

ANALISIS STATIK DAN DINAMIK RETAKAN MEMANJANG DI PUNCAK BENDUNGAN SUTAMI

STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF LONGITUDINAL CRACK ON CREST OF SUTAMI DAM

Dery Indrawan¹⁾, Mahdi Ibrahim Tanjung²⁾, Haris Eko Setyawan³⁾, Nurlia Sadikin⁴⁾

^{1), 4)} Peneliti dan ^{2), 3)} Calon Peneliti Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan,
Pusat Litbang Sumber Daya Air, Kementerian PU-Pera
Jl. Ir. H. Djuanda No. 193, Bandung - 40135
Email: n.sadikin@gmail.com

Diterima: 24 Maret 2015; Disetujui: 28 Mei 2015

ABSTRAK

Bendungan Sutami merupakan bendungan urugan batu dengan inti lempung dan memiliki tingkat keamanan risiko tinggi. Permasalahan retakan memanjang di puncak Bendungan Sutami sudah terjadi pada saat konstruksi, yaitu tahun 1969-1971, retakan pada masa konstruksi terjadi pada pertemuan filter dan inti lempung, kemudian diantisipasi dengan membasahi lapisan filter sehingga material filter menyesuaikan diri dan menutup retakan. Setelah beroperasi selama 42 tahun pada tahun 2014 ditemui adanya retakan memanjang di puncak bendungan sepanjang 120 m dengan kedalaman antara 1,5 – 2,0 m dari permukaan. Selain itu, berdasarkan studi kegempaan terbaru (peta gempa 2010) menunjukkan tingkat bahaya gempa untuk skenario Safety Evaluation Earthquake (SEE) di Indonesia meningkat, dikhawatirkan retakan yang terjadi berpengaruh terhadap perilaku bendungan pada saat gempa. Oleh karena itu perlu adanya kajian perilaku Bendungan Sutami akibat gempa dengan mempertimbangkan adanya retakan. Tulisan ini berisi pemodelan numerik dengan analisis statik dan dinamik guna mengetahui penyebab dan mekanisme retakan yang terjadi serta memeriksa keamanan Bendungan Sutami akibat gempa pada skenario SEE. Analisa statik dan dinamik tubuh bendungan dilakukan dengan menggunakan perhitungan numerik berbasis finite element. Hasil analisa dinamik skenario SEE diketahui bahwa lereng hulu kemungkinan akan mengalami masalah stabilitas lereng. Meski demikian besaran deformasi yang terjadi relatif kecil, yaitu 16,3 cm. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tubuh Bendungan Sutami aman terhadap skenario gempa SEE.

Kata Kunci: Bendungan, analisis keamanan bendungan, mekanisme retakan, analisis statik dan dinamik

ABSTRACT

Sutami Dam age was 42 years old dam and its safety categorized as high risk dam. Longitudinal crack on the crest of the dam was recorded happened during the construction, which was during 1969-1971. A field inspection resulted in 2014 revealed that there was a new longitudinal crack on crest of the dam with length of 120 m with 1.5-2.0 m depth from the surface occurred. Besides, according to the latest seismic study (earthquake hazard map of 2010), it also showed that earthquake risk for Safety Evaluation Earthquake (SEE) in Indonesia is increasing. Study result of Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) in Sutami Dam location showed peak ground acceleration (PGA) of the dam for 10,000 years return period is 0.659g. This manuscript contained numerical modeling with static and dynamic analysis in order to find cause and the mechanism of the crack occurrence as well as to examine or evaluate the safety of Sutami Dam as regard to earthquake at SEE Scenario. Static and dynamic analysis in the dam body are conducted using numerical calculation based on finite element. The result of this numerical calculation is an interpretation of few modeling steps. The output from the static analysis will be used as initial condition dynamic analysis model. However, the result from Newmark deformation calculation showed that the deformation happened was relatively small, which is 16.3 cm. Hence, it can be concluded that Sutami Dam is safe over the SEE earthquake scenario.

Keywords: Dam, dam safety analysis, crack mechanism, static and dynamic analysis

PENDAHULUAN

Bendungan Sutami merupakan bendungan multifungsi yang sudah beroperasi sejak tahun 1973. Bendungan terletak di Kali Brantas tepatnya di Desa Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang, Propinsi Jawa Timur, berjarak kurang lebih 35 km dari Kota Malang.

Berdasarkan data teknis bendungan dapat diketahui bahwa bendungan utama merupakan bendungan tipe urugan batu dengan inti lempung. Inti bendungan terdiri dari 2 lapisan filter, yaitu filter halus dan kasar. Tinggi bendungan 100 m, lebar puncak 13,70 m, panjang 823,50 m. Elevasi Puncak berada pada El. 279,00 m dengan elevasi mercu spillway pada El. 272,50. Elevasi muka air waduk tertinggi (HWL), yaitu pada elevasi 272,50 m. Elevasi muka air waduk terendah (LWL) untuk kondisi normal pada elevasi 260,00 m, sedangkan pada kondisi kemarau panjang, elevasi muka air minimum adalah El. 246,00 m. Volume tampungan bendungan berdasarkan laporan pemeriksaan besar Bendungan Sutami tahun 2014 adalah sebesar 175 x 106 m³ dan debit banjir rencana hingga 4.200 m³/sekon (hasil perhitungan tahun 2004). Bendungan dibangun di atas tanah pondasi yang tersusun dari lapisan basalt, *hard clay* dan *agglomeratic tuff* yang letaknya terpecah-pecah dan kedap. Pada umumnya lapisan tanah pondasi mempunyai koefisien permeabilitas 10-4 m/sekon.

Bendungan ini termasuk bendungan dengan klasifikasi tingkat risiko tinggi. Permasalahan yang selalu terjadi pada bendungan ini adalah retakan memanjang di puncak bendungan. Retakan ini bahkan tercatat sudah terjadi pada saat konstruksi hingga selesainya, yaitu tahun 1969-1971. Pada tahun 2014, permasalahan retakan di puncak bendungan ini kembali terjadi. Hasil pengamatan lapangan tahun 2014 diketahui terjadi retakan memanjang di puncak Bendungan Sutami sepanjang 120 m dengan kedalaman antara 1,5 – 2,0 m dari permukaan.

Tulisan ini berisi analisis model statik dan dinamik guna mengetahui penyebab dan mekanisme retakan yang terjadi serta memeriksa keamanan Bendungan Sutami akibat gempa pada skenario *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) berdasarkan studi kegempaan terbaru (peta gempa 2010). Hasil studi ini diharapkan menjadi masukan bagi pengelola bendungan untuk mengambil keputusan terkait keamanan Bendungan Sutami akibat gempa.

METODOLOGI

Tahapan untuk analisis numerik tubuh Bendungan Sutami adalah sebagai berikut:

1 Penentuan Skenario Pembebanan

Gempa besar merupakan suatu kejadian yang jarang terjadi. Dengan kata lain, umumnya kejadian gempa besar kemungkinan terjadi tidak bersamaan dengan kondisi elevasi muka air banjir dan atau kondisi muka air tinggi. Dengan demikian, beban yang dipertimbangkan dalam kombinasi pembebanan meliputi:

- 1) Beban Gempa SEE.
- 2) Beban pada kondisi elevasi muka air waduk normal.

2 Pembuatan Model Numerik

1) Model Geometri

Bendungan Sutami memiliki perbandingan panjang dengan tinggi bendungan yang besar. Pemodelan yang akan digunakan cukup dengan model 2D. Dalam pemodelan *finite element* dimensi dari elemen akan sangat mempengaruhi hasil perhitungan. Pada pemodelan ini jumlah elemen yang akan digunakan tidak kurang dari 10 elemen per panjang gelombang, jumlah elemen yang digunakan adalah 613 elemen.

Bentuk dasar fondasi di sekitar tapak bendungan akan sangat berpengaruh terhadap hasil perhitungan. Oleh karena itu geometrinya harus dibuat seakurat mungkin sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

2) Model Material

Pada saat terjadi gempa besar, perilaku tanah adalah nonlinear, meskipun begitu sampai saat ini pemodelan perilaku nonlinear secara numerik masih terbatas. Hal ini berkaitan dengan deformasi besar yang menyebabkan elemen terdistorsi dan menyulitkan dalam iterasi numerik. Oleh karena itu untuk menghasilkan model analisis yang lebih realistik, model material yang digunakan untuk analisis dinamik dengan *time histories* cukup dengan menggunakan *equivalent-linear*. Apabila dari hasil perhitungan dengan menggunakan material *equivalent-linear* membutuhkan analisis deformasi yang lebih akurat, maka pemodelan akan ditingkatkan menjadi model nonlinear dengan teknik pemodelan yang lebih tinggi.

3) Kondisi batas model

Pemodelan kondisi batas dalam analisis dinamik menjadi salah satu bagian yang rumit. Kondisi ini berkaitan dengan perilaku respon *boundary* terhadap gelombang. Apabila *boundary* terlalu dekat, maka gelombang balik yang masuk ke dalam *boundary* akan terpantulkan sehingga terakumulasi dengan gelombang input. Fenomena ini menyebabkan gelombang yang masuk kedalam tubuh bendungan tidak seperti yang direncanakan sesuai hasil *seismic hazard*. Untuk menghindari hal tersebut, dalam pemodelan ini perlu adanya analisis

sensitivitas kondisi batas model guna mengetahui parameter model yang sensitif terhadap keluaran model. Analisis sensitivitas tersebut meliputi kajian jarak *boundary* atau pemodelan *boundary* terhadap gelombang yang akan masuk ke tubuh bendungan.

4) *Input Motion*

Input motion yang digunakan dalam analisis adalah berdasarkan *site specific seismic hazard*, dimana *time histories ground motion* telah melalui spektral *matching* terhadap spektral *conditional mean spektra* (CMS). Analisis dinamik akan menggunakan 3 input motion untuk setiap sumber gempa, sehingga total simulasi yang dilakukan adalah 12 simulasi, yang terdiri dari 4 simulasi akibat gempa sesar, 4 simulasi akibat gempa subduksi dan 4 simulasi akibat gempa benioff.

3 Perhitungan tegangan awal (tegangan kondisi statik)

Kondisi tegangan-regangan awal merupakan salah satu aspek sangat penting dalam analisis dinamik dengan *time histories*. Tahapan ini adalah tahap yang sulit terutama karena memerlukan pemahaman yang mendalam tentang perilaku material. Pemodelan tahapan konstruksi dari bendungan urugan menjadi sangat penting ketika mempertimbangkan perilaku nonlinear dan perilaku viskous dari material.

4 Perhitungan respon dinamik

Perhitungan respon dinamik dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* yang umum digunakan dalam pemodelan bidang geoteknik. *Software* ini melakukan analisa numerik berdasarkan perhitungan implisit. Perhitungan dimulai dari perhitungan tegangan awal, perhitungan tekanan air pori awal, perhitungan tegangan dinamik dan kemudian perhitungan stabilitas.

5 Evaluasi hasil perhitungan respon dinamik

Evaluasi hasil perhitungan respon dinamik untuk memeriksa keamanan bendungan akibat gempa meliputi:

- 1) Evaluasi respon percepatan
- 2) Evaluasi stabilitas
- 3) Evaluasi deformasi permanen

Evaluasi deformasi permanen meliputi:

- a. Pemeriksaan potensi kehilangan tinggi jagaan akibat penurunan berlebih.
- b. Memeriksa Potensi Retak *Transversal*.
- c. Memeriksa Performa bidang kontak (*Interface*) Timbunan dengan Beton.

GROUND MOTION

Studi bahaya gempa pada lokasi Bendungan Sutami dilakukan dengan metode probabilistik dan deterministik. Berdasarkan hasil studi PSHA

yang dilakukan Puslitbang SDA tahun 2011 di lokasi bendungan Sutami diperoleh percepatan gempa di batuan dasar (PGA) untuk periode ulang 10.000 tahun adalah 0,659g (Puslitbang SDA, 2011). Untuk membuat *ground motion* sintesis untuk keperluan analisis dinamik maka pada tahun 2014 dilakukan kembali PSHA yang lebih detail. Analisis probabilistik ini biasanya digunakan untuk gempa perencanaan bangunan bendungan besar. Hasil akhir dari studi ini adalah diperolehnya *ground motion* untuk beban gempa SEE dalam analisis dinamik.

Proses analisis untuk pembuatan *ground motion* di batuan dasar ini meliputi:

- 1 Melaksanakan penelitian dan kaji ulang terhadap besaran *hazard* percepatan gempa di lokasi Bendungan Sutami, dengan mengakomodasi seluruh data mutakhir dan temuan-temuan terkini. Kaji ulang dilakukan terhadap seluruh sumber gempa baik dari sumber patahan, sumber subduksi maupun sumber-sumber yang belum teridentifikasi dengan jelas sehingga bisa dimodelkan dengan *gridded seismicity* yang dapat memberikan pengaruh getaran gempa hingga radius 500 km dari Bendungan Sutami.
- 2 Melakukan analisis deagregasi *magnitude* (M) dan jarak (R).
- 3 Menghitung target spektra dengan analisis PSHA di lokasi yang ditinjau.
- 4 Mengumpulkan data *time histories* gempa aktual dari dalam dan luar negeri yang terekam dan memiliki kemiripan mekanisme dan kondisi geologi/seismologi dengan lokasi studi berdasarkan hasil deagregasi M & R. Data tersebut bisa didapatkan dari BMKG ataupun USGS.
- 5 Memodifikasi data digitasi *time histories* yang dilakukan dengan proses *spectral matching* pada hasil PSHA.

Pemilihan data *ground motion* yang akan digunakan dalam analisis dinamik merupakan salah satu faktor penting dalam pembuatan *modified time histories ground motion*. Data *ground motion* yang dimaksud adalah data digitasi *time histories* percepatan (*acceleration time histories*). Selain itu pembuatan *time histories* harus sesuai dengan kondisi spesifik geologi dan seismologi lokasi yang ditinjau untuk mendapatkan hasil yang akurat. Apabila pada lokasi yang ditinjau tidak memiliki data *time histories* sendiri, maka dapat digunakan tiga metode alternatif untuk mendapatkan data digitasi *time histories* di batuan dasar, yaitu:

- 1 Menggunakan data *time-histories* pada lokasi yang kondisi geologi dan seismologinya sesuai atau mirip dengan kondisi lokasi yang ditinjau.

- 2 Menggunakan data *time histories* dari lokasi lain yang telah diskalakan sesuai dengan target spektra dari lokasi yang ditinjau.
- 3 Membuat *modified time histories* yang disesuaikan dengan kondisi geologi dan seismologi setempat.

Pemilihan data *time histories* dari lokasi lain yang akan diskalakan dilakukan berdasarkan mekanisme sumber gempa, besarnya magnitude dan jarak episenter hasil *deaggregation*. Data *time histories* yang telah diskalakan harus memiliki respons spektra sesuai dengan target respon spektra yang didapat dari analisis resiko gempa.

Pada studi ini, *recorded ground motion* yang diskalakan dipilih berdasarkan hasil PSHA untuk analisis dinamik, dimana pemilihannya ditentukan berdasarkan *controlling earthquake* dari hasil deagregasi seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Dari hasil deagregasi di atas, maka didapatkan nilai mean magnitude dan jarak yang dominan untuk berbagai sumber gempa sehingga bisa dipilih *recorded ground motion* yang sesuai untuk kondisi tersebut. *Resume* hasil deagregasi dan *ground motion* yang dipilih bisa dilihat pada tabel 1 untuk periode ulang gempa 10.000 tahun.

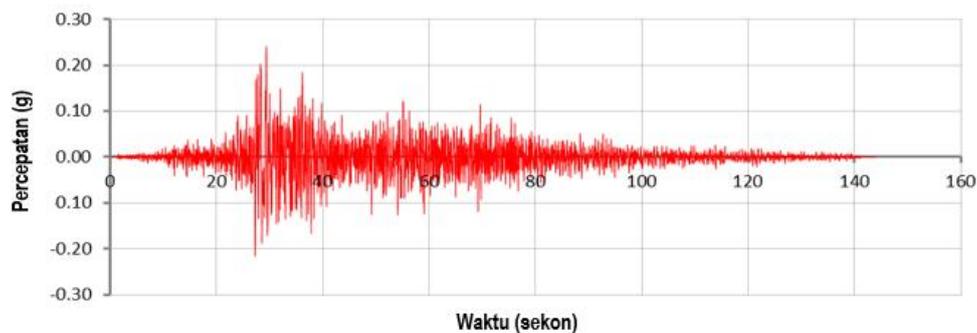
Recorded ground motion yang dipilih tersebut dimodifikasi sehingga spektra dari gelombang

gempa mendekati dengan target spektra. Metode ini dinamakan *spectrum matching analysis* (SMA). Dalam studi SMA dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak (*software*) EZ-FRISK™ (*Risk Engineering*, 2007). *Software* ini sudah mengadopsi metode *time-dependent spectral matching* yang dibuat oleh Norm Abrahamson (Abrahamson, 1998), hasil modifikasi dari riset sebelumnya yang telah dilakukan oleh Lilhanand dan Tseng (1987).

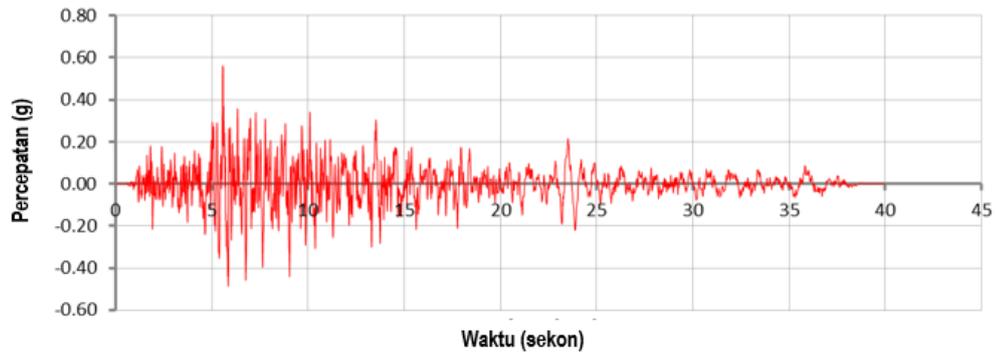
Hasil *spectral matching* berupa Modified Ground Motion (Acceleration Time History) untuk Bendungan Sutami yang telah disesuaikan pada spektra 0,73 sekon seperti ditunjukkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 3. Pada gambar tersebut menunjukkan *ground motion* dengan PGA tertinggi adalah dari sumber gempa shallow crustal, kemudian benioff, dan megathrust. Sedangkan gempa dengan durasi terpanjang adalah dari sumber gempa megathrust, kemudian benioff, dan shallow crustal. Gambar ini menunjukkan bahwa sumber gempa dengan PGA tertinggi belum tentu memberikan dampak terburuk terhadap bendungan. Hal ini dikarenakan sumber gempa dengan durasi gempa yang lebih panjang dapat memiliki energi yang lebih besar dibandingkan dengan sumber gempa dengan PGA tertinggi tetapi dengan durasi yang lebih pendek.

Tabel 1 Resume hasil deagregasi dan pemilihan *Recorded ground motion* untuk gempa dengan periode ulang 10.000 tahun (Puslitbang SDA, 2014).

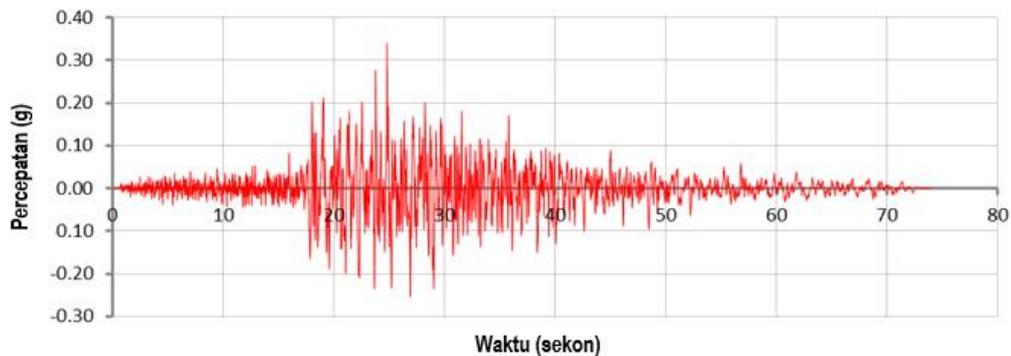
NO	DEAG	Sumber Gempa	M	R (km)	Rekaman Ground Motion (Sebenarnya)	M	R (km)
1	SA 0,73-sec 10.000th	Megathrust	8,68	120,80	Chile, STA-HUALANE S/N 4564, sumber data = SSN/USGS, CESMD, 27 Feb 2010	8,80	136,00
2		Shallow crustal	6,25	33,45	Chalfant Valley-02, NGA0551, STA-Convict Creek, 1986	6,19	31,19
3		Benioff	7,22	88,72	Miyagi Oki, STA-IWTH20, sumber data CESMD, 2005, D 52 km	7,20	154,00



Gambar 1 *Ground Motion Time History* setelah diskalakan di batuan dasar mewakili sumber gempa Megatrtrust pada SA 0,73-sekon untuk periode ulang 10.000 tahun (Puslitbang SDA, 2014)



Gambar 2 *Ground Motion Time History* setelah diskalakan di batuan dasar mewakili sumber gempa *Shallow Crustal* pada SA 0,73-sekon untuk periode ulang 10.000 tahun (Puslitbang SDA, 2014)



Gambar 3 *Ground Motion Time History* setelah diskalakan di batuan dasar mewakili semua sumber gempa Benioff pada SA 0,73-sekon untuk periode ulang 10.000 tahun (Puslitbang SDA, 2014)

PARAMETER TANAH ANALISA DINAMIK

Untuk memperoleh parameter dinamik yang lengkap, diperlukan 2 pengujian parameter dinamik laboratorium, yaitu *resonant column* dan triaksial siklik. Hal ini diperlukan, karena kedua jenis pengujian ini memiliki kapasitas regangan yang berbeda. Hasil *resonant column* akan baik pada regangan rendah dan hasil triaksial siklik akan baik pada regangan sedang sampai besar. Dengan kombinasi kedua pengujian tersebut akan diperoleh parameter dinamik material inti bendungan yang lengkap.

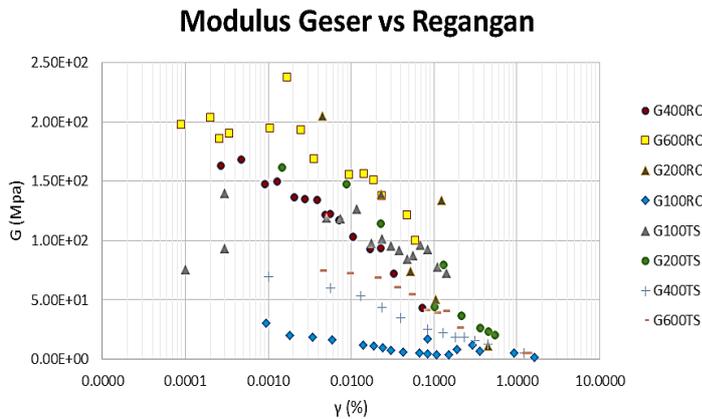
Contoh tanah tak terganggu yang diambil dari *test pit* berupa contoh blok (*block samples*) bercampur dengan batu kapur (*limestone*) berukuran maksimum 5 cm, sehingga benda uji dibuat dengan cara remasan (*remoulded*). Contoh tanah terganggu untuk uji triaksial siklik dipadatkan di dalam tabung belah hingga mencapai kepadatan 98% dari kepadatan kering maksimum proktor standar pada kadar air lapangan sebesar 33,94% untuk mendekati kondisi kepadatan di lapangan. Tanah inti lempung Bendungan Sutami masuk klasifikasi MH & OH, dengan indeks plastisitas sebesar 20,33%, berat isi sebesar 1,657 gr/cm³ dan angka pori sebesar 1,152.

Hasil pengukuran $G - \log \gamma$ dari benda uji zona inti lempung Bendungan Sutami untuk pengukuran pada Tekanan keang (*confining pressure*) dengan kisaran 100 kPa – 600 kPa dapat dilihat pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan nilai modulus geser akan semakin kecil seiring bertambahnya regangan geser. Semakin tinggi tekanan keang maka semakin tinggi juga modulus gesernya. Untuk mempermudah melihat pola modulus geser maka dibuat grafik hubungannya dengan tekanan keang dan regangan geser. Hubungan modulus geser pada regangan kecil terhadap tekanan keang dapat dilihat pada Gambar. Pada gambar tersebut terlihat nilai modulus geser menunjukkan peningkatan yang nonlinear seiring bertambah tingginya tekanan keang. Hubungan reduksi modulus geser yang ternormalisasi ($G/G_{max} - \log \gamma$) dari spesimen inti lempung Bendungan Sutami hasil *resonant column* ditunjukkan pada

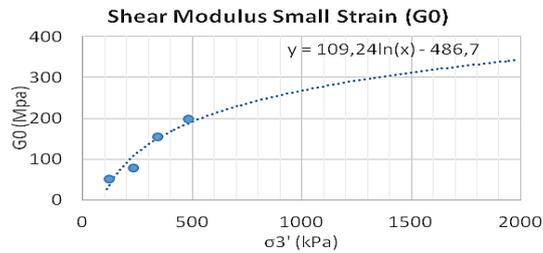
Gambar 6 Pada gambar tersebut terlihat setelah modulus geser dari setiap tingkat tegangan dinormalisasi dengan modulus geser maksimumnya, maka didapat pola regangan geser yang mengikuti regresi *logistic*.

Perilaku material damping hasil pengujian dapat diketahui seiring meningkatnya regangan geser, *damping* berperilaku non-linear. Hasil *material damping* sangat dipengaruhi oleh frekuensi beban pengujian, sehingga sering kali hasil dari *resonant column* menunjukkan nilai *material damping* yang relatif besar dari yang diperkirakan pada regangan kecil. Oleh karena itu untuk menentukan *damping*

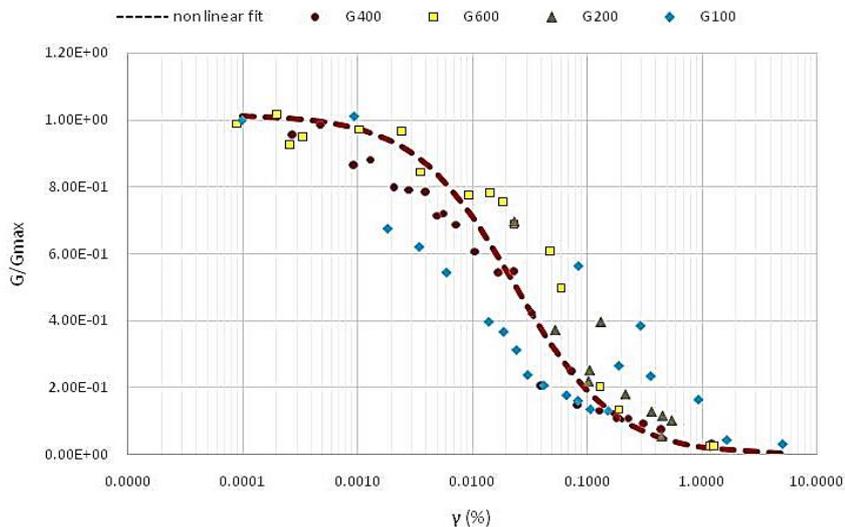
pada regangan kecil lebih baik menggunakan metode *decay* atau TS (*Torsional Shear*). Selain itu hasil uji menunjukkan nilai *damping* cenderung lebih rendah pada nilai tekanan kekang yang tinggi. Hubungan *material damping* ($D - \log \gamma$) dari benda uji zona inti lempung Bendungan Sutami dapat dilihat pada Gambar 7.



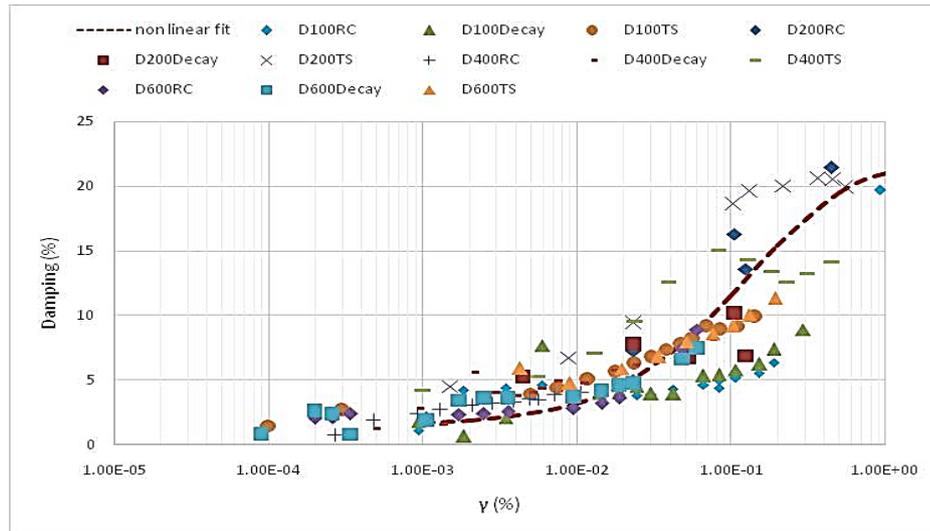
Gambar 4 Hubungan antara modulus geser dan regangan



Gambar 5 Hubungan antara modulus geser regangan kecil dan tegangan kekang (*Confining pressure*)



Gambar 6 Hubungan antara reduksi modulus geser dan regangan geser



Gambar 7 Hubungan antara material damping dan regangan geser

PEMODELAN FINITE ELEMENT

Respon dinamik Bendungan Sutami akibat gempa SEE dilakukan dalam analisis finite element 2D menggunakan program Geostudio. Bendungan berlokasi pada lembah berbentuk semisilinder dengan perbandingan panjang dengan tinggi lebih dari 5 yaitu berkisar 8,5. Dengan demikian analisis model 2D cukup untuk mensimulasikan dan memahami respon dinamik. Geometri tapak bendungan dibuat semirip mungkin dengan kondisi bendungan dan topografi fondasi disekitarnya disederhanakan. Fondasi bendungan sutami merupakan batuan keras dengan demikian model fondasi diasumsikan berupa *rigid base* dengan *boundary* sisi udik dan hilir dibuat bebas dan pada dasar fondasi dibuat sendi pada arah vertikal dan horizontal agar deformasi pada model hanya diakibatkan oleh respon bendungan akibat gempa. Fondasi dimodelkan relatif tipis agar seolah-olah *free field*.

Intensitas gempa pada lokasi cukup tinggi, kemungkinan pada saat gempa SEE material dapat masuk pada perilaku tegangan-regangan nonlinear. Hasil perhitungan menunjukkan perilaku material akibat gempa tidak akan terlalu jauh masuk pada perilaku nonlinear dan hanya sedikit keluar dari perilaku linear. Oleh karena itu dalam analisis ini cukup menggunakan prosedur *equivalent-linear* untuk memperkirakan perilaku nonlinear dari material timbunan pada saat gempa dan deformasi permanen akibat masalah stabilitas menggunakan analisis deformasi Newmark.

Skenario pemodelan dilakukan dengan tahapan berikut:

- 1) Menentukan kondisi awal dan memahami perilaku retakan yang terjadi di lapangan.

- 2) Analisis stabilitas lereng pada kondisi statik untuk melihat efek dari beban gempa terhadap faktor keamanan dan lereng yang paling kritis.

Analisis dinamik meliputi analisis stabilitas lereng dan deformasi permanen pada gempa kondisi SEE.

Parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan ini dapat dilihat pada Tabel 2 berikut. Sementara parameter tanah untuk analisis dinamik ditunjukkan pada Gambar 8.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Statik

Salah satu input yang diperlukan dalam analisis dinamik sebagai kondisi awal adalah tegangan awal (initial) sebelum terjadi gempa. Hasil perhitungan kondisi awal pada kondisi *steady seepage* dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan kondisi tegangan pada lereng udik dan hilir bendungan berbeda. Lereng udik memiliki tegangan yang lebih besar dari lereng hilir. Perbedaan tingkat tegangan akan berpengaruh terhadap tingkat kekakuan. Semakin tinggi tegangan kekang efektif, maka modulus akan semakin tinggi, dengan demikian respon dinamik lereng hilir dan udik pun akan berbeda besarnya, baik respon tegangan maupun respon deformasi.

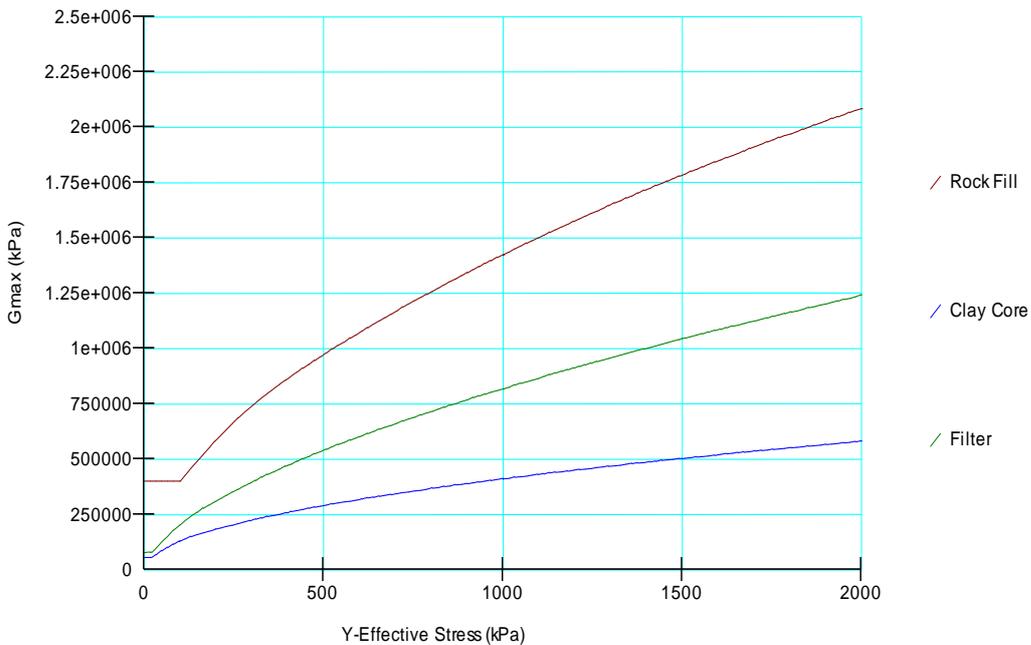
Dengan adanya retakan eksisting pada puncak bendungan, maka perlu dievaluasi seberapa besar dampak retakan tersebut terhadap performa dinamik bendungan. Untuk itu, perilaku retakan tersebut perlu dikaji pada analisis statik ini. Untuk mengetahui pola retakan tersebut maka dilakukan simulai operasi air waduk dengan

menurunkan dan menaikkan dengan kecepatan yang hampir serupa dengan kondisi di lapangan. Hasil analisis rembesan *transient* dengan kondisi muka air waduk diturunkan ke elevasi +258m adalah seperti pada Gambar 11 dan Gambar 12. Gambar tersebut menunjukkan kecepatan

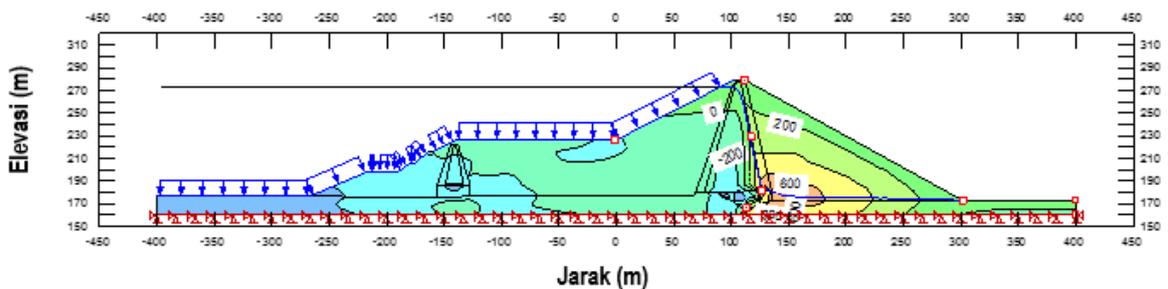
penurunan air waduk berkisar 16 cm/hari akan mengakibatkan sebagian tekanan air pori pada bagian tengah dan hilir inti bendungan masih tersisa. Hal ini mirip dengan fenomena surut cepat pada tanggul urugan homogen.

Tabel 2 Parameter Material Tubuh Bendungan (Puslitbang SDA, 2014)

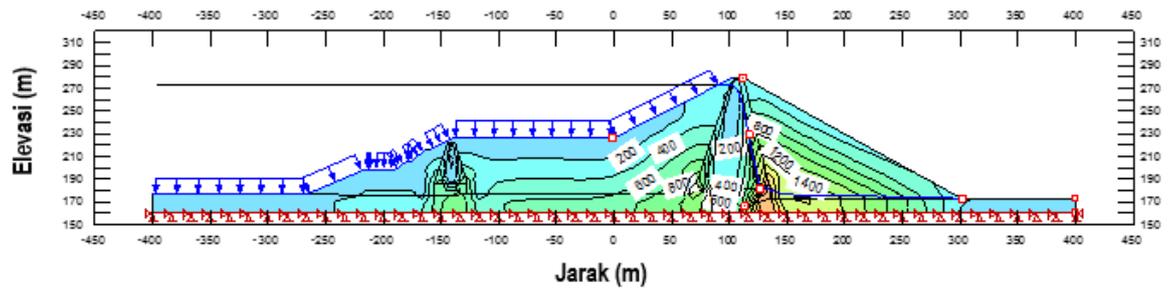
Material	Berat isi (kN/m ³)	Kohesi efektif (c') (kPa)	Sudut Geser efektif (φ')	Poisson Ratio	Modulus Geser Maksimum (G0)
Inti Kedap	19	10	27	0,33	Error! Reference source not found.
Rockfill	22	0	42	0,33	
Filter	21	0	35	0,33	



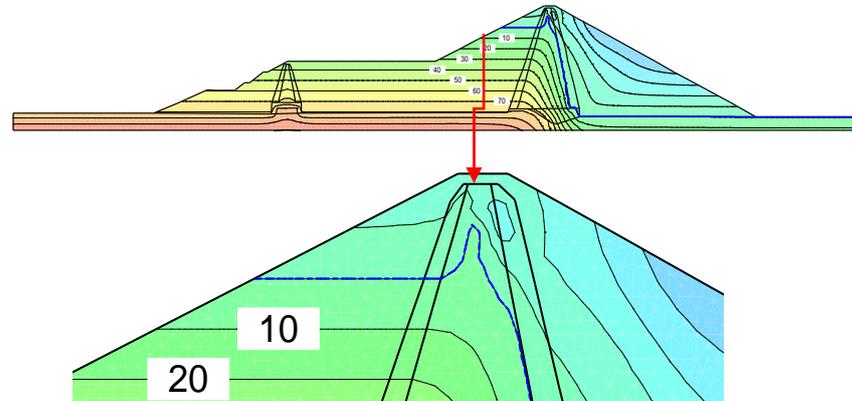
Gambar 8 Hubungan material damping dan regangan geser



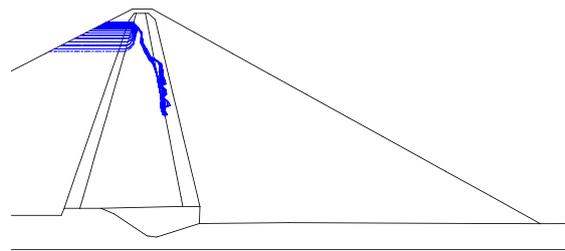
Gambar 9 Tegangan prinsipal efektif minimum



Gambar 10 Tegangan prinsipal efektif maksimum



Gambar 11 Kontur tekanan air pori transient



Gambar 12 Garis freatik transient

Setelah dilakukan analisis rembesan transient, analisis dilanjutkan dengan analisis perubahan volume akibat perubahan tekanan air pori. Pada analisis tersebut ditempatkan titik pantau pada sisi udik, tengah dan hilir puncak bendungan. Hasil perhitungan pada ketiga titik tersebut dapat dilihat pada 13 gambar 14. Dari grafik tersebut terlihat respon deformasi vertikal dan horisontal ketiga titik pada puncak bendungan berbeda, terutama sisi udik puncak bendungan. Perbedaan deformasi sisi hilir dengan tengah relatif tidak signifikan dibandingkan dengan sisi udik. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan deformasi adalah penyebab terjadinya retakan pada puncak bendungan. Selain itu dasar puncak bendungan di atas lapisan kedap merupakan lapisan yang relatif

kaku dan kurang plastis dibanding lapisan inti bendungan.

Hasil simulasi menunjukkan penurunan puncak bendungan berkurang kecepatannya dan relatif berhenti pada saat muka air waduk dinaikan. Hasil perhitungan ini sejalan dengan hasil bacaan pengukur retakan di lapangan seperti pada gambar 15. Untuk memprediksi respon pertambahan retakan pada puncak bendungan terhadap penurunan muka air waduk, maka dibuat grafik hubungan pertambahan lebar retakan dengan elevasi muka air waduk seperti pada Gambar 16. Untuk sementara ini hasil pengukuran menunjukkan pertambahan lebar retakan masih relatif linear terhadap penurunan muka air waduk. Meskipun begitu pengamatan lapangan masih harus tetap dilakukan untuk menambah pemahaman dari pola

retakan tersebut. Dari grafik respon pertambahan lebar retakan terhadap muka air waduk dapat terlihat bahwa apabila muka air waduk diturunkan sampai elevasi +246 m (elevasi minimum), maka lebar retakan akan bertambah $\pm 12,3$ mm. Berdasarkan hal itu, kedalaman retakan diperkirakan akan bertambah dari 1,5 m menjadi 1,67 m.

Setelah melakukan analisis tegangan awal, selanjutnya dilakukan analisis stabilitas lereng pada kondisi dinamik. Analisis ini bertujuan untuk melihat efek dari beban gempa terhadap faktor keamanan dan lereng yang paling kritis pada saat kondisi statik. Faktor keamanan dihitung dengan membandingkan tegangan yang bekerja dengan kapasitas tahanan dari lereng yang dihitung. Hasil perhitungan kondisi statik pada berbagai variasi nilai y/h di kedua lereng menunjukkan faktor keamanan paling rendah terdapat pada lereng hilir nilai $y/h = 1$ dengan faktor keamanan sebesar 1,753. Hasil simulasi model seperti tampak pada Gambar 17.

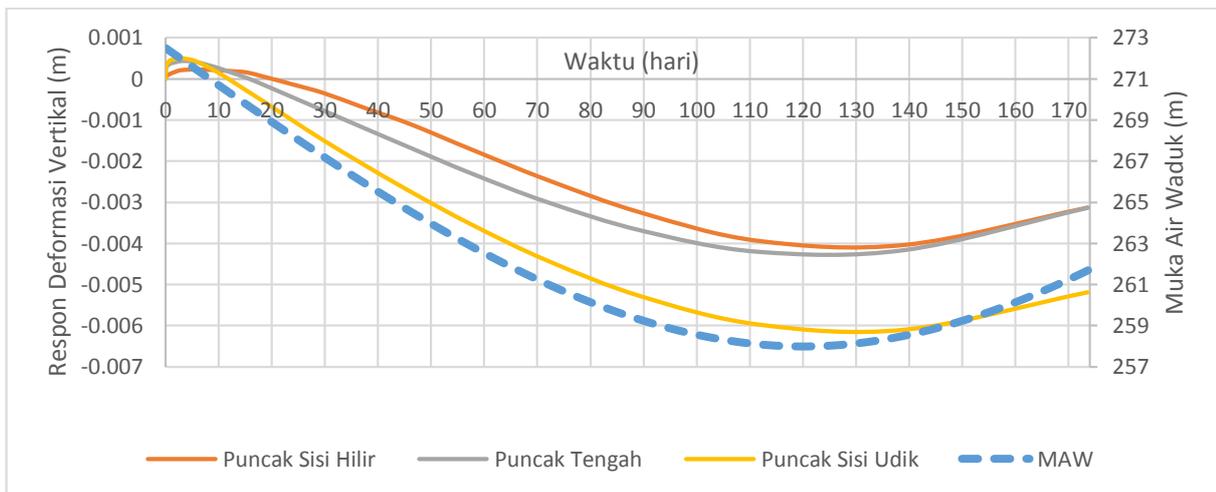
Lereng paling kritis pada saat kondisi statik tidak dapat langsung diartikan menjadi paling kritis juga pada saat kondisi gempa. Hal ini

karena adanya perbedaan respon percepatan di setiap ketinggian bendungan. Semakin dekat dengan puncak bendungan, percepatan semakin tinggi. Sedangkan semakin dekat dengan kaki bendungan, respon percepatan cenderung semakin rendah. Selain itu, akibat perbedaan kondisi tegangan intial antara lereng udik dan hilir juga mengakibatkan respon percepatan lereng udik dan hilir berbeda.

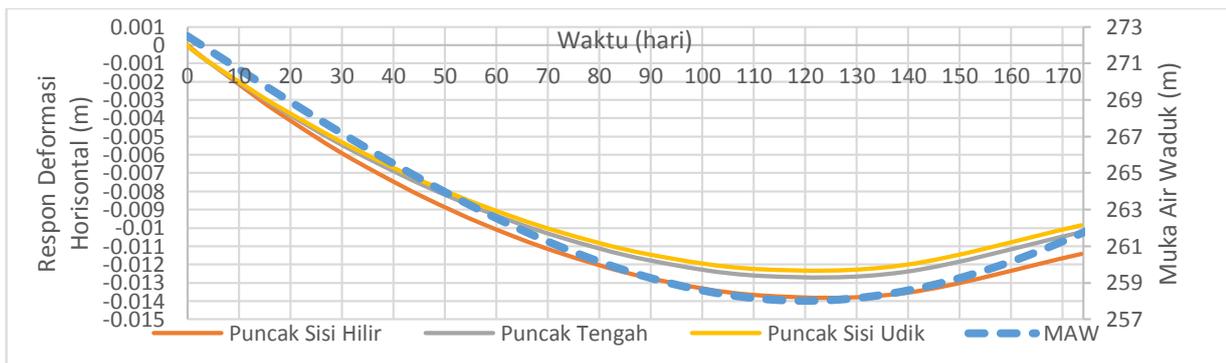
Hasil Analisis Dinamik

Hasil perhitungan respon dinamik Bendungan Sutami terhadap gempa *Megathrust*, *Shallow Crustal* dan *Benioff* periode ulang 10.000 tahun dapat dilihat pada gambar 18 sampai dengan Gambar 20.

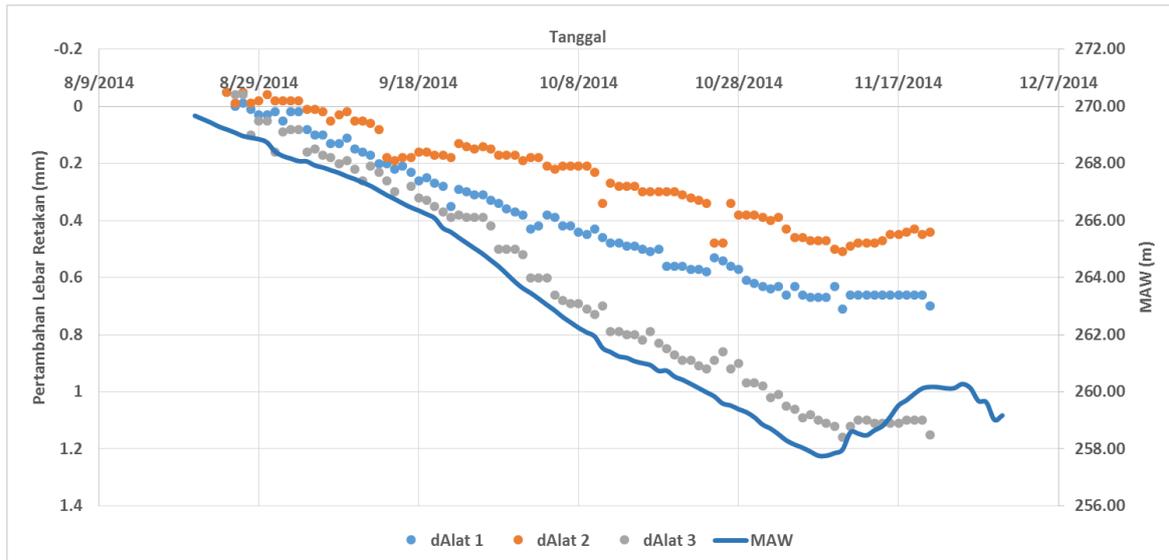
Hasil respon percepatan pada puncak bendungan menunjukkan bahwa respon bendungan terhadap gempa SEE yang terbesar terjadi pada gempa *Megatrust*. Amplifikasi yang terjadi adalah sebesar 5,17 kali dari percepatan di batuan dasar, dimana percepatan puncak pada puncak bendungan adalah sebesar 1,19 g dan pada batuan dasar adalah sebesar 0,23 g.



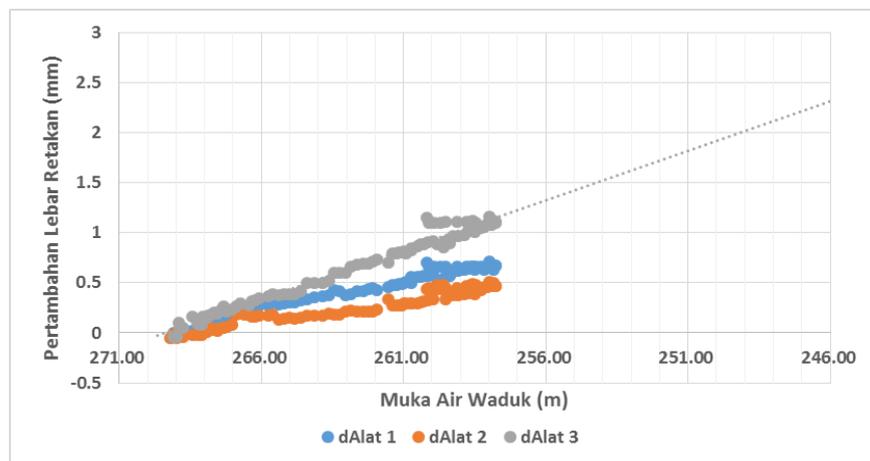
Gambar 13 Grafik respon deformasi vertikal akibat operasi waduk



Gambar 14 Grafik respon deformasi horizontal akibat operasi waduk



Gambar 15 Grafik pertambahan lebar retakan hasil bacaan di lapangan



Gambar 16 Hubungan pertambahan lebar retakan dengan muka air waduk hasil bacaan di lapangan

Pada saat puncak bendungan mengalami respon maksimum, percepatan di tubuh bendungan dengan elevasi yang sama dekat permukaan lereng lebih cepat merespon dibandingkan dengan yang jauh kedalam lereng. Respon percepatan puncak untuk setiap bagian bendungan tidak terjadi pada waktu yang bersamaan. Berdasarkan kontur percepatan Gambar 18 terlihat, saat puncak bendungan mengalami percepatan maksimum, arah percepatan pada dasar bendungan bisa berlawanan dengan arah percepatan pada puncak bendungan. Selain itu bagian lereng udik mengalami respon percepatan yang lebih besar dibanding lereng hilir. Oleh karena itu dalam analisis stabilitas nilai percepatan puncak akan tereduksi untuk bidang gelincir yang dalam dan koefisien gempa lereng udik dapat lebih besar dari lereng hilir bendungan.

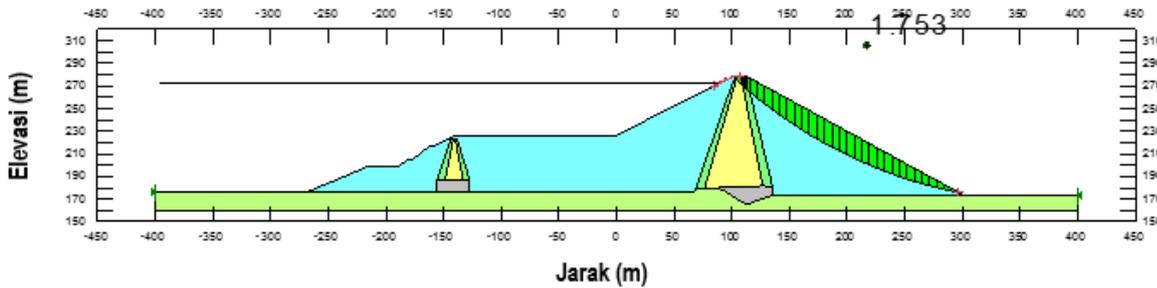
Respon regangan geser dinamik maksimum seperti tampak pada Gambar 19, menunjukkan nilai regangan geser pada inti bendungan pada saat terjadi gempa hanya 1% dan pada sisi lereng udik hanya mencapai 0,2%. Ini menunjukkan bahwa inti bendungan tidak terlalu masuk jauh ke dalam perilaku nonlinear pada saat gempa dan analisis dengan metode equivalent linear masih cukup.

Dari kontur tegangan geser pada Gambar 20 menunjukkan bahwa tegangan geser lereng udik yang terjadi lebih besar daripada lereng hilir. Hal ini menunjukkan bahwa retakan yang terjadi disebabkan oleh perbedaan penurunan (deformasi) antara lereng udik dan hilir.

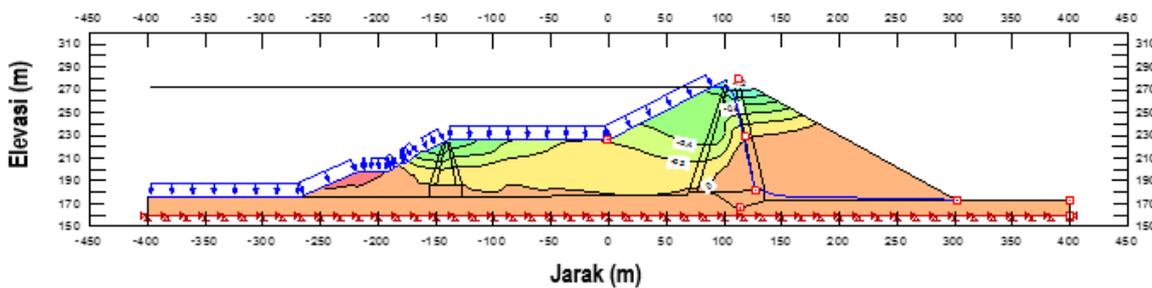
Resume hasil simulasi dinamik tampak pada table 3.

Tabel 3 Hasil Simulasi Analisis Dinamik

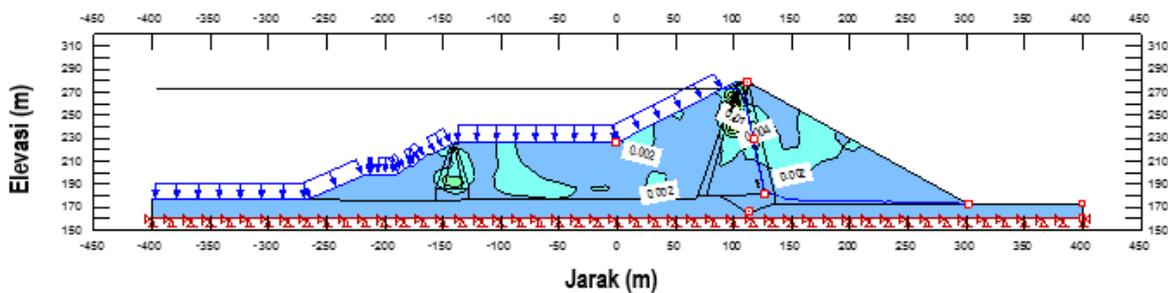
No	Sumber Gempa	Percepatan Gempa		Regangan Geser Maksimum	
		Batuan Dasar (g)	Puncak Bendungan (g)	Lereng Udik	inti
1	<i>Megathrust</i>	0,23	1,19	0,2%	1,00%
2	<i>Shallow Crustal</i>	0,57	0,97	0,2%	1,00%
3	<i>Benioff</i>	0,31	0,71	0,2%	0,65%



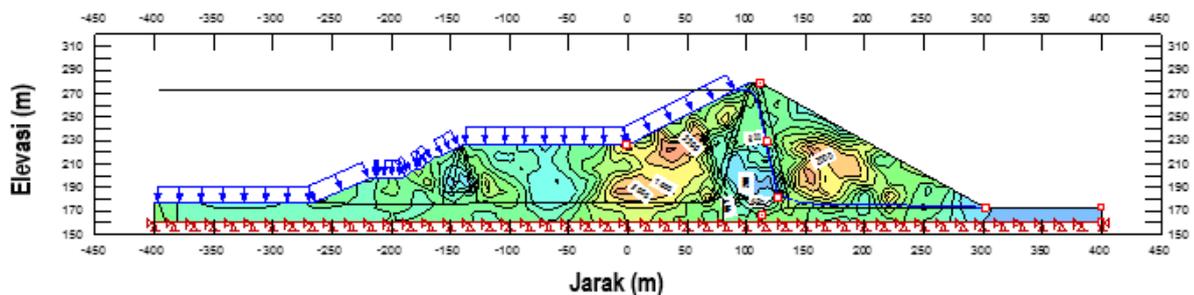
Gambar 17 Faktor keamanan stabilitas lereng hilir kondisi statik pada $y/h = 1$



Gambar 18 Kontur percepatan pada saat puncak bendungan mengalami respon maksimum akibat gempa *megathrust*



Gambar 19 Kontur regangan geser dinamik maksimum pada saat terjadi gempa *shallow crustal*



Gambar 20 Kontur tegangan geser dinamik maksimum pada saat terjadi gempa *benioff*

Tabel 4 Resume hasil perhitungan kapasitas stabilitas terhadap gempa dan deformasi newmark

	FK Statik	ky	Kmax <i>Megathrust</i>	U (cm)	Kmax <i>Shallow Crustal</i>	U (cm)	Kmax <i>Benioff</i>	U (cm)	Ket.
Lereng Udik									
y/h = 0,25	2,747	0,264	0,93	8,9	0,75	6,7	0,74	3,3	Aman, < 3.25 m
y/h = 0,5	1,907	0,238	0,63	4,8	0,64	3,2	0,64	3,0	Aman, < 3.25 m
y/h = 0,75	2,220	0,296	0,61	2,2	0,58	0,9	0,73	2,4	Aman, < 3.25 m
y/h = 1	4,017	0,442	0,63	0,1	0,74	0,2	0,51	0,0	Aman, < 3.25 m
Lereng Hilir									
y/h = 0,25	2,666	0,426	0,86	0,9	1,55	16,3	1,34	5,4	Aman, < 3.25 m
y/h = 0,5	1,938	0,408	0,53	0,1	1,12	7,5	0,98	1,7	Aman, < 3.25 m
y/h = 0,75	1,821	0,398	0,34	-	0,79	2,2	0,77	0,6	Aman, < 3.25 m
y/h = 1	1,753	0,394	0,24	-	0,60	0,4	0,57	0,1	Aman, < 3.25 m

Untuk menilai kinerja secara keseluruhan dari respon Bendungan Sutami terhadap beban gempa, maka tegangan dinamik hasil analisis dinamik digunakan untuk menghitung stabilitas dan deformasi Newmark yang dibandingkan dengan persyaratan setengah tinggi jagaan (Najoan, 2004). Berdasarkan hasil perhitungan kapasitas stabilitas terhadap gempa dan deformasi newmark dapat dilihat bahwa Bendungan Sutami aman terhadap gempa SEE. Resume hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4. Berdasarkan Tabel 4, deformasi permanen terbesar yang terjadi adalah sebesar 16,3 cm. Kondisi ini diperkirakan terjadi pada saat gempa *Shallow Crustal*. Pada saat terjadi gempa *Shallow crustal* Bendungan Sutami memberikan respon paling maksimum dibandingkan dengan skenario gempa lainnya sehingga akumulasi regangan geser plastik yang terjadi pada skenario ini lebih besar dibandingkan sumber gempa lainnya. Besar nilai deformasi ini masih memenuhi syarat keamanan bendungan, yaitu lebih kecil dari setengah tinggi jagaan (Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urukuan Akibat Beban Gempa. Pd T-14-2004-A). Adapun tinggi jagaan Bendungan Sutami adalah 6,5 m.

KESIMPULAN

Hasil studi Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) di lokasi bendungan Sutami menunjukkan percepatan gempa di batuan dasar (PGA) Bendungan Sutami untuk periode ulang 10.000 tahun (SEE) sebesar 0,659g. Berdasarkan hasil perhitungan, periode getar alami tubuh bendungan Sutami adalah sekitar 0,73 sekon.

Hasil analisa statik tegangan awal menunjukkan bahwa puncak bendungan cenderung mengalami penurunan ke arah hulu. Besar penurunan puncak bagian hulu diperkirakan lebih besar dibandingkan bagian hilir. Kondisi inilah yang menyebabkan terjadinya retakan memanjang di puncak bendungan. Analisa stabilitas lereng

menunjukkan bahwa faktor keamanan lereng paling kritis adalah lereng hilir dengan faktor keamanan, $FK = 1,73$. Nilai ini masih memenuhi kriteria keamanan bendungan. Lereng dengan nilai keamanan paling kecil hasil analisis statik ini tidak otomatis menjadi paling kritis pada saat analisis dinamik akibat gempa. Hal ini karena adanya perbedaan respon percepatan di setiap ketinggian bendungan. Semakin dekat dengan puncak bendungan, percepatan gempa semakin tinggi. Sedangkan semakin dekat dengan kaki bendungan, respon percepatan cenderung semakin rendah.

Analisis model dan hasil instrumen menunjukkan retakan memanjang yang terjadi pada puncak bendungan berkorelasi dengan siklus muka air saat waduk dioperasikan. Lebar retakan cenderung menjadi lebih besar seiring dengan penurunan muka air waduk. Apabila muka air diturunkan sampai elevasi +246 m (elevasi muka air minimum), maka lebar retakan diperkirakan akan bertambah menjadi $\pm 12,3$ mm. Saat ini kedalaman retakan terjadi berkisar 1,5 m, maka kedalaman retakan pada muka air minimum diperkirakan akan bertambah menjadi berkisar 1,67 m. Berdasarkan kondisi tersebut kedalaman retakan yang akan terjadi akibat penurunan muka air waduk hingga elevasi minimum masih aman. Kedalaman retakan diperkirakan masih lebih kecil dari setengah tinggi jagaan dan belum mencapai elevasi muka air banjir. Adapun setengah tinggi jagaan Bendungan Sutami adalah 3,25 m dan tinggi jagaan banjir adalah 2 m.

Analisis dinamik Bendungan Sutami akibat gempa SEE dilakukan dengan input ground motion yang berasal dari sumber *Megathrust*, *Shallow Crustal* dan *Benioff*. Berdasarkan hasil analisis kemungkinan terjadi masalah stabilitas pada lereng hilir dan hulu akibat gempa SEE sangat kecil, sehingga kecil kemungkinan terjadi permasalahan stabilitas pada lereng tersebut. Hasil perhitungan deformasi Newmark menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi akibat gempa SEE masih relatif kecil, yaitu 16,3 cm. Nilai deformasi ini masih

memenuhi syarat keamanan bendungan, yakni lebih kecil dari setengah tinggi jagaan. Adapun tinggi jagaan Bendungan Sutami adalah 6,5 m. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tubuh Bendungan Sutami aman terhadap skenario gempa SEE.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, N.A. (1998). *Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH*. PG&E Internal Report, February.
- Completion Report, 1981. *Proyek Karangates Tahap – I*.
- Ishihara, K., (1996), *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford Science Publications.
- Krahn, J., (2004), *Stability Modeling with SLOPE/W, Geo-Slope*.
- Krahn, J., (2004), *Dynamic Modeling with QUAKE/W, Geo-Slope*.
- Kramer, S.L., (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, New Jersey, Prentice Hall.
- Lilhanand, K. and Tseng, W.S. (1987). *Generation of Synthetic Time Histories Compatible with Multiple-Damping Response Spectra*. SmiRT-9. Lausanne, K2/10.
- Meija, L.H., (2013) Analisis of Dynamic Response, 81st Annual Meeting of the International on Large Dams, ICOLD.
- Najoan. T. F., 2004. *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urukun Akibat Beban Gempa*. Pd T-14-2004-A. Departemen Permukiman Dan Prasarana Wilayah
- Puslitbang SDA, 2011. *Pengembangan Peta Percepatan Puncak di Permukaan Tanah Wilayah Indonesia Pada Berbagai Periode Ulang Gempa Untuk Tanah Keras, Sedang dan Lunak*. Laporan Pekerjaan Konsultan Individual. Puslitbang Sumber Daya Air. Bandung. (Tidak dipublikasikan)
- Puslitbang SDA, 2014. *Studi Retakan dan Analisa Dinamik Bendungan Sutami*. Laporan Kegiatan Advis Teknik. Puslitbang Sumber Daya Air. Bandung. (Tidak dipublikasikan)
- Risk Engineering, (2007), *Software for Eartquake groundmotion estimation, user manual, background and theories, attenuation function*, USGS.
- Bozovic, A., (2001), *Design Features of Dams to Resist Seismic Ground Motion*, Bulletin 120, ICOLD.
- Severn, R., (1989) *Selecting Seismic Parameters For Large Dams*, Bulletin 72, ICOLD.
- Soda, S., Sato, N., Otagaki, K., (2013), *Dynamic Analysis using Dynamic Deformation Properties from Seismic Records of Rockfill Dams*, 81st Annual Meeting of the International on Large Dams, ICOLD.
- Swaisgood, J.R., (2003), *Embankment Dam Deformations Caused by Earthquakes*, Pasific Conference on Earthquake Engineering.