

ANALISIS STABILITAS LERENG BENDUNGAN SUTAMI BERDASARKAN PETA GEMPA 2017

Yulia Amirul Fata¹, Ery Suhartanto²

¹Mahasiswa Program Sarjana Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

e-mail : yuliaamirul@gmail.com, erysuhartanto@yahoo.com

ABSTRAK: Peta gempa 2017 menunjukkan percepatan gempa terbaru di Indonesia. Penelitian bertujuan mengetahui kondisi terkini dan stabilitas lereng Bendungan Sutami sehingga didapatkan batas aman kala ulang gempa dan rekomendasi. Analisis kondisi terkini menggunakan data instrumentasi dan gempa lalu stabilitas lereng dianalisis bertahap sesuai pedoman. Sehingga diketahui batas aman kala ulang gempa dan rekomendasi yang sesuai. Kondisi terkini Bendungan Sutami menyatakan hasil aman, namun terdapat hal-hal yang perlu diperhatikan. Stabilitas lereng menunjukkan hasil kondisi statik 97,778% aman, OBE 100 81,111% aman, OBE 200 55,556% aman, dan MDE 100% tidak aman. Analisis dinamik *Makdisi and Seed* dan *Swaisgood* menyatakan aman. Batas aman pada percepatan 0,25g dengan kala ulang OBE 500 tahun serta intensitas gempa sebesar 4,3 M dan V MMI(II SIG BMKG). Rekomendasi dengan mengevaluasi sistem drainase permukaan dan penggunaan pola operasi dengan memperhatikan stabilitas lereng bendungan.

Kata kunci : peta gempa 2017, bendungan sutami, stabilitas lereng, batas aman, rekomendasi

ABSTRACT: The 2017 earthquake map showed the latest earthquake acceleration in Indonesia. The research was aimed to know the current condition and slope stability of the Sutami Dam so obtained safe limit of the earthquake and recommendation. Analysis of current conditions used instrumentation and earthquake data then slope stability was analyzed gradually according to the guidelines. So as to know the earthquake safe limit and fitted recommendations. The current condition of the Sutami Dam states results were safe, but there are things to be notice. Slope stability shows result 97.778% static were safe, OBE 100 81.111% safe, OBE 200 55.556% safe, and MDE 100% unsafe. The dynamic analysis of Makdisi and Seed and Swaisgood stated safe. Safe limit at 0.25g acceleration with OBE 500 years and earthquake intensity were 4.3 M and V MMI (II SIG BMKG). Recommendations by evaluated the surface drainage system and the use of operated patterns with respect to the stability of the dam slope.

Keywords: 2017 earthquake map, sutami dam, slope stability, safe limit, recommendation

Bendungan merupakan bangunan air berskala besar yang berfungsi menampung air untuk memenuhi kebutuhan manusia. Menimbang dari Keputusan Direktur Jenderal Sumber Daya Air No. 257 Tahun 2011 bahwa bendungan sebagai bangunan yang memiliki kemanfaatan umum, diperlukan upaya pengamanan agar diperoleh manfaat selama mungkin serta jaminan atas keselamatan masyarakat di hilirnya. Stabilitas bendungan merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi dalam pembangunan bendungan, bila syarat stabilitas tersebut tidak

terpenuhi, maka akan mengakibatkan masalah keamanan bendungan yang berupa kebocoran, rembesan, longsor, erosi, dan retakan pada tubuh bendungan.

Kajian instrumentasi pemantauan Keamanan Tubuh Bendungan (KTB) akan memberikan informasi keterkaitan gempa dengan instrumentasi yang ada. Berdasarkan Laporan Triwulan I Tahun 2015 Keamanan Tubuh Bendungan Sutami, baru-baru ini masalah yang dihadapi Bendungan Sutami adalah retakan di puncak tubuh bendungan yang terjadi pada tahun

2014. Menurut Pakar Geofisika yang juga Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (F-MIPA) Universitas Brawijaya (UB) Malang, Adi Susilo, mengatakan terkait retakan tersebut perlu dilakukan penelitian menyeluruh guna mengetahui penyebab keretakan bangunan bendungan yang bisa jadi akibat pergeseran tanah karena beberapa faktor dampak dari gempa bumi di wilayah selatan kabupaten Malang dan terjadinya pola patahan.

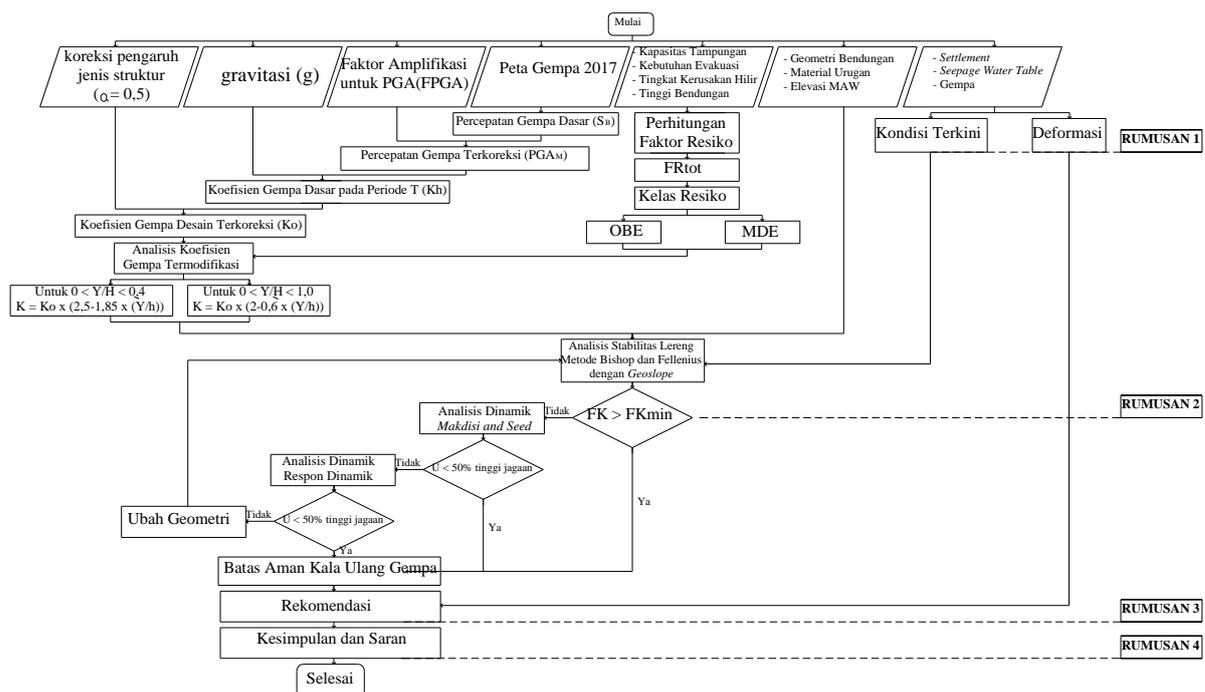
Berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa (2004: 26), dalam analisis stabilitas bendungan urugan akibat beban gempa pada umumnya digunakan data ragam percepatan gempa desain yang diperoleh dari hasil pencatatan akselerograf. Namun pada bahasan studi digunakan percepatan gempa yang diperoleh dari Peta Gempa 2017 yang merupakan pembaharuan dari peta gempa sebelumnya. Analisis stabilitas lereng bendungan terhadap parameter gempa dapat dilakukan dengan bantuan program *GeoSlope*. Program

tersebut dapat menghitung stabilitas lereng bendungan dengan analisis statis dan dinamis bendungan. Sehingga dapat diketahui kondisi terkini bendungan terhadap pengaruh beban seismik yang mungkin terjadi di lokasi bendungan atau di sekitar bendungan yang masih memiliki pengaruh.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan alat yang digunakan pada penelitian ini adalah personal komputer, *Software AutoCad 2007*, *Software GeoStudio 2007*, *Software Microsoft Office 2013*.

Pengumpulan data dilakukan secara sekunder yang meliputi data gambar *as built drawing*, data material hasil pengujian test pit terbaru serta data pengujian parameter dinamik oleh Balai BHGK-Puslitbang pada tahun 2014 Bendungan Sutami, data instrumenasi *seepage water table* dan *settlement*, data hasil pengukuran geolistrik konfigurasi *wenner schlumberger*.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Sumber: Hasil Penggambaran, 2018

Kondisi terkini ditinjau dari analisis instrumentasi *seepage water table* melalui *observation well/hole*, *settlement* melalui patok pengukuran menggunakan *waterpass*, pengukuran geolistrik konfigurasi *wenner schlumberger*, lalu dihubungkan dengan kondisi gempa yang terjadi

di area bendungan yang didapatkan dari BMKG (Badan Meteorologi dan Geofisikan).

Analisis stabilitas lereng dimasukkan koefisien gempa berdasarkan lokasi bendungan terhadap peta gempa 2017 dengan periode ulang didapatkan berdasarkan hasil analisa sesuai

Pedoman Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa 2004. Peta percepatan gempa boleh jadi untuk periode ulang 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5000, dan 10000 tahun yang kemudian digabungkan menjadi satu peta zona gempa dapat digunakan untuk memprediksi percepatan gempa untuk periode ulang tertentu.

Berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa (2004: 50), cara koefisien gempa yang telah diuraikan perlu dimodifikasi karena sudah tidak sesuai lagi. Oleh karena itu, digunakan cara dari Jepang “*Seismic Design Guideline fo Fill Dam*”. Koefisien gempa desain pada tubuh bendungan yang merupakan fungsi dari kedalaman, dapat dihitung dengan persamaan.

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad (1)$$

K merupakan koefisien gempa terkoreksi di permukaan tanah, α_2 merupakan koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan = 0,5, dan K_h merupakan koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang T

Dalam analisis stabilitas ini koefisien gempa pada kedalaman Y dari puncak bendungan berbeda-beda. Untuk analisis stabilitas, peninjauan dilakukan pada $Y = 0,25H$; $0,5H$; $0,75H$ dan H (H ialah tinggi bendungan) dengan menggunakan K_h pada periode ulang sesuai dengan yang dipersyaratkan. Koefisien gempa rata-rata K pada Y yang berbeda-beda dapat dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

Untuk $0 < Y/H \leq 0,4$

$$K = K_o \times (2,5 - 1,85 \times (Y/h)) \quad (2)$$

Untuk $0,4 < Y/H \leq 1$

$$K = K_o \times (2 - 0,6 \times (Y/h)) \quad (3)$$

Analisis stabilitas dilakukan dengan metode keseimbangan batas dengan menggunakan koefisien gempa K yang keluarannya berupa faktor keamanan. Kala ulang gempa yang dipakai bergantung pada hasil kala ulang OBE (*Operating Basis Earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*) sesuai tipe dan parameter Bendungan Sutami.

Bendungan Sutami merupakan bendungan zonal dengan inti tegak yang tersusun dari beberapa material. Menurut Hardiyatmo (2010: 443), metode irisan adalah metode yang cocok untuk kondisi tanah tidak homogen dan aliran rembesan yang terjadi dalam tanah tidak menentu. Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Dalam

metode irisan, massa tanah byang longsor dipecah-pecah menjadi beberapa irisan vertikal. Digunakan dua metode yang relevan terhadap prinsip ini yaitu Fellenius dan Bishop. Metode Fellenius menghasilkan faktor aman yang lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Besarnya nilai kesalahan dapat tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode Fellenius serta membutuhkan cara coba-coba karena nilai F ada di kedua sisi persamaan. Akan tetapi, cara ini telah terbukti menghasilkan nilai faktor aman yang mendekati hasil hitungan dengan cara lain yang lebih teliti. Karena itu, walaupun metode Fellenius lebih mudah, metode Bishop lebih disukai (Hardiyatmo, 2010: 446-453).

Analisis dinamik dilanjutkan menggunakan metode *Makdisi-Seed (Simplified Method)*. *Makdisi-Seed (1978)* menggunakan percepatan gempa rata – rata dalam menghitung deformasi pada timbunan berdasarkan pada prosedur Copra (1966) dan *Sliding Block Analysis*. Dengan penyederhanaan Metode Elemen Hingga dinamik dan analisis balok geser dari beberapa struktur, metode sederhana ini dapat memprediksi besarnya *permanent displacement* yang akan terjadi. Sebagai kalibrasi digunakan metode *Swaisgood* yang merupakan metode empiris hasil dari banyak catatan penurunan puncak bendungan yang terjadi di lapangan akibat beban gempa dari 69 kejadian gempa di dunia (Swaisgood, 2003: 3). Dari kejadian gempa tersebut dibuatlah suatu persamaan yang digambarkan melalui grafik sehingga diketahui prosentase estimasi penurunan puncak bendungan.

Batas aman kala ulang didapatkan dari hasil perhitungan menggunakan peta gempa 2017 dan data USGS (*United States Geological Survey*) lalu dimasukkan pada tabel *Geologic Hazards*. Hasilnya sebagai pembanding standar operasional yang digunakan sebagai inspeksi pasca gempa pada Bendungan Sutami. Rekomendasi apabila dalam keadaan tidak stabil didasarkan pada pencegahan dan penanggulangan sementara sesuai dengan Buku Teknis Perencanaan dan Penanggulangan Longsoran dari DirJen Bina Marga. Adapun parameter yang digunakan adalah hasil geolistrik serta stabilitas lereng yang telah dihitung sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

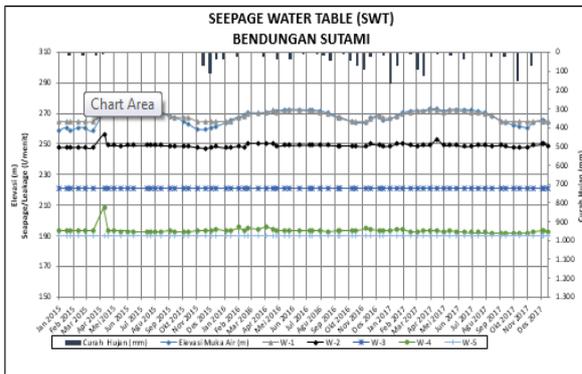
Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa (2004, iv), suatu

bendungan tipe urugan yang menahan air dalam volume yang besar harus mempertimbangkan faktor keamanan terhadap pengaruh kestabilan bendungan dengan mempertimbangkan persyaratan beban baik persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan atau *Maximum Design Flood (MDE)* ataupun persyaratan tanpa kerusakan atau *Operating Basis Earthquake (OBE)*. Hasil dari analisis tersebut akan digunakan sebagai bahan evaluasi perilaku bendungan dan keamanan bendungan terhadap besaran guncangan berdasarkan Peta Gempa 2017.

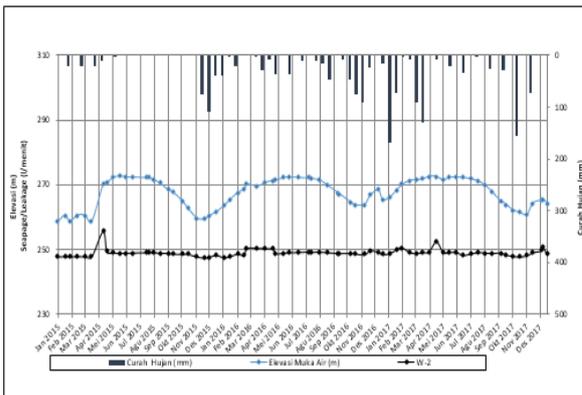
Analisis Kondisi Terkini Bendungan Sutami

1. Seepage Water Table

Seepage Water Table adalah tinggi muka air rembesan melalui tubuh bendungan yang diukur menggunakan instrumen berupa *observation well/hole*.



Gambar 2. Grafik Pengukuran SWT
 Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2018



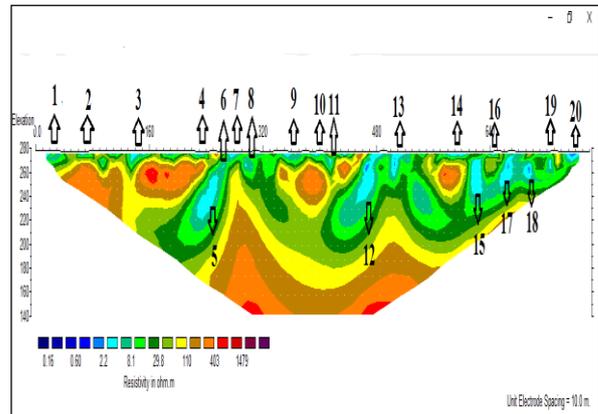
Gambar 3. Grafik Hubungan W2, MAW, dan Curah Hujan
 Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2018

Untuk mengetahui elevasi muka air pada tubuh Bendungan Sutami terdapat 5 buah sumur pantau (*observation well/hole*) di tubuh bendungan, yaitu: W-1 s.d W-5 yang dipasang satu garis melintang tubuh bendungan. Berdasarkan hasil

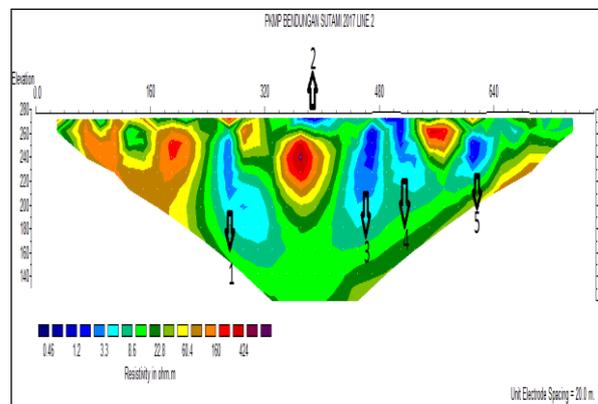
pemantauan, *observation well/hole* W-3 dan W-5 relatif dalam kondisi kering yang kemungkinan disebabkan instrumen tertutup oleh material bendungan itu sendiri, sehingga garis freatis berada di bawah material bendungan dan tidak dapat terukur.

.Dari grafik diatas dapat diketahui nilai muka air rembesan tertinggi dari Januari 2015 hingga Maret 2017 terjadi pada 25 Juni 2015 di W-1 pada elevasi 272.17 m dengan elevasi muka air sebesar 272.67 dan curah hujan total sebesar 130 mm. Sedangkan nilai muka air terendah terjadi pada W-5 sebesar 190.25 m, elevasi tersebut terjadi sepanjang tahun dikarenakan kondisi instrumen telah rusak atau hilang. Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa tinggi muka air rembesan masih dalam batas normal karena berada dibawah elevasi air waduk juga memenuhi standar kebertrimaan yaitu nilai GWL W-2 dibawah 260.16 m pada HWL 272.50 m.

2. Analisis Seepage Water Table menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner Schlumberger



Gambar 4. Hasil Intepretasi Line 1
 Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2017



Gambar 5. Hasil Intepretasi Line 2
 Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2017

Pengukuran dimulai pada *Line I (upstream)* dilanjutkan ke *Line II (downstream)* dengan spasi 10 m sejauh 780 m menggunakan geolistrik konfigurasi Wenner Schlumberger didapatkan kedalaman vertikal maksimal 140 m. Berikut hasil interpretasi hasil program RES2DINV berdasarkan nilai resistivitas batuan.

Tabel 1. Jenis Batuan Berdasarkan Resistivitas

Resistivitas	Warna	Jenis	Keterangan Batuan	K* (mm/hari)
1	2	3	4	5
0,16-3,3	Biru tua-Biru muda	Napal Basah	Berpotensi mengandung air yang berasal dari waduk dan air hujan	>> 0,025
3,3-60,4	Hijau - Coklat Tua	Napal	Tanah yang ada pada daerah kapur berkarakteristik berbutir halus (lempung) hingga sedikit kasar (berpasir)	0,025
60,4-424	Kuning - Orange	Batu Pasir Gampingan	Digunakan sebagai penyusun inti (<i>core</i>) bendungan	0,05
424-1479	Merah-Ungu	Bedrock	Terdiri dari campuran batuan keras berukuran besar atau boulder yang terdiri dari andesit/ lava dan batuan gampingan	~1

Sumber: Hasil Analisa dan Buku Air Tanah (Bisri, 2008)

Hasil analisa menunjukkan adanya pola rembesan yang terbentuk dari zona basah dalam dan zona basah permukaan di dalam bendungan.

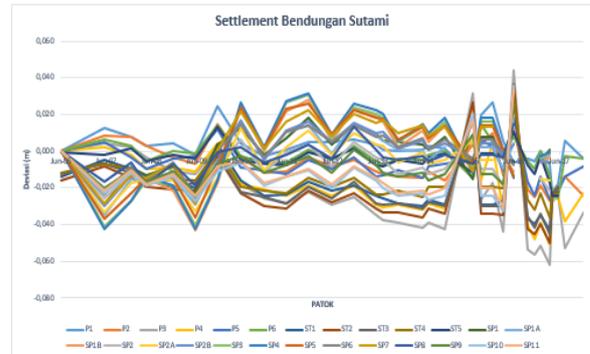
Tabel 2. Rekapitulasi Hubungan Gempa dan Instrumentasi di Bendungan Sutami

Seepage Water Table					Settlement				Gempa					
Waktu	MAW (m)	R (mm)	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	Waktu	Deviiasi Puncak (m)	Deviiasi Loreng (m)	Waktu	Gempa		
26-Jan-15	260,6	21	264,88	247,91	220,64	193,49	190,25	14/01/2015				4,7 SR (II SIG)		
28-Ago-15	270,66	0,00	270,19	249,48	220,64	193,42	190,25							
12-May-15	272,19	4,3	270,78	249,07	220,64	193,45	190,25	01/05/2015				5,2 SR (III MMT)		
25-Jul-15	272,13	0	271,82	249,17	220,64	192,65	190,25							
31-Jul-15	272,08	0	271,86	249,16	220,64	192,64	190,25	Jul-15	0,031	0,026	26/07/2015	28/07/2015	5,9 SR (IV MMT)	7,2 SR
24-Aug-15	270,45	0	271,061	248,955	220,643	192,437	190,251							
11-Sep-15	268,39	0	268	248,91	220,64	193,38	190,25							
21-Sep-15	267,73	0	267,6	248,72	220,64	192,8	190,25	Sep-15	0,026	0,02	08/09/2015	10/09/2015	4,4 SR (IV MMT)	4,9 SR (III MMT)
12-Oct-15	264,93	0	267,52	248,6	220,64	192,82	190,25				06/10/2015		5,3 SR	
13-Nov-15	259,67	0	264,9	247,81	220,64	193,33	190,25				11/11/2015		5,6 SR	
30-Nov-15	259,33	75	264,9	247,44	220,64	193,12	190,25	Nov-15	0,04	0,022				
12-Dec-15	260,61	110	264,902	247,725	220,643	193,497	190,251							
23-Dec-15	261,43	40	264,9	248,26	220,64	193,79	190,25				22/12/2015	22/12/2015	6,1 SR	4,9 SR
26-Jan-16	265,5	2	264,901	247,933	220,643	193,647	190,251							
12-Feb-16	267,67	22	267,18	248,69	220,64	195,29	190,25				10/02/2016		4,2 SR (II MMT)	
26-Feb-16	268,51	0	268,082	248,123	220,643	193,357	190,251							
2-Mar-16	270,19	0	269,71	250,33	220,64	194,59	190,25				02/03/2016		5,2 SR (IV MMT)	
24-Jan-16	272,24	0	271,992	249,215	220,643	193,657	190,251							
18-Jul-16	272,02	12	271,74	249,34	220,64	193,33	190,25				18/07/2016		5,5 SR (II MMT)	
23-Jul-16	271,9	0	271,24	249,28	220,64	192,08	190,25	Jul-16	0,044	0,036				
25-Aug-16	269,81	17	269,522	249,115	220,643	192,767	190,251							
19-Sep-16	267,53	47	267,2	248,9	220,64	193,45	190,25				18/09/2016		4,6 SR (II SIG)	
22-Sep-16	267,33	0	267,01	248,85	220,64	193,37	190,25				22/09/2016		5,1 SR (II SIG)	
26-Oct-16	263,83	47	264,902	248,775	220,643	193,237	190,251							
17-Nov-16	263,84	75	264,9	248,46	220,64	194,447	190,25				16/11/2016		6,2 SR	
30-Nov-16	266,74	92	266,322	249,685	220,643	194,107	190,251							
18-Dec-16	268,42	25	267,99	249,26	220,64	193,42	190,25				07/12/2016		6,5 SR	
27-Jan-17	268,32	169	268,012	249,955	220,643	194,257	190,251							
8-Feb-17	270,09	73	269,67	250,67	220,64	193,88	190,25				29/01/2017	08/02/2017	4,9 SR (II MMT)	4,9 SR (II MMT)
27-Mar-17	271,8	91,00	271,42	249,18	220,64	193,42	190,25	Mar-17	-0,061574806	-0,050317146				
09-Ago-17	272,7		272,17	249,35	220,64	193,65	190,251				08/04/2017		3,7 SR (II SIG)	
25-Ago-17	272,6	130	272,12	252,59	220,64	193,45	190,251	Apr-17	-0,027665467	-0,02409497				
10-Mei-17	271,5	8,00	271,03	249,21	220,64	192,77	190,251	Mei-17	-0,025863778	-0,024172867	27/04/2017	24/05/2017	4,7 SR (II SIG)	5,5 SR (II SIG)
26-Agu-17	267,82	1,00	268,45	248,90	220,64	191,56	190,251	Jul-17	-0,052524876					
14-Sep-17	264,98		264,90	249,04	220,64	191,41	190,251				01/09/2017		5 SR	
26-Sep-17	263,93	26,00	264,90	248,36	220,64	191,39	190,251							
25-Oct-17	261,51	28,00	264,90	247,76	220,64	191,24	190,251				25/10/2017		4,9 SR	
11-Nov-17	260,76	157,00	264,90	248,16	220,64	191,53	190,251							
24-Nov-17	264,33		264,90	249,08	220,64	192,74	190,251				16/11/2017		6,2 SR	
16-Dec-17	265,44		264,92	250,89	220,64	193,28	190,25							
16-Dec-17	264,32	71,00	264,90	248,41	220,64	192,23	190,25	Dec-17	-0,033346354		24/12/2017		4,4 SR	

Sumber: Hasil Analisa, 2008

3. Settlement

Pada Bendungan Sutami telah dilakukan pemantauan pergerakan vertikal sejak tahun 2006 menggunakan sipat datar hingga sekarang, sedangkan pergerakan horizontal mulai dilakukan pada Agustus 2016 menggunakan alat TS (*Total Station*).



Gambar 6. Grafik Pergerakan Vertikal Sutami
Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2017

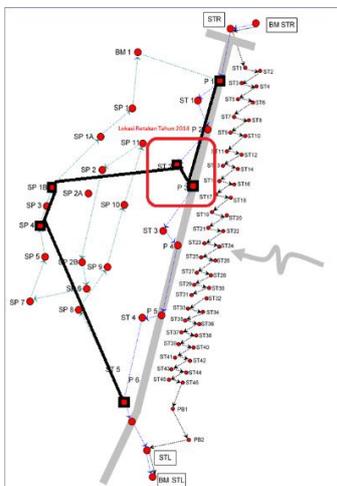
Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui besarnya deviasi atau penurunan yang terjadi di Bendungan Sutami selalu beragam. Deviasi terbesar terjadi pada bulan Maret 2017 sebesar 0.0616 m. Dari deviasi tersebut Bendungan Sutami masih dapat dikatakan aman terhadap pengaruh deformasi karena batas maksimum yang diizinkan adalah ± 1 m.

4. Gempa Bumi

Analisis ini dilakukan guna membuktikan pengaruh gempa yang terjadi di Bendungan Sutami dengan Settlement dan Seepage Water Table sehingga dapat diketahui hubungan dari ketiganya. Data gempa didapatkan dari studi website dan BMKG dengan waktu kejadian 2015-2017.

Dari 13 kelompok data yang ada terdapat 10 kelompok data yang mengalami perbedaan trend hasil pengukuran *seepage water table* ditandai dengan warna putih. Dilihat dari kondisi gempa yang terjadi ternyata 3 kelompok data yang tidak mengalami perbedaan trend gempa yang terjadi ada di kisaran II MMI, II SIG, dan IV MMI. Berdasarkan SOP yang ada pemeriksaan pasca gempa dilakukan bila gempa lebih dari III MMI, sehingga gempa dibawah standar tersebut relatif aman. Pada 10 kelompok data yang mengalami anomali mayoritas gempa yang terjadi lebih dari 5 SR atau \geq III MMI. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa gempa yang terjadi pada kondisi lebih dari standar keberterimaan terbukti berpengaruh.

Pada tabel 2 diketahui deviasi terbesar dari patok yang terpasang, setelah dikaji dapat dilihat nilai maksimum pada patok P1 1 data, P3 17 data, P6 1 data, ST2 6 data, SP1B 2 data, dan SP4 5 data. Dari denah pengukuran pada gambar 7 menunjukkan patok P3 dan ST2 merupakan lokasi adanya retakan yang terjadi di puncak bendungan. Dari dua patok yang memiliki deviasi maksimum terbanyak tersebut membuktikan bahwa gempa yang ada berpengaruh pada kondisi deformasi di Bendungan Sutami serta memiliki hubungan dengan retakan yang ada di puncak bendungan yang juga terindikasi berhubungan dengan pola rembesan.



Gambar 7. Patok Kritis pada Patok Pengukuran Bendungan Sutami
 Sumber: Hasil Penggambaran, 2018

5. Pembahasan

Berdasarkan pembahasan diatas dapat diketahui bahwa secara instrumentasi Bendungan Sutami masih dalam kondisi aman, namun terdapat beberapa hal yang membutuhkan perhatian guna menjaga keamanan tubuh bendungan.

Stabilitas Lereng Bendungan Sutami

Dimulai dengan analisis resiko berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa 2004 didapatkan Bendungan Sutami memiliki kelas resiko IV dengan tinggi 100 m sehingga harus dilakukan menggunakan analisis bertahap dimulai dengan menggunakan cara koefisien gempa termodifikasi, jika faktor kermanan ≤ 1 perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen yang menggunakan cara *Makdisi & Seed* dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggi jagaan, jika tidak memenuhi syarat perlu dilanjutkan dengan analisis respons dinamik yang menggunakan cara elemen hingga.

Kelas resiko juga menunjukkan kala ulang OBE sebesar 100 – 200 tahun dan MDE sebesar 10.000 tahun. Selanjutnya dilakukan perhitungan koefisien gempa dan dibandingkan dengan perhitungan antar peta gempa dan didapatkan hubungan seperti grafik dibawah.

Tabel 3. Koefisien Gempa Termodifikasi Sutami

No	Periode Ulang T (Tahun)	S _B (g)	F _{PGA} (g)	P _{GAM} (g)	K _h	K _o	K			
							y = 0,25h	y = 0,5h	y = 0,75h	
							8	9	10	
1	100	0,15	0,8	0,12	0,12	0,06	0,12225	0,102	0,093	0,084
2	200	0,2	0,8	0,16	0,16	0,08	0,163	0,136	0,124	0,112
3	10000	0,7	0,8	0,56	0,56	0,28	0,5705	0,476	0,434	0,392

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018



Gambar 8. Grafik Percepatan antar Peta Gempa
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Secara OBE maka peta gempa yang memiliki koefisien gempa tertinggi adalah peta gempa 2004 > peta gempa 2010 > peta gempa 2017. Sedangkan untuk MDE koefisien tertinggi adalah peta gempa 2010 > peta gempa 2017 > peta gempa 2004.

Tabel 3. Koefisien Gempa Termodifikasi Sutami

No	Kondisi	Elevasi
1	Muka Air Banjir	+277
2	Muka Air Normal	+272,5
3	Muka Air Rendah	+246
4	Surut Cepat 1	+272,5 ke +246
5	Surut Cepat 2	+273,51 ke +254,1

Sumber: Data Teknis Bendungan Sutami

Tabel 4. Data Material Bendungan Sutami

Material	Gamma Jenuh	Sudut Geser Dalam	Kohesi (c)
	(kN/m ³)	(ϕ)	(kPa)
1	2	3	4
Core Dam	16,57	27	10
Coarse Rockfill	21,1896	38	0
Randomfill	22	42	
Filter/Drain	20	35	0
Fondation	20,1105	33	0

Sumber: Hasil Pengujian Test Pit Terbaru serta Data Pengujian Parameter Dinamik Oleh Balai BHGK-Puslitbang pada Tahun 2014 Bendungan Sutami

Tabel 5. Rekapitulasi FK Tanpa Gempa

No	Kondisi	UPSTREAM								
		MAINDAM & COFFERDAM			MAINDAM			DOWNSTREAM		
		F	B	J	F	B	J	F	B	J
1	NWL	2,754	3,281	3,145	1,706	1,998	1,935	1,564	1,567	1,564
2	LWL	2,611	2,937	2,809	1,457	1,573	1,525	1,564	1,567	1,564
3	MAB	2,797	3,362	3,237	2,236	2,697	2,593	1,564	1,567	1,564
4	RDD 1	2,589	2,918	2,784	2,003	2,264	2,168	1,564	1,567	1,564
5	RDD 2	2,644	3,032	2,887	1,412	1,591	1,542	1,587	1,591	1,587

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Tabel 6. Rekapitulasi FK pada OBE 100 tahun

No	Kondisi	UPSTREAM								
		MAINDAM & COFFERDAM			MAINDAM			DOWNSTREAM		
		F	B	J	F	B	J	F	B	J
y/h = 0,25; K = 0,12225										
1	NWL	1,181	1,289	1,237	1,181	1,289	1,237	1,18	1,184	1,18
2	LWL	1,18	1,184	1,18	1,18	1,184	1,18	1,18	1,184	1,18
3	MAB	1,455	1,469	1,468	1,455	1,469	1,468	1,18	1,184	1,18
4	RDD 1	1,18	1,184	1,18	1,18	1,184	1,18	1,18	1,184	1,18
5	RDD 2	1,494	1,495	1,491	1,551	1,552	1,548	1,271	1,274	1,27
y/h = 0,5; K = 0,102										
1	NWL	1,245	1,43	1,384	1,131	1,152	1,149	1,233	1,236	1,233
2	LWL	1,502	1,613	1,564	1,036	1,1	1,086	1,233	1,236	1,233
3	MAB	1,436	1,685	1,633	1,02	1,202	1,174	1,233	1,236	1,233
4	RDD 1	1,512	1,617	1,565	1,025	1,1	1,077	1,233	1,236	1,233
5	RDD 2	1,52	1,667	1,607	1,174	1,243	1,2	1,271	1,275	1,271
y/h = 0,75; K = 0,093										
1	NWL	1,802	2,152	2,05	1,06	1,24	1,208	1,258	1,261	1,258
2	LWL	1,782	1,994	1,895	1,116	1,211	1,183	1,258	1,261	1,258
3	MAB	1,835	2,205	2,107	1,1	1,299	1,27	1,258	1,261	1,258
4	RDD 1	1,76	1,974	1,874	1,204	1,33	1,29	1,258	1,261	1,258
5	RDD 2	1,777	2,023	1,919	1,092	1,211	1,166	1,279	1,283	1,279
y/h = 1; K = 0,084										
1	NWL	1,548	1,843	1,774	1,339	1,618	1,564	1,283	1,286	1,283
2	LWL	1,591	1,79	1,717	1,386	1,566	1,512	1,283	1,286	1,283
3	MAB	1,557	1,877	1,809	1,389	1,688	1,637	1,283	1,286	1,283
4	RDD 1	1,583	1,783	1,706	1,375	1,559	1,503	1,283	1,286	1,283
5	RDD 2	1,579	1,813	1,733	1,027	1,162	1,126	1,3	1,304	1,3

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Tabel 7. Rekapitulasi FK pada OBE 200 tahun

No	Kondisi	UPSTREAM						DOWNSTREAM		
		MAINDAM & COFFERDAM			MAINDAM			F	B	J
		F	B	J	F	B	J			
y/h = 0,25; K = 0,163										
1	NWL	1,044	1,144	1,094	1,044	1,144	1,094	1,083	1,087	1,084
2	LWL	1,083	1,087	1,084	1,083	1,087	1,084	1,083	1,087	1,084
3	MAB	1,272	1,285	1,283	1,272	1,285	1,283	1,083	1,087	1,084
4	RDD 1	1,083	1,087	1,084	1,083	1,087	1,084	1,083	1,087	1,084
5	RDD 2	1,362	1,363	1,358	1,411	1,412	1,407	1,165	1,168	1,164
y/h = 0,5; K = 0,136										
1	NWL	1,098	1,267	1,226	1,006	1,026	1,023	1,146	1,15	1,146
2	LWL	1,356	1,455	1,413	0,933	1	0,979	1,146	1,15	1,146
3	MAB	1,249	1,472	1,428	0,899	1,067	1,039	1,146	1,15	1,146
4	RDD 1	1,363	1,457	1,412	0,912	1,001	0,972	1,146	1,15	1,146
5	RDD 2	1,355	1,487	1,435	1,069	1,132	1,092	1,181	1,185	1,181
y/h = 0,75; K = 0,124										
1	NWL	1,544	1,849	1,763	0,942	1,107	1,078	1,176	1,179	1,176
2	LWL	1,562	1,748	1,663	1,008	1,095	1,071	1,176	1,179	1,176
3	MAB	1,562	1,888	1,807	0,973	1,156	1,13	1,176	1,179	1,176
4	RDD 1	1,543	1,731	1,644	1,085	1,198	1,164	1,176	1,179	1,176
5	RDD 2	1,549	1,765	1,676	0,989	1,099	1,057	1,195	1,199	1,195
y/h = 1 ; K = 0,112										
1	NWL	1,343	1,603	1,542	1,179	1,428	1,383	1,206	1,21	1,206
2	LWL	1,4	1,575	1,511	1,24	1,402	1,356	1,206	1,21	1,206
3	MAB	1,348	1,628	1,569	1,217	1,484	1,441	1,206	1,21	1,206
4	RDD 1	1,393	1,57	1,503	1,231	1,396	1,348	1,206	1,21	1,206
5	RDD 2	1,384	1,59	1,52	0,934	1,059	1,025	1,222	1,226	1,222

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Tabel 8. Rekapitulasi FK pada MDE 10.000 tahun

No	Kondisi	UPSTREAM						DOWNSTREAM		
		MAINDAM & COFFERDAM			MAINDAM			F	B	J
		F	B	J	F	B	J			
y/h = 0,25; K = 0,5705										
1	NWL	0,397	0,457	0,428	0,397	0,457	0,428	0,522	0,529	0,524
2	LWL	0,522	0,529	0,524	0,522	0,529	0,524	0,522	0,529	0,524
3	MAB	0,473	0,483	0,48	0,473	0,483	0,48	0,522	0,529	0,524
4	RDD 1	0,522	0,529	0,524	0,522	0,529	0,524	0,522	0,529	0,524
5	RDD 2	0,657	0,661	0,656	0,678	0,681	0,676	0,562	0,569	0,564
y/h = 0,5; K = 0,476										
1	NWL	0,421	0,525	0,508	0,307	0,399	0,384	0,611	0,617	0,612
2	LWL	0,628	0,684	0,666	0,38	0,421	0,41	0,611	0,617	0,612
3	MAB	0,466	0,595	0,576	0,31	0,407	0,393	0,611	0,617	0,612
4	RDD 1	0,629	0,684	0,662	0,367	0,419	0,406	0,611	0,617	0,612
5	RDD 2	0,592	0,667	0,645	0,491	0,529	0,503	0,629	0,635	0,63
y/h = 0,75; K = 0,434										
1	NWL	0,578	0,723	0,691	0,357	0,455	0,44	0,656	0,661	0,657
2	LWL	0,656	0,744	0,714	0,435	0,487	0,476	0,656	0,661	0,657
3	MAB	0,576	0,728	0,696	0,364	0,471	0,457	0,656	0,661	0,657
4	RDD 1	0,642	0,736	0,698	0,454	0,526	0,516	0,656	0,661	0,657
5	RDD 2	0,627	0,735	0,698	0,429	0,494	0,473	0,666	0,672	0,667
y/h = 1; K = 0,392										
1	NWL	0,522	0,648	0,621	0,47	0,605	0,586	0,705	0,71	0,706
2	LWL	0,578	0,663	0,636	0,549	0,635	0,616	0,705	0,71	0,706
3	MAB	0,52	0,655	0,627	0,475	0,619	0,602	0,705	0,71	0,706
4	RDD 1	0,578	0,663	0,637	0,544	0,631	0,611	0,705	0,71	0,706
5	RDD 2	0,566	0,665	0,637	0,413	0,486	0,469	0,714	0,719	0,715

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Keterangan:

- F = *Fellenius*
- B = *Bishop*
- J = *Janbu*

Dari ketiga metode diatas dapat dilihat bahwa nilai perhitungan relatif pada *Bishop* > *Janbu* > *Fellenius* dengan perbedaan kisaran tidak begitu jauh. Kriteria yang dipilih untuk kondisi statik dan *Operating Basis Earthquake*(OBE) sesuai dengan poin ke 2 yaitu FKmin tanpa gempa = 1,5 dan FKmin dengan gempa = 1,2. Berbeda dengan kondisi surut cepat yang memiliki FKmin tanpa gempa = 1,3 dan FKmin dengan gempa = 1,1. Sedangkan untuk kondisi *Maximum Design Flood* (MDE) sesuai dengan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa adalah FKmin = 1. Apabila syarat tidak terpenuhi atau FKmin < 1 maka dilakukan analisis Dinamik menggunakan Metode *Makdisi Seed* yang disarankan oleh pedoman.

Berdasarkan hasil perhitungan pada analisis kondisi tanpa gempa memberikan hasil 97,7778 % aman, *Operating Basic Earthquake* (OBE) kala ulang 100 tahun memberikan hasil 81,111 % aman serta ulang 200 tahun memberikan hasil 55,5556 % aman dan kondisi *Maximum Design Earthquake* (MDE) kala ulang 10.000 tahun memberikan hasil 100 % tidak aman (<1). Karena kondisi tersebut seperti yang telah terlampir pada pedoman maka harus dilakukan analisis menggunakan *Makdisi Seed*.

Analisis Dinamik Metode *Makdisi & Seed*

Deformasi permanen dihitung menggunakan dua metode yaitu *Fellenius* dan *Bishop*. *Displacement* maksimum yang diijinkan pada masing-masing lereng dengan berbagai kondisi disyaratkan memiliki nilai $U < 50\%$ dari tinggi jagaan bendungan.

Tinggi jagaan Bendungan Sutami didapatkan dari:
 Elevasi *Normal Water Level* (NWL): +272,5m
 Elevasi Puncak Bendungan : +279m
 Selisih/ Tinggi Jagaan : 6,5m
 50% Tinggi Jagaan : 3,25m

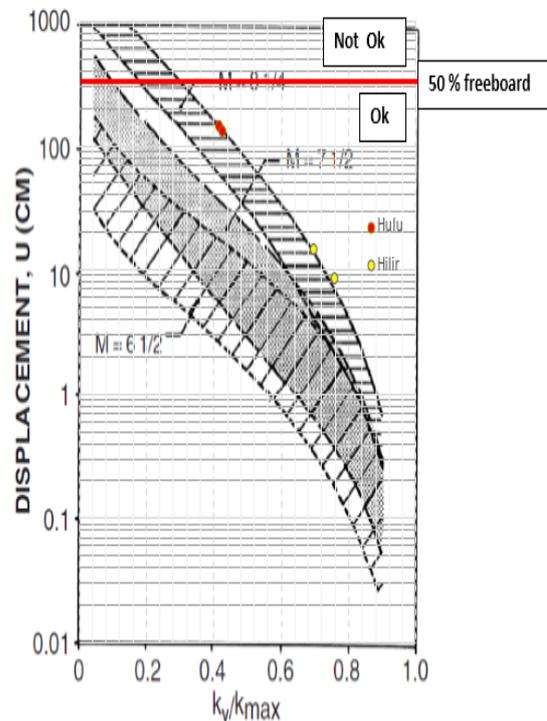
Nilai maksimum deformasi permanen metode *fellenius* pada setiap kondisi:

- a. NWL : 170 cm saat $y/h = 0,75$
- b. LWL : 210 cm saat $y/h = 0,5$
- c. MAB : 230 cm saat $y/h = 0,5$
- d. RDD 1 : 210 cm saat $y/h = 0,5$
- e. RDD 2 : 250 cm saat $y/h = 1$

Nilai maksimum deformasi permanen metode *bishop* pada setiap kondisi:

- a. NWL : 170 cm saat $y/h = 0,5$
- b. LWL : 170 cm saat $y/h = 0,5$

- c. MAB : 90 cm saat $y/h = 0,5$
- d. RDD 1 : 200 cm saat $y/h = 0,5$
- e. RDD 2 : 80 cm saat $y/h = 0,75$



Gambar 9. *Seismic Displacement vs K_y/K_{max} and Magnitude*

Sumber: *Makdisi and Seed* (1978)

Berdasarkan hasil perhitungan deformasi permanen diatas dapat disimpulkan nilai $U < U$ maksimum 325 cm sehingga stabilitas Bendungan Sutami masih memenuhi syarat keamanan stabilitas akibat gempa *Operating Basis Earthquake* (OBE) dan *Maximum Design Earthquake* (MDE).

Analisis Metode *Swaisgood, 2003*

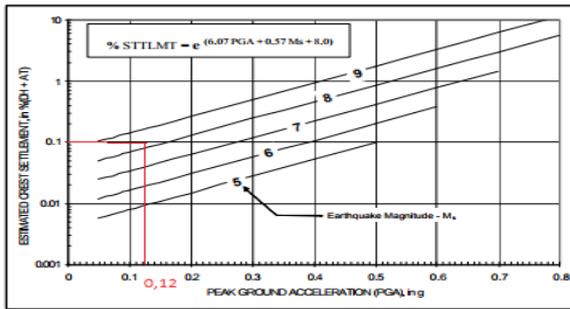
Langkah-langkah perhitungan dalam penggunaan metode ini adalah menggunakan parameter nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) yang didapatkan berdasarkan Peta Gempa 2017. Adapun nilai PGA adalah sebagai berikut:

Tabel 9. Nilai PGA_M Peta Gempa 2017

No	Kondisi	PGA_M (g)
1	OBE T = 100 tahun	0,12
2	OBE T = 200 tahun	0,16
3	MDE T = 10.000 tahun	0,56

Sumber: *Hasil Perhitungan, 2018*

Dari tabel diatas selanjutnya dilakukan *plotting* pada grafik untuk masing-masing kondisi sebagai berikut:



Gambar 10. Grafik Penurunan Puncak Bendungan Kondisi OBE 100 tahun
 Sumber: Makdisi and Seed (1978)

Tabel 10. Hasil Penurunan Berdasarkan PGA_M

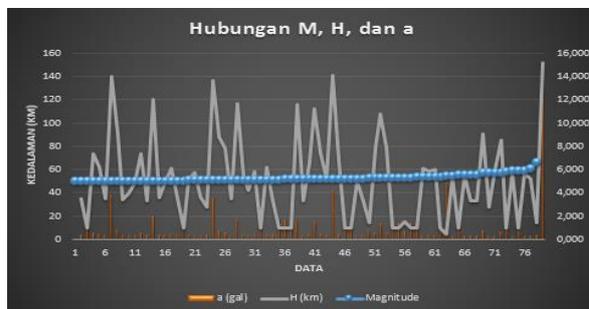
No	Kondisi	PGA_M (g)	Penurunan (%)	Penurunan (cm)
1	OBE T = 100 tahun	0,12	0,1	10
2	OBE T = 200 tahun	0,16	0,13	13
3	MDE T = 10.000 tahun	0,56	1,6	160

Sumber: Hasil Perhitungan, 2018

Hasil perhitungan ini dibandingkan dengan perhitungan maksimum deformasi permanen Metode Makdisi Seed sebesar 250 cm memiliki selisih 90 cm dan masih aman terhadap 50% tinggi jagaan (325 cm).

Batas Aman Kala Ulang Gempa

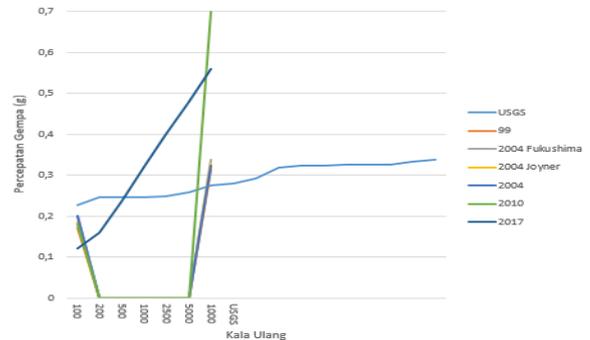
Dalam mengetahui batas aman digunakan data gempa historis dari USGS (*United States Geological Survey*) dengan *magnitude* diatas 5 rentan waktu 20 tahun dari tahun 1998 – 2018. Lalu dihitung percepatan gempa menggunakan rumus *Kawashumi*, sehingga didapatkan grafik sebagai berikut:



Gambar 10. Grafik Hubungan M, H, dan a
 Sumber: Hasil Analisa, 2018

Karena nilai percepatan gempa sangat beragam maka akan digunakan beberapa data USGS sebagai parameter plotting menggunakan perhitungan percepatan gempa Peta Gempa.

Dalam hal ini maka penggunaan parameter data akan mempengaruhi letak batas aman dari kala ulang gempa itu sendiri.



Gambar 11. Grafik Hubungan Percepatan Gempa
 Sumber: Hasil Analisa, 2018

Grafik diatas dapat menjelaskan perpotongan antara Peta Gempa 2017 dan lainnya dengan data USGS yang ada. Diketahui perpotongan pada titik percepatan gempa 0,25 g. Dari tabel rekapitulasi percepatan gempa Peta Gempa 2017 nilai 0,25 g berada diantara kala ulang OBE 500 dan OBE 1.000 tahun. Sehingga dapat disimpulkan bahwa batas aman kala ulang yang mampu diberikan pada Bendungan Sutami adalah gempa OBE kala ulang 500 tahun.

Menggunakan tabel *Geologic Hazards* didapatkan hubungan antara percepatan gempa, *magnitude* gempa, dan intensitas gempa dengan skala MMI. Dengan nilai batas aman percepatan gempa sebesar 0,25 g maka didapatkan nilai skala V MMI atau II SIG (berdasarkan tabel 4.7 Skala SIG BMKG) sebagai batas pelaksanaan inspeksi pasca gempa dengan *magnitude* sebesar 4,3 M. Pada standar pemeriksaan pasca gempa di Bendungan Sutami telah diberikan batasan skala intensitas III MMI . Dengan hasil skala gempa sebesar V MMI maka dapat diketahui bahwa standar tersebut memenuhi adanya kondisi gempa yang terjadi.

Pencegahan dan Pemilihan Tipe Penanggulangan Longsor

Menurut Buku Petunjuk Teknis Perencanaan dan Penanggulangan Longsoran (DirJen Bina Marga, 5-1) membagi penanggulangan longsoran menjadi dua hal yaitu pencegahan dan tindakan korektif. Dalam hal ini dipilih tipe penanggulangan sementara dan tindakan pencegahan dari hasil penelitian sebelumnya.

Pola rembesan yang membentuk zona basah dapat menimbulkan meningkatkan tegangan air pori sehingga disarankan untuk mengevaluasi

sistem drainase agar dapat menyalurkan air limpasan hujan dan memperkecil rembesan yang ada guna mengurangi tegangan air pori. Selain itu penentuan pola operasi yang baik dengan memperhatikan stabilitas lereng berupa penyediaan tampungan ketika terjadi banjir dapat meminimalisir peningkatan air pori dalam tubuh bendungan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian dari uraian rumusan masalah yang dituliskan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kondisi terkini Bendungan Sutami ditinjau dari hubungan instrumentasi *Settlement* dan Analisis *Seepage Water Table* dengan kondisi gempa menyatakan hasil yang aman dari standar keberterimaan yang ada, meskipun terdapat beberapa hal perlu perhatian guna menjaga keamanan tubuh bendungan.
2. Stabilitas lereng Bendungan Sutami dianalisis berdasarkan Peta Gempa 2017 menyatakan hasil :
 - a. Kondisi Tanpa Gempa memberikan hasil 97,7778 % Aman
 - b. Kondisi *Operating Basic Earthquake (OBE)* kala ulang 100 tahun memberikan hasil 81,111 % Aman
 - c. Kondisi *Operating Basic Earthquake (OBE)* kala ulang 200 tahun memberikan hasil 55,5556 % Aman
 - d. Kondisi *Maximum Design Earthquake (MDE)* kala ulang 10.000 tahun memberikan hasil 100 % Tidak Aman ($FK \leq 1$)

Berdasarkan Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa menyatakan jika faktor keamanan ≤ 1 perlu dilanjutkan dengan analisis deformasi permanen yang menggunakan cara *Makdisi & Seed* dengan syarat deformasi tidak melebihi 50% dari tinggi jagaan. Tinggi jagaan Bendungan Sutami dihitung dari Muka Air Normal (NWL) sebesar 6,5 m. Hasil perhitungan deformasi permanen menunjukkan nilai sebesar 2,5 m < 3,25 m, maka dinyatakan aman. Estimasi penurunan puncak bendungan menggunakan Metode *Swaigood* memberikan nilai penurunan maksimum sebesar 1,6 m < 2,5 m < 3,25 m, sehingga disimpulkan masih aman dari kondisi tersebut.

3. Batas aman kala ulang gempa dianalisa dengan membandingkan data gempa historis

dari USGS (*United States Geological Survey*) dengan magnitudo diatas 5 rentang waktu 20 tahun dari tahun 1998 – 2018 dan nilai percepatan gempa terkoreksi dari Peta Gempa didapatkan hasil percepatan gempa sebesar 0,25 g yang menunjukkan nilai skala V MMI dengan magnitudo sebesar 4,3. Percepatan gempa 0,25 g tersebut masuk dalam peta gempa 2017 kala ulang 500 tahun dengan anggapan bahwa pada kala ulang dibawah 10.000 tahun adalah *Operating Basics Earthquakei (OBE)*.

4. Rekomendasi bila bendungan dalam keadaan tidak stabil:
 - a. Apabila deformasi permanen *Makdisi Seed* tidak aman dilanjutkan dengan respon dinamik. Apabila masih tidak aman dihitung alihan tetap dengan cara *Newmark*, dan apabila tetap tidak aman maka ubah geometri dan mengulang analisa stabilitas dari awal.
 - b. Tindakan pencegahan dapat dilakukan dengan mengeringkan genangan air di permukaan, menutup/ meratakan lekukan, dan atau mengendalikan air permukaan.
 - c. Tindakan penanggulangan sementara dengan mencegah masuknya air permukaan dengan evaluasi sistem drainase, mengalirkan genangan air serta menutup retakan yang ada.
 - d. Optimalisasi pola operasi dengan memperhatikan stabilitas lereng berupa penyediaan tampungan ketika terjadi banjir dan saat waduk kering atau surut.

DAFTAR PUSTAKA

- Bisri, M. (2008). Air Tanah. Tirta Media. Malang.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa. Jakarta: Balai Bendungan.
- DirJen Bina Marga. Buku Petunjuk Teknis Perencanaan dan Penanggulangan Longsoran. DirJen Bina Marga. Jakarta: DirJen Bina Marga.
- Perusahaan Umum Jasa Tirta I. 2017. Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Sutami Menggunakan Peta Gempa 2010. Malang.
- USGS (*United States Geological Survey*). (2018.). Data Gempa. <https://earthquake.usgs.gov/>. (diakses 15 Januari 2018)Hardiyatmo, H.C. (2010). *Mekanika Tanah 2*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

