

## ANALISIS DEFORMASI VERTIKAL BENDUNGAN TUKUL BERDASARKAN PEMBACAAN PATOK GESER

Imam Nashrullah<sup>1\*</sup>, Hari Nugroho<sup>1</sup>, Kresno Wikan Sadono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang

\*Corresponding authors: [imamnashr28@gmail.com](mailto:imamnashr28@gmail.com)

**Abstract:** A newly completed dam undergoes loading from its self-weight and reservoir water, which can induce deformation. The objective of this study is to evaluate the post-construction vertical deformation behavior of the Tukul Dam by analyzing the magnitude of the observed settlement against established acceptance criteria. Post-construction surface vertical deformation can be monitored using surface monitoring point. The vertical deformation analysis focuses on the z-axis monitoring data, which illustrates the settlement trends across the dam body's surface. The measurement results were compared with empirical acceptance criteria from Hunter and Fell, ICOLD, Sowers, and Sherard, as well as an analysis based on the *Settlement Index* (SI). Based on monitoring data spanning a three-year period, the vertical deformation analysis of the Tukul Dam indicates that while a few instruments recorded values classified as abnormal or below the acceptance criteria, the vast majority of the markers met the criteria and were deemed normal. However, the presence of abnormal readings at certain instruments does not necessarily imply that the dam is unsafe. The SI analysis confirms that all instruments recorded values below the critical threshold of 0.02, ranging from 0.001 to 0.015, thereby classifying the observed settlement as normal.

**Keywords:** dam, deformation, instruments, surface monitoring point

**Abstrak:** Bendungan yang telah selesai dibangun akan mengalami tekanan dari beban sendiri dan air waduk yang dapat menyebabkan bendungan mengalami deformasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku deformasi vertikal Bendungan Tukul pasca konstruksi dengan menganalisis besaran penurunan yang terjadi terhadap kriteria penerimaan. Deformasi vertikal bendungan pasca konstruksi pada permukaan dapat dipantau dengan instrumentasi patok geser. Analisis deformasi vertikal difokuskan pada arah sumbu z sebagai data pengukuran yang menunjukkan tren penurunan pada permukaan tubuh bendungan. Hasil dari pengukuran dibandingkan dengan kriteria penerimaan dari Hunter and Fell, ICOLD, Sowers, Sherard, dan analisa berdasarkan *Settlement Index* (SI). Hasil analisis deformasi vertikal Bendungan Tukul pasca konstruksi dalam periode 3 (tiga) tahun berdasarkan patok geser dari beberapa kriteria didapatkan hasil beberapa instrumen memiliki nilai abnormal atau di bawah kriteria penerimaan, sebagian besar instrumen memenuhi kriteria sehingga dianggap normal. Namun, dalam hal kriteria yang abnormal terjadi pada beberapa instrumen bukan berarti bendungan dianggap tidak aman. Hasil analisis SI, keseluruhan instrumen memenuhi nilai di bawah 0,02 dengan nilai 0,001 - 0,015, sehingga penurunan yang terjadi dalam kategori normal.

**Kata kunci:** : bendungan, deformasi, instrumen, patok geser

### 1. PENDAHULUAN

Bendungan adalah bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015). Salah satu hal yang perlu dicermati yang dapat menyebabkan kegagalan bendungan yaitu pada peristiwa pasca konstruksi adanya penurunan

yang berlebihan. Deformasi yang berlebihan dapat menyebabkan hilangnya ambang bebas (*freeboard*), kerusakan bangunan pelengkap, retakan pada tubuh bendungan urugan, hingga potensi kegagalan hidraulik (*U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2015*). Kegagalan bendungan dapat dicegah dan diminimalkan dengan melakukan program keamanan bendungan yang harus diterapkan mulai dari desain, saat konstruksi, pasca konstruksi, hingga operasi dan pemeliharaan bendungan.

Penyebab adanya deformasi dari faktor eksternal seperti tekanan hidrostatik air, perubahan suhu udara, kejadian seismik (gempa), serta kondisi geoteknik tanah menjadi pemicu utama deformasi yang harus dianalisis korelasinya (Scaioni et al., 2018). Beberapa kasus analisis deformasi seperti indikasi awal deformasi abnormal di beberapa titik, secara tidak langsung menyatakan bendungan tidak aman, namun menjadi dasar penting untuk analisis lebih lanjut dan potensi intervensi dini guna menjamin keamanan struktural, hidrolis, dan rembesan (Istiaji et al., 2021). Bendungan Jatibarang menunjukkan hasil stabil pada sebagian besar titik di dalam kurun waktu 2017–2020, dengan pengecualian tiga titik yang perlu perhatian lebih lanjut (Rizki Purwanto et al., 2021). Kasus lain pada analisis berdasarkan *settlement index* serta kriteria penerimaan Sowers dan Hunter dan Fell pada Bendungan Sermo menghasilkan kondisi normal (Hutami et al., 2023). Penelitian (Pratama & Sukamta, 2024) mengidentifikasi perilaku deformasi vertikal pada tubuh Bendungan Sepaku Semoi selama masa konstruksi. Penurunan maksimum umumnya terdeteksi pada bagian tengah bentang bendungan (*maximum section*) di mana tinggi timbunan paling besar (Pratomo et al., 2021). Monitoring jangka panjang diperlukan untuk mengevaluasi perilaku bendungan selama masa layan guna mendeteksi penurunan internal yang signifikan (Kurniawan et al., 2021). Apabila deformasi mencapai batas kritisnya, maka sangat mungkin terjadi kerusakan yang luar biasa, bahkan memicu keruntuhan bendungan (de Lacy et al., 2017).

Salah satu bendungan yang selesai dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum pada tahun 2020 adalah Bendungan Tukul. Setelah 5 (lima) tahun selesai konstruksi dan seiring berjalannya waktu, deformasi dan penurunan terjadi, biasanya setelah beban mulai bekerja, di mana partikel tanah mengalami *creep*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku deformasi vertikal Bendungan Tukul dengan menganalisis besaran penurunan yang terjadi terhadap kriteria penerimaan. Sehingga, diharapkan dapat diketahui keamanan Bendungan Tukul terhadap ancaman perilaku deformasi yang terjadi.

## 2. METODE PENELITIAN

Bendungan Tukul berada di Desa Karanggede, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur terletak pada 111°08'22" BT dan 8°03'26" LS. Bendungan Tukul dibangun di Sungai Telu, salah satu anak Sungai Grindulu. Bendungan ini masuk dalam pengelolaan oleh Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Bendungan Tukul merupakan bendungan tipe urugan batuan yang memiliki inti kedap air. Data teknis Bendungan Tukul dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Data teknis Bendungan Tukul

No	Uraian	Data Teknis	Satuan
<b>A Hidrologi</b>			
1	Luas DTA	47,8	Km <sup>2</sup>
2	Nama Sungai	Telu	
3	Panjang Sungai Hingga As Dam	17,5	Km
4	Hujan Tahunan Rata-rata	2.246	Mm
<b>B Waduk</b>			
1	Elevasi Muka Air Banjir (MAB)	197,22	+ m
2	Elevasi Muka Air Normal (MAN)	192,10	+ m
3	Elevasi Muka Air Rendah	175,90	+ m
4	Volume Tampungan Total	8,68	Juta m <sup>3</sup>
5	Volume Tampungan Efektif	4,98	Juta m <sup>3</sup>
6	Volume Tampungan Mati	3,70	Juta m <sup>3</sup>
7	Luas Tampungan (MAN)	44,81	Ha
<b>C Tubuh Bendungan</b>			
1	Tipe	urugan zonal dengan inti tegak	
2	Elevasi Puncak Bendungan	198,30	+ m
3	Elevasi Dasar Fondasi	128,96	+ m
4	Panjang Puncak	233	M
5	Lebar Puncak	10	M
6	Tinggi dari Fondasi Terdalam	74,30	M
7	Tinggi dari Dasar Sungai	70,34	M
8	Kemiringan Lereng Hilir	1: 2,5	
9	Kemiringan Lereng Hulu	1: 3,0	

Instrumentasi yang berfungsi untuk memonitor perilaku deformasi vertikal pada tubuh Bendungan Tukul salah satunya adalah

patok geser. patok geser/*Surface Monitoring Point* (SMP) merupakan alat pantau deformasi pada permukaan tubuh bendungan. Patok geser yang dipasang pada bendungan tukul berjumlah 38 patok geser dengan sebaran 8 patok terpasang pada elevasi +192.1 bagian hulu dari STA MD 2 + 00 – STA MD 9 + 00, 9 patok terpasang pada puncak bendungan bagian hulu dari STA MD 1 + 00 – STA MD 9 + 00, 9 patok terpasang pada puncak bendungan bagian hilir dari STA MD 1 + 00 – STA MD 9 + 00, 7 patok terpasang pada elevasi +180 bagian hilir dari STA MD 3 + 00 – STA MD 9 + 00, dan 5 patok terpasang pada elevasi +160 bagian hilir dari STA MD 4 + 00 – STA MD 8 + 00. Letak detail patok geser dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Data pemantauan diperoleh melalui survei geodetik presisi tinggi menggunakan GNSS (*Global Navigation Satellite System*), dengan mencapai akurasi pengukuran sebesar ±1mm/km. Survei dilakukan dengan interval setengah tahunan sepanjang periode pengamatan tahun 2020–2023. Patok geser digunakan untuk mengukur pergerakan dari permukaan bendungan baik secara vertikal maupun horizontal. Keuntungan dari pemantauan deformasi bendungan berdasarkan survei patok geser adalah sederhana, dapat dilakukan kapan pun, sensitivitas data yang baik, dan frekuensi survei yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan (*U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*, 2014).

Arah pergeseran pada bendungan yang dapat diketahui dari pemantauan patok geser 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. Analisis deformasi vertikal pada bendungan yaitu difokuskan pada arah sumbu z. Analisis tersebut dilakukan dengan cara memperhitungkan besar selisih posisi awal patok geser dengan posisi patok geser saat survei. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan kriteria penerimaan deformasi bendungan pasca konstruksi (Hunter & Fell, 2003). Periode yang dipakai dalam analisis deformasi vertikal Bendungan Tukul pasca konstruksi adalah 3 (tiga) tahun.

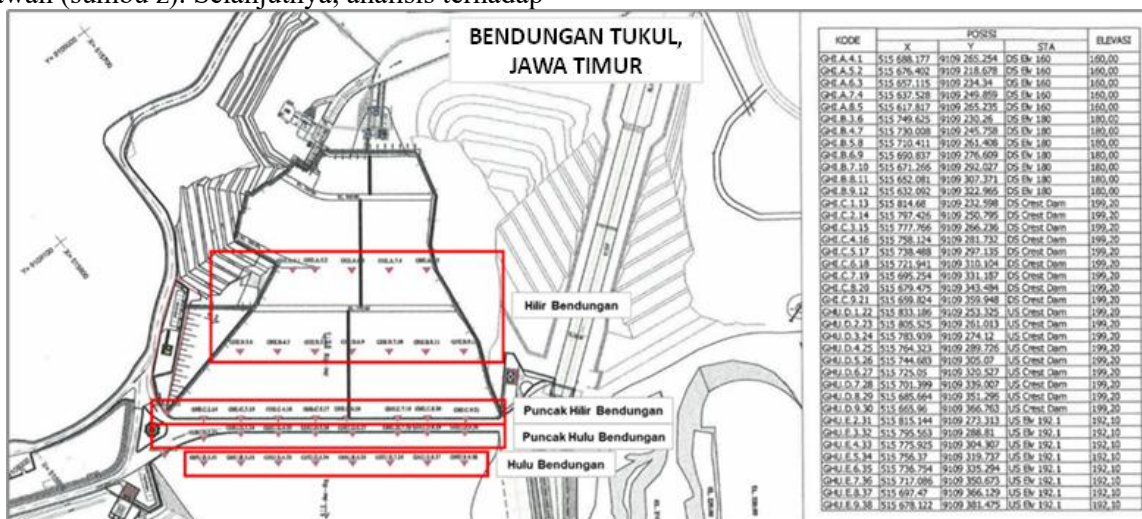
Kriteria penerimaan penurunan puncak, lereng hulu dan hilir bendungan (Hunter & Fell, 2003) dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.** dan Tabel 3.

Penurunan puncak bendungan dapat dievaluasi dengan *settlement index* (SI) yang dinyatakan dengan rumus:

$$SI = \frac{S}{1000 \times H \times \log\left(\frac{t_1}{t_2}\right)} \quad (1)$$

Di mana S (mm) adalah selisih dari penurunan puncak diukur antara waktu t2 dan t1, sedangkan H adalah ketinggian bendungan. (Tedd et al., 1997) mengemukakan bahwa nilai-nilai *Settlement Index* "lebih besar dari 0,02 dapat mengindikasikan beberapa mekanisme selain *creep* yang menyebabkan penurunan dan bahwa situasinya harus diperiksa secara serius".

Selain kriteria penerimaan hasil analisis Hunter dan Fell, deformasi vertikal bendungan urugan batu dapat dievaluasi dengan kriteria penerimaan dari penelitian lain yang disajikan pada Tabel 4.



**Gambar 1.** Denah patok geser Bendungan Tukul, Jawa Timur**Tabel 2.** Kriteria penerimaan penurunan puncak bendungan pasca konstruksi

Core Width	Core Properties		Crest Settlement (% of dam height)		
	Class	Moisture content	3 years	10 years	20 - 25 years
Thin to medium	CL/CH	Dry	0,05 – 0,55	0,10 – 0,65	0,20 – 0,95
		Wet	0,04 – 0,75	0,08 – 0,95	0,20 – 1,10
	SC/GC	Dry	0,10 – 0,25	0,10 – 0,40	< 0,5
		Wet	0,15 – 0,80	0,20 – 1,10	< 1,1
Thin to thick	SM/GM	All	0,06 – 0,30	0,10 – 0,65	< 0,5 – 0,7
Thick	CLCH	All (most dry)	0,02 – 0,75	0,10 – 1,00	0,5 – 1,0
	SC/GC	All (most dry)	0,05 – 0,20	0,10 – 0,35	0,10 – 0,45
Very broad	All	All (most dry)	0 – 0,60	0 – 0,80	0,05 – 0,76

Notes: Thin ( $<0,25H: 1V$ ); Medium ( $0,25H < x < 0,5H: 1V$ );  
Thick ( $0,5H < x < 1,25H: 1V$ )      Very Broad (lebar lapisan kedap > lebar puncak)

**Tabel 3.** Kriteria penerimaan penurunan lereng hulu dan hilir bendungan pasca konstruksi

Material Type	Compaction Rating	Settlement (% height from the control point to foundation level)			
		Downstream Shoulder		Upstream Shoulder	
		3 years	10 years	3 years	10 years
Rockfill	Well	0,05 – 0,35	0,05 - 0,55	0,10 – 0,60	0,10 – 0,70
	Reas to well	< 0,30	< 0,50	0 – 0,55	0,10 – 0,60
	Reas	0,20 – 1,0	0,10 – 1,0	< 0,70	*
	Poor	0,10*	0,15*	0,10 – 1,05	0,15 – 1,20
	Poor - dry	0,15 – 1,60	0,30 – 2,0	0,15 – 1,35	0,20 – 1,6
Gravels	-	< 0,15	< 0,25	< 0,15	< 0,25
Earthfills	-	0 – 0,40	0,0 – 0,70	0,05 – 0,60	0,10 – 0,70

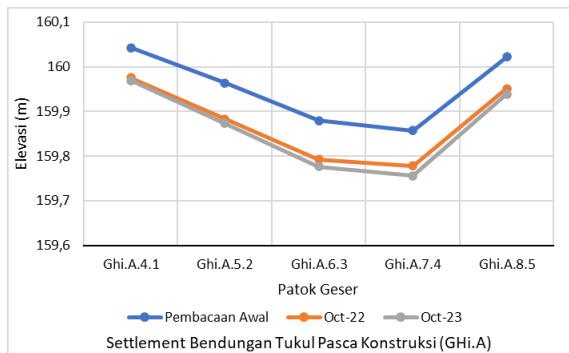
(\*) insufficient data

**Tabel 4.** Kriteria penerimaan penurunan bendungan tipe urugan batu pasca konstruksi

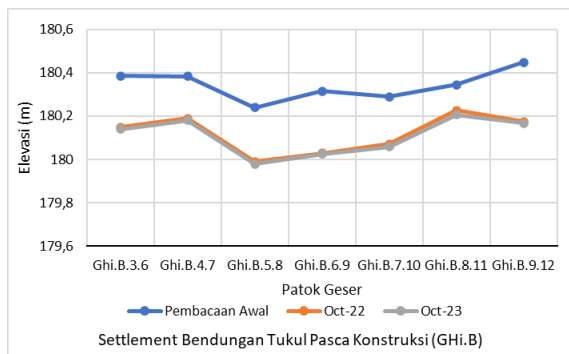
Referensi	Parameter Deformasi	Batas Deformasi (% dari tinggi bendungan)
(ICOLD, 1993)	Puncak	0,2% – 1,0%
	Lereng	0,1% – 0,2%
(Sowers, 1965)	Puncak	0,25% – 1,0%
(Sherard, 1963)	Puncak	0,1% - 0,4%

### 3. HASIL

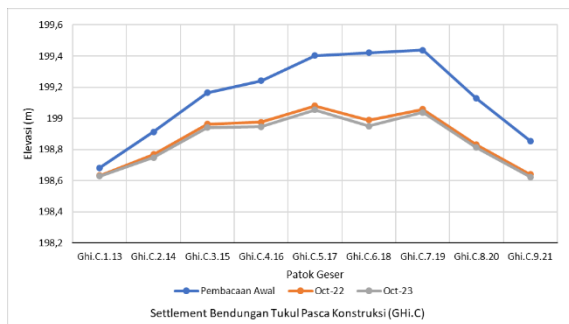
Pada penelitian ini digunakan data pengamatan alat instrumentasi patok geser yang memonitor deformasi vertikal yang terjadi di Bendungan Tukul pasca konstruksi tahun 2020 sampai dengan 2023. Data instrumentasi dikelompokkan dalam 5 (lima) segmen Ghi.A, Ghi.B, Ghi.C, Ghi.D, dan Ghi.E. Data Instrumentasi diolah ke dalam grafik yang menampilkan settlement pada permukaan Bendungan Tukul. Grafik yang ditampilkan pada rentan waktu awal pengamatan, 2 tahun pasca konstruksi, dan 3 tahun pasca konstruksi.



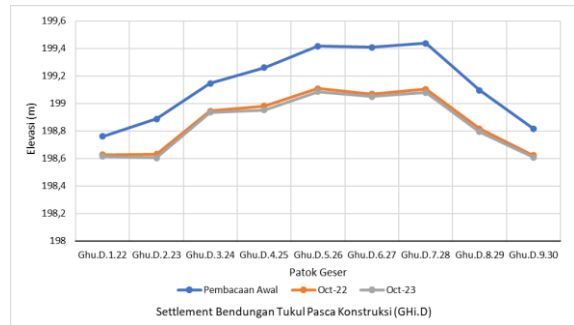
**Gambar 2.** Grafik penurunan permukaan Bendungan Tukul segmen 1 (Ghi.A)



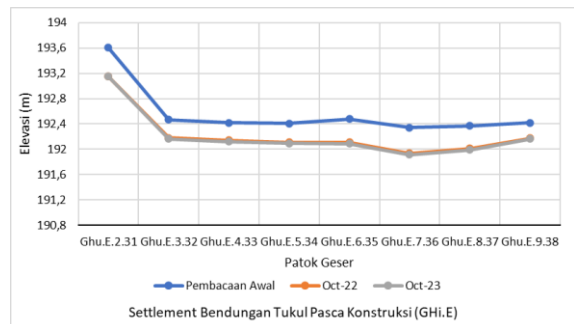
**Gambar 3.** Grafik penurunan permukaan Bendungan Tukul segmen 2 (Ghi.B)



**Gambar 4.** Grafik penurunan permukaan Bendungan Tukul segmen 3 (Ghi.C)



**Gambar 5.** Grafik penurunan permukaan Bendungan Tukul segmen 4 (Ghi.D)



**Gambar 6.** Grafik penurunan permukaan Bendungan Tukul segmen 5 (Ghi.E)

Pada gambar dapat dilihat adanya *settlement* bervariasi pada Bendungan Tukul yang terjadi setelah periode 3 (tiga) tahun pasca konstruksi. Segmen 1 (Ghi.A) penurunan terbesar terjadi pada patok geser Ghi.A.6.3 sebesar 0,130 m dan terkecil pada patok geser Ghi.A.4.1 sebesar 0,074 m. Segmen 2 (Ghi.B) mengalami penurunan terbesar pada patok geser Ghi.B.6.9 sebesar 0,291 m dan terkecil pada patok geser Ghi.B.8.11 sebesar 0,138 m. Segmen 3 (Ghi.C) penurunan terbesar terjadi pada patok geser Ghi.C.6.18 sebesar 0,471 m dan terkecil pada patok geser Ghi.C.1.13 sebesar 0,054 m. Segmen 4 (Ghi.D) terjadi penurunan terbesar pada patok geser Ghi.D.7.28 sebesar 0,358 m dan terkecil pada patok geser Ghi.D.1.22 sebesar 0,147 m. Segmen 5 (Ghi.E) mengalami penurunan terbesar pada patok geser Ghi.E.2.31 sebesar 0,455 m dan terkecil pada patok geser Ghi.E.9.38 sebesar 0,255 m. Sehingga, *settlement* yang paling besar dalam semua segmen terjadi pada patok geser Ghi.C.5.18 dengan penurunan sebesar 0,471 m dan yang paling kecil pada patok geser Ghi.C.1.13 sebesar 0,054 m.

Analisis data pemantauan dari SMP menunjukkan pola deformasi yang bervariasi di sepanjang badan bendungan. Deformasi vertikal yang teramati pada Tukul Dam tidak

menunjukkan profil keruntuhan progresif, melainkan merefleksikan perilaku konsolidasi sekunder pasca-konstruksi (*long-term creep*). Mekanisme ini dipicu oleh reorganisasi partikel material *rockfill* dan *core* akibat pembebanan gravitasi mandiri (*self-weight*) dan fluktuasi beban hidrostatis reservoir. Tekanan air pori yang berangsur mendisipasi pasca-pengisian reservoir berkontribusi signifikan terhadap laju penurunan yang melambat secara asimtotik seiring berjalannya waktu. Hal ini mengindikasikan bahwa tubuh bendungan sedang mencapai kondisi kesetimbangan (ekuilibrium) geoteknik baru.

Bendungan Tukul sudah beroperasi lima tahun sehingga analisa deformasi vertikal dapat ditinjau pada 3 (tiga) tahun sesuai dengan periode penilaian kriteria penerimaan deformasi pasca konstruksi Hunter dan Fell sesuai dengan [1], Jawa Timur

Tabel 2 dan Tabel 3. Evaluasi deformasi vertikal dilakukan terhadap kriteria penerimaan penurunan puncak bendungan pasca konstruksi yaitu antara 0,05% - 0,55% terhadap tinggi bendungan. Sedangkan Kriteria penerimaan penurunan lereng hilir bendungan pasca konstruksi yaitu 0,05% - 0,35% terhadap tinggi dari patok geser hingga fondasi dan pada hulu bendungan pasca konstruksi yaitu 0,1% - 0,6% terhadap tinggi dari patok geser hingga fondasi. Selain itu, analisa deformasi vertikal bendungan pasca konstruksi dilakukan dari penelitian lain sesuai dengan Tabel 4.

**Tabel 5.** Nilai *settlement* pada hilir Bendungan Tukul pasca konstruksi periode 3 tahun (% terhadap tinggi dari patok geser hingga fondasi)

Kode Patok Geser	Z (Settlement) % height from SMP to Foundation
Ghi.A.4.1	0,24
Ghi.A.5.2	0,29
Ghi.A.6.3	0,33
Ghi.A.7.4	0,33
Ghi.A.8.5	0,27
Ghi.B.3.6	0,48
Ghi.B.4.7	0,40
Ghi.B.5.8	0,51
Ghi.B.6.9	0,57
Ghi.B.7.10	0,45
Ghi.B.8.11	0,27
Ghi.B.9.12	0,55

**Tabel 6.** Nilai *settlement* pada puncak Bendungan Tukul pasca konstruksi periode 3 tahun (% terhadap tinggi bendungan)

Kode Patok Geser	Z (Settlement) % of dam height
Ghi.C.1.13	0,08
Ghi.C.2.14	0,24
Ghi.C.3.15	0,32
Ghi.C.4.16	0,42
Ghi.C.5.17	0,50
Ghi.C.6.18	0,67
Ghi.C.7.19	0,57
Ghi.C.8.20	0,45
Ghi.C.9.21	0,33
Ghu.D.1.22	0,21
Ghu.D.2.23	0,41
Ghu.D.3.24	0,30
Ghu.D.4.25	0,44
Ghu.D.5.26	0,48
Ghu.D.6.27	0,51
Ghu.D.7.28	0,51
Ghu.D.8.29	0,43
Ghu.D.9.30	0,30

**Tabel 7.** Nilai *settlement* pada hulu Bendungan Tukul pasca konstruksi periode 3 tahun (% terhadap tinggi dari patok geser hingga fondasi)

Kode Patok Geser	Z (Settlement) % height from SMP to Foundation
Ghu.E.2.31	0,72
Ghu.E.3.32	0,48
Ghu.E.4.33	0,47
Ghu.E.5.34	0,50
Ghu.E.6.35	0,62
Ghu.E.7.36	0,67
Ghu.E.8.37	0,60
Ghu.E.9.38	0,40

Hasil analisis lereng hilir Bendungan Tukul pada Tabel 5 menurut kriteria ICOLD dengan nilai batas yang diizinkan 0,1% - 0,2% berperilaku abnormal. Kriteria menurut Hunter and Fell, perilaku abnormal ditunjukkan pada titik Ghi.B.3.6, Ghi.B.4.7, Ghi.B.5.8, Ghi.B.6.9, Ghi.B.7.10, dan Ghi.B.9.12 yang melebihi batas kriteria 0,05% - 0,35%.

Hasil analisis puncak tubuh Bendungan Tukul pada Tabel 6 menurut kriteria ICOLD dan Sowers dalam batas normal, akan tetapi terdapat

beberapa perilaku abnormal menurut kriteria Sherard dengan nilai batas yang diizinkan 0,1% - 0,4% yaitu 11 titik patok geser pada puncak Bendungan Tukul. Sedangkan berdasarkan kriteria Hunter and Fell dengan nilai batas 0,05% - 0,55% yang dianalisis terdapat perilaku abnormal 2 (dua) titik yaitu Ghi.C.6.18 dan Ghi.C.7.19 pada periode 3 (tahun) pasca konstruksi.

Hasil analisis deformasi vertikal lereng hulu Bendungan Tukul pasca konstruksi pada Tabel 7 berdasarkan kriteria Hunter and Fell (2003) didapatkan perilaku deformasi yang abnormal pada instrumentasi Ghu.E.2.31, Ghu.E.6.35, Ghu.E.7.36, dan Ghu.E.8.37, dengan nilai lebih besar dari kriteria penerimaan yaitu 0,1 - 0,6%. Sedangkan hasil analisis lereng hulu Bendungan Tukul pasca konstruksi menurut kriteria ICOLD dengan nilai batas yang diizinkan 0,1% - 0,2% berperilaku abnormal.

Namun, dalam hal kriteria yang abnormal terjadi pada beberapa instrumentasi patok geser bukan berarti bendungan dianggap tidak aman. Menurut (Pratomo et al., 2021) hal tersebut disebabkan oleh besaran persentase *settlement* dalam pedoman yang diatur lebih rendah jika dibandingkan dengan persentase *settlement* dalam kriteria penerimaan yang lain. Ketidaksesuaian data (kondisi abnormal) terkadang dipengaruhi oleh faktor sensitivitas sensor atau keakuratan pembacaan instrumen, bukan selalu merupakan indikasi bahaya langsung (Hutami et al., 2023). Hasil tersebut akan menjadi perhatian dan rekomendasi untuk analisis yang lebih lanjut.

Analisis selanjutnya mengenai *Settlement Index* (SI), batasan dari penilaian SI adalah lebih besar 0,02 dapat mengindikasikan perilaku abnormal. Berdasarkan hasil analisis SI pada **Error! Reference source not found.**, keseluruhan instrumentasi patok geser pada Bendungan Tukul memenuhi nilai di bawah 0,02 dengan nilai 0,001 - 0,015, sehingga penurunan yang terjadi pada Bendungan Tukul pasca konstruksi dalam periode 3 (tiga) tahun dalam kategori normal.

Hasil analisis menunjukkan bahwa titik SMP Ghi.C.6.18 mencatat penurunan maksimum sebesar 0,471 m. Secara deskriptif, nilai ini memang melebihi kriteria Hunter dan Fell (0,05%–0,55%). Namun, analisis SI pada titik tersebut menunjukkan nilai 0,0104, yang

jauh di bawah ambang batas kritis 0,02. Hal ini menunjukkan bahwa laju penurunan tidak bersifat progresif atau mengkhawatirkan. Perbedaan hasil antar kriteria terjadi karena perbedaan sensitivitas ambang batas dalam pedoman masing-masing. Penurunan di Bendungan Tukul lebih diidentifikasi sebagai respons pasca-pengisian reservoir yang masih dalam batas toleransi geoteknik.

**Tabel 8.** Nilai *Settlement Index* (SI) pada Bendungan Tukul pasca konstruksi periode 3 tahun

Kode Patok Geser	<i>Settlement Index</i> SI ≤ 0,02
Ghi.A.4.1	0,0036
Ghi.A.5.2	0,0043
Ghi.A.6.3	0,0051
Ghi.A.7.4	0,0049
Ghi.A.8.5	0,0038
Ghi.B.3.6	0,0070
Ghi.B.4.7	0,0060
Ghi.B.5.8	0,0076
Ghi.B.6.9	0,0086
Ghi.B.7.10	0,0072
Ghi.B.8.11	0,0042
Ghi.B.9.12	0,0081
Ghi.C.1.13	0,0012
Ghi.C.2.14	0,0037
Ghi.C.3.15	0,0050
Ghi.C.4.16	0,0066
Ghi.C.5.17	0,0080
Ghi.C.6.18	0,0104
Ghi.C.7.19	0,0090
Ghi.C.8.20	0,0072
Ghi.C.9.21	0,0052
Ghu.D.1.22	0,0028
Ghu.D.2.23	0,0061
Ghu.D.3.24	0,0049
Ghu.D.4.25	0,0071
Ghu.D.5.26	0,0077
Ghu.D.6.27	0,0082
Ghu.D.7.28	0,0082
Ghu.D.8.29	0,0069
Ghu.D.9.30	0,0049
Ghu.E.2.31	0,0109
Ghu.E.3.32	0,0076
Ghu.E.4.33	0,0073
Ghu.E.5.34	0,0079
Ghu.E.6.35	0,0099
Ghu.E.7.36	0,0106

Kode Patok Geser	Settlement Index $SI \leq 0,02$
Ghu.E.8.37	0,0094
Ghu.E.9.38	0,0063

Evaluasi deformasi vertikal pada Bendungan Tukul dilakukan dengan mengacu pada berbagai kriteria empiris yang memiliki dasar filosofis dan teknis yang berbeda. Kriteria Hunter & Fell (2003) serta Sherard umumnya berfokus pada limitasi deformasi absolut sebagai fungsi dari tinggi bendungan, yang bertujuan untuk mendeteksi retakan tarik (*tensile cracking*) akibat penurunan diferensial. Di sisi lain, kriteria ICOLD (1993) lebih menekankan pada respons material urugan batu (*rockfill*) terhadap beban operasional, sedangkan Sowers memberikan batasan empiris berdasarkan statistik kinerja bendungan global.

Perbedaan hasil klasifikasi 'abnormal' antar kriteria tersebut muncul karena variasi dalam ambang batas sensitivitas yang ditetapkan. Misalnya, kriteria yang lebih konservatif cenderung mengklasifikasikan deformasi kecil sebagai 'abnormal' untuk memastikan keselamatan struktural pada tahap dini. Namun, nilai-nilai tersebut tidak selalu mencerminkan kegagalan mekanis, melainkan sering kali merupakan manifestasi dari konsolidasi creep jangka panjang.

Dalam konteks Bendungan Tukul, penelitian ini memprioritaskan penggunaan Settlement Index (SI) sebagai instrumen evaluasi utama, didukung oleh kriteria Hunter & Fell sebagai referensi komparatif. Justifikasi pemilihan SI didasarkan pada kemampuannya untuk menormalisasi laju penurunan terhadap variabel waktu (*logarithmic time-dependency*), sehingga dapat membedakan secara kuantitatif antara deformasi yang bersifat progresif dengan deformasi stabil yang menuju ekuilibrium geoteknik. Pendekatan ini lebih relevan dalam memberikan penilaian kondisi bendungan yang holistik, karena menempatkan besaran deformasi ke dalam konteks laju waktu operasional, bukan sekadar membandingkan nilai numerik statis terhadap batas ambang yang bersifat umum.

#### 4. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan hasil analisis deformasi vertikal Bendungan Tukul pasca konstruksi dalam periode 3 (tiga) tahun berdasarkan kriteria penerimaan Hunter and Fell, ICOLD, Sowers,

dan Sherard bahwa struktur bendungan saat ini berada dalam kondisi stabil. Meskipun terdapat beberapa titik monitoring yang menunjukkan deviasi numerik di atas kriteria batas tertentu, analisis Settlement Index (SI) secara konsisten menghasilkan nilai di bawah 0,02 di seluruh titik pantau. Hal ini membuktikan bahwa fenomena penurunan yang teramati bukan merupakan deformasi abnormal atau indikasi kegagalan struktural, melainkan bagian dari proses konsolidasi sekunder (*secondary creep*) yang umum terjadi pada fase pasca-konstruksi bendungan urugan.

Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya penggunaan analisis SI sebagai metodologi yang lebih dinamis dan objektif dibandingkan sekadar perbandingan nilai absolut terhadap kriteria empiris statis. Integrasi parameter waktu dalam SI terbukti krusial dalam membedakan antara perilaku material yang aman dengan potensi anomali struktural. Sebagai implikasi praktis, pengelola bendungan direkomendasikan untuk tetap melakukan pemantauan rutin pada titik-titik dengan deviasi tinggi, terutama pasca-peristiwa curah hujan ekstrem atau fluktuasi muka air reservoir yang signifikan.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- De Lacy, M. C., Ramos, M. I., Gil, A. J., Franco, Ó. D., Herrera, A. M., Avilés, M., Domínguez, A., & Chica, J. C. (2017). Monitoring of vertical deformations by means of high-precision geodetic levelling. Test case: The Arenoso dam (South of Spain). *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 11, Hal. 31–41. <https://doi.org/10.1515/jag-2016-0034>
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). *Deformation behaviour of embankment dams*.
- Hutami, R. S., Nugroho, H., & Edhisono, S. (2023). Evaluasi perilaku deformasi vertikal Bendungan Sermo berdasarkan data instrumentasi geoteknik. *Jurnal Rab Construction Research*, Vol. 8, Hal. xx–xx. <http://jurnal.uni-vrab.ac.id/index.php/racic>
- ICOLD. (1993). *Rock materials for rockfill dams: Review and recommendations (Bulletin 92)*.
- Istiaji, M. S., Sriyana, S., & Sadono, K. W. (2021). Behavioral study of Bajulmati dam deformation through dam history database-based assessment. *TEKNIK*, Vol. 42, Hal. 186–198. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i2.39629>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Peraturan Menteri Pekerjaan*

*Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No. 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan.*

- Kurniawan, F. A., Wardani, S. P. R., & Sadono, K. W. (2021). Perilaku deformasi Bendungan Jati-barang. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 11, Hal. 531. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.592>
- Pratama, S. E., & Sukamta, S. (2024). Evaluasi deformasi vertikal timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi berdasarkan data pembacaan multilayer settlement menggunakan metode prediksi deformasi saat konstruksi. *TEKNIK*, Vol. 45, Hal. 30–40. <https://doi.org/10.14710/teknik.v45i1.60088>
- Pratomo, D. A. P., Suharyanto, & Atmojo, P. S. (2021). Deformasi Bendungan Cirata berdasarkan analisis data instrumen patok geser. *Jurnal Teknik*, Vol. 19, Hal. 96–106. <https://doi.org/10.37031/jt.v19i2.166>
- Rizki Purwanto, D., Sabri, L. M., & Awaluddin, M. (2021). Pemantauan deformasi Bendungan Jati-barang menggunakan survei GNSS tahun 2017–2020. *Jurnal Geodesi UNDIP*, Vol. 10.
- Scaioni, M., Marsella, M., Crosetto, M., Tornatore, V., & Wang, J. (2018). Geodetic and remote-sensing sensors for dam deformation monitoring. *Sensors*, Vol. 18. <https://doi.org/10.3390/s18113682>
- Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F., & Clevenger, W. A. (1963). *Earth and earth-rock dams: Engineering problems of design and construction*. John Wiley and Sons, Inc.
- Sowers, G. F., Davie, J. R., Soenarno, I., & Mansoer, M. N. (1965). *Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills*. University of Toronto, Montreal.
- Tedd, P., Charles, C. J. A., Holton, I. R., & Robertshaw, A. C. (1997). The effect of reservoir drawdown and long-term consolidation on the deformation of old embankment dams. *Géotechnique*, Vol. 47, Hal. 33–48. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.1.33>
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2014). *Embankment dams chapter 11: Instrumentation and monitoring phase 4 final*.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2015). *Embankment dams chapter 13: Seismic analysis and design phase 4 final*.