

Kajian Stabilitas Bendungan Tapin Berdasarkan Instrumen Geoteknik

Abdurahman Hafizudin

Student – Universitas Katolik Parahyangan

Eulis Karmila

PT Indra Karya

Freddy Gunawan

PT Duta Rangka Rekayasa Indonesia

ABSTRAK: Bendungan Tapin telah selesai dibangun pada tahun 2020 sebagai salah satu upaya konservasi sumber daya air. Diantaranya adalah menyelesaikan permasalahan banjir, kekurangan air irigasi, dan meningkatkan *supply* air baku di Kabupaten Tapin. Namun di sisi lain bendungan juga menyimpan potensi bahaya keruntuhan yang mengakibatkan kerusakan di daerah hilir. Untuk mengamati stabilitas dan keamanan bendungan terhadap potensi keruntuhan dilakukan pemasangan instrumen geoteknik. Ada 3 (tiga) jenis instrumen geoteknik yang dipasang di Bendungan Tapin. Pertama adalah alat ukur tekanan air pori sistem terbuka dan tertutup berupa *open stand pipe piezometer* (STP), *vibrating wire piezometer* (VWP), dan *observation well* (OW). Kedua adalah alat ukur pergerakan vertikal dan horizontal berupa inklinometer dan *multilayer settlement*, serta ketiga adalah alat ukur debit rembesan berupa *v-notch*. Hasil monitoring instrumen menunjukkan stabilitas dari aspek struktur dan rembesan Bendungan Tapin masih dalam kondisi baik.

Kata Kunci: instrumen geoteknik, Bendungan Tapin, stabilitas bendungan

ABSTRACT: Tapin Dam was built on 2020 to do water resources conservation, so its can solve the flood problems, lack of irrigation supply and increasing of raw water supply, but in the other side the dam also have the potential danger of collapse which causes damage to the downstream of the dam. To determine the performance of Dam that were still safe against potential collapse, geotechnical instruments are installed. There are 3 various of geotechnical instruments installed at Tapin Dam, first is open and closed system pore water pressure measuring such as open stand pipe piezometers (STP), vibrating wire piezometers (VWP), observation wells (OW). Second is vertical and horizontal movement measuring device such as inclinometers, multilayer settlement, and third is seepage measuring device such as v-notch. Monitoring results from various geotechnical instruments describe the current structural and seepage aspects stability of Tapin Dam is on the good condition.

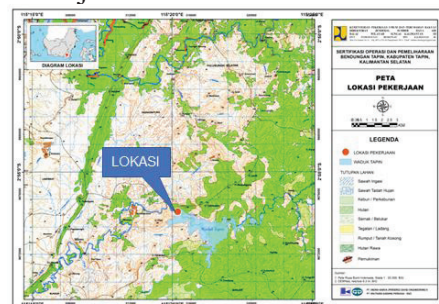
Keywords: geotechnical instruments, Tapin Dam, dam stability

1 PENDAHULUAN

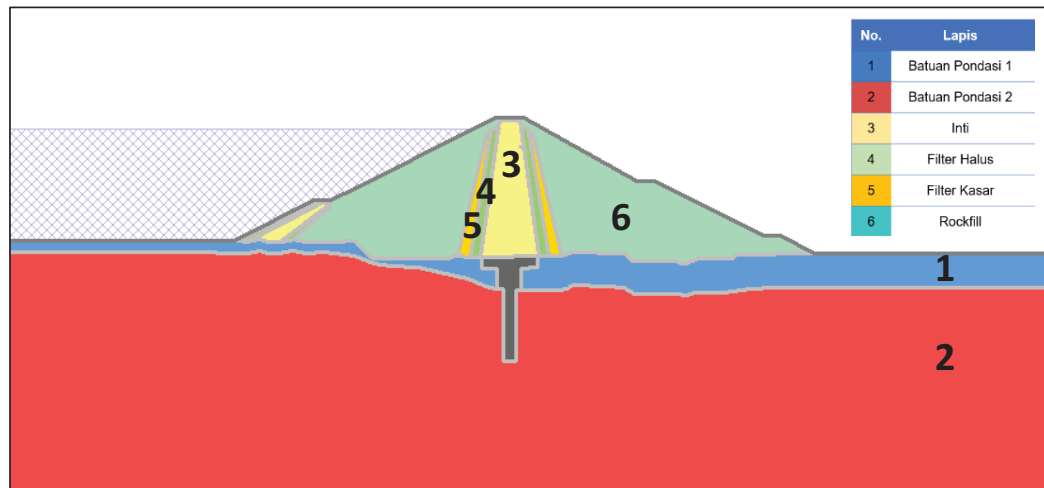
Bendungan Tapin terletak di Kecamatan Piani, Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan (Gbr. 1). Bendungan dengan tinggi total 70 m ini membendung Sungai Tapin sehingga menciptakan tampungan waduk sebesar 56.72 juta m³.

Tipe bendungan ini adalah urugan batu dengan zona inti tegak. Gbr. 2 menunjukkan potongan melintang tipikal dan pembagian zona timbunan. Pemanfaatan bendungan ini

adalah untuk irigasi, air baku, tenaga listrik, dan reduksi banjir.



Gbr 1. Lokasi Bendungan Tapin.



Gbr. 2. Potongan Tipikal Melintang Bendungan Tapin

Data teknis Bendungan Tapin adalah sebagai berikut:

- Tinggi bendungan : 70,0 m
- Elevasi puncak : +151,0
- Panjang puncak : 262,7 m
- Kemiringan lereng hulu : 1 : 2,0
- Kemiringan lereng hilir : 1 : 1,8
- Elevasi muka air normal : +145,5

Selain manfaat, setiap bendungan juga menyimpan bahaya apabila terjadi kegagalan. Keamanan bendungan ditinjau dari keamanan struktur (stabilitas) dan rembesan sesuai Surat Edaran Direktorat Jenderal SDA No. SA 02. 03-Da/475.2020. Instrumen geoteknik dipasang untuk mengamati perilaku tubuh bendungan selama beroperasi.

2 MATERIAL URUGAN DAN PONDASI BENDUNGAN TAPIN

Dalam studi ini, parameter urugan menggunakan hasil uji baik lapangan maupun laboratorium dari quality control (QC) yang dilakukan selama konstruksi. Tabel 2 menunjukkan parameter material timbunan.

Tabel 2. Parameter Material Timbunan.

No.	Lapis	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (cm/s)
1	Inti	17,5	7,3	28,4	3,50E-05
2	Filter halus	18,3	0	30	4,10E-03
3	Filter kasar	18,3	0	32	6,50E-03
4	Rockfill	20,6	0	40	3,80E-02

Parameter pondasi ditentukan oleh ahli geologi menggunakan hasil uji lapangan dan laboratorium dengan mempertimbangkan kondisi geologi setempat. Parameter batuan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Pondasi.

No.	Lapis	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (cm/s)
1	Pondasi 1	2	7	54	6,00E-04
2	Pondasi 2	21	7	54	6,00E-05

3 INSTRUMEN GEOTEKNIK BENDUNGAN TAPIN

Di Bendungan Tapin instrumen geoteknik yang dipasang antara lain:

- Alat ukur tekanan air pori: *open stand pipe piezometer* (STP), *vibrating wire piezometer* (VWP), dan *observation well* (OW)
- Alat ukur deformasi baik arah vertikal maupun horizontal dalam tubuh bendungan berupa: inklinometer dan *multilayer settlement*
- Alat ukur debit rembesan berupa ambang *v-notch*

Monitoring instrumen dilakukan pada saat bendungan sudah terbangun dan akan dilakukan tahap *impounding*.

Penempatan instrumen direncanakan agar dapat mengamati kondisi kritis yang mempengaruhi keamanan struktur bendungan. Lokasi instrumen geoteknik pada Bendungan Tapin dapat dilihat pada Gbr. 3.

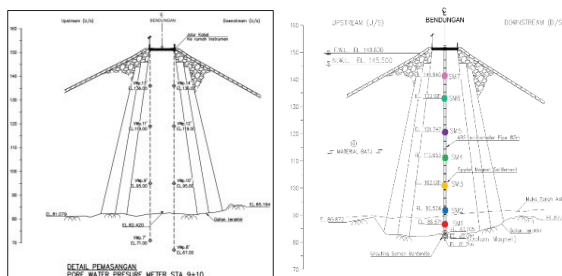
Dalam studi ini disajikan hasil monitoring instrumen dan keamanan pada bagian timbunan bendungan tertinggi yang berada di STA. 9+10



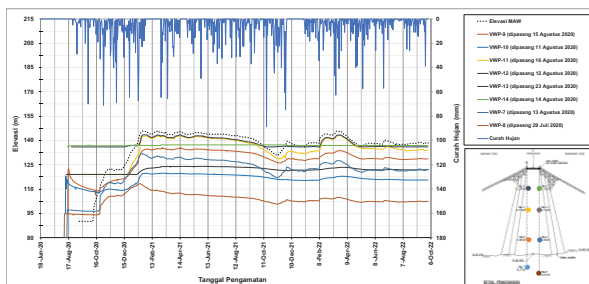
Gbr. 3. Denah Instrumen Bendungan Tapin.

3.1 Piezometer

Gbr. 4 menunjukkan potongan melintang tubuh bendungan di Sta 9+10 dengan VWP yang dipasang pada pondasi dan timbunan. Gbr. 6. menunjukkan kurva monitoring VWP terhadap waktu. Dapat dilihat bahwa VWP.7 dan 8 yang ada di pondasi memberikan data elevasi tekanan air yang berbeda walaupun elevasi tip yang dipasang hanya memiliki selisih 4 m, hasil monitoring *pressure head* memiliki selisih 19 m - 20 m berfluktuasi mengikuti muka air waduk. Hal ini menunjukkan efektivitas grouting tirai pada pondasi bendungan. Sama hal-nya VWP yang ada di pondasi, VWP yang dipasang pada tubuh bendungan merespons fluktuasi muka air waduk dengan baik. Data *pressure head* hasil monitoring tersebut akan digunakan untuk menggambarkan kontur tekanan air dalam analisis stabilitas dan rembesan.



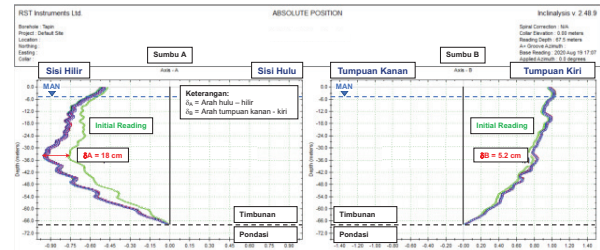
Gbr. 4. Potongan Melintang Bendungan Tapin STA 9+10 dan 8+10.



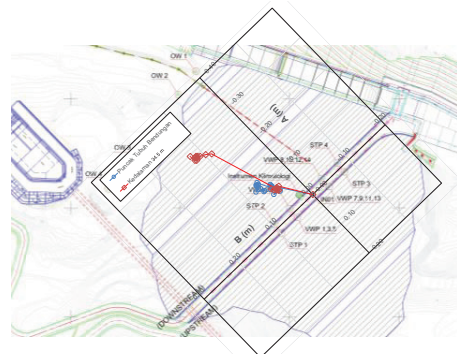
Gbr. 6. Data Monitoring Instrumen VWP.

3.2 Inklinometer dan Multilayer Settlement

Casing inklinometer dipasang pada Sta. 8+10. Panjang total casing inklinometer adalah 69 m dimana 1.5 m dari casing masuk ke dalam pondasi. Seiring dengan waktu terjadi patah pada sambungan casing di kedalaman 67.5 m sehingga tidak dapat dilakukan monitoring lebih lanjut sampai kedalaman 69 m. Gbr. 7 dan Gbr. 8 menunjukkan hasil monitoring inklinometer dan vektornya.

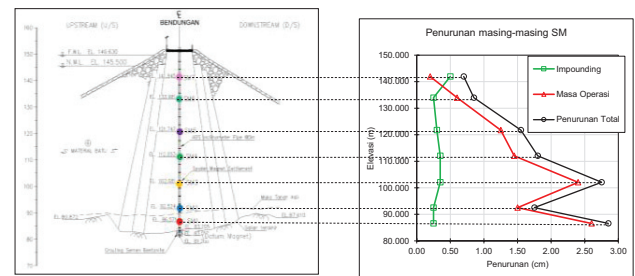


Gbr. 7. Hasil Monitoring Inklinometer.



Gbr. 8. Vektor Deformasi Inklinometer.

Satu buah sensor datum dan tujuh buah sensor *spyder magnet* (SM) dipasang pada selubung inklinometer (Gbr. 4). Gbr. 9 menunjukkan hasil monitoring pada *multilayer settlement*.

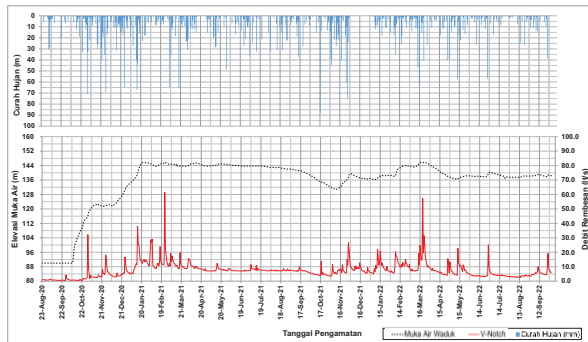


Gbr. 9. Besar Penurunan Setiap Elevasi Kedalaman Multilayer Settlement.

3.3 V-notch

V-notch adalah alat ukur rembesan yang melalui tubuh bendungan berupa ambang berbentuk v dengan sudut 90° yang dilengkapi

papan duga air untuk mengukur debit rembesan yang terjadi. Gbr. 10 menunjukkan hasil monitoring v-notch.



Gbr. 10. Hasil Monitoring V-notch.

4 METODOLOGI

Seperti telah disebutkan di atas, instrumen digunakan untuk mengamati kondisi dan keamanan tubuh bendungan selama beroperasi.

Untuk mengetahui keamanan terhadap deformasi yang terjadi, kecepatan pergerakan horizontal dari hasil monitoring inklinometer dihitung untuk kemudian dibandingkan dengan *Velocity Class* yang diusulkan oleh Yueping et al. (2010).

Stabilitas tubuh bendungan dianalisis menggunakan metode kesetimbangan batas. Model konstitutif menggunakan Mohr-Coulomb dengan parameter seperti disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Model yang digunakan dalam analisis stabilitas sudah memasukkan kondisi muka air waduk dan freatik yang ada di dalam tubuh bendungan. *Pressure head* menggunakan hasil pembacaan saat kondisi muka air waduk normal di elevasi +145.5. Garis freatik diperoleh dengan menggambar kontur *pressure head* hasil pengamatan VWP. Hasil bacaan *pressure head* masing-masing VWP dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. *Pressure Head* masing-masing VWP.

No.	Nomor VWP	<i>Pressure Head</i> (m)
1.	VWP. 7 (pondasi)	+127,39
2.	VWP. 8 (pondasi)	+104,68
3.	VWP. 9	+133,70
4.	VWP. 10	+117,85
5.	VWP. 11	+142,95
6.	VWP. 12	+123,36
7.	VWP. 13	+143,32
8.	VWP. 14	+136,95
9.	OW. 2	+86,50

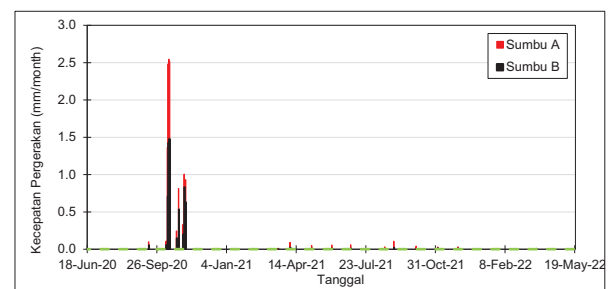
Tekanan air pori yang digunakan dalam analisis hanya menggunakan hasil monitoring VWP. Hasil monitoring STP menunjukkan anomali sehingga tidak digunakan. Anomali terjadi karena ada lumpur yang mengendap di dalam pipa STP sehingga perlu dilakukan pembersihan dengan metode *flushing*.

Selain pemeriksaan stabilitas tubuh bendungan, keamanan terhadap rembesan juga dilakukan. Data yang digunakan dalam analisis adalah *pressure head* dan parameter permeabilitas yang diperoleh dari uji lapangan saat konstruksi. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan data monitoring *v-notch*.

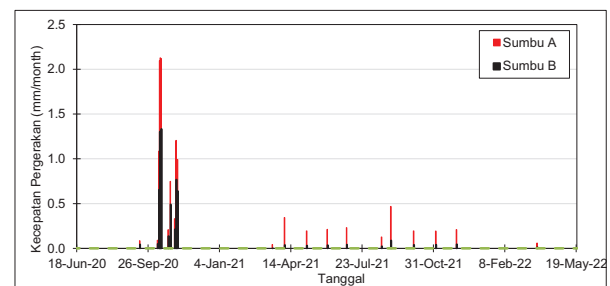
5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Monitoring Inklinometer

Berdasarkan hasil monitoring inklinometer didapat kecepatan pergerakan terbesar pada saat waduk kosong hingga waduk penuh dengan nilai kecepatan sebesar 2,55 mm/month (puncak bendungan) dan 2,09 mm/month (kedalaman 34,5 m).



Gbr. 11. Kecepatan Pergerakan Inklinometer pada Puncak Bendungan.



Gbr. 12. Kecepatan Pergerakan Inklinometer pada Kedalaman 34.5 m.

Jika dibandingkan dengan syarat kecepatan dari Yueping et. al. (2010) maka masuk ke klasifikasi Level Kuning seperti dapat dilihat pada Tabel 5 sehingga perlu dilakukan peningkatan monitoring. Namun hasil

monitoring secara keseluruhan menunjukkan tren kecepatan pergerakan (Gbr. 11 dan Gbr.

12) yang terus menurun hingga hampir berhenti atau kecepatan mendekati nol.

Tabel 5. Klasifikasi Kecepatan Berdasarkan Yueping et al. (2010).

Early Warning Level	Color	Monitoring Value				Measures
		Ground Displacement (mm/month)	Deep Displacement (mm/month)	Pore Water Pressure (kPa/month)	Ground Strain ($\mu\epsilon$ /month)	
□ level	Blue	< 10	<1	<10	50	Macroscopically Photo inspection, ordinary monitoring
□ level	Yellow	10 – 30	1 – 15	10 – 50	50 – 100	Increasing monitoring density and monitoring methods
□ level	Orange	30 – 300	15 – 150	50 – 100	100 – 150	Comprehensive consultation, emergency evacuation, engineering emergency strengthening
□ level	Red	> 300	> 150	> 100	> 150	Engineering multiple strengthening, controlling reservoir water level changing

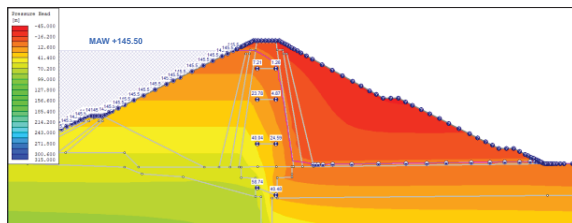
5.2 Hasil Monitoring Multilayer Settlement

Berdasarkan rule of thumb yang diusulkan oleh U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2012), besar penurunan maksimum yang dapat ditoleransi adalah 1% terhadap tinggi bendungan atau untuk Bendungan Tapin adalah 70 cm. Hasil monitoring menunjukkan penurunan total sangat kecil yaitu ± 12 cm. Penurunan yang kecil disebabkan saat masa konstruksi monitoring tidak dilakukan akibat alat yang rusak.

5.3 Hasil Analisis Stabilitas Bendungan

Analisis stabilitas Bendungan Tapin mengacu pada SNI 8064:2016 dan Pd. T-14-2004-A dengan analisis pseudostatik.

Gbr. 13 menunjukkan garis freatik yang dibentuk dari kontur *pressure head* hasil monitoring masing-masing VWP.



Gbr. 13. Kontur Tekanan Air Pori Berdasarkan Hasil Pembacaan Instrumen.

Analisis dengan beban gempa menggunakan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia

Tahun 2017 sesuai dengan kelas risiko bendungan. PGA gempa OBE menggunakan periode ulang 100 tahun sebesar 0.025g dan gempa MDE menggunakan periode ulang 10,000 tahun sebesar 0.275g. Hasil analisis untuk berbagai kombinasi kondisi dapat dilihat pada Tabel 6 sampai dengan Tabel 8.

Tabel 6. Hasil Analisis Stabilitas Kondisi Tanpa Gempa.

Kondisi	Faktor Keamanan Tanpa Gempa	
	Hulu	Hilir
Muka air normal	2,378	2,380
Muka air banjir	2,529	2,351
Surut cepat	1,580	1,670
Kosong	2,136	2,254

Faktor keamanan pada kondisi tanpa gempa memenuhi syarat faktor keamanan minimum yaitu diatas 1,5.

Pada beban gempa OBE (beban normal), seluruh nilai faktor keamanan (FK) memenuhi syarat, yaitu di atas FK minimum 1,2. Pada beban gempa MDE (beban luar biasa), ada FK yang kurang dari 1,0 sehingga dilanjutkan dengan analisis alihan permanen menggunakan Metode Makdisi-Seed. Hasil analisis menunjukkan besar alihan kurang dari setengah tinggi jagaan atau 2,75 m. Menurut Pedoman T-14-2004-A, jika alihan yang terjadi kurang dari 50% tinggi jagaan, maka bendungan dikatakan masih dalam kondisi aman.

Tabel 7. Hasil Analisis Stabilitas untuk Kondisi dengan Gempa OBE.

Tinjauan kedalaman (Y/H)	0,25		0,50		0,75		1,00	
Koefisien Gempa (K)	0,0255		0,0213		0,0194		0,0175	
Kondisi	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
Muka air normal	1,873	1,820	1,875	1,906	1,938	2,020	1,941	2,120
Muka air banjir	1,957	1,817	1,934	1,798	1,996	2,101	1,894	2,123
Surut cepat	1,817	1,647	1,696	1,599	1,595	1,707	1,520	1,733
Kosong	2,012	1,818	1,980	1,918	2,136	2,208	1,982	2,208

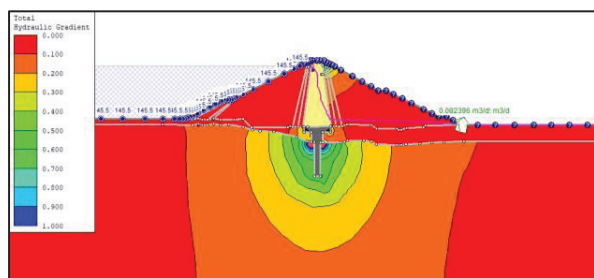
Tabel 8. Hasil Analisis Stabilitas untuk Kondisi dengan Gempa MDE.

Tinjauan kedalaman (Y/H)	0,25		0,50		0,75		1,00	
Koefisien Gempa (K)	0,2802		0,2166		0,153		0,0894	
Kondisi	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
Muka Air Normal	0,915	1,095	0,993	1,277	1,178	1,581	1,114	1,777
Muka Air Banjir	0,820	1,097	0,946	1,275	1,193	1,557	1,448	1,767
Surut Cepat	1,077	0,985	1,119	1,069	1,159	1,257	1,227	1,459
Kosong	1,193	1,096	1,306	1,285	1,590	1,565	1,671	1,855

5.4 Hasil Analisis Rembesan dan Monitoring V-Notch

Analisis rembesan, menghasilkan debit rembesan sebesar 5,3 lt/s. Jika dibandingkan dengan hasil monitoring, dimana debit rembesan berada dalam rentang 5 lt/s – 7,5 lt/s, maka hasil analisis masih mendekati hasil monitoring lapangan.

Sementara itu, nilai *gradient exit* (Gbr. 14) adalah sebesar 0,10 dengan nilai *gradient* kritis 1,06 sehingga diperoleh FK terhadap erosi buluh sebesar 10,55. Nilai tersebut lebih besar dari FK minimum 2,0 berdasarkan SNI 8065:2016.



Gbr. 14. Kontur *Gradient Exit* Berdasarkan Hasil Pembacaan Instrumen.

6 KESIMPULAN

Seluruh aspek yang ditinjau menunjukkan Bendungan Tapin dalam kondisi aman, baik aspek deformasi, stabilitas, dan rembesan.

Hasil monitoring inklinometer menunjukkan tren kecepatan pergerakan sudah mendekati nol pada saat bendungan telah beroperasi.

Nilai FK stabilitas bendungan untuk beban normal di atas FK minimum yang disyaratkan. Sedangkan FK stabilitas bendungan untuk beban luar biasa ada yang di bawah FK minimum yang disyaratkan, tetapi alihan yang terjadi masih lebih kecil dari 50% tinggi jagaan. Rangkuman analisis stabilitas bendungan terhadap aspek struktur dan rembesan dapat dilihat pada Tabel 9.

Merujuk hasil analisis di atas, berdasarkan Surat Edaran Dir. Jen. SDA. No. SA.02.03–Da/475, 2020, Bendungan Tapin masuk dalam Klasifikasi Baik (Tabel 10).

Tabel 9. Stabilitas Bendungan.

No	Aspek	Kondisi Beban Normal	Kondisi Beban Luar Biasa
1	Aspek struktur	Aman	Aman dengan Metode Alihan
2	Aspek rembesan	10.5 > 2.0 (Memenuhi kriteria FK minimum)	

Tabel 10. Kriteria Keamanan Bendungan.

Kategori Klasifikasi	Indikator	Keterangan/Tindakan Diperlukan
Baik	Bendungan aman pada beban normal dan beban ekstrim	Bendungan dapat beroperasi seperti biasa
Cukup	Bendungan aman pada beban normal tetapi tidak aman pada beban ekstrim	Bendungan dapat dioperasikan dengan kewaspadaan yang tinggi dan lakukan peningkatan keamanan bendungan

Kategori Klasifikasi	Indikator	Keterangan/Tindakan Diperlukan
Kurang	Bendungan tidak aman pada beban luar biasa atau muncul masalah yang belum jelas (uncertainities)	Diperlukan studi atau investigasi lebih lanjut (special study)
	Muncul masalah yang sudah jelas (clearly recognize)	Diperlukan tindakan segera untuk mengatasi masalah dan bila perlu pembatasan operasi sampai masalah dapat diatasi
Buruk	Bendungan tidak aman pada beban normal.	Perlu segera tindakan perbaikan, perkuatan atau rehabilitasi
	Bendungan tidak aman pada kondisi operasi normal sehari-hari/ kondisi bendungan mengkhawatirkan	

DAFTAR PUSTAKA

- Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Bendungan Tapin. 2020. *Supervisi Pembangunan Bendungan Tapin di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan*.
- Pd. T-14-2004-A. 2004. *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Departemen Pemukiman dan Prasarana wilayah.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 8064:2016. *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 8065:2016. *Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air Untuk Bendungan Tipe Urugan*. Badan Standarisasi Nasional.
- Surat Edaran Direktorat Jenderal SDA No. SA 02. 03-Da/475. 2020. *Persyaratan dan Bagan Alir Proses Izin Operasi Bendungan Lama*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. 2012. *Design Standards No. 13 Embankment Dams Chapter 10: Embankment Construction*. Reclamation Managing Water in the West.
- Yueping, Y., Wang H., Gao Y., Li X., 2010. Real-Time Monitoring and Early Warning of Landslides at Relocated Wushan Town, the Three Gorge Reservoir, China. *J. SE Asian Appl. Geol.* Sep–Dec 2010 Vol. 2(3):170–184.

