

Potensi Erosi Buluh akibat Mata Air pada Bendungan (Studi Kasus: Bendungan Titab)

*I Putu Hariawan Anggara¹, Sri Sangkawati Sachro², Thomas T. Putranto³

¹Direktorat Bina Operasi dan Pemeliharaan, Kementerian PUPR

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

³Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*) hariawan.anggara@gmail.com

Received: 22 Juli 2021 Revised: 30 November 2021 Accepted: 2 Desember 2021

Abstract

The dam is one of the water infrastructures that can function as conservation, utilization, and control of the destructive power of water. Titab Dam is one of the dams in Indonesia that has multifunction as irrigation water, raw water and hydropower. This dam is a type of rock fill dam with an upright core which has a peak length of 210 m, a width of 12 m, and a height of 78 m from the deepest foundation. This dam was built with relatively complex geological conditions and landslides occurred on the spillway walls and springs were found in the landslides so it was necessary to analyze the potential for piping due to the presence of springs. This study examines the potential for piping due to the influence of springs near the dam. The study was conducted based on instrument observations during the inundation period from 2016 to 2019. The analysis was carried out by calculating the acceptance criteria (KP) for seepage and seepage index (Q_i) to determine seepage behavior in the dam body and a safety factor analysis (FK) for piping hazards was carried out by comparing the hydraulic gradient based on piezometer instrumentation readings and the hydraulic gradient of the dam body core material. Based on the calculation of the seepage acceptance criteria and the seepage index, the seepage that occurs in the Titab Dam is not safe because it exceeds the requirements, the average seepage occurs is $6.350 > 0.56$ liter/minute/m and $Q_i > 1$. However, the analysis of the safety factor of piping hazard is still safe that is equal to $8,390 > 4$.

Keywords: Earth fill dam, seepage, piping, safety factor

Abstrak

Bendungan merupakan salah satu infrastruktur keairan yang dapat difungsikan sebagai konservasi, pemanfaatan, dan pengendalian daya rusak air. Bendungan Titab merupakan salah satu bendungan di Indonesia yang memiliki multifungsi sebagai air irigasi, air baku dan PLTA. Bendungan ini merupakan tipe bendungan urugan batu dengan inti tegak yang memiliki panjang puncak 210 m, lebar 12 m, dan tinggi 78 m dari pondasi terdalam. Bendungan ini dibangun dengan kondisi geologi yang relatif kompleks dan terjadi longsor pada dinding pelimpah dan ditemukan mata air pada longsor sehingga perlu dilakukan analisis terhadap potensi piping akibat adanya mata air. Penelitian ini mengkaji potensi terjadinya erosi buluh (piping) akibat pengaruh mata air yang ada di dekat bendungan. Kajian dilakukan berdasarkan pengamatan instrumen selama masa penggenangan Tahun 2016 hingga Tahun 2019. Analisis dilakukan dengan menghitung kriteria penerimaan (KP) rembesan dan indeks rembesan (Q_i) untuk mengetahui perilaku rembesan pada tubuh bendungan dan dilakukan analisis faktor keamanan (FK) terhadap bahaya piping dengan membandingkan gradien hidrolik berdasarkan pembacaan instrumen pismometer dan gradien hidrolik material inti tubuh bendungan. Berdasarkan hasil perhitungan kriteria penerimaan rembesan dan indeks rembesan menunjukkan rembesan yang terjadi pada Bendungan Titab tidak aman karena melebihi persyaratan, rembesan rata-rata terjadi sebesar $6,350 > 0,56$ liter/menit/m dan $Q_i > 1$. Namun analisis terhadap FK bahaya piping masih aman yaitu sebesar $8,390 > 4$.

Kata kunci: Bendungan urugan, rembesan, piping, faktor keamanan (FK)

Pendahuluan

Air memberikan manfaat yang begitu besar bagi semua makhluk hidup. Namun, di samping memiliki manfaat, air juga dapat mendatangkan musibah jika keberadaannya terlalu sedikit, terlalu banyak dan kotor atau tercemar. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk melestarikan keberadaan air yaitu dengan membangun infrastruktur penampung air berupa bendungan yang memiliki multi fungsi meliputi: konservasi, pemanfaatan, dan pengendalian daya rusak.

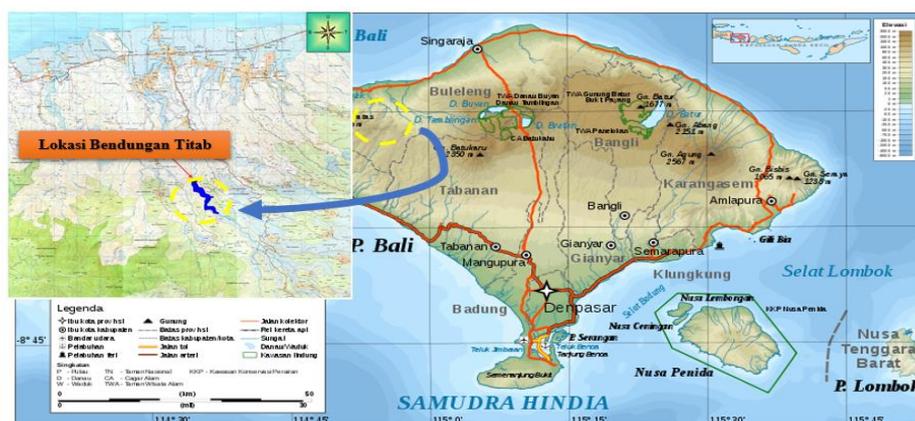
Penyebab kegagalan terbesar bendungan urugan adalah rembesan yang dapat ditinjau baik dari sisi gradasi maupun permeabilitas material (Putri *et al.*, 2017). Rembesan yang terjadi di dalam maupun di bawah timbunan bendungan urugan harus dikontrol. Gambaran mengenai rembesan yang terjadi pada bendungan urugan dapat dikenali dengan analisis indeks rembesan (QI). $QI < 1$ mengindikasikan rembesan yang terjadi masih normal dan tidak menimbulkan kebocoran serta ketidakstabilan pada tubuh bendungan (Novak *et al.*, 2001).

Rembesan pada tubuh bendungan maupun pondasi merupakan faktor penting dalam stabilitas bendungan sehingga pola aliran dan besaran debit rembesan sangat penting untuk diperhatikan (Yong & Chuanfang, 2009). Rembesan melalui tubuh bendungan, pondasi, dan tepian/bukit sekeliling waduk harus terkendali, tidak boleh terjadi gaya angkat (*uplift*) yang berlebih, ketidakstabilan, longsoran, aliran buluh, terhanyutnya material karena pelarutan atau erosi internal/material terbawa aliran melalui retakan, kekar dan rongga (Look, 2007).

Salah satu bendungan di Indonesia yang memiliki banyak fungsi adalah Bendungan Titab yang terletak di Provinsi Bali seperti pada Gambar 1. Pemanfaatan bendungan ini sebagai sumber irigasi,

air baku dan PLTA. Bendungan ini merupakan tipe bendungan urugan batu dengan inti tegak yang memiliki panjang puncak 210 m, lebar 12 m dan tinggi 78 m dari pondasi terdalam. Bendungan dibangun dengan kondisi geologi relatif sangat kompleks yaitu bertumpu pada pondasi yang berasal dari endapan vulkanik muda. Pada saat pelaksanaan konstruksi ditemukan mata air (artesis) pada pondasi bendungan. Bulan Januari 2016 dilakukan pengisian awal waduk hingga mencapai elevasi $\pm 133,5$ m dan belum terjadi limpasan karena elevasi pelimpah berada pada ± 156 m. Dalam prosesnya terdapat beberapa kejadian meliputi terjadinya semburan pada mulut *intake* ± 40 m, terjadi rekahan memanjang pada puncak bendungan serta debit yang tercatat cukup deras sebesar 20 liter/detik, sehingga berdasarkan rekomendasi KKB Waduk Titab diminta untuk dilakukan pengosongan kembali pada bulan Maret 2016 dan pengisian kembali dilakukan pada bulan November 2017. Rekahan memanjang terjadi sebagai akibat dari perbedaan nilai deformasi vertikal antara hulu dan hilir dan arah defromasi horisontal pada puncak bendungan (Nala *et al.*, 2021).

Setelah digenangi kembali, melalui pengamatan visual di bulan Februari 2018 dijumpai perubahan-perubahan pada bendungan dan terjadi longsoran pada dinding pelimpah dengan panjang 63 m, lebar 14 m, dan tinggi 7,7 m (BWS Bali Penida, 2018). Pada bidang longsoran ditemukan kurang lebih empat sumber air yang cukup deras keluar dari timbunan tanah di belakang dinding kiri kolam olak dan kaki tampungan kiri *spillway* serta melalui pengamatan semua *observation well* (OW) di hilir kaki bendungan menunjukkan adanya peningkatan muka air, sehingga perlu dilakukan analisis potensi aliran buluh. Paper ini mengkaji potensi terjadinya erosi buluh (*piping*) akibat pengaruh mata air yang ada di dekat bendungan. Kajian dilakukan berdasarkan pengamatan instrumen selama masa penggenangan Tahun 2016 hingga 2019.



Gambar 1. Lokasi Bendungan Titab

Metode

Penelitian ini merupakan studi kasus Bendungan Titab. Analisis rembesan menggunakan pendekatan empiris dari data pembacaan V-Notch dan tekanan air pori pada pisometer. Data yang digunakan merupakan pembacaan dari Tahun 2016 hingga 2019 pada penampang di Sta. 8. Peninjauan penampang melintang bendungan menggunakan Sta. 8 dikarenakan lebih menggambarkan kondisi kejadian melalui pembacaan peralatan instrumen yang terpasang pada penampang tersebut. Potongan melintang Bendungan Titab dan lokasi pisometer ditunjukkan pada Gambar 2. Data pembacaan V-Notch dan pisometer dapat dilihat pada Tabel 1, 2 dan 3.

Pola rembesan pada tubuh bendungan sangat bergantung pada ketinggian muka air waduk yang menghasilkan tekanan air (Jayadi, 2009). Dimana,

muka air waduk memiliki hubungan linear dengan rembesan (Siswanto *et al.*, 2019). Ketinggian muka air waduk juga berpengaruh terhadap durasi rembesan, semakin tinggi muka air waduk semakin panjang durasi rembesan yang terjadi (Ardiansyah *et al.*, 2014). Kuantitas rembesan, kecepatan rembesan, dan *exit gradient* sangat dipengaruhi oleh ketinggian muka air waduk, pada muka air maksimum memberikan nilai kuantitas rembesan, kecepatan rembesan, dan *exit gradient* yang tinggi dan sebaliknya (Abass & Najeeb, 2018).

Tabel 1. Data pembacaan rembesan

No	Tahun	V-Notch (lt/detik)
1	2016	16,589
2	2017	18,516
3	2018	27,972
4	2019	25,818

Sumber: BWS Bali Penida, 2019.

Tabel 2. Data pembacaan pisometer Tahun 2016

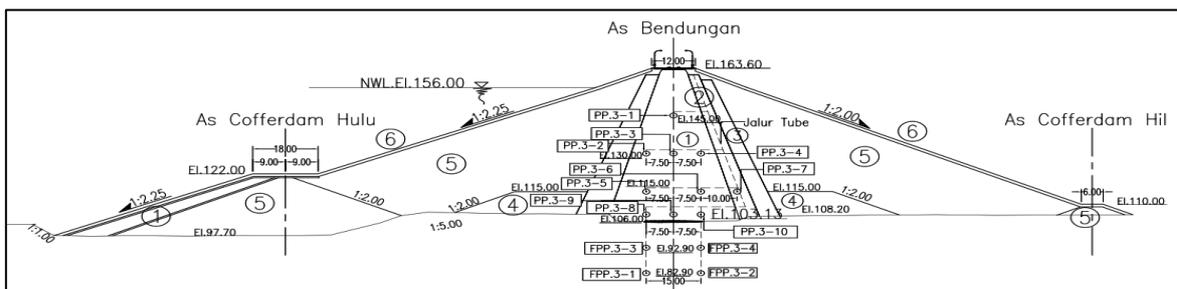
Pisometer U/S	Pisometer U/S head (m)	Pisometer D/S	Pisometer D/S head (m)	Perbedaan tinggi tekanan, ΔH (m)	Jarak pisometer (m)	Gradien hidrolis, i
PP.1	6,47	PP.3	6,60	0,12	15,00	0,01
PP.2	6,58	PP.4	5,23	1,35	15,00	0,09
PP. 5	0,83	PP.6	5,83	5,00	15,00	0,33
PP.8	12,71	PP.10	12,78	0,07	15,00	0,00
FPP.3	5,12	FPP.4	17,51	12,39	15,00	0,83
FPP. 1	16,87	FPP.2	18,09	1,22	15,00	0,08
Rata-rata gradien hidrolis						0,22

Sumber: BWS Bali Penida, 2019

Tabel 3. Data pembacaan pisometer Tahun 2017

Pisometer U/S	Pisometer U/S head (m)	Pisometer D/S	Pisometer D/S head (m)	Perbedaan tinggi tekanan, ΔH (m)	Jarak pisometer (m)	Gradien hidrolis, i
PP.1	6,02	PP.3	6,35	0,33	15,00	0,02
PP.2	6,27	PP.4	4,57	1,70	15,00	0,11
PP. 5	1,85	PP.6	5,47	3,63	15,00	0,24
PP.8	12,10	PP.10	13,05	0,95	15,00	0,06
FPP.3	5,78	FPP.4	16,64	10,86	15,00	0,72
FPP. 1	17,64	FPP.2	18,63	0,98	15,00	0,07
Rata-rata gradien hidrolis						0,20

Sumber: BWS Bali Penida 2019



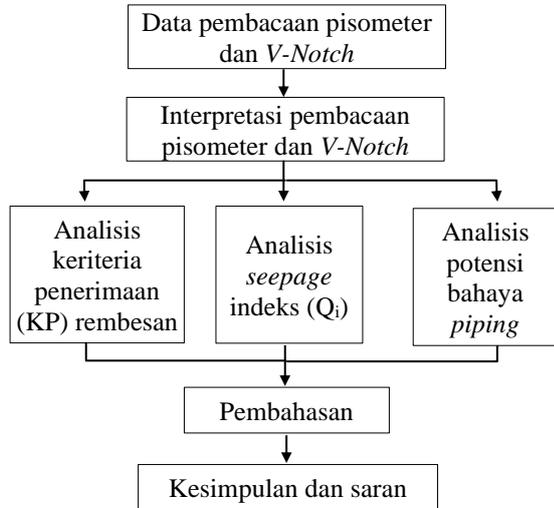
Keterangan :

PP : Pneumatic pisometer

FPP : Fondation pneumatic pisometer

Gambar 2. Potongan melintang perletakan pisometer

Peningkatan elevasi muka air waduk juga berbanding lurus dengan kenaikan tekanan air pori dan rembesan baik dianalisis secara FEM maupun dari hasil pembacaan peralatan instrumen (Huda *et al.*, 2019).



Gambar 3. Tahapan analisis

Tabel 4. Kriteria penerimaan rembesan pada tubuh bendungan

Tinggi bendungan (m)	Rembesan, liter/hari/m (liter/menit/m)	
	Aman	Tidak aman
< 5	< 25 (0,02)	> 50 (0,03)
5 – 10	< 50 (0,03)	> 100 (0,07)
10 – 20	< 100 (0,07)	> 200 (0,14)
20 – 40	< 200 (0,14)	> 400 (0,28)
> 40	< 400 (0,28)	> 800 (0,56)

Sumber: Look, 2007

Untuk mengetahui rembesan yang terjadi pada bendungan masih dapat ditoleransi atau tidak dilakukan analisis indeks rembesan (*seepage index*, Q_i). Nilai $Q_i < 1$ memberikan gambaran bahwa rembesan yang terjadi pada bendungan dapat ditoleransi dan tidak mengindikasikan terjadi bahaya keruntuhan bendungan akibat rembesan (Novak *et al.*, 2001). Besaran Q_i dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kuantitas rembesan, permeabilitas, gradien hidrolik, dan geometri bendungan.

Geometri bendungan meliputi kemiringan hulu dan hilir, lebar inti dan ketebalan inti berpengaruh terhadap kuantitas rembesan yang mengalir per satuan lebar, untuk bendungan inti zonal perbandingan horizontal terhadap vertikal sebesar 1:0,5 yang paling ideal (Al-Janabi *et al.*, 2020). Koefisien permeabilitas (k), ketinggian air, kemiringan hulu (β), kemiringan hilir (α) dan lebar puncak mempengaruhi kecepatan aliran rembesan,

peningkatan kecepatan aliran rembesan dapat meningkatkan gradien hidrolik (Tang *et al.*, 2020). Nilai Q_i dapat dihitung dengan persamaan 1.

$$Q_i = \frac{q}{1000 \cdot A \cdot k \cdot i} \quad (1)$$

dengan, Q_i merupakan *seepage index*, q merupakan debit rembesan melalui tubuh bendungan persatuan lebar ($l/dt/m$), A merupakan luasan elemen dalam satu penampang (m^2), k merupakan koefisien permeabilitas pada inti bendungan (m/dt), i merupakan gradien hidrolik yang melewati tubuh bendungan

Tahapan selanjutnya dilakukan analisis terhadap bahaya *piping*. Analisis dilakukan dengan memperhitungkan faktor keamanan terhadap aliran air di dalam tubuh bendungan atau rembesan. Aliran air sangat berpengaruh terhadap stabilitas bendungan. Jika material terangkut bersama aliran dan membentuk pipa-pipa di dalam tanah dapat mengakibatkan *piping*, semakin tinggi kecepatan aliran, semakin tinggi potensi aliran membawa butiran tanah (Sukirman, 2014). *Critical hydraulic gradient* atau *exit gradient* sangat berpengaruh terhadap kecepatan aliran yang berpotensi membawa butiran material (Wang & Okeke, 2016). Analisis faktor keamanan terhadap bahaya *piping* dilakukan berdasarkan perbandingan gradien hidrolik air dengan gradien hidrolik material seperti persamaan 2.

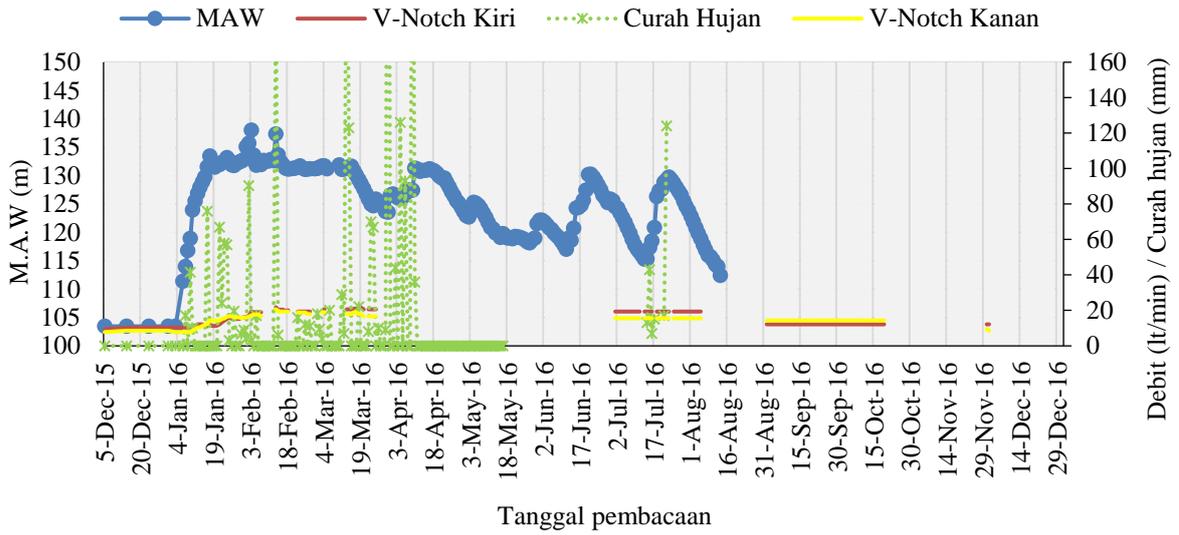
$$FK_{piping} = \frac{i_c}{i_e} \geq 4 \quad (2)$$

dengan, FK_{piping} merupakan faktor keamanan *piping* (minimum = 4, Badan Standarisasi Nasional, 2016). i_e merupakan gradien hidrolik debit rembesan, i_c merupakan gradien hidrolik dari material, dan penentuan harga i_c menggunakan Persamaan 3.

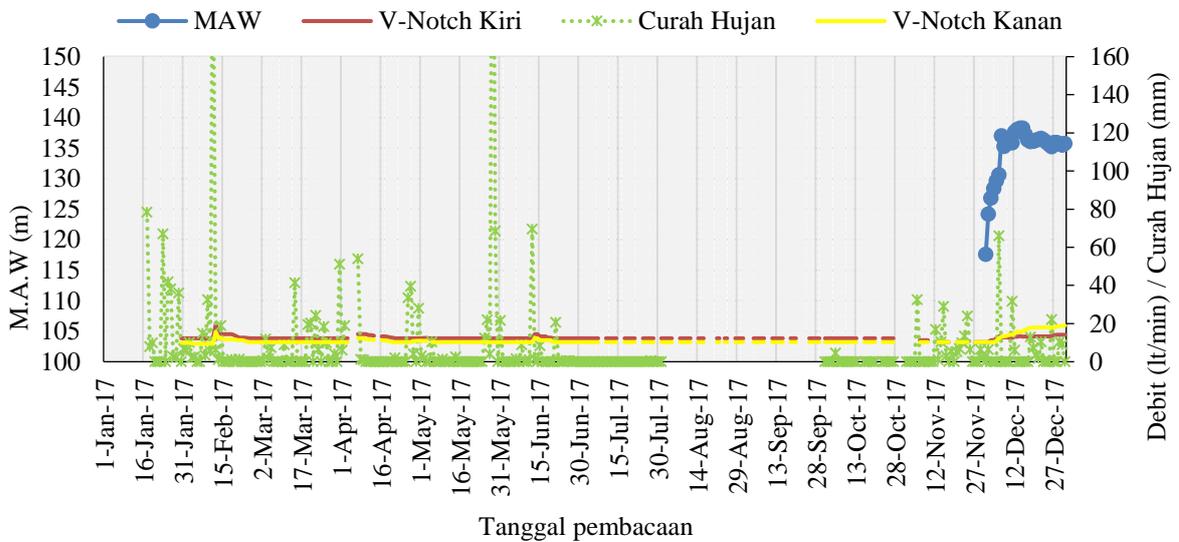
$$i_c = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} \quad (3)$$

dengan, γ_{sat} merupakan berat volume material (kN/m^3), γ_w merupakan berat volume air ($9,81 kN/m^3$).

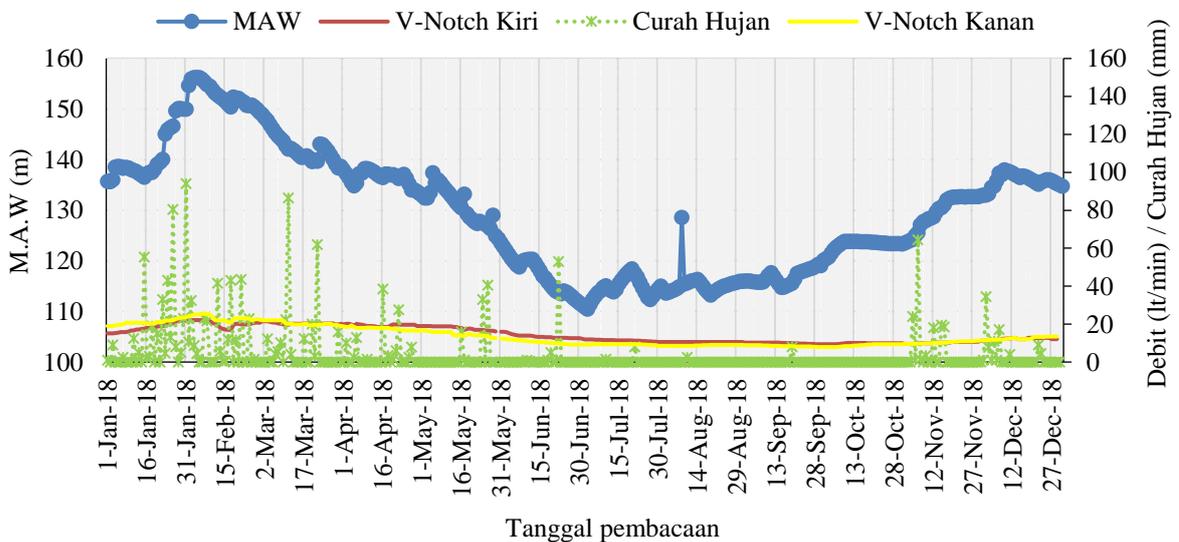
Pada bendungan eksisting faktor keamanan sebesar 3,0 masih dapat diterima jika struktur bendungan telah stabil dan pembebanan yang bekerja pada bendungan mendekati normal. Faktor keamanan sebesar 4,0 lebih ditunjukkan pada bendungan yang baru pada saat desain dan untuk bendungan eksisting yang dilakukan rehabilitasi terhadap struktur bendungannya. Untuk keadaan bendungan dengan struktur pondasi yang baik dan terdapat instrumen pisometer yang memadai untuk mengamati perilaku tekanan air pori yang terjadi pada tubuh dan pondasi bendungan, faktor keamanan 2,0 – 2,5 masih dapat diterima (Engemoen, 2014).



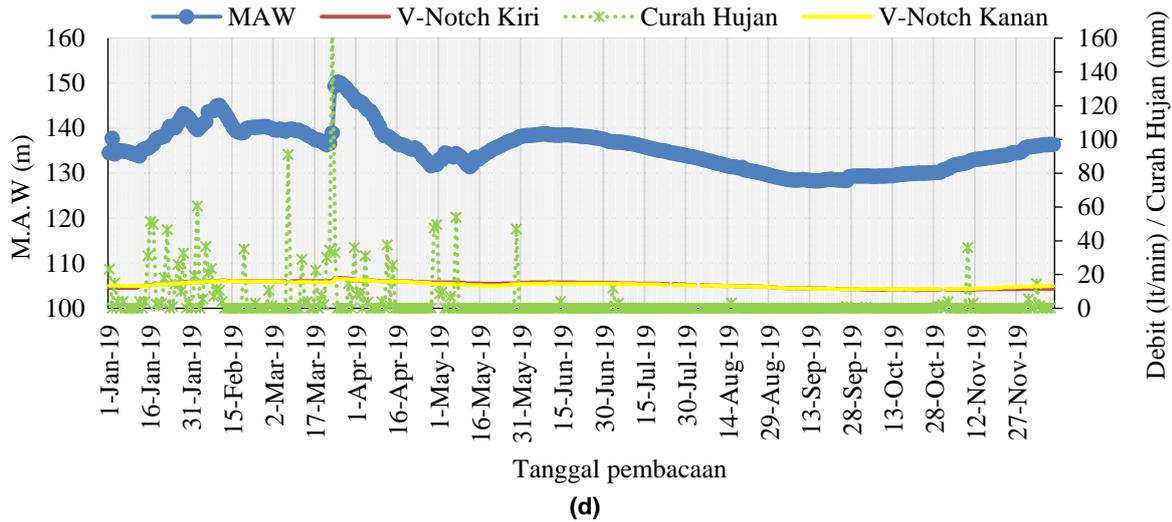
(a)



(b)



(c)



Gambar 4. Interpretasi debit rembesan pada pembacaan V-notch (a) 2016, (b) 2017, (c) 2018, (d) 2019

Hasil dan Pembahasan

Kriteria penerimaan rembesan

Analisis kriteria penerimaan untuk rembesan yang diijinkan berdasarkan nilai kuantitas rembesan per meter panjang bendungan dan ditinjau berdasarkan tinggi bendungan (Look, 2007). Berdasarkan Tabel 4 dengan tinggi Bendungan Titab sebesar 78 m memiliki batas aman kuantitas rembesan tiap satuan lebar bendungan adalah 0,28 liter/min/m. Hasil interpretasi data pembacaan debit rembesan ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan data pembacaan debit rembesan pada V-notch dari Tahun 2016 hingga 2019 diperoleh kuantitas rembesan seperti pada Tabel 5.

Pada Tabel 5. diperoleh bahwa kuantitas debit rembesan Bendungan Titab rata-rata tidak aman karena lebih dari 0,56 liter/min/m. Hal ini mengindikasikan bahwa kuantitas debit rembesan yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan sangat berlebih dan tidak terkontrol. Berdasarkan hasil inetrpretasi pembacaan debit rembesan pada Gambar 4, bahwa debit rembesan cukup berkorelasi dengan muka air waduk. Jika air waduk meningkat debit rembesan juga meningkat. Namun jika air waduk menurun debit rembesan tidak menurun secara signifikan mengikuti penurunan muka air waduk (Gambar 4.).

Hal ini mengindikasikan mata air yang terdapat pada pondasi mempengaruhi debit rembesan sehingga kuantitas debit rembesan tetap besar walaupun muka air waduk menurun. Hal ini juga diperkuat dengan penemuan mata air setelah terjadi kelongsoran seperti ditunjukkan pada Gambar 5, dan lokasi runtuhnya dan penemuan mata air ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Posisi longsoran dinding kiri kolam olak



Gambar 6. Lokasi longsor dan penemuan mata air setelah longsor.

Analisis indeks rembesan (*seepage index, Qi*)

Analisis indeks rembesan (Q_i) dimaksudkan untuk mengukur tingkat rembesan yang terjadi pada bendungan urugan. Jika seluruh bagian bendungan terjadi aliran rembesan diharapkan *seepage index* (Q_i) < 1, hal ini memberikan gambaran bahwa aliran rembesan yang terjadi masih dapat ditoleransi tidak memberikan indikasi bahaya keruntuhan pada bendungan. Hasil perhitungan Q_i pada Bendungan Titab terdapat pada Tabel 6.

Tabel 5. Analisis kuantitas rembesan tiap satuan lebar bendungan

No	Tahun	V-Nocth (liter/min)	Analisis kuantitas rembesan tiap satuan lebar bendungan			
			Rembesan tiap meter bendungan (liter/min/m)	Nilai batas (liter/min/m)		Keterangan
				Aman	Tidak aman	
1	2016	995,319	4,740	0,28	0,56	Tidak Aman
2	2017	1110,969	5,290	0,28	0,56	Tidak Aman
3	2018	1678,315	7,992	0,28	0,56	Tidak Aman
4	2019	1549,084	7,377	0,28	0,56	Tidak Aman

Tabel 6. Perhitungan seepage index (Qi) Bendungan Titab

No	Tahun	V-Nocth (liter/detik)	Analisis seepages index, Qi				Keterangan
			Luas A (m ²)	Permeabilitas K (m/s)	Hidrolik gradien, i	Qi	
						(Q < 1)	
1	2016	16,589	1302,450	1,01E-05	0,22	5,73	Tidak memenuhi
2	2017	18,516	1302,450	1,01E-05	0,21	6,70	Tidak memenuhi
3	2018	27,972	1302,450	1,01E-05	Alat rusak	-	-
4	2019	25,818	1302,450	1,01E-05	Alat rusak	-	-

Dapat dilihat bahwa keseluruhan pembacaan memberikan nilai $Q_i > 1$, hal ini menunjukkan bahwa rembesan yang terjadi pada Bendungan Titab tidak dapat ditoleransi sehingga perlu pengendalian rembesan secara signifikan untuk mencegah terjadinya kegagalan bendungan akibat rembesan. Analisis Q_i dipengaruhi beberapa faktor meliputi kuantitas rembesan, permeabilitas, gradien hidrolik dan luas per satuan penampang. Semakin kecil kuantitas debit rembesan yang mengalir dengan luasan pengaliran yang besar dapat memperkecil indeks rembesan.

Bendungan Titab memiliki perbandingan kemiringan inti antara horisontal terhadap vertikal yang cukup curam yaitu 1:0,25 sehingga dengan kuantitas debit yang besar diperoleh $Q_i > 1$ yang sejalan dengan KP rembesan bahwa debit rembesan yang terjadi tidak dapat ditoleransi atau diterima. Peningkatan debit rembesan juga didasarkan pada adanya mata air pada pondasi yang terlihat pada Gambar 4 yang telah dibahas sebelumnya. Dalam hal ini kedua analisa baik KP rembesan dan indeks rembesan memberikan hasil bahwa debit rembesan yang terjadi tidak dapat ditoleransi akibat adanya mata air pada pondasi.

Analisis faktor keamanan terhadap bahaya *piping*

Analisis faktor keamanan terhadap bahaya *piping* dilakukan untuk mengidentifikasi apakah bendungan dapat berpotensi terjadi erosi internal atau tidak. Pada Bendungan Titab analisis terhadap bahaya *piping* dilakukan dengan memperhitungkan perbandingan antara besaran *exit gradient* yang terjadi terhadap nilai gradien hidrolik material. Bila diketahui gradien hidrolik inti bendungan (i_c)

adalah 0,21; berat volume material inti (γ_{sat}) adalah 17,285 kN/m³ dan berat volume air (γ_w) 9,81 kN/m³ sehingga,

$$i_c = \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} = \frac{17,285}{9,81} = 1,762$$

maka,

$$FK_{piping} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{1,762}{0,21} = 8,390 > 4 \quad (\text{Ok})$$

Berdasarkan hasil perhitungan faktor keamanan (FK) terhadap bahaya *piping* diperoleh nilai FK sebesar 8,390 artinya lebih besar dari yang dipersyaratkan yaitu 4,0. Hal ini menunjukkan bahwa Bendungan Titab tidak berpotensi atau masih aman terhadap bahaya erosi internal atau *piping*.

Potensi erosi buluh akibat mata air

Berdasarkan hasil analisis indeks rembesan dan kriteria penerimaan rembesan bahwa mata air menambah kuantitas rembesan pada bendungan sehingga debit rembesan yang terukur tidak dapat ditoleransi, namun Bendungan Titab tidak berpotensi terhadap bahaya *piping* karena $FK > 4$ dan perlu penelitian lebih lanjut untuk mengamati kuantitas dan kualitas debit rembesan kedepannya.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal, meliputi kuantitas rembesan tiap satuan lebar bendungan masih belum dapat diterima berdasarkan analisis KP rembesan dan analisis *seepage index* (Q_i). Hal ini membuktikan bahwa mata air berpengaruh terhadap rembesan karena berdasarkan interpretasi pembacaan debit rembesan cukup berkorelasi

dengan tinggi muka air waduk namun pada penurunan muka air waduk debit rembesan tidak menurun secara signifikan. Bendungan Titab aman terhadap bahaya piping walaupun kuantitas rembesan tidak dapat ditoleransi.

Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah perlu dilakukan analisis lebih lanjut dalam upaya pengurangan kuantitas debit rembesan akibat pengaruh mata air. Selain itu juga perlu adanya pemantauan secara ketat dan rutin terhadap kualitas air rembesan akibat kuantitas debit rembesan tidak dapat ditoleransi sehingga dimungkinkan dapat berpotensi membawa butiran material.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Melalui BPSDM yang telah memberikan dana dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro yang telah memberikan arahan dan Balai Wilayah Sungai Bali Penida yang telah berkenan memberikan data pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

Abass, A. S., & Najeeb, A. D. (2018). Analysis of seepage through embankment dams as case study (Al-Shahabi Dam) in Iraq. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)* 40(2), 07-17.

Al-Janabi, A. M. S., Ghazali, A. M., Ghazaw, Y. M., & Afan, H. A. (2020). Experimental and numerical analysis for earth fill dam seepage. *Sustainability Journal*, 12(6), 01-14.

Ardiansyah, R. H., Sobriyah, & Wahyudi, A. H. (2014). Pengaruh fluktuasi muka air waduk terhadap debit rembesan menggunakan model seep/W (Studi Kasus di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali). *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 2(3), 471-476.

BWS Bali Penida. (2018). *Laporan inspeksi lapangan kejadian khusus Bendungan Titab-Ularan*. Bali: BWS Bali Penida.

BWS Bali Penida. (2019). *Laporan Pembacaan Instrumen Pisometer dan V-Notch Bendungan Titab*. Bali: BWS Bali Penida.

Engemoen, B. (2014). *Design standards No. 13 embankment dams*. United State of Amerika: US Department of Interior Bureau of Reclamation.

Huda, A. L., Wardani, S. P. R., & Suharyanto, S. (2019). Evaluasi tekanan air pori dan rembesan pada bendungan panohan. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 4(2), 102-111.

Jayadi, M. (2009). *Analisis debit rembesan pada model tanggul tanah*. Institut Pertanian Bogor, from <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/60563>

Look, B. G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*, London: Taylor and Francis Group.

Nala, I. M. A., Sangkawati, S., & Putranto, T. T. (2021). Pengaruh muka air waduk saat pengisian awal terhadap deformasi dan rekahan pada tubuh bendungan (Studi Kasus: Bendungan Titab). *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(3), 168-182.

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayan, P. (2001). *Hydraulic structures* (4th ed), London: Taylor and Francis Group.

Putri, V. S., Rangga, F., Hardiyati, S., & Wikan, K. S. (2017). Analisa permeabilitas zona inti dan zona filter Bendungan Logung. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(2), 70-82.

Siswanto, Suprpto, & Sacro, S.S. (2019). Estimasi dan evaluasi debit rembesan pada bendungan urugan zonal inti tegak. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 4(2), 129-138.

SNI 8065. (2016). Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan.

Sukirman. (2014). Analisis rembesan pada bendungan tipe urugan melalui uji hidrolis di laboratorium hidro FT UNSRI. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(2), 238-244.

Tang, D., Gordan, B., Koopialipoor, M., & Armaghani, D. J. (2020). Seepage analysis in short embankments using developing a metaheuristic method base on governing equations. *Sciences Journal*, 10(1761), 1-23.

Wang, F., & Okeke, C. A. U. (2016). Critical Hydraulic Gradients for Seepage Induced Failure of Landslide Dams. *Geoenviron Disaster Journal*. 3(9), 01-22.

Yong, H., & Chuanfang, K. E. (2009). *Study on anti-seepage effect of xiongjiagang earth-rock fill dam based on cut off wall scheme*. China: China Three Gorges University