

Deformasi Bendungan Cirata berdasarkan Analisis Data Instrumen Patok Geser

¹Dian Arief Pramudya Pratomo, ²Suharyanto, ³Pranoto Samto Atmojo

^{1,2}Departemen Teknik Sipil UNDIP, Jl. Prof. Soedarto, SH. – Tembalang, Semarang

³Politeknik Pekerjaan Umum Semarang, Jl. Prof. Soedarto, SH. – Tembalang, Semarang
e-mail: dianpramudya41@gmail.com

Abstrak

Bendungan urugan batu membran beton (UBMB) atau concrete-faced rockfill dam (CFRD) memiliki kelemahan yang serupa dengan bendungan tipe lainnya yaitu deformasi. Deformasi yang terjadi pada permukaan bendungan dapat dipantau dengan patok geser. Analisis terhadap data pengukuran patok geser dapat menunjukkan tren settlement maupun displacement yang berhubungan erat dengan deformasi bendungan itu sendiri. Dalam analisis ini data pengukuran patok geser dibandingkan dengan kriteria penerimaan dari ICOLD, Sowers, Clements, Fell, dan Kementerian PUPR dalam Pedoman Desain dan Konstruksi Bendungan Urugan Batu Membran Beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis hasil pengukuran patok geser untuk mengetahui settlement dan displacement bendungan berdasarkan kriteria penerimaan deformasi tersebut. Hasil dari penelitian ini adalah patok geser segmen pertama memiliki rentang nilai persentase settlement sebesar 0,028 – 0,165% masih memenuhi sebagian besar kriteria penerimaan. Selain itu, nilai persentase displacement patok geser segmen pertama sebesar 0,022 – 0,071% masih memenuhi kriteria penerimaan ICOLD dan Clements. Adapun untuk patok geser segmen kedua sampai keempat memiliki nilai persentase settlement sebesar 0,007 – 0,102% dinilai masih memenuhi kriteria penerimaan ICOLD dan Fell.

Kata kunci: Bendungan, Urugan Batu Membran Beton, Deformasi, Instrumen, Patok Geser

Abstract

Concrete-faced rockfill dam (CFRD) has a similar weakness to other types of dams, namely deformation. Surface movement monuments can be used to monitor the deformation that occurs on the surface of the dam. Analysis of the monument's measurement data can show settlement and displacement trends that are closely related to the deformation of the dam itself. In this research, the monuments measurement data are compared to acceptance criteria from ICOLD, Sowers, Clements, Fell, and the Ministry of Public Works and Housing as outlined in the Guidelines for The Design and Construction of Concrete Membrane Stone Backfill Dams. This study aims to analyze data from surface movement monuments to determine the settlement and displacement of the dam based on the criteria of deformation. According to the obtained result, the first segment of surface monuments settlement values ranged from 0.028 to 0.165%, which meet the majority of the criteria. In addition, displacement values at the first segment of surface movement monuments were within 0.022 – 0.071%, which meets the ICOLD and Clements criteria. Meanwhile, for the second to fourth segments of surface movement monuments, settlement values of 0.007 – 0.102% were obtained, which still conform to the ICOLD and Fell criteria.

Keywords: CFRD, Settlement, Displacement, Instrument, Surface movement monument

Diterima: 17 Juli 2021

Disetujui: 20 Desember 2021

Dipublikasi: 25 Desember 2021

©2021 Dian Arief Pramudya Pratomo, Suharyanto, Pranoto Samto Atmojo

Under the license CC BY-SA 4.0

Pendahuluan

Bendungan urugan batu membran beton (UBMB) atau *concrete-faced rockfill dam* (CFRD) merupakan jenis bendungan yang banyak digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan mulai dari irigasi, kebutuhan tambang hingga PLTA. Bendungan jenis ini

dipilih karena dianggap memiliki nilai keamanan yang tinggi, khususnya terhadap guncangan gempa meskipun dengan ukuran bendungan yang tinggi (Zhong, Chen, & Deng, 2018). Bendungan UBMB juga menjadi pilihan terbaik jika material lempung sulit didapatkan di lokasi, pembangunannya membutuhkan biaya yang relatif rendah namun cepat pengerjaannya, serta dapat dibangun di berbagai kondisi geografi dan geologi (Ghaemi & Konrad, 2020).

Indonesia memiliki ± 231 bendungan hingga saat ini. Dari jumlah tersebut, ± 201 bendungan di antaranya dikelola oleh negara melalui Kementerian PUPR (Pusat Data dan Teknologi Informasi Kementerian PUPR, 2020). Meski demikian, bendungan jenis UBMB di Indonesia hanya sedikit jika dibandingkan dengan bendungan jenis urugan batu zonal. Tercatat ada 7 bendungan jenis CFRD di Indonesia, atau $\pm 3\%$ dari keseluruhan bendungan di Indonesia (Suparji, Muklison, & Firdaus, 2019). Meskipun bendungan UBMB memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan bendungan jenis urugan batu zonal, tetapi ada kelemahan yang serupa antara kedua jenis bendungan tersebut yaitu deformasi. Deformasi yang terjadi di bendungan UBMB bisa terjadi selama 50 tahun atau lebih (Y. Kim, Seo, Lee, & Kang, 2014). Apabila deformasi mencapai batas kritisnya, maka sangat mungkin terjadi kerusakan yang luar biasa, bahkan memicu keruntuhan bendungan (De Lacy et al., 2017). Pemantauan terhadap deformasi bendungan merupakan metode paling efektif untuk mengetahui karakteristik bendungan (Abedian, Farrokhi, & Rasouli, 2018). Selain itu, pemantauan deformasi merupakan aspek penting dalam hal pemantauan keamanan bendungan itu sendiri (Acosta et al., 2018).

Deformasi yang terjadi di bendungan dapat dipantau menggunakan sejumlah instrumen, salah satunya adalah patok geser atau *surface movement monument*. Patok geser dipasang pada lereng dan puncak bendungan, sesuai kebutuhan dan dengan memperhatikan kemampuan pengukuran terhadap posisi patok geser. Pergerakan urugan batu pada bendungan UBMB yang mengarah pada deformasi permukaan dapat diidentifikasi melalui hasil pengukuran atau survei patok geser yang dipasang (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2011). Survei merupakan metode yang dapat diandalkan untuk memantau deformasi yang terjadi pada bendungan saat ini (Zhou, Shi, Liu, & Ju, 2021).

Tujuan dari penelitian ini adalah analisis hasil pengukuran patok geser untuk mengetahui *settlement* dan *displacement* bendungan berdasarkan sejumlah kriteria penerimaan deformasi. Metode yang digunakan adalah analisis matematis yang divisualisasikan menjadi grafik dan disandingkan dengan nilai kriteria penerimaan deformasi dari referensi yang ada. Hasil dari metode tersebut akan menunjukkan

besaran deformasi di permukaan bendungan terhadap kriteria penerimaan pada bendungan tipe UBMB. Sebelumnya, penelitian terkait analisis hasil pengukuran patok geser di Indonesia terbatas hanya pada bendungan tipe urugan batu inti lempung sehingga hasil penelitian ini dapat menjadi referensi untuk melakukan hal yang serupa namun pada bendungan tipe UBMB.

Metode

Patok geser pada bendungan biasanya digunakan untuk mengukur pergerakan dari permukaan bendungan baik secara vertikal maupun horizontal. Pergerakan bendungan secara vertikal atau bisa disebut juga sebagai *settlement*, dan pergeseran bendungan secara horizontal atau disebut juga *displacement* atau defleksi lateral yang dapat dianalisis dari teknik survei terhadap patok geser yang dipasang di permukaan bendungan. (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012). Dalam survei yang dilakukan, patok geser diukur berdasarkan posisinya terhadap titik referensi atau *reference point*. Titik referensi yang digunakan dapat berupa titik patok di puncak, lereng maupun kaki bendungan yang sesuai dengan desain bendungan itu sendiri (Ave, 2011). Keuntungan dari pemantauan deformasi bendungan berdasarkan survei patok geser adalah sederhana, dapat dilakukan kapanpun, sensitivitas data yang baik, dan frekuensi survei yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan (U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 2012). Survei patok geser yang dilakukan menghasilkan data bacaan untuk 3 (tiga) arah sumbu yaitu x, y, dan z (Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi BPSDM Kementerian PUPR, 2017).

Data hasil survei instrumen patok geser yang didapat selanjutnya disortir berdasarkan tanggal dilakukannya survei, kode patok geser, dan bacaan dari sumbu x, y, dan z. Data tersebut kemudian divisualisasikan dengan menggunakan grafik. Penggunaan grafik dalam pengolahan data bertujuan untuk mengetahui kecenderungan arah pergeseran bendungan. Adapun arah pergeseran bendungan yang dapat diketahui dari data patok geser diantaranya adalah pergeseran bendungan ke arah hulu-hilir (sumbu x), kiri-kanan (sumbu y), dan atas-bawah (sumbu z). Selanjutnya, analisis terhadap deformasi permukaan dapat dilakukan. Dalam penelitian ini, analisis deformasi difokuskan terhadap arah sumbu x dan z, dengan kata lain *settlement* dan *displacement* pada permukaan bendungan akan dianalisis lebih lanjut. Analisis tersebut dilakukan dengan cara memperhitungkan besar selisih posisi awal patok geser dengan posisi patok geser saat survei. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan sejumlah kriteria penerimaan deformasi bendungan pasca konstruksi yang terdapat dalam berbagai referensi seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Kriteria penerimaan deformasi urugan batu pada bendungan

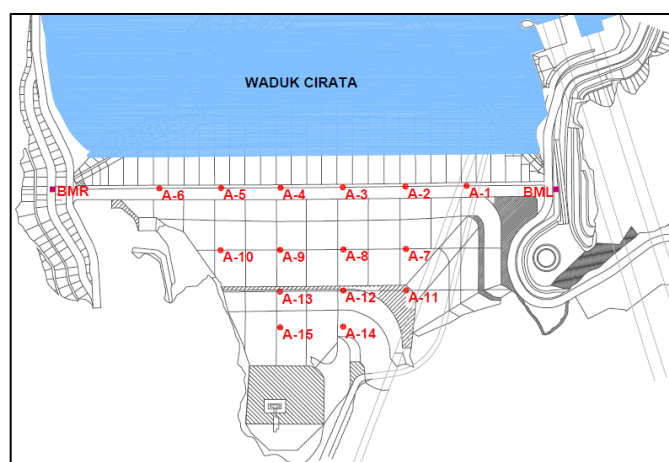
Sumber	Jenis Deformasi	Besaran Deformasi (% dari tinggi bendungan)
ICOLD, 1993	<i>Settlement</i> puncak	< 0,2 – 1,0
	<i>Displacement</i> puncak	< 0,1 – 0,5
	<i>Settlement</i> lereng hilir	< 0,1 – 0,2
Sowers, Williams, & Wallace, 1965	<i>Settlement</i> puncak	< 0,25 – 1.0
Clements, 1984	<i>Settlement</i> puncak	0 – 0,25
	<i>Displacement</i> puncak	0 – 0,25
Fell, MacGregor, Stapledon, & Bell, 2015	<i>Settlement</i> puncak	< 0,06 – 0,2 (10 Tahun)
	<i>Settlement</i> lereng hilir	< 0,3 (3 tahun) < 0,5 (10 tahun)
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2011	<i>Settlement</i> puncak	< 0,1

Lokasi penelitian berada di Bendungan Cirata. Bendungan Cirata berada di Desa Cadas Sari, Kecamatan Tegal Waru, Kabupaten Purwakarta, Provinsi Jawa Barat. Bendungan Cirata merupakan bendungan tipe UBMB yang dibangun pada tahun 1987 dan difungsikan sebagai pembangkit listrik tenaga air. Bendungan ini memiliki tinggi 125 m dari dasar pondasi dan panjang 458,5 m. (Radhi, 2007).

Hasil dan Pembahasan

Hasil

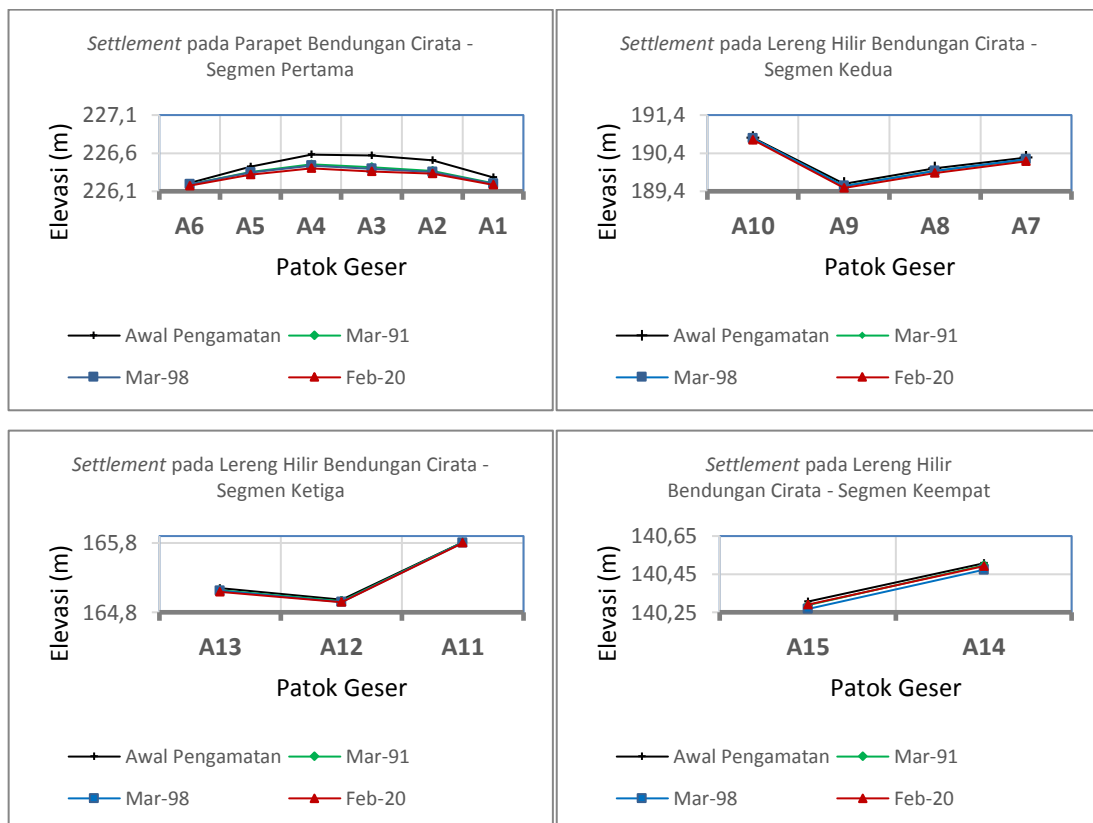
Instrumen patok geser pada Bendungan Cirata terdiri dari 6 (enam) buah patok geser pada bagian atas parapet, dan 9 (sembilan) buah patok geser di lereng hilir bendungan. Survei terhadap patok geser dilakukan setiap bulan (PT. Indra Karya (Persero) Divisi Engineering-I, 2020). Adapun posisi instrumen patok geser pada tubuh bendungan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Posisi instrumen patok geser di Bendungan Cirata

Penelitian ini menggunakan data patok geser dari hasil survei dalam rentang waktu bulan Maret tahun 1988 – bulan Februari tahun 2020. Data instrumen patok geser

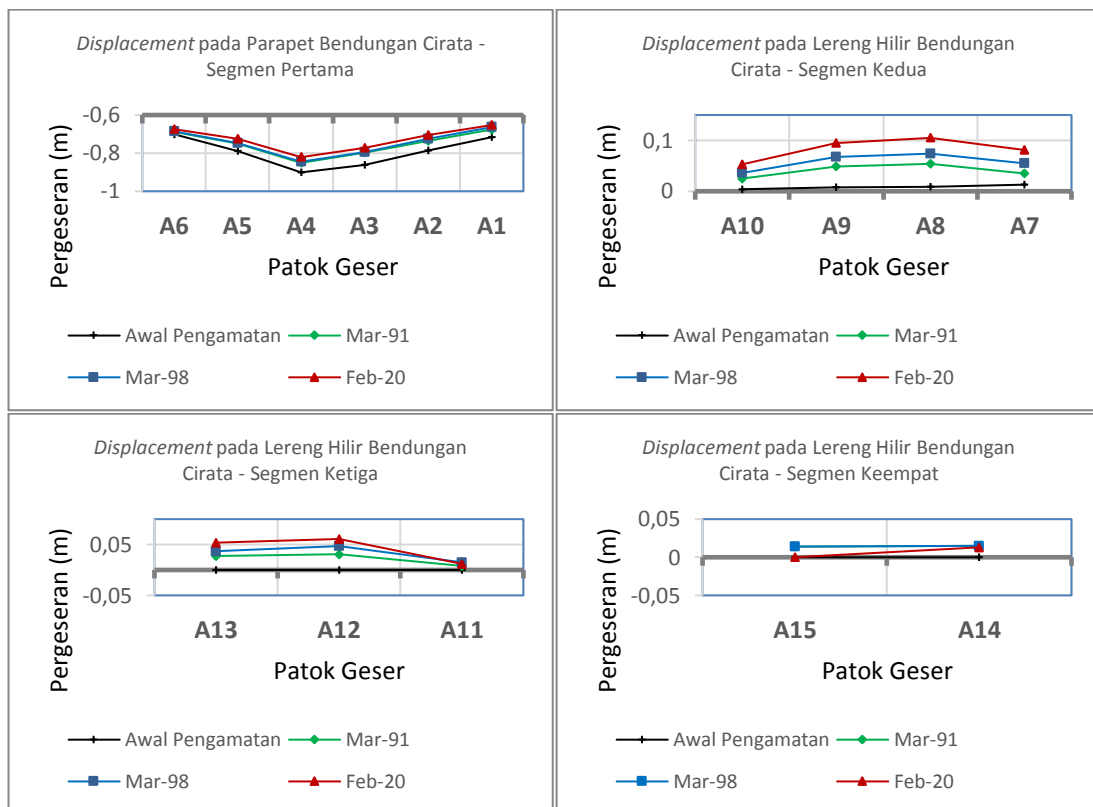
dikelompokkan menjadi 4 (empat) segmen. Segmen pertama adalah A1-A2-A3-A4-A5-A6; segmen kedua terdiri dari A7-A8-A9-A10; segmen ketiga diantaranya A11-A12-A13; dan segmen keempat yaitu A14-A15. Pengolahan data instrumen patok geser ke dalam grafik dilakukan pada masing-masing segmen untuk kedua jenis deformasi bendungan yaitu *settlement* dan *displacement*. Grafik ditampilkan data pada waktu 3 dan 10 tahun pasca konstruksi serta Bulan Februari 2020. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga visualisasi grafik tetap ringkas, dan sesuai dengan kriteria penerimaan Fell yang menggunakan data 3 dan 10 tahun pasca konstruksi.



Gambar 2 Grafik *settlement* pada keempat segmen Bendungan Cirata

Gambar 2 menunjukkan terjadinya *settlement* yang bervariasi. *Settlement* paling besar terjadi pada patok geser A3 dan yang paling kecil pada patok geser A6 dalam segmen pertama. Pada segmen kedua seluruh patok geser mengalami *settlement* dengan penurunan terbesar terjadi pada patok geser A9 dan patok geser yang paling sedikit mengalami penurunan adalah A10. Patok geser di segmen ketiga mengalami *settlement* yang tidak sebesar dua segmen sebelumnya. Pada segmen ketiga penurunan terbesar terjadi pada patok geser A13, sedangkan penurunan paling kecil terjadi pada patok geser A11. Segmen keempat menunjukkan adanya penurunan dari patok A14 dan A15 sejak awal pengamatan hingga 10 tahun berikutnya. Namun, hingga tahun 2020 tepatnya bulan Februari berdasarkan data yang didapat, terjadi kenaikan

pada kedua patok geser. Meskipun begitu, kenaikan yang terjadi tidak terlalu besar yaitu sekitar $\pm 1,5$ cm. *Displacement* terbesar di segmen pertama berada pada patok geser A3 dan pergeseran terkecil terjadi pada patok geser A6. *Displacement* terbesar di segmen kedua terjadi pada patok geser A8, sedangkan *displacement* terkecil terjadi pada patok geser A10. *Displacement* terbesar di segmen ketiga terjadi pada patok geser A12 dan pergeseran terkecil terjadi pada patok geser A11. Segmen keempat menunjukkan adanya pergeseran yang menerus pada patok geser A14 dan A15 ke arah hilir sejak selesainya konstruksi hingga 10 tahun kemudian, namun pada Februari 2020 terjadi pergeseran pada arah sebaliknya. Meskipun begitu, pergeseran terjadi di bawah 1,5 cm sehingga dianggap tidak terlalu signifikan. Hal-hal tersebut ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3 Grafik *displacement* pada keempat segmen Bendungan Cirata

Pembahasan

Seiring waktu, bangunan besar seperti bendungan akan menimbulkan perubahan terhadap bangunan itu sendiri maupun pondasi yang umumnya merupakan penurunan atau pergeseran yang mengikuti arah beban bangunan maupun beban air. Namun berdasarkan analisis data digunakan, patok geser A14 dan A15 sempat mengalami penurunan kemudian mengalami kenaikan elevasi. Kenaikan elevasi terlihat mulai terjadi pada Bulan Oktober 2002. Secara teoritis hal tersebut dapat terjadi karena dua

hal. Pertama, gaya hidraulik menekan tubuh bendungan searah dengan arah aliran yang menimbulkan tarikan ke atas pada urugan batu, hal tersebut kemudian dipengaruhi oleh adanya gaya tahan kunci batu arah vertikal. Resultan dari kedua gaya tersebut menimbulkan kenaikan elevasi maupun pergeseran material urugan batu (Ravindra, Sigtryggsdottir, & Lia, 2021). Kedua, adalah munculnya getaran gempa yang menyebabkan material urugan batu sedikit demi sedikit bergerak menghasilkan perubahan kepadatan karena muncul renggangan di dalamnya (M. K. Kim, Lee, Choo, & Kim, 2011).

Setelah tren *settlement* dan *displacement* patok geser dari keempat segmen diketahui, selanjutnya persentase selisih posisi awal patok geser dengan posisi patok geser saat survei dibandingkan terhadap kriteria penerimaannya. Hasil perhitungan persentase *settlement* maupun *displacement* patok geser yang lebih besar dari kriteria penerimaan pada Tabel 1 dinyatakan tidak memenuhi kriteria penerimaan (TM), jika persentasenya berada pada rentang nilai kriteria penerimaan maka dinyatakan memenuhi kriteria penerimaan (M). Tabel 2 menunjukkan jika deformasi yang terbaca dari hasil pemantauan patok geser yang berada di parapet bendungan masih memenuhi sebagian besar kriteria. Hal itu karena persentase *settlement* yang terjadi pada patok geser A1-A2-A3-A4-A5-A6 masih berada di bawah nilai yang ditentukan dalam sejumlah kriteria penerimaan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1, kecuali Pedoman Desain dan Konstruksi Bendungan Urugan Batu Membran Beton. Namun, hal itu bukan berarti bendungan bisa langsung dianggap tidak aman. Hal tersebut disebabkan oleh besaran persentase *settlement* dalam pedoman yang diatur lebih rendah jika dibandingkan dengan persentase *settlement* dalam kriteria penerimaan yang lain. Kecilnya persentase *settlement* yang diizinkan dalam pedoman dianggap wajar jika melihat minimnya penelitian terhadap bendungan tipe UBMB di Indonesia sehingga perlu *margin of safety* yang lebih besar.

Tabel 2 Analisis segmen pertama terhadap kriteria penerimaan *settlement*

Patok Geser	% <i>Settlement</i>	Kriteria penerimaan				
		ICOLD1993	Sowers1965	Clements1984	Fell2015	Pedoman2011
A1	0.077%	M	M	M	M	M
A2	0.142%	M	M	M	M	TM
A3	0.165%	M	M	M	M	TM
A4	0.144%	M	M	M	M	TM
A5	0.083%	M	M	M	M	M
A6	0.028%	M	M	M	M	M

Analisis segmen pertama terhadap *displacement* menunjukkan *displacement* memenuhi kriteria penerimaan dalam Tabel 1. Hasil analisis terhadap segmen pertama dapat dilihat dalam Tabel 3. Analisis terhadap *settlement* pada segmen kedua sampai keempat dilakukan hanya dengan kriteria penerimaan ICOLD dan Fell. Hal itu karena

kriteria penerimaan lainnya lebih menitikberatkan penilaian *settlement* pada hasil pemantauan di puncak bendungan. Berdasarkan hasil analisis pada patok geser A7-A15 di hilir bendungan menunjukkan jika persentase *settlement* di bagian hilir bendungan masih memenuhi kriteria ICOLD yang ditunjukkan dalam Tabel 4. Hasil analisis data patok geser pada hilir bendungan dengan menggunakan kriteria penerimaan Fell ditunjukkan dalam Tabel 5. Dalam analisis tersebut, persentase dari patok geser A7-A15 dihitung pada waktu 3 dan 10 tahun pasca selesainya konstruksi bendungan. Hasil yang didapat dari analisis menunjukkan jika *settlement* yang terjadi pada hilir bendungan masih memenuhi kriteria penerimaan *settlement* Fell.

Tabel 3 Analisis segmen pertama terhadap kriteria penerimaan *displacement*

Patok Geser	% <i>Displacement</i>	Kriteria penerimaan	
		ICOLD1993	Clements1984
A1	0.050%	M	M
A2	0.066%	M	M
A3	0.071%	M	M
A4	0.064%	M	M
A5	0.052%	M	M
A6	0.022%	M	M

Tabel 4 Analisis segmen kedua sampai keempat terhadap kriteria *settlement* ICOLD

Patok Geser	% <i>Settlement</i>	Kriteria penerimaan
		ICOLD1993
A7	0.071%	M
A8	0.102%	M
A9	0.087%	M
A10	0.043%	M
A11	0.016%	M
A12	0.030%	M
A13	0.044%	M
A14	0.012%	M
A15	0.013%	M

Tabel 5 Analisis segmen kedua sampai keempat terhadap kriteria *settlement* Fell

Patok Geser	% <i>Settlement</i> 3 tahun	Kriteria penerimaan	% <i>Settlement</i> 10 tahun	Kriteria penerimaan
		Fell2015 3 tahun		Fell2015 10 tahun
A7	0.038%	M	0.030%	M
A8	0.061%	M	0.057%	M
A9	0.046%	M	0.048%	M
A10	0.018%	M	0.012%	M
A11	0.007%	M	0.012%	M
A12	0.018%	M	0.026%	M
A13	0.022%	M	0.034%	M
A14	0.009%	M	0.027%	M
A15	0.015%	M	0.031%	M

Kesimpulan

Hasil analisis data pemantauan instrumen patok geser di Bendungan Cirata menunjukkan *settlement* dan *displacement* masih memenuhi sejumlah kriteria penerimaan. Patok geser segmen pertama memiliki rentang nilai persentase *settlement* sebesar 0,028 – 0,165% masih memenuhi kriteria penerimaan ICOLD, Sowers,

Clements, Fell dan sebagian tidak memenuhi kriteria penerimaan Pedoman Desain dan Konstruksi Bendungan UBMB. Selain itu, nilai persentase *displacement* patok geser segmen pertama sebesar 0,022 – 0,071% masih memenuhi kriteria penerimaan ICOLD dan Clements. Adapun untuk patok geser segmen kedua sampai keempat memiliki nilai persentase *settlement* sebesar 0,007 – 0,102% dinilai masih memenuhi kriteria penerimaan ICOLD dan Fell. Meski begitu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap perbedaan tren *settlement* dan *displacement* pada segmen keempat di bagian hilir bendungan.

Daftar Pustaka

- Abedian, M. A., Farrokhi, F., & Rasouli, R. (2018). Settlement Evaluation of a Concrete Face Rock-Fill Dam (CFRD) Using a Back-Analysis Method Based on Measurement Results (A Case Study of Siah-Bisheh Dam). *J.Eng.Technol.Sci*, 50(4), 516–533. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2018.50.4.5>
- Acosta, L. E., de Lacy, M. C., Ramos, M. I., Cano, J. P., Herrera, A. M., Avilés, M., & Gil, A. J. (2018). Displacements study of an earth fill dam based on high precision geodetic monitoring and numerical modeling. *Sensors (Switzerland)*, 18(5). <https://doi.org/10.3390/s18051369>
- Ave, N. P. (2011). United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2279, 904.
- Central Board of Irrigation and Power. (1992). *Rockfill Dams - Finite Element Analysis to Determine Stresses and Deformation in Membrane Type Rockfill Dam*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.
- Clements, R. . (1984). Post-Construction Deformation of Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(7), 821–840.
- De Lacy, M. C., Ramos, M. I., Gil, A. J., Franco, Ó. D., Herrera, A. M., Avilés, M., ... Chica, J. C. (2017). Monitoring of vertical deformations by means high-precision geodetic levelling. Test case: The Arenoso dam (South of Spain). *Journal of Applied Geodesy*, 11(1), 31–41. <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0034>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams 2nd Edition*. Geotechnical Engineering of Dams. <https://doi.org/10.1201/noe0415364409>
- Ghaemi, A., & Konrad, J. M. (2020). A semi-empirical relationship for predicting earthquake-induced crest settlement of concrete faced rockfill dams. *Soil*

- Dynamics and Earthquake Engineering*, 132(October 2019), 105990.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105990>
- ICOLD. (1993). Rock Material for Rockfill Dams: Review and Recommendations. *ICOLD Bulletin*, 92.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2011). *Pedoman Desain dan Konstruksi Bendungan Urugan Batu Membran Beton*. Jakarta.
- Kim, M. K., Lee, S. H., Choo, Y. W., & Kim, D. S. (2011). Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(11), 1579–1593.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.06.010>
- Kim, Y., Seo, M., Lee, C., & Kang, G. (2014). Deformation characteristics during construction and after impoundment of the CFRD-type Daegok Dam, Korea. *Engineering Geology*, 178, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.009>
- PT. Indra Karya (Persero) Divisi Engineering-I. (2020). *Laporan Utama Inspeksi Besar Bendungan PLTA Cirata*. Malang.
- Pusat Data dan Teknologi Informasi Kementerian PUPR. (2020). *Informasi Statistik Infrastruktur*.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi BPSDM Kementerian PUPR. (2017). *Modul Instrumentasi Bendungan Urugan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*. Bandung.
- Radhi, S. (2007). *Menyimak Bendungan di Indonesia (1910-2006)*. Tangerang Selatan: Bentara Adhi Cipta Indocamp.
- Ravindra, G. H. R., Sigtryggdottir, F. G., & Lia, L. (2021). Buckling analogy for 2D deformation of placed ripraps exposed to overtopping. *Journal of Hydraulic Research*, 59(1), 109–119. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1744745>
- Sowers, G. F., Williams, R. C., & Wallace, T. (1965). *Compressibility of Broken Rock and The Settlement of Rockfills*. In *Proceedings of The 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 561–565). Montreal: University of Toronto Press.
- Suparji, Muklison, & Firdaus, M. (2019). Bendungan Tipe UBMB sebagai Alternatif Teknologi dalam Tantangan Pembangunan Bendungan Besar di Indonesia, 1–12.
- U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation. (2012). Embankment Dams. Chapter 11: Instrumentation and Monitoring. *Design Standards No. 13: Embankment Dams*, 4(13).

- Zhong, Q. ming, Chen, S. shui, & Deng, Z. (2018). A simplified physically-based breach model for a high concrete-faced rockfill dam: A case study. *Water Science and Engineering*, 11(1), 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2018.03.005>
- Zhou, J., Shi, B., Liu, G., & Ju, S. (2021). Accuracy analysis of dam deformation monitoring and correction of refraction with robotic total station. *PLoS ONE*, 16(5 May), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251281>