

Evaluasi Deformasi Vertikal Timbunan Tubuh Bendungan Sepaku Semoi Berdasarkan Data Pembacaan *Multilayer Settlement* Menggunakan Metode Prediksi Deformasi Saat Konstruksi

Sadewa Eka Pratama*, Sukamta

Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
Jalan Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku Semoi dimulai pada Tahun 2020, tipe bendungannya berupa timbunan tanah homogen dan dilakukan pekerjaan timbunan terhadap tubuh bendungannya. Adanya faktor tahapan pekerjaan timbunan yang pada setiap fase akan menambah ketinggian tubuh bendungan serta faktor kualitas pemadatan timbunan tubuh bendungan dapat menyebabkan risiko kegagalan bendungan semakin meningkat. Oleh sebab itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi perilaku deformasi vertikal dari timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi agar keamanan tubuh bendungan terjamin pada saat pelaksanaan konstruksi. Identifikasi perilaku deformasi vertikal pada penelitian ini dilakukan dengan cara mengevaluasi data pembacaan instrumentasi multilayer settlement terhadap kriteria penerimaan menggunakan metode prediksi deformasi saat konstruksi yang terdiri dari tiga metode yaitu total settlement, korelasi vertical strain vs fill height above, dan settlement index. Hasil evaluasi metode total settlement pada seluruh multilayer settlement menghasilkan perilaku normal, begitu juga dengan evaluasi metode korelasi vertical strain vs fill height above menghasilkan perilaku normal, serta evaluasi metode settlement index menghasilkan perilaku normal. Dari ketiga hasil evaluasi metode prediksi deformasi saat konstruksi tersebut dapat disimpulkan bahwa secara garis besar, perilaku deformasi vertikal saat pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku Semoi mempunyai perilaku normal dan tidak melampaui batas dari kriteria yang diizinkan.

Kata kunci: deformasi vertikal; bendungan; pelaksanaan konstruksi; multilayer settlement; timbunan

Abstract

[Title: Vertical Deformation Evaluation of Sepaku Semoi Main Dam Embankment Based on Multilayer Settlement Reading Data Using Deformation Prediction During Construction Method] Sepaku Semoi Dam construction began in 2020, the type of dam is homogeneous earthfill embankments. During construction, the existence of factors in embankment work staging which in every phase will increase the main dam height and the compaction quality factor of main dam can lead the dam failure risk to increase. Therefore, the purpose of this study was to identify the vertical deformation behaviour of Sepaku Semoi main dam embankment, so that the main dam safety is assured during construction. Identification of vertical deformation behaviour in this study was carried out by evaluating the reading data of multilayer settlement against acceptance criteria using deformation prediction during construction method, such as total settlement, vertical strain vs fill height above, and settlement index. The results of the total settlement method evaluation on all multilayer settlements generated into normal behaviour, as well as the evaluation of vertical strain vs fill height above method produced normal behaviour, and the settlement index method evaluation generated in normal behaviour also. From the three evaluation results, in general it can be concluded that vertical deformation behaviour during construction of Sepaku Semoi Dam has normal behaviour and does not exceed the permitted criteria boundaries.

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: sadewaekap@gmail.com

Keywords: vertical deformation; dam; during construction; multilayer settlement; embankment

1. Pendahuluan

Perilaku deformasi yang abnormal merupakan salah satu penyebab terjadinya kegagalan bendungan, khususnya deformasi dengan jenis vertikal. Semua bendungan akan mengalami deformasi secara vertikal akibat adanya pembebanan, namun jika deformasi vertikal melebihi batas kriteria akan menimbulkan bahaya seperti retakan, rembesan berlebih, rekahan hidrolis, berkurangnya tinggi jagaan yang menyebabkan *overtopping* dan lalu bendungan runtuh (Rizal, 2004). Seperti diketahui, deformasi vertikal dominan terjadi pada bendungan yang sedang dalam tahap pelaksanaan konstruksi (Kurniawan et al., 2021), dibandingkan dengan bendungan dalam tahap *impounding* atau operasi.

Adanya faktor tahapan pekerjaan timbunan yang pada setiap fase akan menambah ketinggian tubuh bendungan serta faktor kualitas pemadatan timbunan tubuh bendungan, yang jika kedua faktor tersebut tidak memenuhi standar akan menyebabkan risiko kegagalan bendungan meningkat. Menurut (Zaky et al., 2023), penimbunan tubuh bendungan dalam masa konstruksi juga dikhawatirkan memicu anomali berupa deformasi yang mengakibatkan kegagalan konstruksi. Oleh sebab itu, evaluasi perilaku deformasi vertikal menjadi penting dilakukan pada bendungan tahap konstruksi agar pekerjaan timbunan terjamin keamanannya. Adapun instrumentasi pengukur deformasi vertikal yang umumnya digunakan pada bendungan, yaitu *multilayer settlement* dan patok geser (Pusdiklat SDAK, 2017). Menurut Soetjiono (2010), keterpengaruhannya deformasi terhadap tinggi jagaan akan dapat diketahui jika sistem instrumentasi yang dipasang sudah tepat.

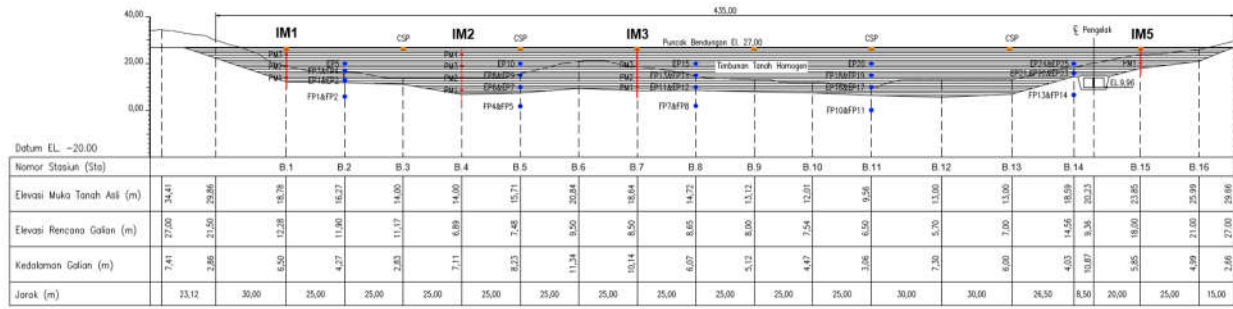
Salah satu bendungan yang dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dan saat penelitian ini dilakukan masih dalam pelaksanaan konstruksi adalah Bendungan Sepaku Semoi yang terletak di Kecamatan Sepaku, Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur. Pembangunan bendungan dimulai pada Tahun 2020, tipe bendungan berupa timbunan tanah homogen yang menurut definisi

Badan Standardisasi Nasional (2015) adalah bendungan yang bahan pembentuk tubuh bendungannya terdiri atas tanah yang hampir sejenis dengan klasifikasi hampir homogen dan dipadatkan secara mekanik menggunakan *vibrator roller* atau alat lainnya pada setiap hamparan dengan tebal tertentu. Bendungan Sepaku Semoi memiliki tinggi bendungan sebesar 25 m yang ditinjau dari dasar fondasi. Puncak bendungan berada pada elevasi +27 mdpl dengan panjang puncak 450 m dan lebar puncak bendungan sebesar 6 m. Lereng hulu tubuh bendungan mempunyai kemiringan 1V:3,5H, sedangkan untuk lereng hilir memiliki kemiringan 1V:3H.

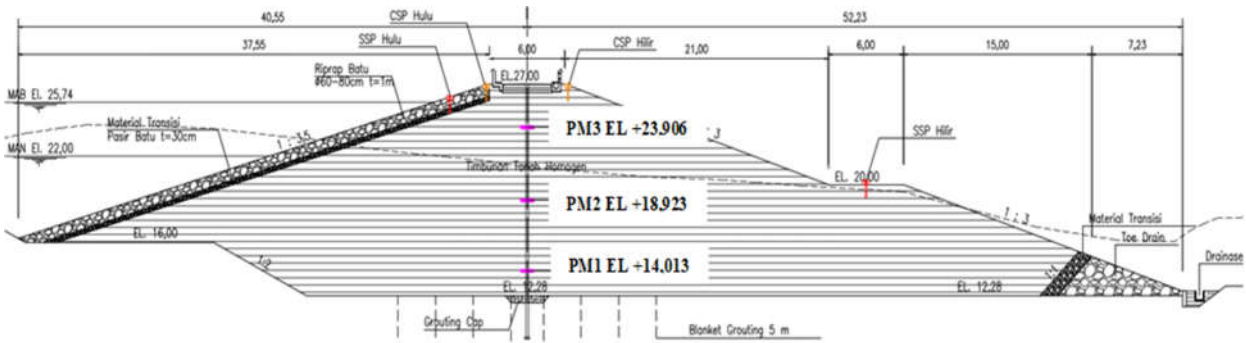
Evaluasi deformasi vertikal dengan tinjauan saat pelaksanaan konstruksi pada bendungan, sebelumnya pernah dilakukan dengan menggunakan 2 (dua) metode (Hutami et al., 2023; Pratomo et al., 2021). Evaluasi deformasi vertikal dengan tinjauan saat pelaksanaan konstruksi pada bendungan menggunakan 2 (dua) metode mempunyai kelebihan yaitu tingkat kompleksitas analisis yang dilakukan menjadi lebih sederhana dibandingkan saat menggunakan lebih dari 2 (dua) metode, sedangkan untuk kelemahannya adalah parameter analisis yang dihasilkan dalam evaluasinya menjadi terbatas atau tidak banyak jumlahnya dibandingkan saat menggunakan lebih dari 2 (dua) metode. Beberapa literatur terdahulu lainnya dalam mengevaluasi deformasi vertikal dengan tinjauan saat pelaksanaan konstruksi pada bendungan pernah juga menggunakan 1 (satu) metode (Istiaji et al., 2021; Aprianto et al., 2015; Kurniawan et al., 2021; Michalis et al., 2016; Pytharouli & Stiros, 2008). Evaluasi deformasi vertikal dengan tinjauan saat pelaksanaan konstruksi pada bendungan menggunakan 1 (satu) metode mempunyai kelebihan yaitu tingkat kompleksitas analisis yang dilakukan menjadi lebih sederhana dibandingkan saat menggunakan 2 (dua) metode, sedangkan untuk kelemahannya adalah parameter analisis yang dihasilkan dalam evaluasinya menjadi terbatas atau tidak banyak jumlahnya dibandingkan saat menggunakan 2 (dua) metode.

Tabel 1. Ketersediaan data *multilayer settlement*

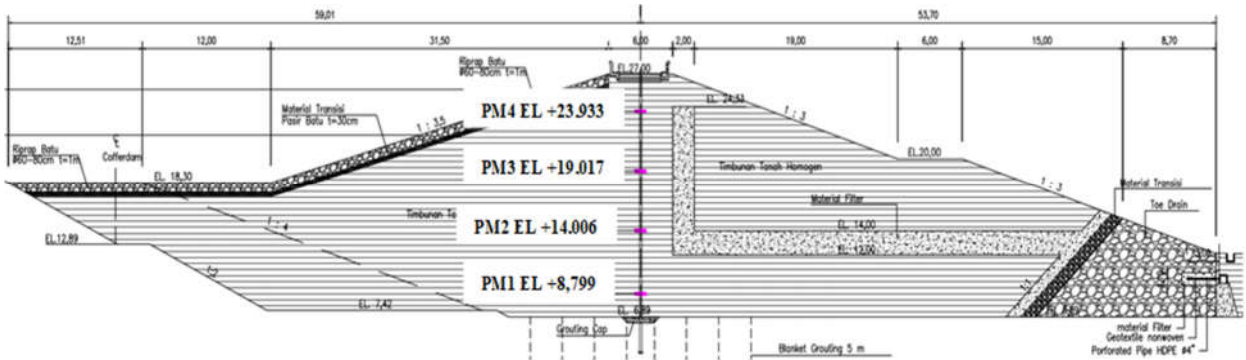
<i>Multilayer Settlement</i>	Lokasi	Pelat Magnet	Interval Waktu Data Pembacaan
IM 1	Sta. B.1	PM1	2 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM2	27 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM3	14 November 2022 s/d 15 Juli 2023
IM 2	Sta. B.4	PM1	15 Mei 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM2	24 Juli 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM3	2 Oktober 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM4	24 November 2022 s/d 15 Juli 2023
IM 3	Sta. B.7	PM1	28 Juni 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM2	9 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023
		PM3	19 Februari 2023 s/d 15 Juli 2023
IM 5	Sta. B.15	PM1	16 Desember 2022 s/d 15 Juli 2023



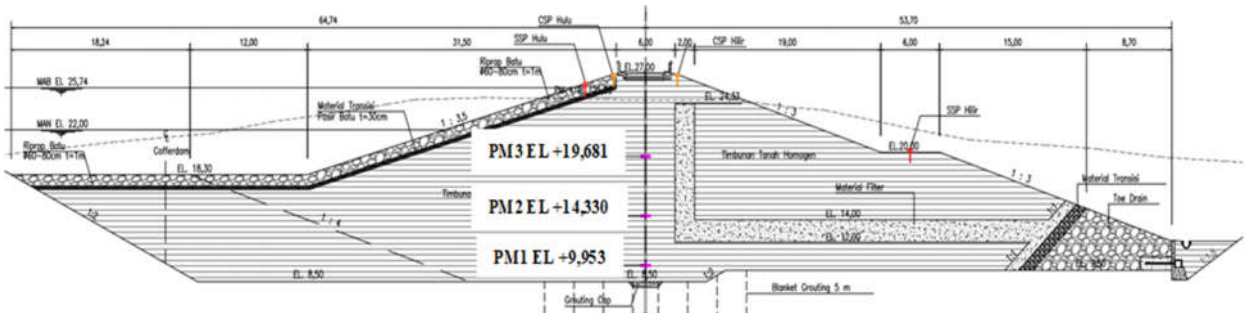
Gambar 1. Potongan memanjang tata letak multilayer settlement di Bendungan Sepaku Semoi



Gambar 2. Potongan melintang multilayer settlement IM 1 (Sta. B.1) di Bendungan Sepaku Semoi



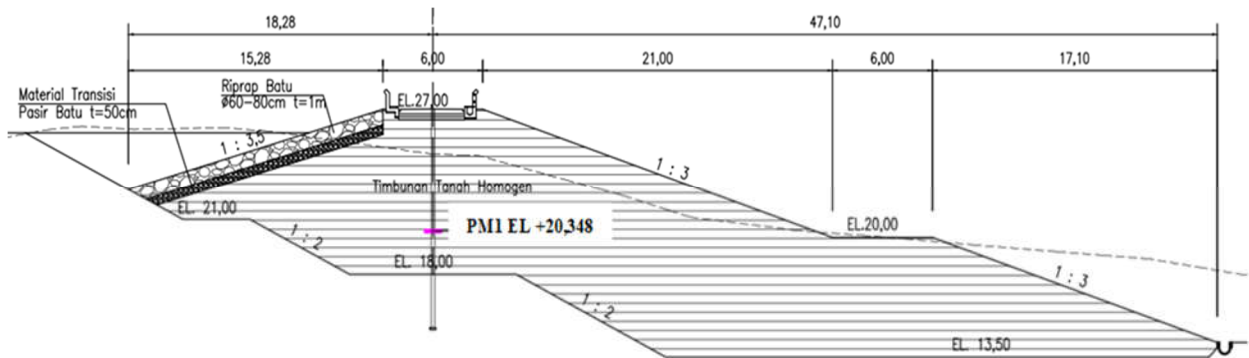
Gambar 3. Potongan melintang multilayer settlement IM 2 (Sta. B.4) di Bendungan Sepaku Semoi



Gambar 4. Potongan melintang multilayer settlement IM 3 (Sta. B.7) di Bendungan Sepaku Semoi

Namun, dari kajian literatur-literatur terdahulu yang telah disebutkan di atas, belum pernah dilakukan evaluasi deformasi vertikal menggunakan 3 (tiga) metode

sekaligus serta semua bendungan yang digunakan sebagai lokasi penelitian merupakan bendungan yang telah beroperasi, untuk diketahui evaluasi deformasi vertikal



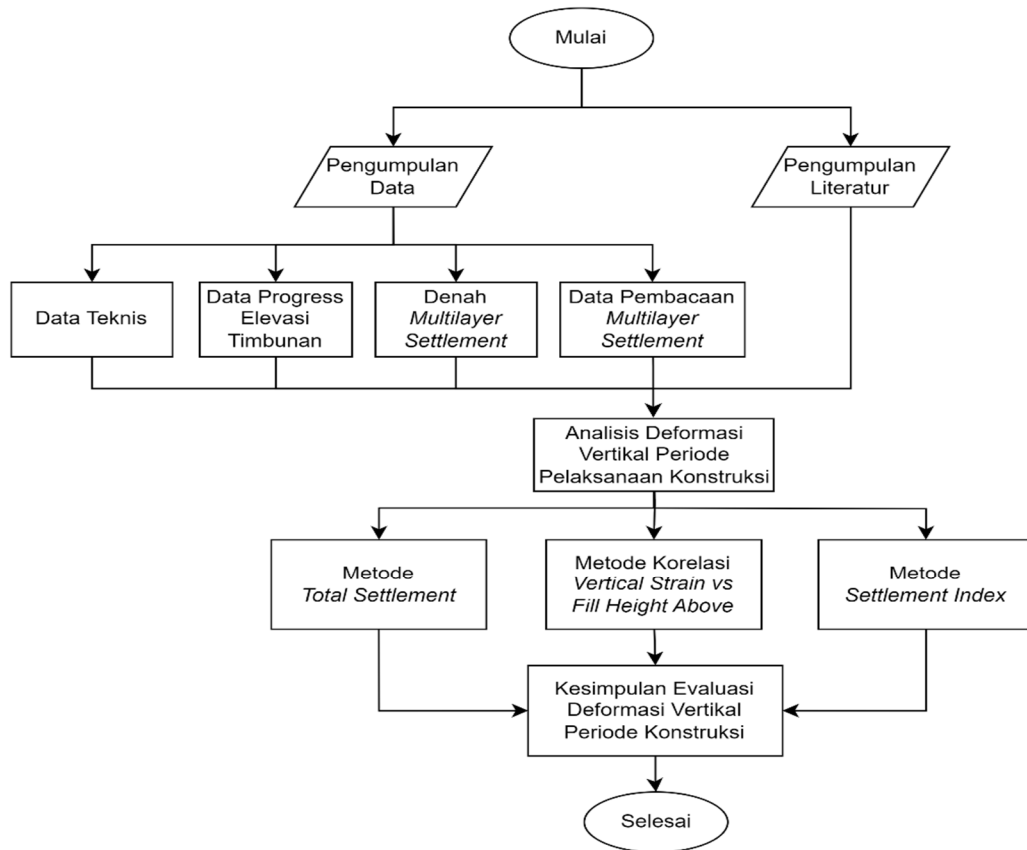
Gambar 5. Potongan melintang *multilayer settlement* IM 5 (Sta. B.15) di Bendungan Sepaku Semoi

bendungan dengan tinjauan saat pelaksanaan konstruksi menggunakan 3 (tiga) metode mempunyai kelebihan yaitu parameter analisis yang dihasilkan dalam evaluasinya menjadi lebih berkualitas dan berkuantitas dibandingkan saat menggunakan 2 (dua) maupun 1 (satu) metode. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi perilaku deformasi vertikal Bendungan Sepaku Semoi dengan mengevaluasi data hasil pembacaan *multilayer settlement* selama pelaksanaan konstruksi terhadap kriteria penerimaan menggunakan 3

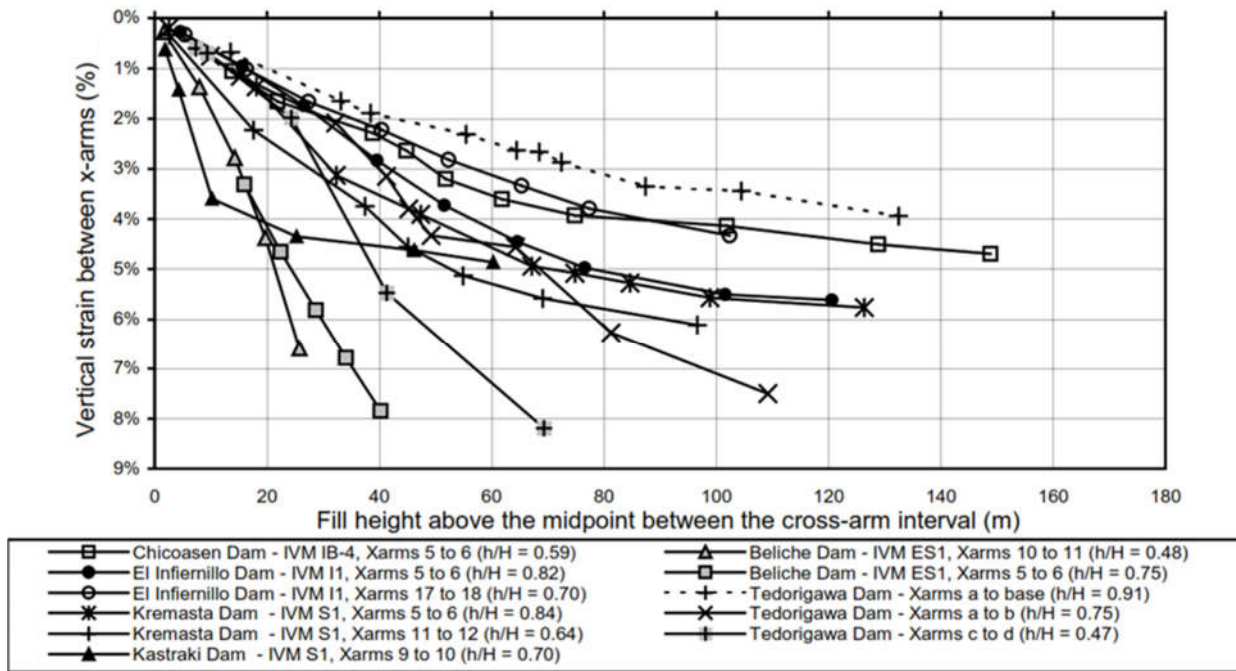
(tiga) metode prediksi deformasi saat konstruksi, yaitu *total settlement*, *vertical strain vs fill height above*, dan *settlement index* (Hunter & Fell, 2003).

2. Bahan dan Metode

Data-data yang diperlukan dalam mengidentifikasi hasil evaluasi perilaku deformasi vertikal saat pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku



Gambar 6. Bagan alir penelitian



Gambar 7. Grafik kriteria penerimaan vertical strain vs fill height above (Hunter & Fell, 2003)

Semoi yaitu pertama, data pembacaan instrumentasi *multilayer settlement* yang rekapitulasi ketersediaan datanya secara jelas dapat dilihat pada Tabel 1. Kemudian data lainnya yang diperlukan adalah data teknis bendungan seperti tipe bendungan, tinggi bendungan dari dasar fondasi, dan elevasi puncak bendungan, selanjutnya data progres elevasi timbunan tubuh bendungan, serta gambar penampang memanjang dan melintang instrumentasi *multilayer settlement* yang dapat dilihat pada Gambar 1 s/d Gambar 5.

Sesuai Tabel 1 dapat dijelaskan secara rinci bahwa interval waktu data pembacaan *multilayer settlement* di Bendungan Sepaku Semoi bervariasi, dimulai dari instrumen IM 1 di Sta. B.1 untuk pelat magnet PM1 mulai Tanggal 2 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM2 mulai Tanggal 27 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM3 mulai Tanggal 14 November 2022 s/d 15 Juli 2023, kemudian instrumen IM 2 di Sta. B.4 untuk pelat magnet PM1 mulai Tanggal 15 Mei 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM2 mulai Tanggal 24 Juli 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM3 mulai Tanggal 2 Oktober 2022 s/d 15 Juli 2023, dan pelat magnet PM4 mulai Tanggal 24 November 2022 s/d 15 Juli 2023, selanjutnya instrumen IM 3 di Sta. B.7 untuk pelat magnet PM1 mulai Tanggal 28 Juni 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM2 mulai Tanggal 9 Agustus 2022 s/d 15 Juli 2023, pelat magnet PM3 mulai Tanggal 19 Februari 2023 s/d 15 Juli 2023, sedangkan instrumen IM 5 di Sta. B.15 untuk pelat magnet PM1 mulai Tanggal 16 Desember 2022 s/d 15 Juli 2023.

Sebagai catatan, untuk instrumen IM 4 di Sta. B.11 tidak dapat dilakukan evaluasi karena pipa *multilayer settlement* mengalami kebengkokan yang disebabkan insiden tertabraknya pipa oleh alat berat, sehingga banyak terjadi kekosongan data pembacaan. Status pekerjaan di Bendungan Sepaku Semoi saat dilakukan penelitian ini yaitu progres timbunan tubuh bendungan persentasenya sebesar 81,32% dan telah mencapai elevasi +23,545 mdpl. Menurut Chugh (2011), perwujudan fisik yang paling sederhana dari deformasi vertikal pada bendungan urukan adalah terbentuknya geometri bendungan menjadi agak tidak teratur, yang notabene secara visual tidak terlihat oleh mata yang kurang terlatih. Dari kumpulan data-data yang telah disebutkan sebelumnya akan digunakan untuk mengidentifikasi perilaku deformasi vertikal pada konstruksi Bendungan Sepaku Semoi dengan tahapan evaluasinya sesuai bagan alir penelitian pada Gambar 6, dimana dalam penelitian ini menggunakan 3 (tiga) metode prediksi deformasi selama pelaksanaan konstruksi yang diteliti oleh Hunter & Fell (2003).

2.1. Deformasi vertikal metode total settlement

Metode pertama yang digunakan dalam identifikasi perilaku deformasi vertikal pada bendungan saat tahap pelaksanaan konstruksi adalah *total settlement*. Metode tersebut menyajikan perhitungan penurunan total dari bagian tengah timbunan tubuh bendungan pada saat pelaksanaan konstruksi. Korelasi antara penurunan total atau *total settlement* timbunan tubuh bendungan terhadap tinggi bendungan dinyatakan pada Persamaan 1,

sedangkan korelasi antara persentase *total settlement* timbunan tubuh bendungan terhadap tinggi bendungan dinyatakan dalam Persamaan 2 (Hunter & Fell, 2003). Dengan H adalah tinggi timbunan tubuh bendungan aktual saat pelaksanaan konstruksi yang digunakan sebagai titik tinjau.

$$Total\ Settlement\ (mm) = H(0,152H + 12,60) \quad (1)$$

$$Total\ Settlement\ (\%) = 0,179H^{0,6} \quad (2)$$

2.2. Deformasi vertikal metode *vertical strain vs fill height above*

Regangan yang terjadi di dalam tanah disebabkan oleh berubahnya susunan tanah dan berkurangnya rongga pori di dalam tanah tersebut (Aprianto et al., 2015), hal itu berlaku juga ke dalam tanah material timbunan di suatu tubuh bendungan. Perhitungan persentase regangan vertikal (*vertical strain*) pada timbunan tubuh bendungan diperoleh dari menghitung selisih jarak antara pelat magnet saat *initial reading* dengan pelat magnet pada saat observasi/pembacaan, yang kemudian dibagi dengan jarak antar pelat magnet saat *initial reading* di dalam instrumen *multilayer settlement*. Adapun untuk *fill height above* dapat diartikan bahwa tinggi yang ditinjau pada instrumen *multilayer settlement* dihitung dari tinggi di atas timbunan aktual tubuh bendungan sampai dengan titik tengah yang berada di antara 2 (dua) pelat magnet observasi (Hunter & Fell, 2003). Korelasi dari persentase regangan vertikal terhadap jarak pelat magnet pada instrumen *multilayer settlement* saat *initial reading* dan observasi untuk tubuh bendungan dinyatakan dengan Persamaan 3 (Hunter & Fell, 2003). Dengan ΔS adalah selisih dari jarak antar pelat magnet saat *initial reading* (S_0) dengan jarak antar pelat magnet saat observasi (S_1).

Tabel 2. Evaluasi deformasi vertikal instrumen IM 1 metode *total settlement*

	Tanggal			
	26 Agustus 2022	15 Juli 2023		
Timbunan Tubuh Bendungan				
(%)	47,826	95,129		
(+mdpl)	19,320	26,283		
(m)	7,040	14,003		
Batas <i>Settlement</i>				
(m)	0,096	0,206		
(%)	0,577	0,872		
Nilai <i>Settlement</i>				
PM1	0,039 m	0,554%	0,092 m	0,657%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
PM2	-		0,121 m	0,864%
Kriteria	-		Normal	Normal
PM3	-		0,079 m	0,564%
Kriteria	-		Normal	Normal

$$Vertical\ Strain\ (\%) = \frac{S}{S_0} \times 100\% \quad (3)$$

Setelah dilakukan perhitungan persentase *vertical strain* beserta *fill height above*, kemudian hasilnya diplot ke dalam grafik kriteria penerimaan yang diteliti oleh Hunter & Fell (2003) bersumber dari hasil penilaiannya pada beberapa studi kasus tentang perilaku deformasi bendungan, termasuk deformasi vertikal dalam kondisi normal atau abnormal. Perilaku ini dinilai berdasarkan kumpulan beberapa data pembacaan instrumentasi pengukur deformasi bendungan, adapun *database* yang digunakan sebanyak 134 buah bendungan urukan di seluruh dunia yang termasuk di antaranya bendungan timbunan tanah homogen. Pada metode ini, perilaku deformasi vertikal didasarkan grafik kriteria penerimaan pada Gambar 7 sehingga didapatkan interpretasi yang dapat digunakan untuk menentukan status deformasi vertikal di Bendungan Sepaku Semoi.

Menurut Hunter & Fell (2003), batas yang ditunjukkan pada grafik kriteria penerimaan merupakan sebuah interpretasi berdasarkan evaluasi data dari batas umum deformasi vertikal yang dikategorikan “normal” pada timbunan tubuh bendungan selama pelaksanaan konstruksi. Namun jika suatu titik atau rangkaian titik berada di luar batas kriteria penerimaan, maka diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengategorikan ke dalam deformasi yang “abnormal” dan inilah tujuan utama ditetapkannya batas indikatif pada grafik kriteria penerimaan. Meskipun demikian, dari semua titik yang mewakili studi kasus yang disajikan ke dalam grafik kriteria penerimaan, beberapa titik yang berada di dalam batas indikatif dapat dianggap sebagai indikasi perilaku deformasi vertikal yang “normal”.

Tabel 3. Evaluasi deformasi vertikal instrumen IM 2 metode *total settlement*

	Tanggal			
	7 Agustus 2022		15 Juli 2023	
Timbunan Tubuh Bendungan				
(%)	48,185		96,435	
(+mdpl)	16,580		26,283	
(m)	9,690		19,393	
Batas <i>Settlement</i>				
(m)	0,136		0,302	
(%)	0,699		1,060	
Nilai <i>Settlement</i>				
PM1	0,062 m	0,640%	0,113 m	0,583%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
PM2	0,067 m	0,691%	0,205 m	1,057%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
PM3	-		0,191 m	0,985%
Kriteria	-		Normal	Normal
PM4	-		0,105 m	0,541%
Kriteria	-		Normal	Normal

Tabel 4. Evaluasi deformasi vertikal instrumen IM 3 metode *total settlement*

	Tanggal			
	1 Oktober 2022		15 Juli 2023	
Timbunan Tubuh Bendungan				
(%)	44,876		81,324	
(+mdpl)	16,802		23,545	
(m)	8,302		15,045	
Batas <i>Settlement</i>				
(m)	0,115		0,224	
(%)	0,637		0,911	
Nilai <i>Settlement</i>				
PM1	0,052 m	0,626%	0,099 m	0,658%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
PM2	0,046 m	0,554%	0,136 m	0,904%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
PM3	-	-	0,120 m	0,798%
Kriteria	-	-	Normal	Normal

2.3. Deformasi vertikal metode *settlement index*

Indeks penurunan atau *settlement index* diusulkan sebagai penilaian terhadap perilaku penurunan atau deformasi vertikal puncak bendungan jangka panjang pada timbunan tubuh bendungan. Deformasi vertikal puncak bendungan dapat dievaluasi dengan *settlement index* (S_i) yang dinyatakan dengan Persamaan 4 (Michalis et al., 2016). Dengan s adalah penurunan puncak bendungan dalam satuan milimeter yang diukur dalam interval waktu t_2 dan t_1 , adapun t_1 merupakan waktu yang ditentukan sebagai waktu pengamatan pertama dari deformasi vertikal dalam satuan tahun yang dihitung dari awal pembacaan pelat magnet pada *multilayer settlement*, untuk t_2 merupakan waktu yang ditentukan sebagai waktu pengamatan kedua dari deformasi vertikal dalam satuan tahun yang dihitung dari awal pembacaan pelat magnet dalam instrumen *multilayer settlement*, sedangkan H adalah tinggi puncak timbunan tubuh bendungan dari elevasi fondasi dalam satuan meter yang ditinjau pada waktu t_2 .

$$S_i = \frac{s}{1000 \times H \times \log(t_2/t_1)} \quad (4)$$

Tabel 6. Perhitungan *vertical strain* dan *fill height above* di *multilayer settlement* IM 1

	PM1 – PM2	PM2 – PM3
h/H	0,68	0,57
S (m)	4,910	4,983
S_i (m)	4,875	5,025
ΔS (m)	0,035	0,042
<i>Vertical Strain</i> (%)	0,713	0,843
Titik Tengah (m)	2,438	2,513
<i>Fill Height Above</i> (m)	8,693	3,744

Tabel 5. Evaluasi deformasi vertikal instrumen IM 5 metode *total settlement*

	Tanggal			
	7 Januari 2023		15 Juli 2023	
Timbunan Tubuh Bendungan				
(%)	35,000		65,167	
(+mdpl)	21,150		23,865	
(m)	3,150		5,865	
Batas <i>Settlement</i>				
(m)	0,041		0,079	
(%)	0,356		0,517	
Nilai <i>Settlement</i>				
PM1	0,006 m	0,190%	0,021 m	0,358%
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal

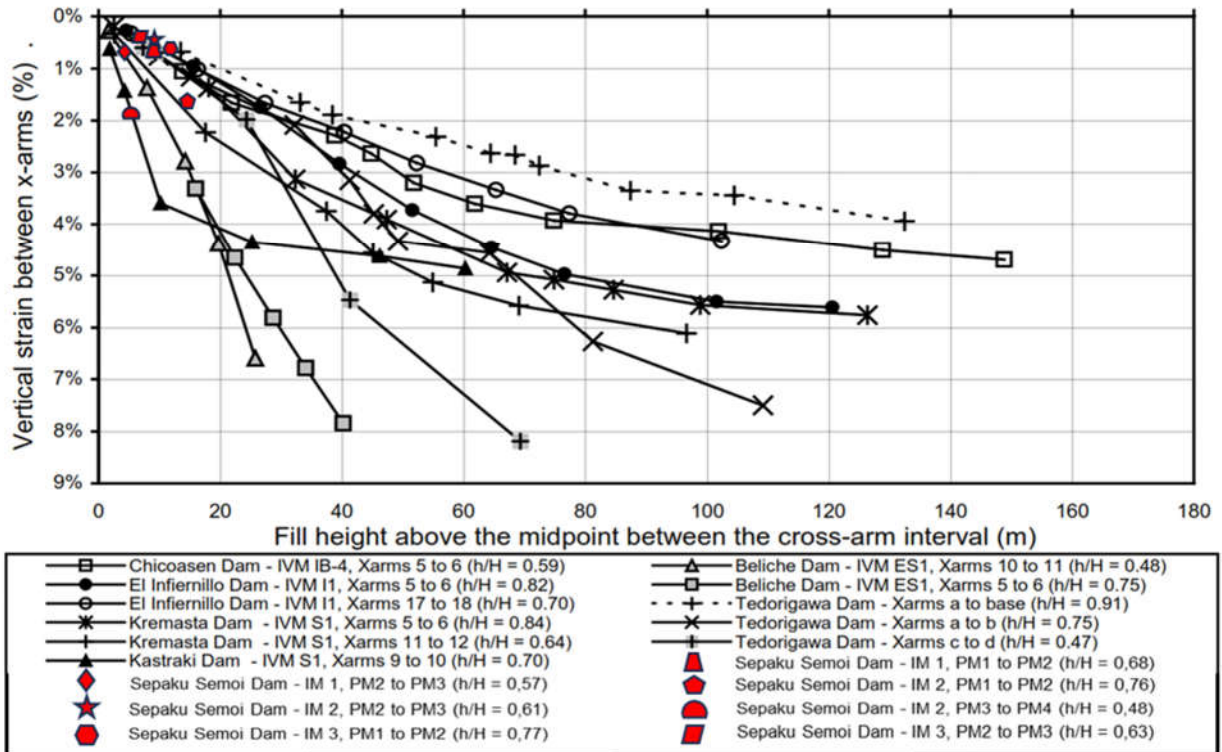
Settlement index serupa dengan koefisien konsolidasi sekunder untuk tanah lempung (Hunter & Fell, 2003). Jika nilai hasil perhitungan *settlement index* lebih besar dari 0,02 dapat mengindikasikan adanya mekanisme lain selain rayapan sebagai penyebab deformasi vertikal di puncak bendungan dan situasi tersebut perlu dilakukan kajian lebih lanjut (Pytharouli & Stiros, 2008).

3. Hasil dan Pembahasan

Sejalan dengan penelitian ini, (Chugh & Davidson, 1988) menyatakan bahwa data pembacaan *multilayer settlement* dan pekerjaan timbunan tubuh bendungan yang menyebabkan deformasi vertikal adalah data spesifik lokasi yang dapat diandalkan dan tersedia untuk evaluasi. Evaluasi deformasi vertikal di Bendungan Sepaku Semoi dilakukan pada instrumen *multilayer settlement* IM 1, IM 2, IM 3, dan IM 5 dengan menggunakan 3 (tiga) metode yaitu *total settlement* yang mempunyai batas nilai *settlement* sesuai dengan tinggi timbunan tubuh bendungan aktual saat konstruksi sebagai titik tinjau, selanjutnya metode korelasi *vertical strain vs fill height above* mempunyai batas nilai *settlement* sesuai dengan tren pada grafik kriteria penerimaan (Gambar 7), serta metode *settlement index* mempunyai batas nilai *settlement* sebesar 0,02 untuk setiap hasil evaluasinya.

Tabel 7. Perhitungan *vertical strain* dan *fill height above* di *multilayer settlement* IM 2

	PM1 – PM2	PM2 – PM3	PM3-PM4
h/H	0,76	0,61	0,48
S (m)	5,207	5,011	4,916
S_i (m)	5,120	5,029	5,011
ΔS (m)	0,087	0,018	0,095
<i>Vertical Strain</i> (%)	1,671	0,359	1,932
Titik Tengah (m)	2,560	2,515	2,506
<i>Fill Height Above</i> (m)	13,814	8,740	3,720



Gambar 8. Hasil plotting korelasi vertical strain vs fill height above di Bendungan Sepaku Semoi

3.1. Evaluasi deformasi vertikal metode total settlement

Deformasi vertikal metode total settlement di timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi pada saat pelaksanaan konstruksi dievaluasi menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2. Hasil dari evaluasi deformasi vertikal metode total settlement di timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi secara jelas dapat dilihat pada Tabel 2 s/d Tabel 5. Di dalam evaluasi deformasi vertikal metode total settlement pada penelitian ini ditetapkan 2 (dua) kali waktu observasi, yang pertama di saat progres timbunan berjalan sekitar setengah dari akhir ketersediaan data pembacaan multilayer settlement, selanjutnya yang kedua di saat akhir ketersediaan data pembacaan instrumentasi yaitu Tanggal 15 Juli 2023 dengan batas nilai settlement yang dianalisis masing-masing Sta. Waktu observasi yang berjumlah lebih dari 1 (satu) ditetapkan agar dapat diketahui perbandingan perilaku deformasi vertikal dari suatu waktu ke waktu lainnya pada saat pelaksanaan konstruksi.

Evaluasi deformasi vertikal yang dilakukan sesuai Tabel 2 s/d Tabel 5 mendapatkan hasil, yaitu semua nilai total settlement dengan variasi persentase tinggi timbunan pada masing-masing pelat magnet di instrumen IM 1, IM 2, IM 3, dan IM 5 termasuk ke dalam kategori normal atau tidak melampaui batas dari total settlement yang diizinkan. Sesuai dengan penelitian Hutami et al.

(2023), nilai deformasi vertikal total settlement selama pekerjaan timbunan berlangsung berada di bawah batas deformasi yang diizinkan.

3.2. Evaluasi deformasi vertikal metode vertical strain vs fill height above

Persamaan 3 digunakan untuk mengevaluasi deformasi vertikal metode korelasi vertical strain vs fill height above pada timbunan tubuh bendungan saat pelaksanaan konstruksi. Komponen penting dalam evaluasi ini adalah persentase vertical strain dan tinggi fill height above. Perhitungan persentase regangan vertikal (vertical strain) saat pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku Semoi pada timbunan tubuh bendungan dilakukan dengan cara menghitung selisih jarak antara 2 (dua) buah pelat magnet saat pembacaan awal instrumen atau initial reading (S₀) dengan jarak antara 2 (dua) buah pelat magnet saat observasi (S₁). Hasil selisih jarak tersebut kemudian dibagi dengan jarak antara 2 (dua) buah pelat magnet saat initial reading (S₀) di dalam instrumen multilayer settlement.

Sedangkan untuk perhitungan tinggi fill height above dapat ditinjau dari kedalaman instrumen multilayer settlement, dimulai dari tinggi di atas timbunan aktual tubuh bendungan pada waktu observasi yang telah ditentukan sampai dengan titik tengah yang berada di antara 2 (dua) buah pelat magnet observasi. Di dalam evaluasi deformasi vertikal metode vertical strain vs fill

Tabel 8. Perhitungan *vertical strain* dan *fill height above* di *multilayer settlement* IM 3

	PM1 – PM2	PM2 – PM3
h/H	0,77	0,63
S _i (m)	4,377	5,351
S _i (m)	4,344	5,370
ΔS (m)	0,033	0,019
<i>Vertical Strain</i> (%)	0,754	0,355
Titik Tengah (m)	2,172	2,685
<i>Fill Height Above</i> (m)	11,518	6,661

height above di Bendungan Sepaku Semoi, instrumen *multilayer settlement* yang dapat dievaluasi hanya IM 1, IM 2, dan IM 3, sedangkan IM 5 tidak dapat dilakukan evaluasi karena jumlah pelat magnet yang dipasang hanya 1 (satu) buah yaitu PM1.

Poin penting lainnya yang perlu diperhatikan adalah nilai h/H pada grafik kriteria penerimaan *vertical strain vs fill height above* dari (Hunter & Fell, 2003), dengan h merupakan tinggi pada timbunan yang dihitung dari elevasi titik tengah di antara 2 (dua) buah pelat magnet instrumen *multilayer settlement* sampai dengan elevasi aktual timbunan sesuai waktu tinjau yang ditentukan, sedangkan H merupakan tinggi pada timbunan yang dihitung dari elevasi aktual timbunan sesuai waktu tinjau sampai dengan elevasi dasar timbunan.

Jika diperhatikan, rentang nilai h/H yang disyaratkan dalam grafik kriteria penerimaan tersebut adalah 0,47 s/d 0,91. Oleh karena itu, agar nilai h/H memenuhi persyaratan rentang nilai, waktu pembacaan data yang dipakai sebagai tinjauan atau observasi (S_i) bukan pada akhir ketersediaan data pembacaan instrumentasi (Tanggal 15 Juli 2023), melainkan sedikit digeser lebih awal yaitu pada Tanggal 2 Juli 2023 dengan nilai h/H masing-masing untuk instrumen IM 1 pada pelat magnet PM1-PM2 sebesar 0,68, pelat magnet PM2-PM3 sebesar 0,57; selanjutnya instrumen IM 2 pada pelat

Tabel 10. Hasil evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* di *multilayer settlement* IM 2

	PM1	PM2	PM3	PM4
Bulan ke-3				
S _i	0,016	0,018	0,017	0,004
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-6				
S _i	0,008	0,012	0,011	0,005
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-9				
S _i	0,006	0,011	0,010	0,006
Kriteria	Normal	Normal	Normal	Normal

Tabel 9. Hasil evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* di *multilayer settlement* IM 1

	PM1	PM2	PM3
Bulan ke-3			
S _i	0,012	0,015	0,004
Kriteria	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-6			
S _i	0,007	0,010	0,006
Kriteria	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-9			
S _i	0,006	0,010	0,006
Kriteria	Normal	Normal	Normal

magnet PM1-PM2 sebesar 0,76, pelat magnet PM2-PM3 sebesar 0,61, pelat magnet PM3-PM4 sebesar 0,48; serta instrumen IM 3 pada pelat magnet PM1-PM2 sebesar 0,77 dan pelat magnet PM2-PM3 sebesar 0,63.

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 6 sampai dengan Tabel 8 yang selanjutnya dievaluasi terhadap perilaku normal deformasi vertikal bendungan pada saat pelaksanaan konstruksi dengan cara membuat plot korelasi antara *vertical strain* terhadap *fill height above* pada grafik kriteria penerimaan *vertical strain vs fill height above* yang sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 7. Hasil *plotting* persentase *vertical strain* dan tinggi *fill height above* dari masing-masing instrumentasi *multilayer settlement* di Bendungan Sepaku Semoi, yaitu IM 1, IM 2, dan IM 3 dapat dilihat pada Gambar 8.

Menurut hasil *plotting* melalui grafik kriteria penerimaan metode korelasi *vertical strain* terhadap *fill height above* pada Gambar 8, menunjukkan bahwa semua titik-titik pelat magnet pada instrumen *multilayer settlement* (IM 1, IM 2, dan IM 3) saat pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku Semoi dapat dikategorikan sebagai perilaku deformasi vertikal yang normal, karena *plotting* nya masuk ke dalam tren grafik dari studi kasus perilaku deformasi vertikal beberapa bendungan yang tersebar di dunia menurut penelitian

Tabel 11. Hasil evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* di *multilayer settlement* IM 3

	PM1	PM2	PM3
Bulan ke-3			
S _i	0,017	0,011	0,008
Kriteria	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-6			
S _i	0,010	0,012	0,009
Kriteria	Normal	Normal	Normal
Bulan ke-9			
S _i	0,009	0,009	-
Kriteria	Normal	Normal	-

Tabel 12. Hasil evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* di *multilayer settlement* IM 5

	PMI
Bulan ke-3	
S ₁	0,004
Kriteria	Normal
Bulan ke-6	
S ₁	0,004
Kriteria	Normal
Bulan ke-9	
S ₁	0,004
Kriteria	Normal

yang dilakukan oleh Hunter & Fell (2003). Sebaliknya menurut Kurniawan et al. (2021), jika deformasi vertikal berada pada luar batas deformasi normal maka pada kedalaman tersebut terjadi indikasi ketidaknormalan deformasi karena adanya efek *arching* serta perubahan susunan dan rongga pada tanah.

3.3. Evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index*

Metode *settlement index* dalam evaluasi deformasi vertikal pada pelaksanaan konstruksi Bendungan Sepaku Semoi dalam pembahasannya menggunakan periode waktu pengamatan pertama (t_1), yaitu bulan awal dimulainya pembacaan data instrumen *multilayer settlement* yang bervariasi di setiap titik instrumennya, menyesuaikan awal pemasangan instrumen. Langkah selanjutnya dilakukan peninjauan atau observasi t_2 setiap periode 3 bulan ke depan sampai dengan bulan ke-9 pada masing-masing *multilayer settlement*, pengecualian berlaku pada instrumen IM 3 dengan pelat magnet PM3 karena pelat magnet baru dilakukan pemasangan dan pembacaan pada tanggal 19 Februari 2023.

Seperti pada metode *total settlement*, waktu observasi yang berjumlah lebih dari 1 (satu) ditetapkan agar dapat diketahui perbandingan dan perkembangan perilaku deformasi vertikal dari suatu waktu ke waktu lainnya pada saat pelaksanaan konstruksi. H yang digunakan dalam perhitungan ini menyesuaikan dengan tinggi puncak timbunan tubuh bendungan dari elevasi dasar timbunan tubuh bendungan, karena tinggi timbunan masing-masing titik atau Sta. berbeda-beda antara di abutmen maupun di tengah tubuh bendungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Evaluasi yang dilakukan untuk mengetahui perilaku deformasi vertikal metode *settlement index* menggunakan Persamaan 4 dan batas nilai *settlement index* yang digunakan adalah 0,02. Hasil dari evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* ditunjukkan pada Tabel 9 sampai dengan Tabel 12. Berdasarkan hasil evaluasi deformasi vertikal metode *settlement index* pada

setiap instrumentasi *multilayer settlement* di atas (IM 1, IM 2, IM 3, IM 5), menunjukkan bahwa seluruh nilai *settlement index* yang dianalisis di timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi menghasilkan nilai kurang dari 0,02 sehingga perilaku deformasi vertikal dengan metode *settlement index* pada timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi saat tahap pelaksanaan konstruksi termasuk ke dalam kategori normal. Menurut (Aprianto et al., 2015) pengamatan deformasi vertikal masih aman karena nilai *settlement index* $\leq 0,02$, namun perlu dilakukan pengukuran instrumen deformasi vertikal yang ada secara kontinu untuk mengetahui tingkat deformasi vertikal yang terjadi pada tubuh bendungan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi perilaku deformasi vertikal metode prediksi deformasi saat pelaksanaan konstruksi dari timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi yang telah dilakukan, dengan mengacu pada data pembacaan *multilayer settlement*, dapat disimpulkan bahwa evaluasi deformasi vertikal metode *total settlement* pada seluruh *multilayer settlement* menghasilkan nilai yang termasuk ke dalam kategori normal atau tidak melampaui batas dari *total settlement* yang diizinkan. Begitu juga dengan evaluasi metode korelasi *vertical strain vs fill height above* menghasilkan *plotting* pada grafik kriteria penerimaan yang menunjukkan bahwa seluruh titik-titik pelat magnet pada *multilayer settlement* IM 1, IM 2, dan IM 3 masuk ke dalam kriteria perilaku deformasi vertikal yang normal, karena *plotting* nya masuk ke dalam tren grafik tersebut. Serta evaluasi metode *settlement index* pada seluruh pelat magnet instrumen *multilayer settlement* menghasilkan nilai kurang dari 0,02 sehingga perilaku deformasi vertikal dengan metode *settlement index* termasuk ke dalam kategori normal. Menurut hasil evaluasi di atas, dengan 3 (tiga) metode prediksi deformasi saat pelaksanaan konstruksi dapat diidentifikasi bahwa secara garis besar, perilaku deformasi vertikal dari timbunan tubuh Bendungan Sepaku Semoi saat pelaksanaan konstruksi mempunyai perilaku normal dan tidak melampaui batas dari kriteria yang diizinkan. Saran yang dapat penulis sampaikan, yaitu hasil evaluasi deformasi vertikal di dalam penelitian ini perlu dievaluasikan terhadap instrumen patok geser jika ke depannya telah dilakukan pembacaan data.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Balai Wilayah Sungai Kalimantan IV yang telah berkenan membantu perihal informasi dan kebutuhan data dalam penelitian ini, serta kepada semua pihak yang membantu dalam pengerjaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Aprianto, D. S., Maulana, R. E., Atmanto, I. D., & Pardoyo, B. (2015). Analisa Instrumentasi Geoteknik Untuk Evaluasi Keamanan Bendungan Urugan Tanah di Lodan Kabupaten Rembang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 4(4), 561–567. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts>
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan. In *SNI 8062:2015*.
- Chugh, A. K. (2011). *Training Aids for Dam Safety Module: Evaluation of Embankment Dam Stability and Deformation*. United States Bureau of Reclamation.
- Chugh, A. K., & Davidson, L. W. (1988). Analysis of Foundation Settlements at Ridgway Dam. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 716–725. <https://doi.org/10.1139/t88-082>
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). *The Deformation Behaviour of Embankment Dams* (Issue February). School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales.
- Hutami, R. S., Nugroho, H., & Edhisono, S. (2023). Evaluasi Perilaku Deformasi Vertikal Bendungan Sermo Berdasarkan Data Instrumentasi Geoteknik. *Jurnal Rab Contruction Research*, 8(1), 1–12.
- Istiaji, M. S., Sriyana, S., & Sadono, K. W. (2021). Behavioral Study of Bajulmati Dam Deformation Through Dam History Database-based Assessment. *Jurnal Teknik Universitas Diponegoro*, 42(2), 186–198. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i2.39629>
- Kurniawan, F. A., Wardani, S. P. ., & Sadono, K. W. (2021). Perilaku Deformasi Bendungan Jatibarang. *Teras Jurnal*, 11(2), 531. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.592>
- Michalis, P., Pytharouli, S. I., & Raftopoulos, S. (2016). Long-term Deformation Patterns of Earth-fill Dams based on Geodetic Monitoring Data: the Pournari I Dam Case Study. *Proc. of 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, April, 1–5.
- Pratomo, D. A. P., Suharyanto, & Atmojo, P. S. (2021). Deformasi Bendungan Cirata berdasarkan Analisis Data Instrumen Patok Geser. *Jurnal Teknik Universitas Negeri Gorontalo*, 19(2), 96–106. <https://doi.org/10.37031/jt.v19i2.166>
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. (2017). *Modul Instrumentasi Bendungan Urugan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*. Badan Pengembangan SDM, Kementerian PUPR.
- Pytharouli, S., & Stiros, S. (2008). Dam Crest Settlement, Reservoir Level Fluctuations and Rainfall: Evidence for A Causative Relationship for The Kremasta Dam Greece. *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis*, 1–9.
- Rizal, M. (2004). *Deformation and Cracking in Rockfill Dams - Case of Jatiluhur Dam*. UNESCO-IHE.
- Soetjiono, C. (2010). Gagasan Revitalisasi Bendungan Urugan dalam Mendukung Pengelolaan Sumber Daya Air. *Jurnal Sumber Daya Air*, 6(1), 59–74.
- Zaky, F., Nugroho, H., & Edhisono, S. (2023). Analisa Kebutuhan Instrumentasi Geoteknik Dry Dam Bendungan Sawangan Kabupaten Minahasa Utara. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 7(2), 123–136.