

ANALISIS STABILITAS BANGUNAN SABO DAM GE-C13 KALI GENDOL MERAPI

Sri Madiastuti¹, Yeri Sutopo², Agung Sutarto², Karuniadi Satrijo Utomo²
^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang
Gedung E3-E4 Kampus Sekarang Gunungpati Semarang, telp/fax 024-8508102

email: madiaastuti@gmail.com

Abstract: *Sediment control buiding Gendol Check Dam-13 (GE-C13) is one of buildings that was damaged by the eruption of Merapi in 2010 and in 2018. Sabo dam GE-C13 has been completely renovated. The purpose of this study is to analyze sliding stability, shear and soil bearing capacity of the building during flooding with a 50 year return period (Q_{50}). The analysis begins with the calculation of the design flood discharge by the Hydrographic Synthesis Nakayasu (HSS) method with a 50 year return period (Q_{50}) and for the Sabo Dam Stability Analysis in accordance with SNI 2851-2015. The results of the design flood discharge with a 50 year return period of 51,401 m³ / sec. Stability Analysis at the time of flood conditions obtained value of sliding; Shear; Soil bearing capacity (6.39 > 2; 2.21 > 1.5; 10.74 > 1.5 resepectively.*

Keywords : *GE-C13, HSS Nakayasu Stability.*

Abstrak: Bangunan Pengendali Sedimen Sabo dam bangunan Gendol Check Dam -13 (GE-C13) merupakan salah satu bangunan yang mengalami kerusakan akibat erupsi merapi pada tahun 2010 dan pada tahun 2018. Bangunan pengendali sedimen GE-C13 telah selesai di perbaiki. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis stabilitas bangunan terhadap gaya guling, geser dan daya dukung tanah bangunan saat terjadi banjir dengan kala ulang 50 tahun (Q_{50}). Analisis yang dilakukan dimulai dengan perhitungan debit banjir rancangan dengan metode Hidograf satuan sintesis (HSS) Nakayasu dengan kala ulang 50 tahun (Q_{50}) dan untuk Analisis Stabilitas Sabo Dam sesuai SNI 2851-2015. Hasil debit banjir rancangan dengan kala ulang 50 tahunan sebesar 51,401 m³/det. Analisis stabilitas pada saat keadaan banjir nilai stabilitas guling, geser dan daya dukung tanah sebesar 6,39 (>2); 2,21 (>1,5) dan 10,74 (>1,5) secara berturut-turut.

Kata kunci : *GE-C13, HSS Nakayasu, Stabilitas..*

1. PENDAHULUAN

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung paling aktif di Indonesia. Catatan sejarah telah menunjukkan bahwa seringkali letusan Gunung Merapi terjadi dengan mekanisme yang berbeda, misalnya tahun 1872 dan tahun 2010 yang terjadi secara eksplosif [1]. Letusan Gunung Merapi pada tahun 2010 memiliki indeks vulkanik 4 (VEI 4) yang merupakan letusan vulkanik terbesar sejak 1872, hal ini berbeda dengan letusan yang terjadi sebelumnya tahun 2006 dengan indeks yang hanya (VEI 1) [2]. Dalam 15 tahun terakhir tercatat dua erupsi yang cukup besar yang terjadi pada tahun 2006 dan puncaknya pada tahun 2010 yang diperkirakan merupakan siklus ulang 100 tahunan Gunung Merapi [3].

Sungai yang berhulu pada Gunung Merapi terkena

banjir lahar pasca letusan 2010 yang mengakibatkan banyak kerusakan pada bangunan sabo dam baik berupa rusaknya bagian dari bangunan maupun sampai hancur atau hanyutnya bangunan sabo [4]. Erupsi pada 4 November 2010 merupakan erupsi eksplosif terbesar. Semburan material vulkanis dari mega-erupsi mengeluarkan material awan panas sekitar 140 juta m³ meluncur ke bawah, tersebar ke-13 sungai utama yang berhulu di Merapi. Luncuran aliran awan panas terjauh menuju ke arah Kali Gendol, tersebar sejauh 14 Km dari puncak Gunung Merapi [5]. Untuk menanggulangi bencana akibat aliran lahar, diperlukan bangunan pengendali sedimen sabo dam. Di Kali Gendol terdapat Sabo Dam GE-C13 yang terletak di Kali Gendol Desa Glagaharjo, Cangkringan, Sleman, Daerah Istimewa

Yogyakarta yang merupakan salah satu sabo dam yang mengalami kerusakan akibat erupsi Merapi pada tahun 2010. Sabo dam tersebut tidak dapat menampung sedimen lagi karena sudah dipenuhi material sedimen dari letusan Gunung Merapi, dan sabo dam tersebut baru selesai di perbaiki pada tahun 2018. Disamping itu, kemungkinan terjadinya perubahan morfologi sungai Kali Gendol pasca erupsi [6] dapat mempengaruhi kinerja sabo dam.

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait analisis dan perencanaan sabo dam. Penelitian yang dilakukan oleh [7] tentang fungsi bangunan pengendali sedimen di *check dam* pengkol DAS Kedung, Bengawan Solo. Kegiatan penelitian ini dimulai dengan pencarian data dan survei lokasi di *check dam* pengkol wilayah DAS Kedung Bengawan Solo Hulu kemudian dilakukan perhitungan pengolahan data hujan, untuk mencari curah hujan rencana metode yang digunakan adalah Metode Log Normal, Metode Gumbel dan Metode Log Pearson III. Perhitungan debit rencana menggunakan Metode Rasional dan Metode HSS Nakayasu. Evaluasi erosi dan sedimen pada DAS menggunakan metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*). Perkiraan sedimen tertampung dengan persamaan *Meyer Peter Muller*, data yang digunakan pada persamaan ini adalah data diameter medium, perhitungan stabilitas *check dam* pengkol meliputi stabilitas terhadap geser, stabilitas guling, stabilitas terhadap daya dukung dan stabilitas terhadap piping dan yang terakhir adalah desain ulang *check dam* menggunakan peraturan SNI [8]. Penelitian yang dilakukan oleh [9] tentang stabilitas bangunan pengendali sedimen di Sungai Warmere. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data hidrologi, data topografi dan data mekanika tanah.

Penelitian yang dilakukan oleh [10] tentang stabilitas bangunan pengendali sedimen di Kali Woro Gunung Merapi Lereng Timur yang terletak di desa Balerante, Kecamatan Kemalang, Kabupaten Klaten. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah berupa peta rupa bumi, data hujan, data sabo dam. Penelitian tersebut

menganalisis stabilitas sabo dam sesuai dengan standarisasi dan kriteria perencanaan gugus kerja bidang sabo pada sub-panitia teknik bidang sumber daya air, dan untuk rencana desain bangunan gerusan lokal sesuai dengan standar Departemen Kimpraswil, Puslitbang SDA–Balai Sabo Yogyakarta.

Penelitian yang dilakukan oleh [11] mengenai stabilitas *check dam* di Kali Konto Kecamatan Pujon Kabupaten Malang. Analisa yang dilakukan adalah analisa hidrologi, hidrolika, pendimensian *check dam* lalu analisa stabilitas. Hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut, debit banjir rancangan menggunakan Metode Nakayasu dengan kala ulang 50 tahun sebesar 1186,790 m³/det. Debit *out flow* dari penelusuran banjir lewat waduk sebesar 246,829 m³/det dengan tinggi muka air rencana 3 m. Dimensi *check dam* adalah tinggi *main dam* 6,00 m dan lebar mercu 3,00 m. Kedalaman pondasi 1,00 m dan panjang apron 10,50 m. Kontrol stabilitas *check dam* menunjukkan kondisi aman, baik dalam kondisi normal maupun banjir.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui bagaimanakah stabilitas bangunan pengendali sedimen sabo dam GE-C13 pada saat banjir.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan berupa pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dengan melakukan survei dilokasi penelitian untuk mengetahui kondisi lingkungan yang akan diteliti secara langsung dan pengujian tanah yang ada dilokasi kemudian di uji di laboratorium. Data sekunder diperoleh dengan mengumpulkan data berupa data hujan tahunan, peta topografi wilayah yang diteliti dan gambar sabo dam ge-c13 di dinas terkait. Kemudian dari data yang sudah diperoleh dibuatlah peta DAS sebagai acuan batasan wilayah yang akan diteliti. Penelitian ini dilakukan di lokasi sabo dam GE-C13, Cangkringan, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Perhitungan stabilitas bangunan pengendali sedimen GE-C13 menggunakan debit banjir

dengan kala ulang 50 tahunan (Q_{50}) dengan metode HSS Nakayasu dan untuk perhitungan stabilitas menggunakan SNI [8]. Setelah debit banjir rancangan telah diperoleh barulah menganalisis stabilitas bangunan pengendali sedimen pada saat banjir.

Debit Banjir Rancangan

Pengukuran dispersi untuk menentukan pemilihan distribusi antara lain: (1) Deviasi Standar (S); (2) Koefisien *Skewness* (Cs); (3) Pengukuran *Kurtosis* (Ck); (4) Koefisien Variasi (Cv) [12].

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$Cs = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)(S)^3} \quad (2)$$

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)(S)^4} \quad (3)$$

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} \quad (4)$$

Tabel 1 Pedoman pemilihan distribusi

Jenis Distribusi	Syarat
Normal	Cs \approx 0 Ck = 3
Gumbel	Cs \leq 1,1396 Ck \leq 5,4002
Log Pearson	Cs \neq 0
Log normal	Cs \approx 3Cv + Cv ² = 3 Ck = 5,383

Sumber dalam [13]

Distribusi menggunakan Log Pearson Tipe III [14]:

$$\log X_T = \overline{\log X} + K_T \times S \log X \quad (5)$$

Seperangkat persamaan untuk membentuk suatu hidrograf Nakayasu berdasarkan SNI [15].

Waktu Kelambatan (*time lag*, t_g):

$$t_g = 0,4 + 0,058 \times L; \text{ untuk } L > 15 \text{ km} \quad (6)$$

$$t_g = 0,21 \times L^{0,7}; \text{ untuk } L < 15 \text{ km} \quad (7)$$

Waktu puncak dan debit puncak hidrograf satuan sintesis dirumuskan sebagai berikut:

$$t_p = t_g + 0,8 Tr \quad (8)$$

Waktu saat debitsama dengan 0,3 kali debit puncak:

$$T_{0,3} = \alpha \times t_g \quad (9)$$

Waktu puncak:

$$t_p = t_g + 0,8 Tr \quad (10)$$

Debit puncak hidrograf satuan sintesis dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_p = \frac{1}{3,6} \times A \times R_0 \times \frac{1}{(0,3 \times t_p \times t_{0,3})} \quad (11)$$

Bagian lengkung naik ($0 < t < t_p$)

$$Q = Q_p \frac{t^{2,4}}{t_p} \quad (12)$$

Bagian lengkung turun,

Jika $t_p < t < t_{0,3}$:

$$Q = Q_p \times 0,3 \frac{t-t_p}{t_{0,3}} \quad (13)$$

Jika $t_p < t < 1,5 t_{0,3}$:

$$Q = Q_p \times 0,3 \frac{t-t_p+0,5 \times t_{0,3}}{1,5 \times t_{0,3}} \quad (14)$$

Jika $t > 1,5 t_{0,3}$

$$Q = Q_p \times 0,3 \frac{t-t_p+1,5 \times t_{0,3}}{2 \times t_{0,3}} \quad (15)$$

Analisis Stabilitas Pada Saat Kondisi Banjir

Pada saat terjadi banjir, *Main Dam* dipengaruhi oleh beberapa gaya yaitu gaya akibat berat sendiri konstruksi; gaya akibat tekanan air statik; gaya akibat tekanan tanah sedimen; dan gaya akibat tekanan air ke atas (*uplift pressure*). Akibat pengaruh gaya-gaya tersebut maka tubuh *main dam* harus aman antara lain terhadap beberapa kondisi, yaitu:

(1) Stabilitas terhadap guling dianalisis menggunakan persamaan berikut:

$$Sf = \frac{M_t}{M_g} > 2 \quad (16)$$

(2) Stabilitas terhadap geser menggunakan persamaan:

$$Sf = \frac{f \sum V}{\sum H} > 1,5 \quad (17)$$

(3) Kontrol terhadap penurunan (*tergazi*) menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{ult} = 1,3 \cdot C \cdot N_c + h_p \cdot \gamma \cdot N_q + 0,4 B_2 \cdot \gamma \cdot N_y \quad (18)$$

Sedangkan tegangan yang terjadi akibat beban dapat dihitung dengan persamaan berikut ini [8].

$$Q_{maks/min} = \frac{\sum V}{B_2} 1 \pm \frac{\sum V}{B_2} > Q_{ult} \quad (19)$$

$$e = x - \frac{1}{2} B_2 \quad (20)$$

$$x = \frac{Mt - Mg}{v} \quad (21)$$

3. HASIL PEMBAHASAN

Debit Banjir Rancangan

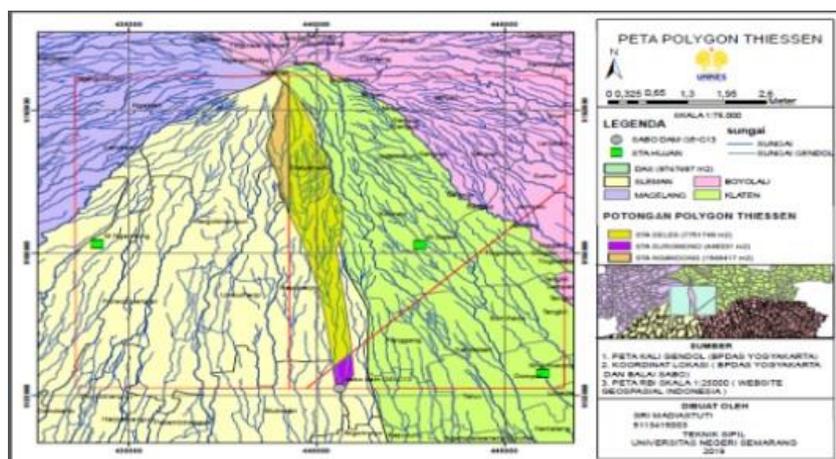
Data curah hujan yang digunakan diambil dari titik-titik tempat penakar hujan yang dimiliki oleh Balai Sabo Yogyakarta dan Pusat Sumber Daya Air (PSDA) Jawa Tengah, dengan mengambil data dari rentang 2010 hingga 2018 dan hanya didapati 9 tahun kesamaan tahun data di 3 Stasiun sehingga dapat digunakan sesuai dengan batas minimal data untuk pengecekan secara statistik maupun secara teori yang lain. Langkah langkah dalam analisis hidrologi secara umum adalah sebagai berikut; (1) membuat luasan Daerah Aliran Sungai (DAS) mendekati kondisi lapangan riil; (2) menentukan luas pengaruh dari setiap Stasiun curah hujan yang digunakan mewakili DAS dari Kali Gendol dengan metode *Polygon Thiessen*; (3) menghitung besaran curah hujan maksimal tahunan dari

$$Fk_{max} = qu / Q_{max} \quad (22)$$

data curah hujan yang dimiliki; (4) melakukan analisis curah hujan rencana dengan periode ulang T tahunan sesuai yang digunakan dalam penelitian; (5) menghitung debit banjir rencana sesuai dengan analisis curah hujan rencana pada periode ulang T tahunan;

Dalam analisis ini penulis menggunakan aplikasi ArcGis 10.6 untuk menentukan Peta DAS dan Pembagian wilayah sebaran hujan dengan metode *Polygon Thiessen*.

Gambar 1 memperlihatkan pembagian luasan daerah aliran air di wilayah kali Gendol dengan metode *Polygon Thiessen* menggunakan bantuan aplikasi ArcGis 10.6. Curah hujan yang dihitung menggunakan metode *polygon Thiessen* diperlihatkan pada **Tabel 2**. **Tabel 2** ini menunjukkan bahwa luas daerah tangkapan hujan wilayah kali gendol dengan hilir sabo dam GE-C13 sebesar 9,6229 km².



Gambar 1 Pembagian luasan dengan *polygon thiessen* wilayah Kali Gendol

Tabel 2 Pembagian luas daerah tangkapan hujan metode *Polygon Thiessen*

No	Nama Stasiun Pos Hujan	Ai = (Km ²)
1	Deles	7,95
2	Ngandong	1,23
3	Surowono	0,44
Jumlah		9,6229

Tabel 3 Curah hujan rerata maksimum dari perhitungan *polygon thiessen*

No	Tahun	Hujan Daerah (mm)
1	2010	117,31
2	2011	95,33
3	2012	117,99
4	2013	98,05
5	2014	84,12
6	2015	107,51
7	2016	116,69
8	2017	113,35
9	2018	110,82

Sedangkan curah hujan rerata maksimum dengan metode Poligon Thiessen diperlihatkan pada **Tabel 3**. Besarnya curah hujan tahunan yang telah dihitung dengan metode *Polygon Thiessen*. Rata-rata curah hujan tertinggi terjadi pada tahun 2012 adalah sebesar 117,99 mm/ tahun.

Tabel 4 Hasil uji normalitas Kolmogorof-Smirnov menggunakan SPSS versi 21

Keterangan	Hasil
N	9
Mean	106,79
Standar Deviasi	11,08
Diferences Positive	,172
Diferences Negative	-,191
Asymp. Sig. (2-tailed)	0.899

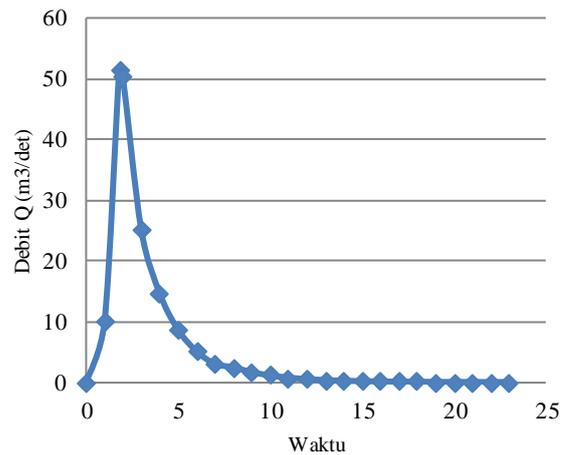
Uji Normalitas Kolmogorov Smirnov menunjukkan bahwa data hujan di wilayah ini yang ada terdistribusi secara normal. Berdasarkan hasil tersebut, diuji Cs dan Ck yang dapat diterima dalam parameter statistik pada distribusi *Log Pearson Type III*, sehingga perhitungan nilai hujan rencana akan menggunakan persamaan metode *Log Pearson Type III* seperti ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Hujan Rancangan Metode Distribusi Log Pearson Type III

T (tahun)	K	Log XT (mm)	Xp (mm)
2	0.18	2.035	108.46
5	0.85	2.069	117.21
10	1.11	2.082	120.85
25	1.33	2.093	124.01
50	1.45	2.099	125.68
100	1.53	2.104	126.94

Nilai curah hujan rancangan didapatkan sesuai dengan **Tabel 5** mengambil umur rencana bangunan air selama 50 tahun didapatkan nilai curah hujan rancangan sebesar 125,68 mm.

Debit banjir rencana dalam penelitian ini dilakukan dengan hidrograf satuan sintetik dengan metode Nakayasu pengulangan intensitas curah hujan periode ulang 50 tahun seperti yang terlihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Hidrograf satuan sintetik dengan metode Nakayasu 50 tahun

Grafik di atas, diketahui nilai debit maksimum banjir rencana untuk periode ulang selama 50 tahun di kali Gendol sebesar 51,401 m³/det.

Analisis Stabilitas Bangunan Pengendali Sedimen

Desain bangunan pengendali sedimen harus menghasilkan bangunan dengan stabilitas sesuai [8] yang memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- Aman terhadap Guling ($Fk_{guling} \geq 2$);
- Aman terhadap Geser ($Fk_{geser} \geq 1,5$);
- Aman terhadap daya dukung tanah ($Fk_{daya\ dukung} \geq 1,5$)

Tabel 6 memperlihatkan data teknis sabo dam GE-C 13 yang dibutuhkan untuk menghitung stabilitas sabo dam. Berdasarkan data tersebut dihitung gaya arah horizontal dan arah vertikal yang bekerja pada bendung. Perhitungan memberikan hasil bahwa total gaya horizontal adalah 98,65 ton dengan total momen adalah 441,62 ton meter. Selanjutnya, total gaya vertikal adalah 264,49 ton dengan total momen 2824,24 ton meter.

Stabilitas Guling pada Main Dam

Gaya gaya yang telah didapatkan dalam perhitungan momen kemudian diuji keamanannya dengan membandingkan hasil stabilitas terhadap guling.

Perhitungan memperlihatkan bahwa FK_{guling} adalah 6,39 yang berarti lebih dari angka 2 yang dipersyaratkan agar bendung aman.

Tabel 6 Data dibutuhkan perhitungan stabilitas sabo dam

No	Keterangan	Notasi	Nilai
1	Tinggi keseluruhan bendung utama (m)	H	13.5
2	Tebal peluap Main Dam (m)	B	6,00
3	Kemiringan hulu main dam	M	0,60
4	Kemiringan hilir bendung utama	N	0,20
5	tinggi air diatas peluap	H_w	0.88
6	berat jenis air (dengan sedimen)	γ_w	1,20
7	Berat jenis beton	γ_m	2,35
8	Lebar total dasar bendung utama	b_2	16,39
9	koefisien gesekan dasar	F	0,60
10	tinggi air diatas lantai terjun	H_j	5,25
11	Berat jenis sedimen	γ_s	1,50
12	Tinggi efektif bendung utama	H_e	10,50
13	Kondisi tanah aktif	K_a	0,271
14	Berat jenis sedimen dasar	γ_{sub}	1,30
15	Koefisien Gempa	K	0.15

Stabilitas Geser pada *Main Dam*

Perhitungan keamanan bendung penahan sedimen

Tabel 7 Rangkuman hasil stabilitas pada *main dam*

Stabilitas	FK	Kondisi Banjir
Stabilitas Guling	>2 (aman)	$F_k = 6,39$
Stabilitas Geser	>1,5 (aman)	$F_k = 2,21$
Stabilitas Daya Dukung Tanah	>1,5 (aman)	$F_{kmax} = 43,94$ $F_{kmin} = 10,74$

Tabel 7 memperlihatkan bahwa kestabilan main dam pada saat kondisi banjir meliputi stabilitas guling, geser dan daya dukung tanah dengan debit rancangan kala ulang 50 tahunan (Q_{50}) semuanya aman.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pembahasan yang dilakukan menghasilkan beberapa kesimpulan:

(*main dam*) terhadap gaya geser dihitung menggunakan persamaan gaya geser. Nilai $\tan \phi$ belum diketahui, sehingga harus diambil dari nilai pada lampiran C SNI 2851-2015 untuk jenis tanah dasar berupa pasir padat dan kompak dengan nilai $\tan \phi = f = 0,6$. Hasil hitungan memperlihatkan bahwa FK_{geser} bendung adalah 2,217 yang lebih dari 1,5 sebagai syarat keamanan bendung.

Stabilitas Daya dukung Tanah pada *Main Dam*

Perhitungan dalam upaya menghitung nilai kontrol daya dukung tanah terhadap terhadap penurunan menggunakan persamaan *Terzaghi*. Sesuai dengan persamaan *terzaghi* yang didasari oleh nilai sudut geser mendekati $35,32^\circ$ diperoleh nilai N_c sebesar 60,2, N_q sebesar 43,9, dan N_γ sebesar 46,12. Berdasarkan nilai tersebut diperoleh Q_{ult} sebesar 217,172 ton/m²

Selanjutnya perkiraan nilai tegangan yang terjadi disebabkan oleh gaya yang ada dengan persamaan Q_{max} yang diperoleh sebesar 8,73 ton/m³. Nilai ini lebih besar dari Q_{ult} . Oleh karena itu, hasil ini menunjukkan bahwa Sabo Dam ini amat dari aspek daya dukung tanah. Rangkuman hasil perhitungan stabilitas main dam dapat dilihat pada **Tabel 7**.

- 1) Besaran debit banjir rancangan untuk periode ulang 50 tahunan di Kali Gendol dengan luas DAS 9,6229 km² sesuai dengan hidrograf satuan sintetik metode Nakayasu sebesar 51,401 m³/detik;
- 2) Analisis Stabilitas Bangunan pengendali sedimen Sabo Dam GE-C13 didapatkan stabilitas main dam saat kondisi banjir dengan nilai stabilitas guling sebesar $6,39 > 2$ (aman), stabilitas terhadap geser sebesar $2,21 > 1,5$ (aman) dan stabilitas

terhadap penurunan tanah sebesar $F_{kmax} 43,94 > 1,5$, F_{kmin} (aman) $10,74 > 1,5$ (aman).

Saran

Diperlukan rehabilitasi bagian main dam dan pegerukan material semdimen secara berkala di lokasi Sabo dam agar sabo dam dapat berfungsi sesuai dengan yang diinginkan.

Ucapan Terimakasih

Laboratorium mekanika tanah Fakultas Teknik UNNES.
Balai Sabo Yogyakarta, PPK PL G Merapi, PSDA
Jateng, BPDAS Yogyakarta.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. S. Brotopuspito, "Kajian Multi Bahaya, Kerentanan, Resiko, Desain Tata RUang Kawasan Rawan Bencana Merapi dan Implementasinya dalam peningkatan Kapasitas dan Kesiapsiagaan Masyarakat Terhadap Bahaya Gunungapi," Yogyakarta, 2011.
- [2] K. Preece, "Transitions between effusive dan explosive activity at Merapi volcano, Indonesia. a volcanological and petrological study of the 2006 and 2010 eruptions," 2014.
- [3] Surono dkk., "The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano-A '100-year' event," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2012.
- [4] M. D. Munir dan Djudi, "Kerusakan Bangunan Pengendali Sedimen (Sabodam) Pasca Erupsi Gunungapi Merapi 2010," in *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan Ke-8*, 2015, pp. 128–141.
- [5] C. B. Sukatja dan A. Alfianto, "Revitalisasi Sabodam Sebagai Pengendali Aliran Lahar," *J. Tek. Hidraul.*, vol. 8, no. 1, pp. 29–42, 2017.
- [6] G. D. Arya, H. Nugraha, D. S. Hadmoko, D. Wacano, A. D. W. R, dan F. Cahyaningtyas, "Estimasi Perubahan Morfologi Sungai Pasca Erupsi: Aplikasi Data Lidar dan DEM Processing Di Kali Gendol," in *Seminar Nasional Pendayagunaan Informasi Geospasial Untuk Optimalisasi Otonomi Daerah*, 2013.
- [7] T. Rahayu, "Evaluasi Fungsi Bangunan Pengendali Sedimen (Check Dam) Pengkol Berdasarkan Perubahan Tata Guna Lahan Kali," *e-Jurnal Matrik Tek. Sipil*, 2017.
- [8] Anonim, *SNI 2851 2015 Desain Bangunan Penahan Sedimen*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2015.
- [9] Herlina, L. dan E. Kumiyaningrum, "Analisis Stabilitas Bangunan Pengendali Sedimen (Sabo Dam) Berdasarkan Morfologi Sungai di

- Sungai Warmare, Kabupaten Monokwari," *J. Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [10] Harseno, E. dan Marsinius, "Analisis Stabilitas Sabo Dam dan Gerusan Lokal Kali Woro Gunung Merapi Kabupaten Klaten," *Maj. Ilm. UKRIM*, vol. 1, pp. 1–18, 2008.
- [11] Suhudi dan R. Kandari, "Uji Stabilitas Check Dam Kedungrejo 15 di Kali Konto Kecamatan Pujon Kabupaten Malang," *J. Reka Buana*, vol. 1, no. 2, pp. 65–72, 2016.
- [12] B. Triatmodjo, "Hidrologi Terapan," *Beta Offset*, 2008.
- [13] Soemarto, *Hidrologi Teknik*. Surabaya: Usaha Nasional, 1987.
- [14] I. M. Kamiana, *Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [15] SNI 2415:2016, "Tata cara perhitungan debit banjir rencana," *Bsn*, 2016.