

## Analisis Perilaku Deformasi Bendungan Bajulmati Dengan Metode Penilaian Berdasarkan Database Sejarah Bendungan

M Santang Istiaji<sup>1\*</sup>, Sriyana<sup>2</sup>, Kresno Wikan Sadono<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Balai Wilayah Sungai Maluku Utara, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat,  
Jl. Jati Besar, Ternate, Maluku Utara, Indonesia 97716

<sup>2</sup> Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

### Abstrak

Bendungan akan mengalami tekanan dari beban sendiri sampai dengan efek loading air waduk. Akibat gaya tekanan tersebut maka tubuh bendungan akan mengalami deformasi. Perilaku deformasi bendungan perlu dipantau, untuk mengetahui deformasi vertikal dan horisontal yang terjadi. Makalah ini membahas tentang perilaku deformasi pada Bendungan Bajulmati dari tahap konstruksi, pengisian awal, dan pasca konstruksi. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan perilaku deformasi "normal" sehingga studi kasus yang menunjukkan deformasi "abnormal" dapat diidentifikasi sejak dini dan kemudian dapat dianalisis lebih lanjut. Perilaku deformasi Bendungan Bajulmati hasil evaluasi berdasarkan kriteria penerimaan dari database sejarah bendungan yang serupa, sebagian besar instrumen memenuhi kriteria penerimaan deformasi sehingga dianggap normal. Sedangkan sebagian kecil tidak memenuhi kriteria penerimaan karena nilainya diluar dari persyaratan. Hasil tersebut dapat menjadi perhatian dan rekomendasi awal untuk analisis lebih lanjut mengenai perilaku deformasi abnormal yang terjadi.

**Kata kunci:** bendungan; instrumentasi; perilaku deformasi; normal; abnormal

### Abstract

*[Title: Behavioral Study of Bajulmati Dam Deformation Through Dam History Database-based Assessment] Dam will experience pressure from its own load up to the effect of loading reservoir water. As a result of this pressure force, the dam body will be deformed. The behavior of dam deformation needs to be monitored to know the vertical and horizontal deformation that occurs. This paper discusses the deformation behavior of bajulmati dam during the construction stage, first filling, and post-construction. The purpose of this analysis is to determine "normal" deformation behavior so that case studies showing "abnormal" deformation can be identified early and can then be further analyzed. Evaluation results of Bajulmati Dam deformation behavior based on the acceptance criteria from a similar dam history database showed that most instruments meet the criteria of deformation acceptance so that it is considered normal. Only a small percentage do not meet the acceptance criteria because the value is outside of the requirements. These results may be a concern and initial recommendation for further analysis of abnormal deformation behaviors occurring.*

**Keywords:** dam; instrumentation; deformation behavior; normal; abnormal

### 1. Pendahuluan

Bendungan adalah bangunan 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 bendungan yang dibangun oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat adalah Bendungan Bajulmati, terletak

\*) Penulis Korespondensi.

E-mail: santangcivil@gmail.com

di perbatasan wilayah Kabupaten Banyuwangi dan Kabupaten Situbondo. Pembangunannya melalui studi yang panjang diawali survei lokasi dilakukan pada 1980 hingga akhirnya tuntas pada tahun 2015. Pengisian awal (impounding) dilaksanakan pada 1 Desember 2015 dan mencapai tinggi air normal pada 3 Januari 2017 atau selama 13 bulan. Tubuh bendungan Bajulmati berjenis urugan batu dipadatkan dengan baik dengan inti kedap air (clay) dengan kemiringan 1:0,2 (thin), mempunyai elevasi pondasi +45,00 m dan elevasi puncak +92,80 m dengan lebar puncak 6 m dan panjang puncak 250 m, kemiringan lereng bagian hilir adalah 1/2,3 serta kemiringan dibagian hulu adalah 1/3,455. Pelimpah Bendungan Bajulmati bertipe side channel dengan panjang mercu 90 m, elevasi puncak mercu +87,60 m, dasar elevasi mercu +84,00 m.

Seperti diketahui, tubuh bendungan akan mengalami tekanan dari beban sendiri sampai dengan efek loading air waduk. Gaya tekanan tersebut mengakibatkan tubuh bendungan akan mengalami deformasi. Risiko kegagalan suatu bendungan dapat diantisipasi dengan melakukan program keamanan bendungan, salah satunya dengan pengamatan instrumentasi keamanan yang wajib diberlakukan sejak tahap pelaksanaan konstruksi, pengisian awal, serta masa operasi dan pemeliharaan bendungan. Parameter geoteknik yang perlu dipantau dalam konstruksi suatu bendungan urugan, baik selama pelaksanaan konstruksi maupun operasinya untuk mengetahui perilaku bendungan, yaitu deformasi vertikal maupun horizontal.

Menurut *United States Bureau of Reclamation* (2011), efek utama dari deformasi adalah hilangnya *freeboard*, kerusakan struktur bangunan pelengkap yang terletak atas bendungan, hilangnya kepercayaan pada bendungan karena penampilan *swayback* (penampakan lendutan), retakan pada bendungan urugan (paling merugikan pada *impervious core*), terbentuknya suatu zona yang mengarah pada rekahan hidrolik (*hidraulik fracturing*), dan kegagalan instrumentasi. Manifestasi fisik yang paling sederhana dari deformasi kepada bendungan urugan adalah membuat geometri bendungan agak tidak teratur yang mungkin tidak terlihat oleh mata yang tidak terlatih (*Training Aids for Dam Safety*, 2011).

Penelitian perilaku Bendungan Bajulmati sudah pernah dilakukan untuk perilaku tekanan air pori (Orfa & Samad, 2019), analisis rembesan pada bendungan (Astuti dkk., 2012; Rakhman dkk., 2015), dan analisis rembesan dan stabilitas bendungan (Nanda & Hamdhan, 2016). Namun belum pernah dilakukan studi tentang perilaku deformasi pada Bendungan Bajulmati dengan metode penilaian berdasarkan database perilaku bendungan yang serupa. Tujuan dari database sejarah bendungan yang dirujuk dari berbagai bendungan dan timbunan batuan/tanah yang diinstrumentasi dengan baik adalah untuk memberikan metode mendefinisikan secara luas perilaku deformasi "normal" dan dari platform ini untuk

kemudian mengidentifikasi perilaku deformasi yang berpotensi "tidak normal", baik dalam hal besaran, laju, atau tren (Hunter & Fell, 2002).

Batasan dari perilaku deformasi bendungan dikategorikan normal/abnormal dirujuk dari metode yang didasarkan pada perbandingan dengan catatan sejarah dari bendungan yang serupa. Kondisi perilaku deformasi "normal" adalah dimana perilaku deformasi bendungan yang dianalisis relatif sama dengan perilaku deformasi bendungan-bendungan serupa. Jika hasil analisis perilaku deformasi tidak sesuai, maka disebut perilaku deformasi "abnormal". Metode tersebut berasal dari kumpulan data yang berkualitas baik dan pertimbangan faktor-faktor penting yang mempengaruhi perilaku deformasi.

Berdasarkan laporan Akhir Inspeksi Bendungan Bajulmati oleh SNVT Pembangunan Bendungan Balai Besar Wilayah Sungai Brantas pada tahun 2020, hasil inspeksi visual lapangan mendapatkan temuan yaitu cekungan pada satu titik di daerah puncak dan terdapat gejala penurunan pada sisi lereng hilir. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian perilaku deformasi pada Bendungan Bajulmati. Tujuan dari analisis ini adalah menentukan perilaku deformasi "normal" sehingga studi kasus yang menunjukkan deformasi "abnormal" dapat diidentifikasi dan kemudian dianalisis lebih lanjut. Sehingga, hasil analisis perilaku deformasi bendungan memberikan panduan terbaik kepada personel yang bertanggung jawab untuk penilaian kinerja bendungan serta dapat menjadi gambaran awal sebagai rekomendasi untuk analisis lebih lanjut mengenai perilaku deformasi abnormal yang terjadi.

## 2. Bahan dan Metode

Data untuk keperluan analisis perilaku deformasi bendungan adalah data hasil bacaan dari pemantauan instrumentasi deformasi dari mulai awal pemasangan hingga penelitian ini berlangsung. Pemantauan dimulai dari awal konstruksi untuk *multilayer cell* (2014) dan akhir pekerjaan penimbunan untuk patok geser (2015) sampai dengan saat ini. Pada bendungan Bajulmati terdapat 15 buah patok geser (*surface monitoring point*) terbagi menjadi 5 buah *crest settlement survey point* (CS 1 s/d CS 5) yang terletak pada puncak bendungan dan 10 buah *Slope settlement survey point* (SS 1 s/d SS 10) yang terletak pada lereng hilir bendungan untuk memantau deformasi horizontal dan vertikal pada permukaan bendungan. Semua patok masih dalam kondisi yang baik seperti pada Gambar 1. Sedangkan untuk pengamatan *Internal Vertical Movement* (IVM), Bendungan Bajulmati terdapat 12 plat *magnetic* untuk memantau penurunan pada bendungan. *Multilayer Settlement* tersebar di 3 STA bendungan yaitu STA 14+5; STA 17,5; dan STA 20,5. Dalam 1 STA terdiri dari 4 plat magnetic (PM 1 s/d PM 4) dengan elevasi masing-masing adalah EL.+51; EL.+61;

EL.+71; dan EL.+81. Kondisi instrumen dapat dijelaskan pada Gambar 2,3, dan 4.

Kondisi instrumentasi patok geser semuanya berfungsi dan dapat diamati dengan baik, sedangkan untuk instrumentasi multilayer settlement tidak semuanya dapat terbaca pada pengamatan. Kerusakan dialami beberapa alat pendeteksi deformasi vertikal ini yaitu pada STA 14+5 terdapat 2 alat rusak, STA 17+5 terdapat 2 alat rusak, dan STA 20+5 terdapat 2 alat rusak. Keseluruhan alat yang rusak berada pada elevasi terendah, dikarenakan pipa inclino bengkok/menyempit sehingga alat tidak bisa dijangkau.

Hunter dan Fell (2002), menganalisis perilaku deformasi penimbunan batuan dari data base studi kasus terutama dari bendungan penimbunan batuan. Metode prediksi dikembangkan untuk estimasi deformasi batuan berdasarkan catatan sejarah kinerja bendungan. Metode dikembangkan atau metode saat ini ditingkatkan untuk estimasi/prediksi deformasi vertikal selama konstruksi, deformasi lateral selama pengisian awal, dan deformasi vertikal pasca konstruksi. Perilaku deformasi telah dikelompokkan menjadi deformasi selama konstruksi dan deformasi pasca konstruksi. Perilaku deformasi selama pengisian pertama didiskusikan sebagai bagian terpisah dari perilaku deformasi pasca konstruksi.

**2.1 Perilaku Deformasi Bendungan Selama Konstruksi (*during construction*)**

Analisis perilaku deformasi selama konstruksi timbunan tanah dan timbunan batuan sebagian besar terkonsentrasi pada zona inti timbunan tanah karena di sinilah letak instrumen. Data deformasi yang dikumpulkan dan dianalisis adalah deformasi vertikal dari

hasil pengukuran *Internal Vertical Movement (IVM)* yang dipasang saat konstruksi berlangsung. Deformasi pada inti bendungan urugan pada periode konstruksi dianalisis pada kondisi timbunan masih berjalan dan kondisi timbunan sudah selesai.

**Periode Konstruksi Timbunan**

Identifikasi perilaku deformasi yang berpotensi “abnormal” dari inti selama konstruksi adalah penurunan total inti yang terjadi pada saat timbunan masih berjalan. Deformasi vertikal total diperkirakan dari penurunan kumulatif antara alat pengukur dari 42 studi kasus bendungan yang diteliti oleh Hunter and Fell, (2003). Korelasi antara settlement dan persentase dari tinggi timbunan dinyatakan pada persamaan 1, sedangkan korelasi antara settlement dan persentase tinggi timbunan dinyatakan dalam Persamaan 2.

$$Settlement (mm) = H(0,152H + 12,6) \quad (1)$$

$$Settlement (\%) = 0,179H^{0,60} \quad (2)$$

Dimana H adalah ketinggian bendungan (m).

Gambar 5 menyajikan penurunan total inti *clay* versus ketinggian tanggul selama periode konstruksi. Grafik menunjukkan kecenderungan peningkatan penurunan (sebagai persentase dari ketinggian timbunan) dengan bertambahnya ketinggian timbunan. Pada ketinggian timbunan kurang dari 50 m total penurunan umumnya berada pada urutan kurang dari 1% s.d. 2,5%, dan untuk tinggi timbunan lebih dari 150 m berkisar antara 2 s.d. 5%.



**Gambar 1.** Foto udara tubuh Bendungan Bajulmati menunjukkan lokasi instrumentasi patok geser

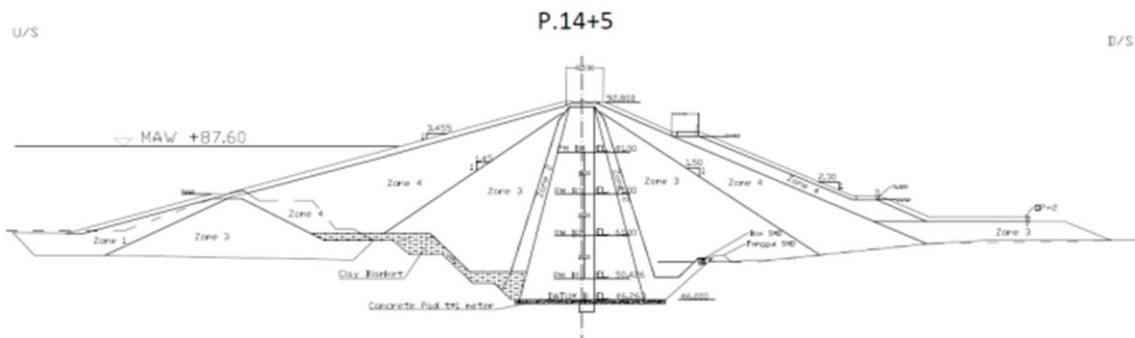
**Konstruksi Timbunan Telah Selesai**

Pada kondisi konstruksi timbunan sudah selesai, evaluasi dilakukan dengan plot regangan vertikal (*vertical strain*) versus tegangan vertikal efektif (*effective vertical stress*) dimana,  $W_{placement} < W_{omc}$  (*dry placed earthfill*) berdasarkan pada data field test result saat konstruksi berlangsung. Regangan vertikal (*vertical strain*) di inti dihitung antara interval *cross-arm* individu dari IVM dengan membagi penurunan terukur (antara interval *cross-arm*) dengan jarak asli antara *cross-arm*. Tegangan vertikal (*vertical stress*) atau ketinggian pengisian urugan mewakili titik tengah antara interval *cross-arm* yang dinominasikan. Gambar 6 menjelaskan perilaku deformasi vertikal pada inti 18 bendungan yang sekaligus

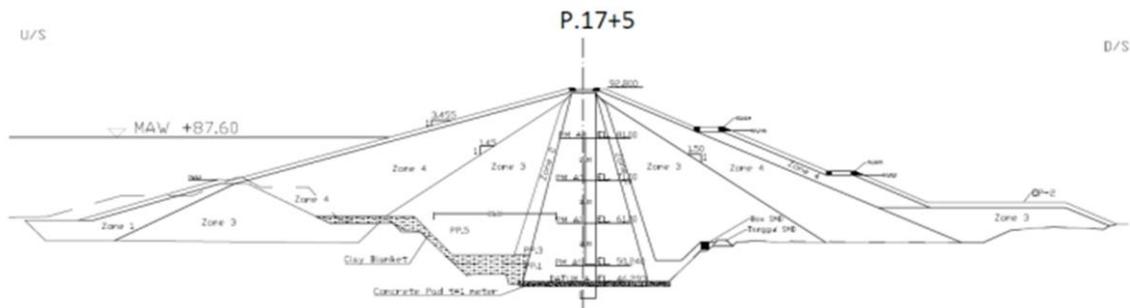
menjadi batas perilaku bendungan masuk batas normal (*bound of normal type deformation*) atau tidak.

**2.2 Perilaku Deformasi Bedungan Saat Pengisian Awal (*first filling*)**

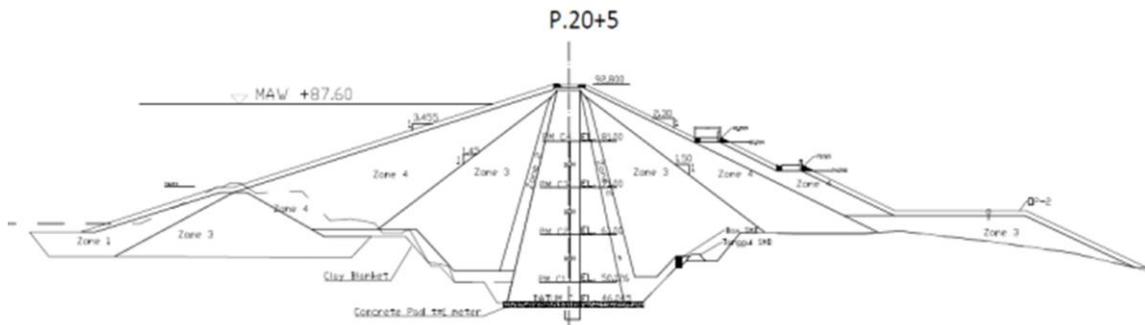
Pengamatan deformasi pada first filling dilakukan dengan mengamati *lateral surface displacement* pada patok geser atau *Surface Monitoring Point* (SMP). Untuk melakukan pengamatan *post construction* dan *first filling* maka dilakukan pembagian menjadi 3 zona yaitu: (1) *Mid to downstream region of the crest*; (2) *Mid to upper region of the downstream slope*; (3) *Upper upstream slope to upstream crest region* seperti ditampilkan pada Gambar 7.



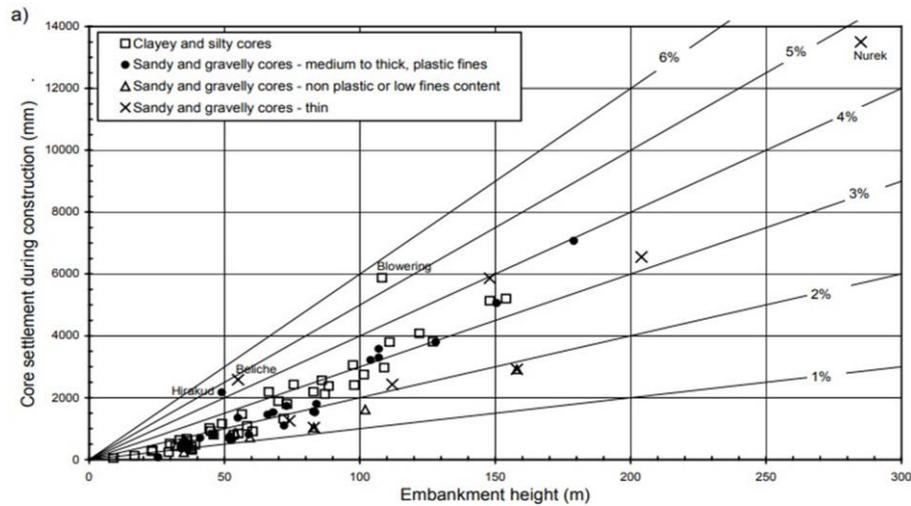
**Gambar 2.** Potongan Melintang Bendungan Bajulmati pada STA 14+5 terdapat 4 plat *magnetic* pada inti



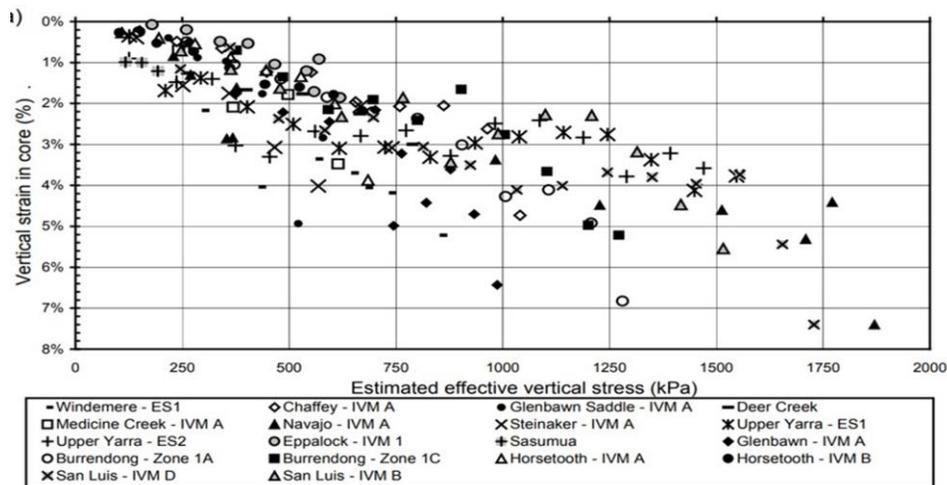
**Gambar 3.** Potongan Melintang Bendungan Bajulmati pada STA 17+5 terdapat 4 plat *magnetic* pada inti



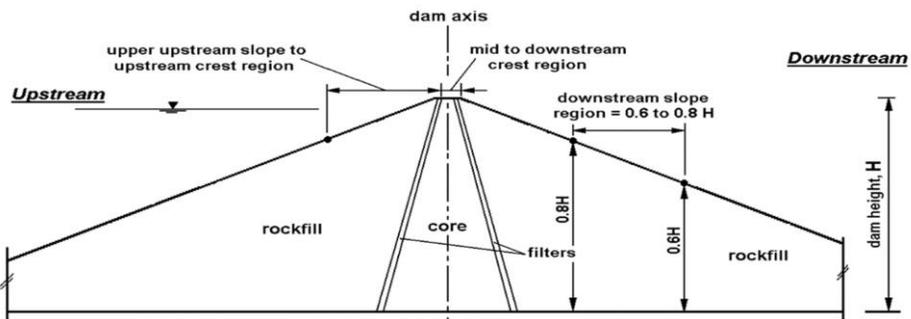
**Gambar 4.** Potongan Melintang Bendungan Bajulmati pada STA 20+5 terdapat 4 plat *magnetic* pada inti



Gambar 5. Penurunan Inti Selama Konstruksi Urugan Timbunan Tanah dan Batu (Hunter and Fell, 2003)



Gambar 6. Regangan vertikal versus tegangan vertikal efektif dalam inti pada akhir konstruksi 18 bendungan (Hunter & Fell, 2003)



Gambar 7. Pembagian Wilayah Tanggul Untuk Analisis Deformasi Permukaan Pasca Konstruksi (Hunter & Fell, 2003)

Hunter dan Fell (2003), meneliti lima studi kasus untuk bendungan dengan lebar inti *clay* tipis sampai dengan sedang (*thin to medium*) dengan material timbunan ditempatkan pada kondisi kering dan

padatkan dengan baik mempunyai perpindahan lateral yang dapat diidentifikasi dari *Surface Monitoring Point* (SMP) di zona *mid to downstream region of crest* yaitu antara 5 mm s.d. 80 mm atau 0 s.d. 0,12 % terhadap tinggi

bendungan. Sedangkan untuk *zona mid to upper region of the downstream slope* pada *first filling* dengan urugan dimana *dry placed rockfill* (*rockfill* yang pemasangannya tidak dibasahi) pada *downstream shoulder*, umumnya *displacement lateral* tipikal 0 s.d. 0,25 % dari tinggi bendungan. *Displacement* pada *upper upstream slope* atau *upstream crest region* pada *first filling* kebanyakan kasus ditemui *displacement* pada rentang -200 mm s.d. -300 mm *upstream* sampai dengan 300 mm *downstream*.

### 2.3 Perilaku Deformasi Bendungan Paska Konstruksi (post construction)

Data deformasi pasca konstruksi yang dikumpulkan adalah bagian maksimum urugan yaitu data titik pemantauan permukaan/SMP (*Surface Monitoring Point*) pada puncak dan kemiringan tanggul (pada bidang yang normal terhadap sumbu bendungan). Deformasi permukaan pasca konstruksi total disajikan sebagai plot penurunan versus ketinggian bendungan pada waktu tertentu setelah konstruksi berakhir. Data disajikan untuk tiga wilayah permukaan bendungan; puncak tengah hingga hilir, lereng hilir tengah hingga atas, dan kawasan puncak hulu hingga hulu seperti Gambar 7.

Hunter dan Fell (2003), meneliti sembilan studi kasus untuk bendungan dengan lebar inti *clay* tipis sampai dengan sedang (*thin to medium*) yang ditempatkan saat konstruksi dengan kondisi kering (*dry moisture content*) mempunyai deformasi vertikal atau biasa disebut juga dengan penurunan puncak bendungan yang dapat diidentifikasi dari *surface monitoring point* (SMP) di *zona mid to downstream region of crest* yaitu antara 0,05 % s.d. 0,55 % terhadap tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun pertama; 0,10 % s.d. 0,65 % terhadap tinggi bendungan pada 10 (sepuluh) tahun; dan 0,20 % s.d. 0,95 % terhadap tinggi bendungan pada 25 (dua puluh lima) tahun. Sedangkan untuk *zona mid to upper region of the downstream slope* pada *post construction* dengan urugan dimana *rockfill* dipadatkan dengan baik pada *downstream shoulder*, umumnya 0 s.d. 0,35 % dari tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun pertama dan 0,05 % s.d. 0,55 pada 10 (sepuluh) tahun, dengan studi kasus 11 (sebelas) bendungan. *Settlement* pada *upper upstream slope* atau *upstream crest region* pada *post construction* ditemui pada 12 (dua belas) kasus bendungan pada rentang 0,10 % s.d. 0,60 % terhadap tinggi bendungan pada tahun ke 3 (tiga) dan pada 10 tahun bendungan mengalami penurunan 0,10 % s.d. 0,70 % terhadap tinggi bendungan.

Metode oleh Clements (1984) dan Dascal (1987), memberikan rentang atau batasan dari kemungkinan perilaku deformasi untuk bendungan dengan urugan batu (*Rockfill Dam*) yaitu antara 0,2 % s.d. 1,0 % terhadap tinggi bendungan. Clements (1984), menyarankan batas-batas tersebut digunakan untuk memberikan kisaran deformasi yang diharapkan, dan untuk prediksi yang lebih

baik ia menyarankan untuk memperkirakan dari perilaku deformasi bendungan dengan karakteristik serupa. Sowers dkk. (1965), mengusulkan hubungan logaritmik antara penurunan puncak (*crest settlement*) dan waktu untuk menggambarkan penurunan puncak pasca konstruksi untuk bendungan "penimbunan batuan". Itu berasal dari database 14 bendungan *rockfill* yaitu yaitu antara 0,25 % s.d. 1,0 % terhadap tinggi bendungan.

Menurut Charles (1986), mengusulkan *Settlement Index* (SI) untuk penilaian perilaku penyelesaian puncak jangka panjang bendungan urugan dengan inti tanah (Persamaan 3). Charles dan Tedd (1991), menunjukkan bahwa indeks penurunan dianalogikan dengan koefisien konsolidasi sekunder untuk tanah liat. Mereka memberikan nilai indeks penurunan untuk sejumlah bendungan urugan dengan inti selama periode operasi reservoir normal.

$$S_I = \frac{S}{1000 \cdot H \cdot \log(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

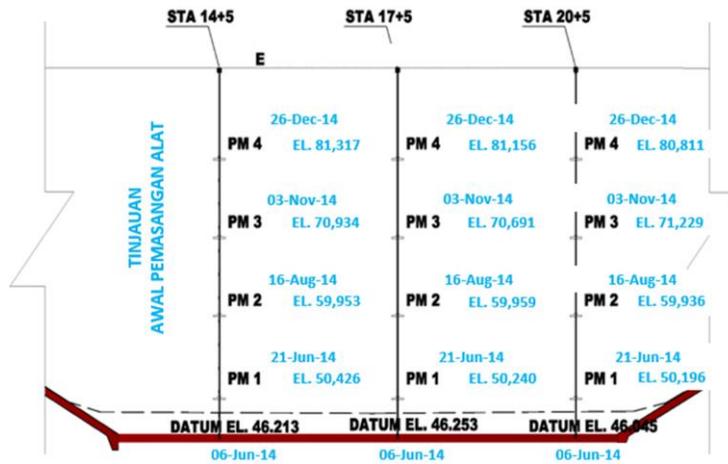
Dimana S adalah penurunan puncak (mm) yang diukur antara waktu  $t_2$  dan  $t_1$ , sedangkan H adalah ketinggian bendungan (m). Tedd dkk. (1997b), mengemukakan bahwa nilai-nilai *settlement index* "lebih besar dari 0,02 dapat mengindikasikan beberapa mekanisme selain *creep* yang menyebabkan penurunan dan bahwa situasinya harus diperiksa secara serius".

## 3. Analisis dan Pembahasan

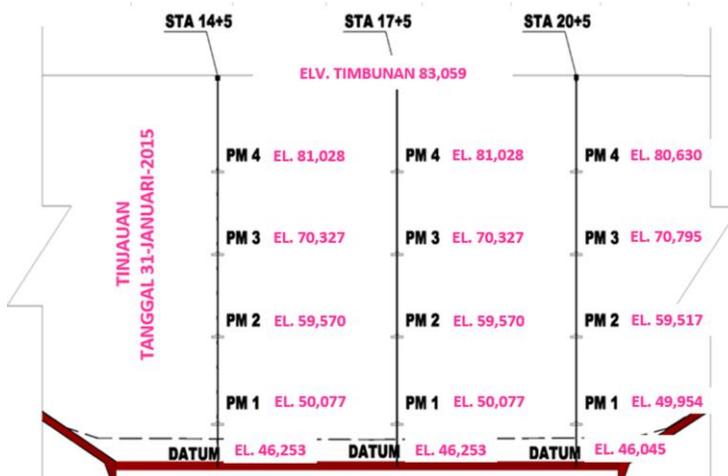
### 3.1 Analisis Deformasi Bendungan Selama Konstruksi (during construction)

Analisis yang dilakukan adalah deformasi vertikal dari hasil pengukuran *Internal Vertical Movement* (IVM). Catatan penurunan sebagian besar berasal dari pengukur penurunan vertikal internal yang dipasang di inti tengah timbunan tanah (dekat sumbu bendungan) saat konstruksi dilanjutkan. Pada analisis ini akan ditetapkan 2 (dua) waktu tinjauan, yaitu pada saat konstruksi timbunan sedang berlangsung dan pada saat konstruksi timbunan telah selesai. Waktu tinjauan yang berbeda ditetapkan agar dapat diketahui perilaku deformasi vertikal dari inti selama periode konstruksi timbunan dan pada kondisi konstruksi timbunan sudah mencapai puncak sesuai dengan desain tinggi bendungan.

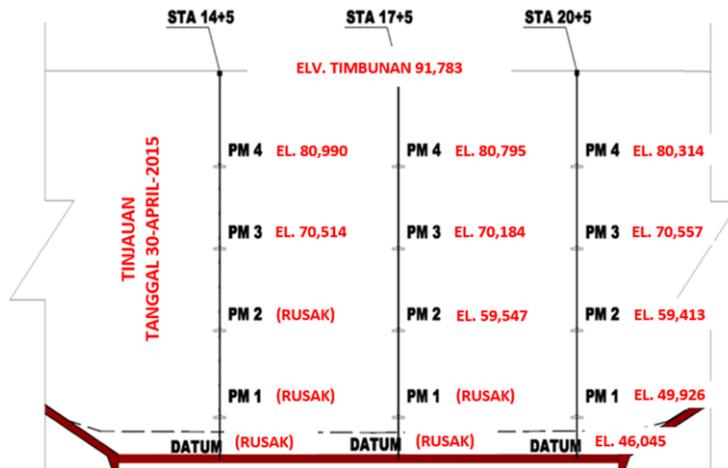
Potongan melintang Bendungan Bajulmati dimana menjelaskan kondisi instrumentasi *multilayer settlement* pada saat awal terpasang (Gambar 8), periode timbunan berlangsung (Gambar 9), dan saat konstruksi timbunan telah selesai (Gambar 10). Elevasi yang tercatat pada saat pengamatan setiap waktu tinjauan mengalami perubahan. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa adanya penurunan.



Gambar 8. Potongan melintang Bendungan Bajulmati, hasil pengamatan instrumentasi *multilayer settlement* pada saat awal pemasangan



Gambar 9. Potongan melintang Bendungan Bajulmati, hasil pengamatan instrumentasi *multilayer settlement* pada saat konstruksi timbunan berlangsung



Gambar 10. Potongan melintang Bendungan Bajulmati, hasil pengamatan instrumentasi *multilayer settlement* pada saat konstruksi timbunan telah selesai sesuai desain

**Tabel 1.** Nilai *settlement* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati saat konstruksi berlangsung (mm)

IVM	STA 14+5	STA 17+5	STA 20+5
PM 4	289	128	181
PM 3	607	364	434
PM 2	383	389	419
PM 1	349	163	242
DATUM	40	0	0

**Tabel 2.** Nilai *settlement* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati saat konstruksi berlangsung (% terhadap tinggi timbunan)

IVM	STA 14+5	STA 17+5	STA 20+5
PM 4	0,76	0,34	0,48
PM 3	1,59	0,96	1,14
PM 2	1,01	1,02	1,10
PM 1	0,92	0,43	0,64
DATUM	0,11	0	0

**Periode Konstruksi Timbunan**

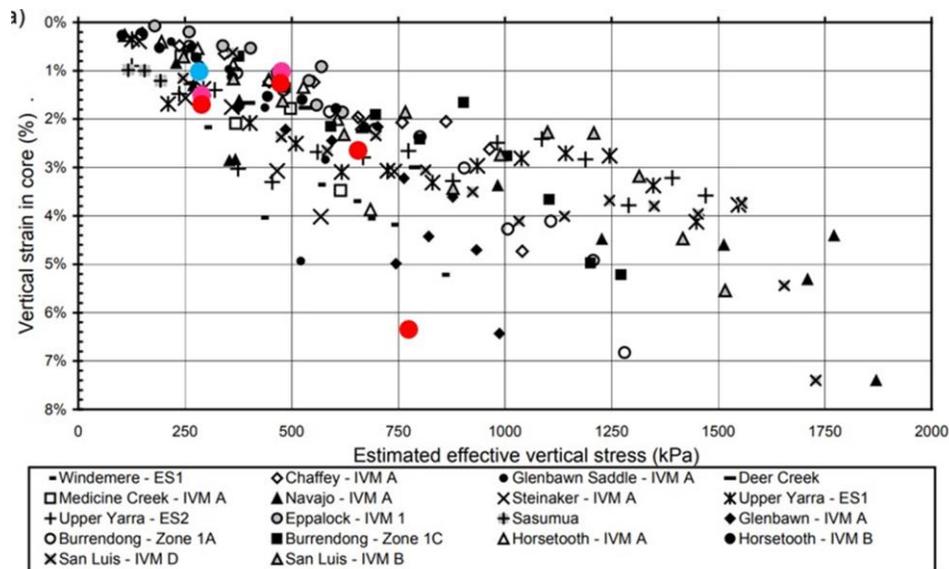
Jenis plot yang berguna dalam mengidentifikasi perilaku deformasi potensial “abnormal” dari inti selama konstruksi adalah penurunan total inti yang terjadi selama periode konstruksi bendungan. Analisis berdasarkan tinjauan waktu saat periode konstruksi timbunan mencapai progres 81,32 % atau konstruksi bendungan masih berlangsung dengan elevasi +83,059 dari elevasi pondasi +45. Data pembacaan seperti pada Gambar 8 dilakukan analisis penurunan vertikal dari inti selama periode konstruksi versus ketinggian urugan untuk mendapatkan nilai yang akan disandingkan dengan nilai batas penurunan. Didapatkan nilai batasan penurunan yang dihasilkan dari persamaan 1 adalah 485,33 mm dan persamaan 2 adalah 1,59 % terhadap tinggi timbunan. Hasil dari analisis dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Dapat dijelaskan deformasi pada masa periode konstruksi timbunan bendungan (Tabel 1 dan Tabel 2) sebagian besar instrumentasi *multilayer settlement* menunjukkan perilaku yang normal, terdapat 1 (satu)

alat yang nilainya yang melebihi batas normal kriteria penerimaan penurunan yang dihasilkan dari persamaan 1 (485,33 mm) dan persamaan 2 (1,59 % terhadap tinggi timbunan). Instrumentasi *multilayer settlement* PM 3 pada STA 14+5 dengan nilai *settlement* sebesar 607 mm dan prosentase penurunannya 1,59 % terhadap tinggi timbunan dianggap berperilaku tidak normal.

**Konstruksi Timbunan Telah Selesai**

Analisis diawali dengan penentuan *lateral deformation*. Berdasarkan data *field test result* saat konstruksi berlangsung pada Bendungan Bajulmati dimana pelaksanaan timbunan inti (*core*) bendungan ditempatkan pada kondisi kering, dimana  $W_{placement} < W_{omc}$  (*dry placed earthfill*) sehingga yang terjadi terjadi adalah *lateral deformation* yang kecil pada saat penimbunan. Evaluasi dilakukan dengan plot regangan vertikal (*vertical strain*) versus tegangan vertikal efektif (*effective vertical stress*).



**Gambar 11.** Hasil plot regangan vertikal versus tegangan vertikal efektif dalam inti pada akhir konstruksi yang terjadi pada Bendungan Bajulmati

**Tabel 3.** Nilai regangan vertikal (*vertical strain*) dan tegangan vertikal efektif (*effective vertical stress*) yang terjadi pada Bendungan Bajulmati ditinjau pada saat timbunan sudah selesai (mencapai elevasi sesuai dengan desain)

IVM	<i>effective vertical stress (Kpa)</i>	<i>vertical strain (%)</i>
PM 3 - 4	STA 14+5	0,90
	278,83	
PM 3 - 4 PM 2 - 3	STA 17+5	1,40 0,89
	281,36	
	464,92	
PM 3 - 4 PM 2 - 3 PM 1 - 2 D - PM 1	STA 20+5	1,62 1,14 2,60 6,50
	282,11	
	462,66	
	641,09	
	756,58	

Tabel 3 adalah hasil dari analisis tersebut dan diplot dalam grafik sebagai batas perilaku deformasinya (Gambar 11). Dapat dilihat, nilai regangan vertikal (*vertical strain*) dan tegangan vertikal efektif (*effective vertical stress*) pada masa konstruksi pada Bendungan Bajulmati tipikal dengan bendungan-bendungan referensi. Dengan demikian perilaku deformasi internal inti pada Bendungan Bajulmati ditinjau saat konstruksi timbunan telah selesai masih di batas normal.

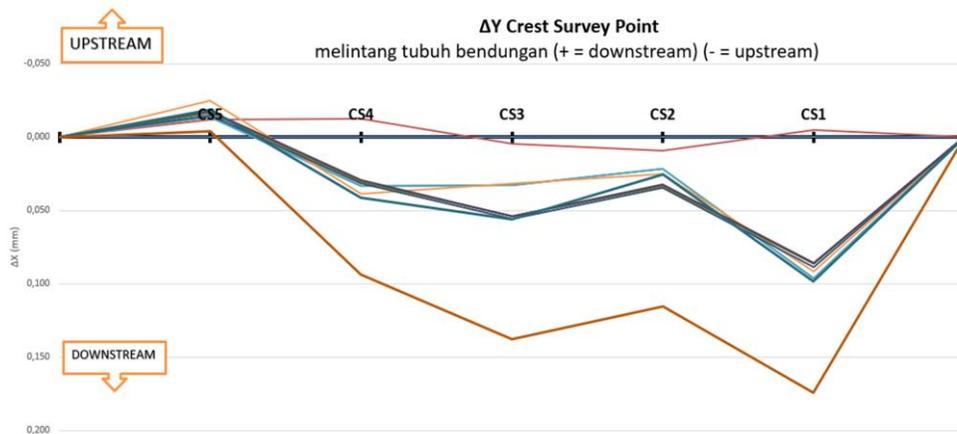
**3.2 Analisis Deformasi Bedungan Saat Pengisian Awal (*first filling*)**

Analisis deformasi pada *first filling* dilakukan dengan mengamati *lateral surface displacement* pada patok geser atau *Surface Monitoring Point (SMP)* seperti ditampilkan pada Gambar 6. Pada Bendungan Bajulmati dilakukan analisis dari hasil pengamatan SMP pada 2 zona yaitu: (1) *Mid to downstream region of the crest*; (2) *Mid to upper region of the downstream slope*. Analisis tidak dilakukan pada zona *upper upstream slope to upstream crest region* karena pada zona tersebut tidak terdapat instrumentasi SMP. Arah dari *Displacement* yang terjadi pada zona *Mid to downstream region of the crest* atau puncak bendungan pada *first filling* pada Bendungan Bajulmati untuk CS1 sampai dengan CS 4 adalah mengarah ke *downstream*, sedangkan CS 5 mengarah ke *upstream* (Gambar 12). Sedangkan pada zona *Mid to upper region of the downstream slope* untuk SS1, SS2, SS3, dan SS5 pada awalnya adalah mengarah ke *upstream* selanjutnya seiring naiknya elevasi muka air pergerakan berubah ke arah *downstream*, sedangkan CS 4 mengarah ke *downstream* (Gambar 13). Gambar 14 menunjukkan

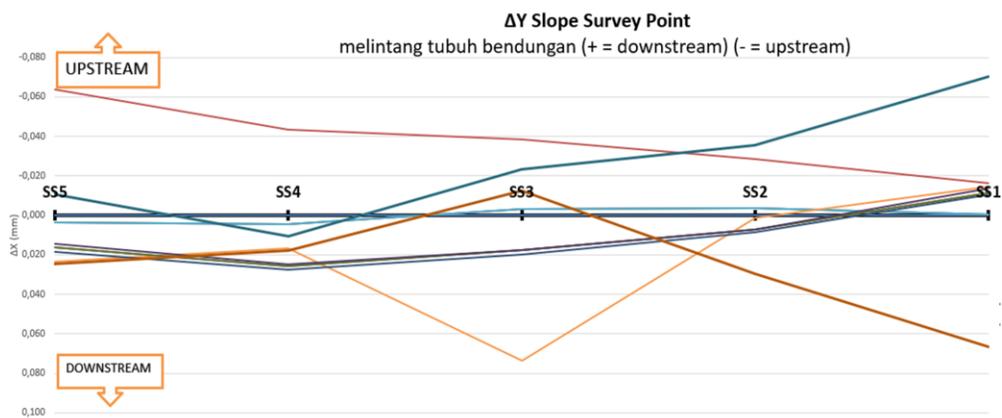
arah pergerakan Bendungan Bajulmati berdasarkan pengamatan patok geser saat pengisian waduk sudah mencapai elevasi normal. Nilai hasil analisis instrumentasi SMP pada periode pengisian awal waduk berdasarkan peningkatan elevasi muka air waduk yang diamati pada bagian puncak dan lereng hilir Bendungan Bajulmati ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Evaluasi perilaku deformasi normal/abnormal dengan plot nilai hasil analisis (Tabel 4 dan 5) pada kriteria penerimaan perpindahan lateral yang dapat diidentifikasi dari *Surface Monitoring Point (SMP)* di zona *mid to downstream region of crest* yaitu antara 5 mm s.d. 80 mm atau 0 s.d. 0,12 % terhadap tinggi bendungan. Sedangkan untuk zona *mid to upper region of the downstream slope displacement* lateralnya tipikal 0 s.d. 0,25 % dari tinggi bendungan.

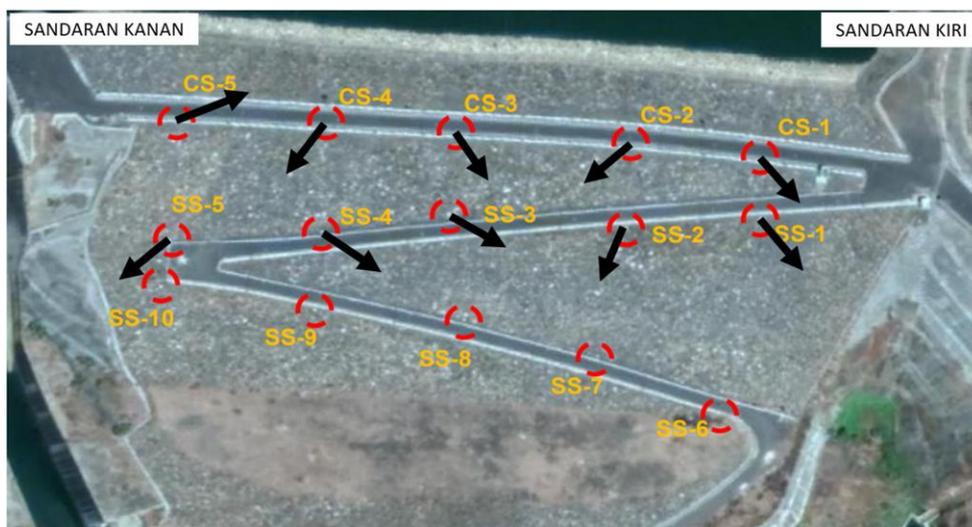
Dapat dijelaskan perilaku deformasi Bendungan Bajulmati pada masa pengisian awal waduk (Tabel 4) dengan besaran *displacement* diidentifikasi dari *Surface Monitoring Point (SMP)* di zona *mid to downstream region of crest* didapati perilaku tidak normal pada beberapa instrumentasi yaitu CS1 dari awal *impounding* sampai MAN. Instrumentasi CS 2, CS 3, dan CS 4 berperilaku normal pada awal pengisian dan seiring berjalan waktu dengan ketinggian MAW yang naik mulai terjadi perilaku yang tidak normal sampai akhir pengisian awal waduk yaitu setelah MAN. Instrumentasi CS 5 berperilaku tidak normal karena arah pergerakan menuju ke *upstream* bendungan. Untuk zona *mid to upper region of the downstream slope* pada *first filling* dengan urugan dimana *dry placed rockfill* (timbunan batu yang pemasangannya tidak dibasahi) pada *downstream shoulder*, umumnya *displacement lateral* kecil dan cenderung ke arah *upstream*, akan tetapi saat muka air waduk menjelang MAN arah *displacement lateral* berbalik ke arah *downstream*, dengan nilai yang masuk dalam kategori normal. Evaluasi dari prosentase nilai *displacement* terhadap tinggi puncak bendungan yang terjadi pada zona *mid to downstream region of the crest* atau puncak bendungan pada *first filling* pada Bendungan Bajulmati (Tabel 5), perilaku tidak normal ditunjukkan oleh instrumentasi CS1 dari awal *impounding* sampai MAN, instrumentasi CS 2, CS 3, dan CS 4 berperilaku normal pada awal pengisian dan seiring berjalan waktu dengan ketinggian muka air waduk yang naik mulai terjadi perilaku yang tidak normal sampai akhir pengisian awal waduk yaitu setelah MAN. Instrumentasi CS 5 berperilaku tidak normal karena arah pergerakan menuju ke *upstream* bendungan. Sedangkan pada zona *Mid to upper region of the downstream slope* untuk SS1, SS2, SS 3, SS 4, dan SS 5 nilainya masuk dalam kriteria berperilaku normal pada penerimaan deformasi masa *impounding*.



**Gambar 12.** Grafik pergeseran (*displacement*) mid to downstream region of the crest bendungan arah memanjang (CS 1 s/d CS 5)



**Gambar 13.** Grafik pergeseran (*displacement*) zona mid to upper region of the downstream slope bendungan arah memanjang (SS 1 s/d SS 5)



**Gambar 14.** Arah pergerakan (*displacement*) Bendungan Bajulmati pada saat pangisian air waduk mencapai elevasi normal

**Tabel 4.** Nilai *displacement* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati saat pengisian awal (mm)

Elevasi MAW	Mid to downstream region of the crest					Mid to upper region of the downstream slope				
	CS 1	CS 2	CS 3	CS 4	CS 5	SS 1	SS 2	SS 3	SS 4	SS 5
59,80	96,40	21,30	32,70	33,40	-13,90	-0,50	-3,60	-3,30	4,70	3,40
75,00	98,40	25,30	55,70	41,40	-18,90	-70,50	-35,60	-23,30	10,70	-10,60
78,85	111,81	41,18	70,17	50,57	-16,25	-46,32	-24,13	-21,35	11,93	-4,42
80,75	129,69	62,35	89,46	62,81	-12,72	-14,09	-8,83	-18,77	13,58	3,81
87,60	143,11	78,24	103,93	71,98	-10,07	10,09	2,63	16,82	14,81	9,98

**Tabel 5.** Nilai *displacement* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati saat pengisian awal (% terhadap tinggi bendungan)

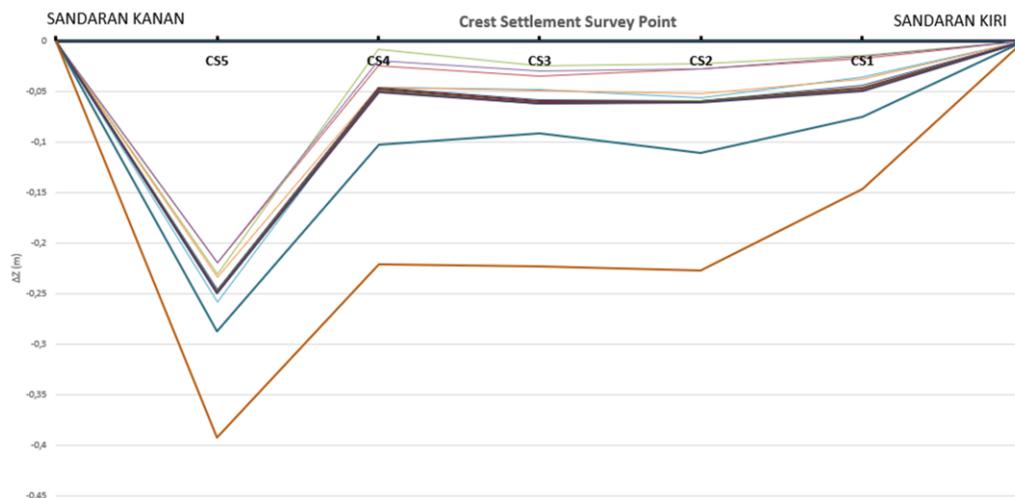
Elevasi MAW	Mid to downstream region of the crest					Mid to upper region of the downstream slope				
	CS 1	CS 2	CS 3	CS 4	CS 5	SS 1	SS 2	SS 3	SS 4	SS 5
59,80	0,21	0,05	0,07	0,07	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
75,00	0,21	0,05	0,12	0,09	0,04	0,15	0,08	0,05	0,02	0,02
78,85	0,24	0,09	0,15	0,11	0,03	0,10	0,05	0,05	0,03	0,01
80,75	0,28	0,13	0,19	0,13	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01
87,60	0,31	0,17	0,22	0,15	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02

**3.3 Analisis Perilaku Deformasi Bendungan Paska Konstruksi (*post construction*)**

Deformasi pasca konstruksi berkonsentrasi pada bagian maksimum urugan yaitu data hasil pengamatan titik pemantauan permukaan/SMP (*Surface Monitoring Point*) pada puncak dan kemiringan tanggul (pada bidang yang normal terhadap sumbu bendungan). Deformasi permukaan pasca konstruksi total disajikan sebagai plot penurunan versus ketinggian bendungan pada waktu tertentu setelah konstruksi berakhir. Zona *mid to upper region of the downstream slope* tidak dianalisis karena tidak terdapat alat SMP terpasang. Gambar 15 dibawah ini adalah hasil pengamatan *settlement* pada instrumentasi SMP dilakukan kondisi

pasca konstruksi.

Bendungan Bajulmati sudah beroperasi lima tahun sehingga analisa periku deformasi vertikal ditinjau pada periode 3 (tiga) tahun sesuai dengan periode penilaian pada kriteria penerimaan deformasi pasca konstruksi seperti dijelaskan di atas, diidentifikasi dari *surface monitoring point* (SMP) di zona *mid to downstream region of crest* yaitu antara 0,05 % s.d. 0,55 % terhadap tinggi bendungan. Sedangkan untuk zona *mid to upper region of the downstream slope* pada *post construction* dengan urugan dimana *rockfill* dipadatkan dengan baik pada *downstream shoulder*, umumnya 0 s.d. 0,35 % dari tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun. Tabel 6 menunjukkan hasil analisis tersebut.



**Gambar 15.** Grafik penurunan (*settlement*) *mid to downstream region of the crest* bendungan arah memanjang (CS 1 s/d CS 5)

**Tabel 6.** Nilai *settlement* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati masa operasi 3 tahun (% terhadap tinggi bendungan)

<i>Mid to downstream region of the crest</i>	
<i>SMP</i>	<i>% of dam height</i>
CS 1	0,375
CS 2	0,530
CS 3	0,531
CS 4	0,543
CS 5	0,906

<i>Mid to upper region of the downstream slope</i>	
<i>SMP</i>	<i>% of dam height</i>
SS 1	0,636
SS 2	0,610
SS 3	0,493
SS 4	0,393
SS 5	0,249
SS 6	0,142
SS 7	0,142
SS 8	0,173
SS 9	0,203
SS 10	0,210

Evaluasi perilaku deformasi normal/abnormal dengan plot nilai hasil analisis Tabel 6 pada kriteria penerimaan perpindahan lateral yang dapat diidentifikasi dari *Surface Monitoring Point* (SMP) di zona *mid to downstream region of crest*: (1) Metode Hunter dan Fell (2003), antara 0,05 % s.d. 0,55 % terhadap tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun pertama. Sedangkan untuk zona *mid to upper region of the downstream slope* pada *post construction* dengan urugan dimana *rockfill* dipadatkan dengan baik pada *downstream shoulder*, umumnya 0 s.d. 0,35 % dari tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun pertama; (2) Metode oleh Clements (1984) dan Dascal (1987), memberikan rentang atau batasan dari kemungkinan perilaku deformasi untuk bendungan dengan urugan batu (*Rockfill Dam*) yaitu antara 0,2 % s.d. 1,0 % terhadap tinggi bendungan; (3) Metode Sowers dkk. (1965), mengusulkan hubungan logaritmik antara penurunan puncak (*crest settlement*) dan waktu untuk menggambarkan penurunan puncak pasca konstruksi untuk bendungan “penimbunan batuan”. Itu berasal dari database 14 bendungan *rockfill* yaitu yaitu antara 0,25 % s.d. 1,0 % terhadap tinggi bendungan.

Analisis selanjutnya mengenai *Settlement Index* (SI), dilakukan berdasarkan rumus tersebut. Perhitungan dilakukan berdasarkan dari waktu awal selesai konstruksi tahun ke-1 sampai dengan data pembacaan instrumen pada tahun ke-3 sesuai dengan tinjauan yang sama dengan analisis sebelumnya. Hasil perhitungan *Settlement Index* (SI) ditampilkan sebagai berikut pada Tabel 7 dibawah ini. Batasan dari penilaian mengemukakan nilai

**Tabel 7.** Nilai *settlement index* yang terjadi pada Bendungan Bajulmati pada masa operasi 3 tahun (% terhadap tinggi bendungan)

<i>Mid to downstream region of the crest</i>		
<i>SMP</i>	<i>Settlement index</i>	<i>Nilai Rujukan</i>
CS 1	0,01	SI ≤ 0,02
CS 2	0,01	
CS 3	0,01	
CS 4	0,01	
CS 5	0,02	

<i>Mid to upper region of the downstream slope</i>		
<i>SMP</i>	<i>Settlement index</i>	<i>Nilai Rujukan</i>
SS 1	0,01	SI ≤ 0,02
SS 2	0,01	
SS 3	0,01	
SS 4	0,01	
SS 5	0,01	
SS 6	0,01	
SS 7	0,001	
SS 8	0,003	
SS 9	0,004	
SS 10	0,004	

*Settlement index* adalah lebih besar dari 0,02 dapat mengindikasikan perilaku deformasi “abnormal”.

Hasil analisis perilaku deformasi pada Bendungan bajulmati pasca konstruksi (Tabel 6) dievaluasi dengan metode Hunter dan Fell (2003) didapati perilaku tidak normal pada zona *Mid to downstream region of the crest* yang diketahui dari analisis hasil bacaan instrumentasi CS 5 yang melebihi batas kriteria penerimaan dengan kisaran 0,05 % s.d. 0,55 % terhadap tinggi bendungan pada 3 (tiga) tahun pertama, Sedangkan untuk zona *mid to upper region of the downstream slope* didapatkan perilaku deformasi yang tidak normal pada instrumentasi SS1, SS2, SS3, dan SS 4, umumnya lebih besar dari kriteria penerimaan yaitu 0 s.d. 0,35 % terhadap tinggi bendungan. Instrumentasi CS 1, CS 2, CS 3, CS4, SS5, SS 6, SS 7, SS 8, SS9, SS10 berperilaku normal. Evaluasi berdasarkan Metode oleh Clements (1984), Dascal (1987) dan Metode Metode Sowers dkk. (1965) bahwa perilaku deformasi pasca konstruksi pada Bendungan Bajulmati adalah normal. Evaluasi *Settlement Index* (SI) pada (Tabel 7), instrumentasi CS 5 pada zona *Mid to downstream region of the crest* mempunyai nilai *Settlement Index* (SI) sama dengan kriteria penerimaan penurunan sehingga dianggap berpotensi tidak normal, dan yang lainnya berperilaku normal.

#### 4. Kesimpulan

Dapat disimpulkan perilaku deformasi vertikal internal Bendungan Bajulmati selama konstruksi (*during construction*) berperilaku normal. Saat pengisian awal

(*first filling*) Bendungan Bajulmati perilaku deformasi horisontal terdapat 4 (empat) titik pada bagian puncak bendungan berperilaku tidak normal, sedangkan bagian bahu hilir berperilaku normal. Perilaku deformasi vertikal (*settlement*) pasca konstruksi (*post construction*) pada Bendungan Bajulmati yang dianalisis, terdapat perilaku tidak normal pada satu titik pada puncak bendungan di dekat sandaran kanan, sedangkan bagian bahu hilir terdapat terdapat empat titik di dekat sandaran kiri berperilaku tidak normal. Dengan demikian perilaku deformasi pada Bendungan Bajulmati berdasarkan hasil evaluasi kriteria penerimaan, sebagian besar instrumen memenuhi kriteria penerimaan deformasi sehingga dianggap normal. Sedangkan sebagian kecil tidak memenuhi kriteria penerimaan karena nilainya diluar dari ambang batas yang dirujuk. Studi kasus yang menunjukkan deformasi "abnormal" pada Bendungan Bajulmati tidak serta merta menyatakan bahwa bendungan tidak aman. Hasil tersebut dapat menjadi perhatian dan rekomendasi untuk analisis lebih lanjut mengenai perilaku deformasi abnormal yang terjadi. Perlu adanya strategi penanganan tindak lanjut sehingga antisipasi keamanan struktur berupa aman terhadap kegagalan struktural, aman terhadap kegagalan hidraulik, dan aman terhadap kegagalan rembesan dapat terjamin.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada BBWS Brantas yang telah berkenan untuk membantu dalam informasi dan data penelitian ini, dan kepada semua pihak yang telah membantu untuk penyelesaian penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- Astuti, Y., Masrevaniah, A., & Marsudi, S. (2012). Analisa Rembesan Bendungan Bajulmati terhadap Bahaya Piping untuk Perencanaan Perbaikan Pondasi. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 3(1), 51-60.
- Charles, J. A. (1986). The significance of problems and remedial works at British earth dams. In *Proceedings of BNCOLD/IWES Conference on Reservoirs*. London: Institution of Civil Engineers, 123-141.
- Clements, R. P. (1984). Post-construction deformation of rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(7), 821-840.
- Dascal, O. (1987). Postconstruction deformations of rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(1), 46-59.
- Evanale Orfa, L., & Samad, A. (2019). Analisis Perilaku Instrumen Pembacaan Tekanan Air Pori Pada Bendungan Bajulmati. *Seminar Nasional Teknologi dan Rekayasa (SENTRA) 2019*.
- Hunter, G., & Fell, R. (2002). *The deformation behaviour of rockfill*, UNICIV Report No. R-405, Sydney : The University of the New South Wales.
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(10), 909-917.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2015 (2015). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No.27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*.
- Nanda, T. N., & Hamdhan, I. N. (2016). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 2(4), 148.
- Rakhman, H. (2015). *Pendugaan Zona Rembesan Di Bendungan Bajulmati, Kabupaten Banyuwangi, Berdasarkan Analisis Litologi Dengan Menggunakan Data Magnetik dan Geolistrik*. *Disertasi*, Universitas Brawijaya.
- Sowers, G. F. (1965). Consistency. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 391-399.
- Training Aids for Dam Safety(2011). *Evaluation of Embankment Dam Stability and Deformation*. Westminster, Colorado: U.S. Committee on Large Dams.
- United States Bureau of Reclamation (1989). *Design Standards, Embankment dams No.13*, Chapter 13: Seismic design and analysis. Denver: US Bureau of Reclamation.
- United States Bureau of Reclamation (2011) *Embankment Dams Design Standart No. 13*, Chapter 9: Static Deformation Analysis. Denver: US Bureau of Reclamation.