ini sangat dipengaruhi oleh perubahan kondisi hidraulik seperti fluktuasi muka air waduk dan dinamika rembesan. Perubahan tersebut memengaruhi tekanan air pori, tegangan efektif, serta respons deformasi tubuh bendungan, sehingga evaluasi stabilitas pada berbagai kondisi operasi waduk menjadi sangat krusial.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa stabilitas bendungan urugan batu dipengaruhi oleh sejumlah faktor utama, termasuk dinamika tekanan pori, sifat mekanis material, konfigurasi geometri lereng, serta beban eksternal seperti aktivitas seismik. Faktor-faktor tersebut saling berinteraksi dan dapat menurunkan keandalan bendungan jika tidak dianalisis secara menyeluruh.

Salah satu faktor yang paling menentukan adalah perubahan tekanan air pori di dalam material urugan. Saat pengisian awal waduk, hubungan antara muka air (*phreatic line*) dan tekanan pori internal merupakan komponen penting dalam menjaga stabilitas lereng. Ketika muka air meningkat, tekanan pori bertambah dan menurunkan tegangan efektif, sehingga meningkatkan potensi ketidakstabilan apabila tidak dikendalikan dengan baik [1]. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa perubahan muka air secara mendadak dapat menciptakan gradien hidraulik yang tinggi sehingga memicu deformasi dan ketidakstabilan, terutama pada bagian atas lereng hulu [2], [3].

Selain aspek hidraulik, sifat mekanis material urugan batu seperti sudut geser dalam dan kohesi berpengaruh signifikan terhadap stabilitas lereng. Studi menunjukkan bahwa perilaku nonlinier material di bawah beban dapat memengaruhi faktor keamanan, terutama ketika kadar air berubah secara drastis [4], [5]. Penurunan parameter kuat geser akibat perubahan kadar air juga berpotensi menurunkan stabilitas jika tidak diperhitungkan dalam desain [6].

Konfigurasi geometrik bendungan, termasuk kemiringan dan tinggi lereng, juga memegang peranan penting. Lereng yang lebih curam umumnya memiliki faktor keamanan yang lebih rendah [7]. Selain itu, beban seismik dapat memperburuk kondisi stabilitas dengan mengubah distribusi tegangan efektif dan meningkatkan risiko kelongsoran [8]. Peran sistem drainase juga tidak dapat diabaikan: drainase yang efektif dapat mengurangi tekanan pori berlebih, sedangkan sistem yang tidak memadai dapat mempercepat terjadinya ketidakstabilan [9], [10].

Interaksi antara rembesan dan deformasi menjadi aspek tambahan yang perlu diperhatikan. Studi kasus kegagalan menunjukkan bahwa rembesan dapat memicu kerusakan lokal ketika terbentuk zona jenuh atau lensa air yang tidak terduga di dalam tubuh bendungan, sehingga meningkatkan tekanan pori secara tiba-tiba dan menyebabkan potensi kegagalan lereng [11]. Penggunaan teknik pemodelan canggih direkomendasikan untuk memprediksi interaksi ini secara lebih akurat [12].

Di sisi lain, penerapan zonasi material merupakan komponen fundamental dalam desain bendungan urugan batu yang aman. Penempatan material berukuran besar dan kuat pada zona kritis terbukti meningkatkan stabilitas lereng [13]. Zonasi juga berfungsi sebagai pengendali rembesan melalui penempatan material impermeabel pada zona tertentu. Penerapan zonasi yang tepat terbukti mampu mengurangi tekanan air pori berlebih dan meningkatkan performa drainase, seperti yang ditunjukkan dalam proyek-proyek sebelumnya [14], [15].

Berdasarkan perkembangan studi-studi tersebut, masih terdapat kebutuhan untuk melakukan evaluasi komprehensif terhadap perilaku stabilitas bendungan urugan batu pada berbagai kondisi muka air dan skenario hidraulik yang realistis, termasuk kondisi transien seperti rapid rising dan rapid drawdown. Perubahan muka air yang cepat merupakan kondisi operasi yang sering terjadi pada bendungan besar, namun respons stabilitasnya dapat sangat berbeda dibandingkan kondisi *steady state* sehingga perlu dianalisis secara khusus.

Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas lereng bendungan urugan batu pada tiga kondisi operasi utama, yaitu Muka Air Minimum (MAM), Muka Air Normal (MAN), dan Muka Air Banjir (MAB), serta pada kondisi perubahan muka air cepat (rapid rising dan rapid drawdown). Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis faktor keamanan terhadap standar kestabilan bendungan yang dipersyaratkan [16] untuk menilai tingkat keamanan struktur pada setiap kondisi operasi.

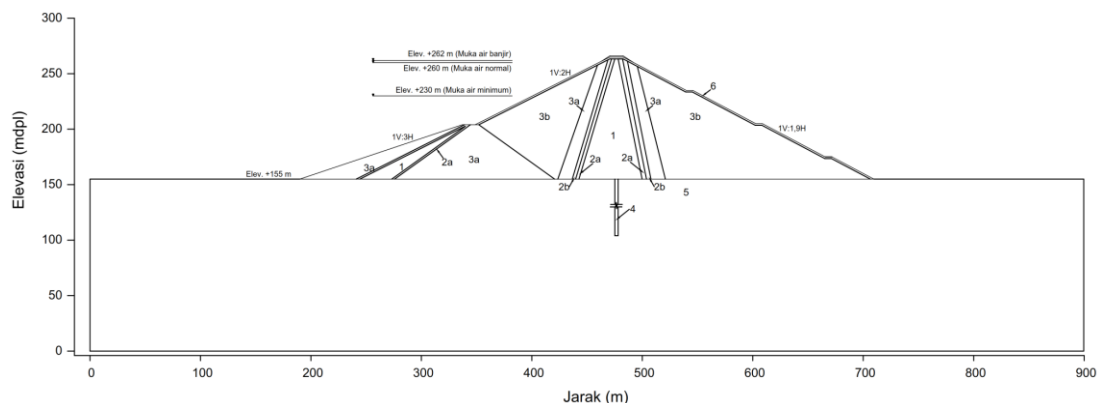
Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan analisis rembesan dengan dua pendekatan, yaitu aliran *steady state* untuk kondisi MAM, MAN, dan MAB, serta aliran *transien* untuk kondisi *rapid rising* dan *rapid drawdown*. Selanjutnya, perhitungan faktor keamanan dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas dengan pendekatan Morgenstern–Price [17]. Melalui kombinasi pendekatan numerik ini, penelitian ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai respons tubuh bendungan terhadap fluktuasi muka air, peran zonasi material dalam mengendalikan rembesan, serta implikasinya terhadap stabilitas lereng.

Hasil analisis diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kondisi operasi yang paling kritis. Temuan tersebut diharapkan dapat menjadi dasar penting dalam perumusan strategi mitigasi risiko, peningkatan sistem pemantauan, dan pengambilan keputusan operasional untuk menjaga keselamatan bendungan secara berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Bendungan ini merupakan bendungan tipe urugan batu dengan inti tegak, yang memiliki tinggi konstruksi sekitar 114 m dari elevasi terendah serta panjang puncak mencapai 1.715 m. Struktur bendungan terbagi ke dalam enam zona utama. Zona 1 berfungsi sebagai zona kedap air. Zona 2A merupakan lapisan filter halus, sedangkan Zona 2B berfungsi sebagai filter kasar. Zona 3A adalah timbunan batu transisi, sementara Zona 3B merupakan timbunan batu dengan ukuran yang lebih besar. Pada sisi hulu, bagian terluar dilindungi oleh Zona 6, yaitu lapisan riprap dengan ukuran maksimum batu 100 cm.

Fondasi bendungan tersusun atas lapisan breksi vulkanik yang diklasifikasikan sebagai Zona 5. Pada dasar bendungan juga dipasang tirai sementasi (grout curtain), yang direpresentasikan sebagai Zona 4, berfungsi untuk mengurangi potensi rembesan melalui fondasi. Pembagian zona lengkap dari bendungan ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 1.



Gambar 1. Pembagian zona bendungan

Analisis stabilitas lereng dilakukan pada tiga kondisi muka air, yaitu Muka Air Minimum (MAM) pada elevasi +230 m, Muka Air Normal (MAN) pada elevasi +260 m, dan Muka Air Banjir (MAB) pada elevasi +262 m. Untuk ketiga kondisi tersebut, analisis rembesan dilakukan dengan asumsi aliran *steady state*.

Selain itu, evaluasi stabilitas juga dilakukan untuk kondisi kenaikan muka air cepat (*rapid rising*) dan penurunan muka air cepat (*rapid drawdown*) menggunakan analisis rembesan transien (*transient*). Analisis rembesan dilakukan dengan metode elemen hingga, sedangkan perhitungan faktor keamanan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas dengan metode Morgenstern–Price [17].

Kondisi muka air naik dan surut secara cepat disederhanakan menggunakan asumsi bahwa perubahan muka air melebihi 1 m/hari, sesuai pendekatan yang direkomendasikan dalam literatur [2], [3]. Fungsi perubahan muka air waduk terhadap waktu, yang digunakan sebagai kondisi batas dalam analisis transien, ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Properties material bendungan

Zona		1	2A	2B	3A	3B	5	4
Model material		Mohr-coulomb						
Parameter	γ (kN/m ³)	15	22	23	22	21,5	26	26
	c (KPa)	20	30	30	40	40	1100	1100
	ϕ (°)	18	36	38	36	36	35	35

Tabel 2. Kondisi batas analisis muka air naik dan surut dengan cepat

No	Hari	Rapid Drawdown	Rapid Rising	Keterangan
		Elevasi (m)	Elevasi (m)	
1	0	260	230	Tahap 1
2	2	257	233	Tahap 2
3	4	254	236	Tahap 3
4	6	251	239	Tahap 4
5	8	248	242	Tahap 5
6	10	245	245	Tahap 6
7	12	242	248	Tahap 7
8	14	239	251	Tahap 8
9	16	236	254	Tahap 9
10	18	233	257	Tahap 10
11	20	230	260	Tahap 11

3. Hasil dan Pembahasan

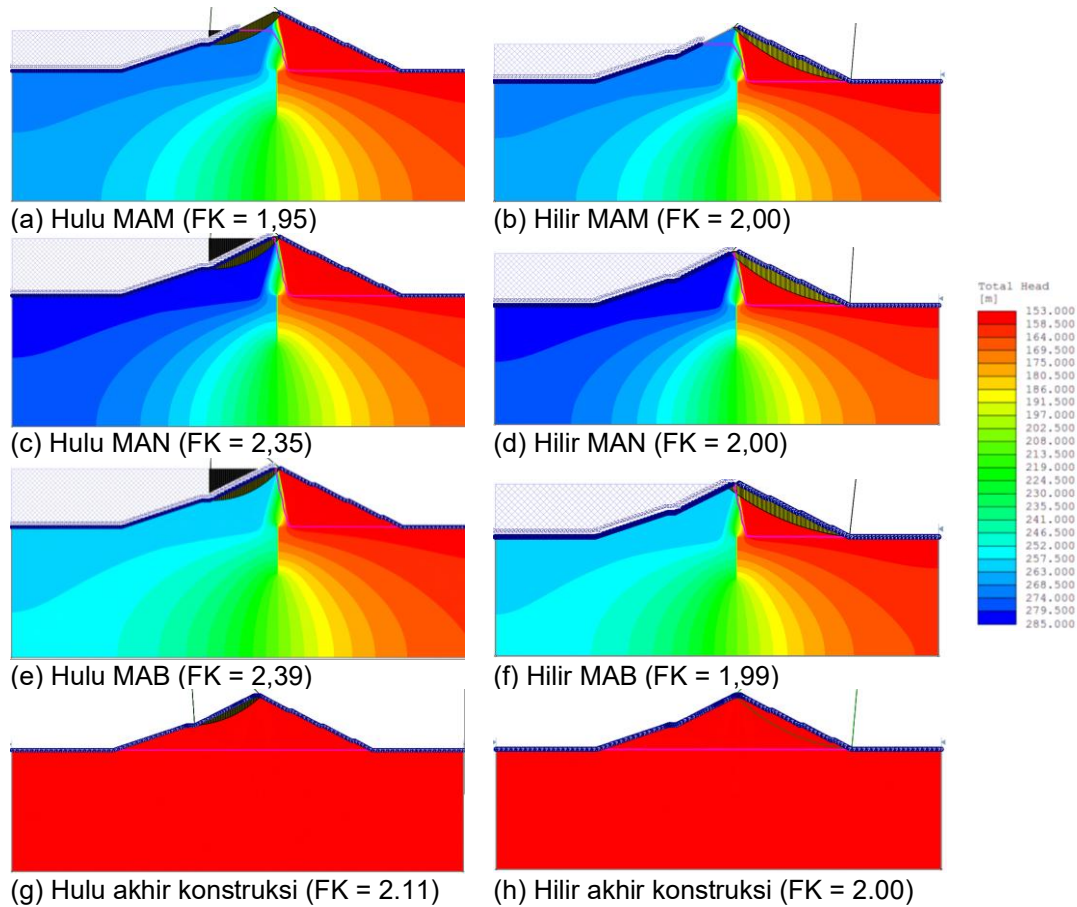
3.1. Analisis Stabilitas Bendungan Kondisi MAM, MAN dan MAB

Hasil analisis stabilitas lereng bendungan pada sisi hulu dan hilir untuk berbagai kondisi muka air dalam keadaan rembesan *steady state* ditunjukkan pada Gambar 2. Pada kondisi akhir masa konstruksi (bendungan sebelum pengisian air), nilai faktor keamanan ditentukan terutama oleh geometri lereng. Pada kondisi awal ketika bendungan masih dalam keadaan kosong sebelum impounding, nilai FK untuk lereng hulu dan hilir masing-masing adalah 2,11 dan 2,00. Nilai ini menunjukkan bahwa secara geometrik bendungan telah dirancang dengan konfigurasi yang memberikan stabilitas yang memadai.

Pada tahap pengisian awal waduk hingga mencapai Muka Air Minimum (MAM), terlihat adanya penurunan nilai FK pada lereng hulu menjadi 1,95. Penurunan ini terjadi karena kenaikan muka air menyebabkan peningkatan tekanan air pori akibat rembesan pada zona hulu, sehingga menurunkan tegangan efektif dan kekuatan geser tanah. Meskipun aliran berada dalam kondisi *steady*, tekanan air pori tetap lebih tinggi dibandingkan kondisi kosong sehingga menghasilkan nilai FK yang lebih rendah. Pada sisi hilir, nilai FK tetap berada pada kisaran 2,00, menandakan bahwa rembesan *steady* pada kondisi MAM tidak menimbulkan perubahan tekanan air pori yang signifikan pada bidang gelincir hilir. Hal ini juga terlihat pada Gambar 1b bahwa aliran rembesan tidak memotong bidang gelincir di sisi hilir.

Pada kondisi Muka Air Normal (MAN), nilai FK pada sisi hulu meningkat menjadi 2,35. Meskipun muka air yang lebih tinggi menambah tekanan air pori, tekanan hidrostatik pada hulu memberikan kontribusi yang lebih dominan dalam

menahan gaya geser, sehingga meningkatkan stabilitas lereng. Nilai FK sisi hilir tetap berada pada 2,00, menunjukkan bahwa kondisi aliran steady pada MAN tetap tidak mempengaruhi tegangan efektif pada zona hilir.



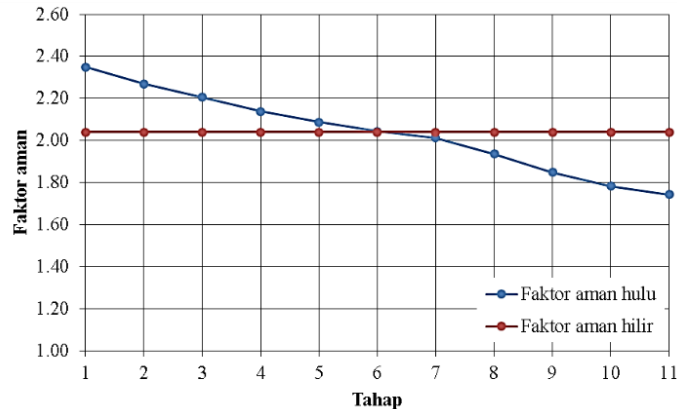
Gambar 2. Hasil analisis faktor keamanan lereng tubuh bendungan

Pada kondisi ekstrem, yaitu Muka Air Banjir (MAB), nilai FK lereng hulu meningkat menjadi 2,39, sedangkan lereng hilir berada pada 1,99. Kondisi MAB tidak menyebabkan penurunan stabilitas karena besarnya tekanan hidrostatik pada hulu menghasilkan kondisi tahanan yang lebih baik terhadap potensi kelongsoran. Penurunan kecil pada faktor keamanan sisi hilir terjadi karena pada Gambar 1f sebagian garis phreatic mulai memotong bidang gelincir, sehingga terdapat zona kecil yang mengalami penurunan kekuatan geser. Namun, pengaruhnya sangat terbatas sehingga penurunan FK tidak signifikan.

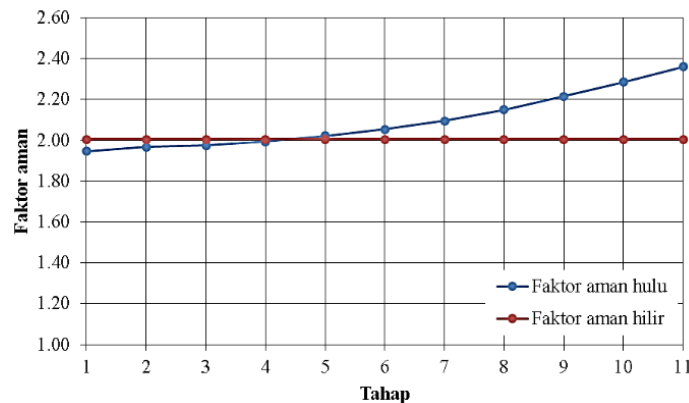
Salah satu faktor utama yang menyebabkan nilai FK di sisi hilir tidak mengalami perubahan besar pada seluruh kondisi muka air adalah keberadaan inti kedap (impermeable core) yang terletak di tengah tubuh bendungan. Inti ini berfungsi mengarahkan aliran rembesan agar tetap berada pada zona hulu, sehingga aliran steady pada kondisi MAM, MAN, maupun MAB tidak melampaui inti menuju hilir. Dengan demikian, fluktuasi muka air di hulu tidak menyebabkan perubahan tekanan air pori ataupun tegangan efektif di sisi hilir. Hal ini membuat kapasitas geser tanah di bagian hilir tetap stabil, dengan nilai FK yang relatif konstan pada kisaran 1,99–2,00 di seluruh kondisi muka air. Hasil analisis faktor aman lereng hulu dan hilir bendungan pada kondisi MAM, MAN dan MAB masih memenuhi kriteria faktor aman minimum yang dipersyaratkan yaitu 1,50.

3.2. Analisis Stabilitas Kondisi Rapid Rising dan Rapid Drawdown

Hasil analisis faktor aman lereng bendungan pada kondisi rapid drawdown dan rapid rising berturut-turut terdapat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Hasil analisis menunjukkan bahwa respon stabilitas lereng pada kondisi *rapid rising* memiliki pola yang berlawanan dengan *rapid drawdown*. Pada kondisi *rapid drawdown*, terjadi penurunan nilai faktor keamanan. Hal ini disebabkan oleh hilangnya tekanan hidrostatik penahan pada permukaan lereng, sementara tekanan air pori di dalam tubuh bendungan belum sempat menurun karena proses disipasi membutuhkan waktu lebih lama. Akibatnya, terjadi ketidakseimbangan antara tekanan air pori internal yang masih tinggi dan berkurangnya tekanan luar, sehingga lereng menjadi lebih rentan terhadap kegagalan.



Gambar 3. Hasil analisis faktor keamanan lereng bendungan kondisi rapid drawdown



Gambar 4. Hasil analisis faktor aman lereng bendungan kondisi rapid rising

Sebaliknya, pada kondisi *rapid rising*, faktor keamanan justru meningkat. Kenaikan muka air memberikan tambahan tekanan hidrostatik yang bekerja sebagai gaya penahan terhadap potensi kelongsoran. Pada saat yang sama, zona lereng hulu belum mengalami penjujukan penuh dalam waktu singkat, sehingga peningkatan tekanan air pori di dalam tubuh bendungan terjadi secara bertahap. Kombinasi antara tambahan tekanan hidrostatik dan keterlambatan penjujukan ini menghasilkan peningkatan momen penahan, sehingga nilai faktor keamanan lereng cenderung meningkat.

Pada lereng hilir, baik kondisi *rapid rising* maupun *rapid drawdown* tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai faktor keamanan. Hal ini disebabkan oleh inti kedap dengan permeabilitas rendah yang membatasi aliran rembesan sehingga garis freatik tidak memotong bidang gelincir pada sisi hilir. Dengan tidak adanya perubahan tekanan air pori maupun tegangan geser yang berarti di zona hilir ketika muka air di hulu berubah, faktor keamanan lereng hilir tetap berada pada kisaran yang relatif konstan. Hasil analisis faktor aman lereng hulu dan hilir bendungan pada kondisi *rapid rising* dan *rapid drawdown* masih memenuhi kriteria faktor aman minimum yang dipersyaratkan yaitu 1,20.

4. Kesimpulan

Hasil evaluasi stabilitas menunjukkan bahwa bendungan urugan batu ini memiliki tingkat keamanan yang memadai pada seluruh skenario operasi waduk yang dianalisis. Pada kondisi awal sebelum pengisian waduk, faktor keamanan (FK) lereng hulu dan hilir berada pada 2,11 dan 2,00, yang mencerminkan stabilitas geometri bendungan yang baik. Ketika waduk mulai diisi hingga mencapai kondisi Muka Air Minimum (MAM), FK hulu menurun menjadi 1,95 akibat peningkatan tekanan air pori yang menurunkan tegangan efektif. Namun, pada kondisi Muka Air Normal (MAN) dan Muka Air Banjir (MAB), FK meningkat masing-masing menjadi 2,35 dan 2,39. Kenaikan muka air ini memberikan tambahan tahanan geser berupa tekanan hidrostatik pada permukaan lereng hulu, sehingga meningkatkan gaya penahan terhadap potensi kelongsoran. Sementara itu, FK lereng hilir tetap hampir konstan pada kisaran 1,99–2,00 karena aliran rembesan *steady state* tidak melampaui inti kedap yang membatasi perubahan tekanan pori pada sisi hilir.

Pada kondisi *transien*, respons stabilitas menunjukkan pola yang konsisten dengan perilaku hidraulik bendungan urugan batu. Pada skenario *rapid drawdown*, nilai FK lereng hulu menurun karena berkurangnya tekanan

hidrostatik penahan pada permukaan lereng sementara tekanan air pori internal belum sempat berkurang. Kondisi ini menghasilkan ketidakseimbangan tekanan yang meningkatkan kerentanan lereng terhadap ketidakstabilan. Sebaliknya, pada *rapid rising*, nilai FK meningkat karena tekanan hidrostatik bertambah lebih cepat dibanding kenaikan tekanan air pori dalam tubuh bendungan. Pola ini menunjukkan bahwa tekanan hidrostatik pada *rapid rising* berperan signifikan dalam menjaga stabilitas lereng pada fase kenaikan muka air yang cepat.

Secara keseluruhan, nilai faktor keamanan untuk seluruh skenario—baik steady state (MAM, MAN, MAB) maupun transien (*rapid rising* dan *rapid drawdown*)—masih berada di atas batas minimum yang disyaratkan, yaitu 1,50 untuk kondisi normal dan 1,20 untuk kondisi transien. Hal ini mengindikasikan bahwa zonasi bendungan, desain inti kedap, serta perilaku hidraulik yang terjadi masih berada dalam batas aman. Temuan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kondisi operasi yang paling kritis serta dapat menjadi dasar bagi penguatan strategi mitigasi risiko dan peningkatan sistem pemantauan keamanan bendungan secara berkelanjutan.

Referensi

- [1] T. F. Fathani, A. Minmahddun, and F. Faris, "Determination of Stability During First Impounding in Jatigede Earth Dam," *J. Appl. Geol.*, vol. 3, no. 2, pp. 56–61, 2019, doi: 10.22146/jag.48592.
- [2] X. Zheng, B. Yan, W. Wang, K. Du, and Y. Fang, "Seepage–Deformation Coupling Analysis of a Core Wall Rockfill Dam Subject to Rapid Fluctuations in the Reservoir Water Level," *Water*, vol. 16, no. 11, p. 1621, 2024, doi: 10.3390/w16111621.
- [3] Z. Li, W. Ye, M. Marençe, and J. D. Bricker, "Unsteady Seepage Behavior of an Earthfill Dam During Drought-Flood Cycles," *Geosciences*, vol. 9, no. 1, p. 17, 2018, doi: 10.3390/geosciences9010017.
- [4] F. L. Jiang, Z. G. Yang, G. H. Li, S. Y. Feng, and B. Lei, "The Influencing Factors' Identification and Analysis of Rockfill Dam Slope's Stability in Tailing Pond Based on RS and PCA," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 724, pp. 144–147, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.724.144.
- [5] S. Yu, L. H. Chen, Z. P. Xu, and N. Chen, "Analysis of Earth-Rockfill Dam Slope Stability by Strength Reduction Method Based on Nonlinear Strength," *Adv. Mater. Res.*, vol. 243–249, pp. 2271–2275, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.243-249.2271.
- [6] Y. Qi, X. Cao, R. Cao, J. Huang, A. Yan, and D. Xu, "The Critical Role of α and ϕ in Ensuring Stability: A Study on Rockfill Dams," *Open Geosci.*, vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.1515/geo-2022-0712.
- [7] P. Yi, J. Liu, and C. Xu, "Reliability Analysis of High Rockfill Dam Stability," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1155/2015/512648.
- [8] R. Pang and L. Song, "Stochastic Dynamic Response Analysis of the 3D Slopes of Rockfill Dams Based on the Coupling Randomness of Strength Parameters and Seismic Ground Motion," *Mathematics*, vol. 9, no. 24, p. 3256, 2021, doi: 10.3390/math9243256.
- [9] Z. Kahot, R. Dkiouak, and A. Khamlichi, "Reliability Analysis of Slope Stability in Earthen Dams Following Rapid Drawdown," *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 101–112, 2019, doi: 10.1556/1848.2018.0011.
- [10] M. K. Malik and I. R. Karim, "Seepage and Slope Stability Analysis of Haditha Dam Using Geo-Studio Software," *Iop Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 928, no. 2, p. 22074, 2020, doi: 10.1088/1757-899x/928/2/022074.
- [11] H. Zhang, Q. Li, J. Wang, and B. Fu, "The Impact of Lenses on the Seepage Failure of Tailings Dam," *PLoS One*, vol. 19, no. 8, p. e0305425, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0305425.
- [12] S. Athani, Shivamanth, C. H. Solanki, and G. R. Dodagoudar, "Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method," *Aquat. Procedia*, vol. 4, pp. 876–883, 2015, doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.110.
- [13] L. Ormann, M. A. Zardari, H. Mattsson, A. Bjelkevik, and S. Knutsson, "Numerical Analysis of Strengthening by Rockfill Embankments on an Upstream Tailings Dam," *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 4, pp. 391–399, 2013, doi: 10.1139/cgj-2012-0255.
- [14] U. Ş. Çavuş and M. Kilit, "Ön Yüzü Geomembran Kaplı Yüksek Bir Kaya Dolgu Barajın Deprem Ve Geomembranda Yırtık Olması Durumunda Performansının Değerlendirilmesi," *Eur. J. Sci. Technol.*, pp. 460–470, 2019, doi: 10.31590/ejosat.549123.
- [15] X. Lu, H. Zhou, J. Liu, S. Di, and Y. Zhang, "Study on the Shape of Super-High Face Rockfill Dam With Sloping Compound Structure," *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 787, no. 1, p. 12020, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/787/1/012020.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8064:2016 Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. BANDUNG: Badan Standardisasi Nasional, 2016.
- [17] N. R. Morgenstern and V. E. Price, "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces," *Géotechnique*, vol. 15, pp. 79–93, 1965.