

EFEKTIFITAS DAN KELENGKAPAN BANGUNAN SABO DI SUNGAI TOGURARA DAERAH GUNUNGAPI GAMALAMA

EFFECTIVITY AND INSTRUMENTATION OF SABODAM IN TOGURARA RIVER GAMALAMA VOLCANO AREA

Ardian Alfianto¹⁾, Jati Iswardoyo¹⁾, Cosmas Bambang Sukatja^{2)*}

¹Balai Litbang Sabo, Pusat Litbang Sumber Daya Air
Sopalan, Maguwoharjo, Yogyakarta-55282
Tel. 0274-886350, Fax. 0274-885431

*Corresponden author: cosabam@yahoo.com

Diterima: 21 Mei 2019; Direvisi: 21 Oktober 2019 ; Disetujui: 11 November 2019

ABSTACT

The lahar flow that occurred after the 2012 Gamalama Volcano eruption, leading to the eastern valley flowing downstream through the Togurara River to the center of Ternate City and Sultan Babullah Airport. To overcome the potential of lahar flow in the river since 2013 - 2016, several sabo dams and building facilities have been built. Based on the results of the calculation of deposits that potentially become lahar flows in 2016, the built-in capacity of the Sabodam has not been able to control the volume of sediment in the upstream of the river, then in the year 2017, 2018 constructed several additional Sabodam. In order to determine the effectiveness, feasibility and conditions of the completeness of Sabodam, is done field assessment on 25 ~ 27 September 2018, the method used was a mathematical approach based on sabo technology. The assessment was in the form of a field survey, simple measurements, interviews with the Sabodam management agency and local residents related to the lahar flow that had occurred. With the capacity of several additional Sabodams built in series, the average river bed slope was originally 9.09% to 6.83%. After the construction of Sabodam, the maximum lahar flow was once as high as 7 m, but now it decreases do 4.2 m. As the slope of the Togurara River slopes progressively, the lahar flow rate and its destructive power are reduced, so that Ternate City and Sultan Babullah Airport are spared from lahar disaster.

Keywords: Lahar flow, sabodam, sabo technology, slope of riverbed, Togurara River.

ABSTRAK

Banjir lahar pasca erupsi Gunungapi Gamalama 2012, mengarah ke lembah timur mengalir ke hilir melalui Sungai Togurara menuju pusat Kota Ternate dan Bandara Sultan Babullah. Untuk menanggulangi potensi limpasan lahar di sungai tersebut sejak tahun 2013 - 2016 dibangun beberapa sabodam dan kelengkapannya. Berdasarkan hasil perhitungan volume endapan yang berpotensi menjadi aliran lahar pada tahun 2016, kapasitas tampung sabodam yang sudah dibangun belum mampu mengendalikan volume sedimen yang ada di hulu sungai, maka pada tahun 2017, 2018 dibangun beberapa sabodam tambahan. Guna mengetahui efektivitas, kelayakan dan kondisi kelengkapan sabodam di sungai Togurara dilakukan pengkajian lapangan pada 25 ~ 27 September 2018, metode yang digunakan pendekatan matematis berdasarkan teknologi sabo. Diantaranya survei lapangan, pengukuran sederhana, wawancara dengan instansi pengelola sabodam dan warga sekitar terkait kejadian banjir lahar yang pernah terjadi. Dengan telah terisinya kapasitas tampung dari beberapa sabodam tambahan yang dibangun secara seri, kemiringan dasar sungai rata-rata yang semula 9,09 % menjadi 6,83 %. Setelah pembangun sabodam tinggi banjir lahar maksimum yang dahulu setinggi 7 m, saat ini menurun menjadi 4,2 m. Dengan semakin landainya kemiringan dasar Sungai Togurara, menjadikan laju kecepatan aliran lahar dan daya rusaknya berkurang, sehingga Kota Ternate dan Bandara Sultan Babullah terhindar dari bencana lahar.

Kata kunci: Aliran lahar, sabodam, teknologi sabo, kemiringan dasar sungai, Sungai Togurara

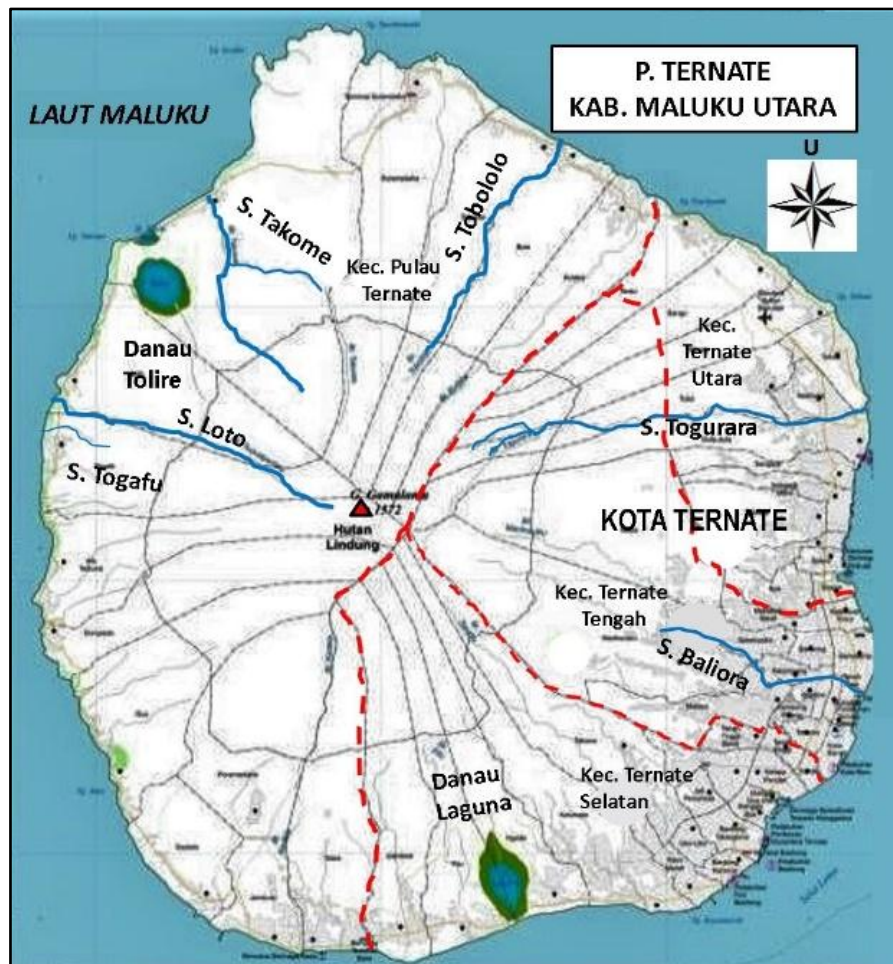
PENDAHULUAN

Gunungapi Gamalama merupakan gunungapi aktif, terletak pada koordinat $01^{\circ} 48' \text{ LU}$ dan $127^{\circ} 19,5' \text{ BT}$. Sejak tanggal 10 Maret 2015 hingga September 2019 Gunungapi Gamalama di Pulau Ternate dengan luas $111,80 \text{ km}^2$, berstatus "Waspada". Gunungapi ini berbentuk stratovolcano, berdiameter 11 km dengan tinggi 1.715 mdpl, terlihat curam di bagian puncaknya, dan landai di bagian kakinya. Gunungapi yang berada di tengah pulau ini seakan menguasai pulau tersebut sehingga sering disebut sebagai pulau vulkanik yang muncul dari dasar laut. Lokasi Gunungapi Gamalama di Pulau Ternate, Kepulauan Maluku Utara dapat dilihat dalam gambar 1 berikut.

Gunungapi Gamalama yang berada di tengah pulau tersebut membentuk topografi lahan daerahnya berbukit dan mengerucut ke arah puncaknya. Kemiringan lereng di daerah puncak di atas 40%, sedang di daerah pesisir/kaki gunung sekitar 2 sampai 8%. Pemukiman masyarakat berkembang di dataran kaki gunung di sepanjang garis pantai timur, selatan dan utara dari pulau Ternate. Daerah dataran yang paling luas adalah dataran

timur yang selain menjadi pusat Kota Ternate juga dibangun bandara. Kota ini memiliki karakter sebagai kota terbesar dan paling pesat pertumbuhannya di wilayah Propinsi Maluku Utara. Jalur penghubung dari beberapa pusat pemukiman yang terletak di sekeliling garis pantai, dibangun jalan raya mengelilingi pulau tersebut.

Karakteristik aktivitas Gunungapi Gamalama dari tahun 1911 selalu diikuti dengan keluarnya aliran awan panas (*pyroclastic flow*). Sejak tahun 1988, 1991 dan 1993 mayoritas aliran awan panas mengalir mengikuti lembah ke arah Timur. Pada tahun 2012 fenomena erupsi Gunungapi Gamalama mengalami perubahan, yakni sebelum erupsi diawali dengan beberapa kali gempa tektonik lokal dan vulkanik (Masinu, A. L. dkk. 2018). Gempa sebelum erupsi tersebut merupakan pergerakan lava atau aliran fluida panas (batuan dalam bentuk cair) dari dapur magma ke bagian permukaan kawah. Aliran lava keluar melalui mulut kawah mengalir ke bawah dan mengendap di sekitar puncak, lereng dan palung sungai membentuk beberapa endapan material vulkanis, sebagai sumber material aliran lahar.



Gambar 1 Pulau Ternate, Kepulauan Maluku Utara dan Gunungapi Gamalama.

Pada tahun 1988, 1991, 1993, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, dan 2018 Gunungapi Gamalama erupsi secara berkelanjutan. Sebagai respon tanggap darurat bencana erupsi berbasis data satelit disusun Peta Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gunungapi Gamalama. Di dalam peta tersebut, Sungai Togurara yang mengalir ke arah dataran Timur diklasifikasikan sebagai daerah KRB III, II, dan I (Lapan, 2014). Sehingga DAS Togurara selain berpotensi terdampak lahar juga rawan terkena perluasan awan panas, dan aliran lava, gambar 2.

Selama lima tahun terakhir sejak tahun 2014, Gunungapi Gamalama mengalami erupsi freatik di setiap tahunnya. Pada erupsi tersebut material yang dominan dikeluarkan adalah abu vulkanik yang disertai sedikit pasir, disemburkan ke udara dengan tinggi antara 500 hingga di atas 1.000 m.

Meskipun hanya erupsi freatik namun karena beruntun maka sebaran abu vulkanik cukup luas. Sebagian besar sebaran material abu vulkaniknya menutup daerah KRB, menyelimuti dan mengendap pada daerah endapan material vulkanis dari hasil erupsi terdahulu. Mayoritas sebaran abu berada di daerah KRB III, disusul di KRB II dan I. Berdasarkan penelitian di daerah Gunungapi Merapi, nilai kepadatan tanah dan tingkat kapasitas infiltrasi tanah di daerah KRB berbeda. Hasil penelitian tersebut menunjukkan nilai kepadatan tanah di KRB I: $10,454 \text{ KN/m}^3$, KRB II: $11,69 \text{ KN/m}^3$, KRB III: $13,86 \text{ KN/m}^3$. Tingkat kapasitas infiltrasi tanah di KRB I: 42.638 cm/jam , KRB II: 22.504 cm/jam , KRB III: 19.667 cm/jam (Ikhsan, J. dkk. 2019). Hasil penelitian ini diperkuat dari hasil uji laboratorium bahwa pada permukaan material vulkanis yang tertutup abu ketika mengalami peningkatan hujan yang terjadi sebelumnya, akan menaikkan tingkat limpasan. Peningkatan limpasan tersebut dapat mempercepat pelepasan limpasan (Jones, R. dkk. 2017).

Dari peta KRB gambar 2 juga terlihat bahwa jarak antara puncak Gunungapi Gamalama dengan garis pantai antara 5,0 sampai 6,0 Km. Sehingga sungai-sungai yang berhulu dari lereng Gunungapi yang tingginya 1.715 mdpl tersebut, merupakan sungai yang pendek, hanya sekitar 3,0 Km. Banjir lahar pasca erupsi Gunungapi Gamalama pada tahun 2011 – 2012 merupakan bencana yang menimbulkan kerugian harta benda dan korban jiwa besar pada dekade 2010. Banjir lahar tersebut terjadi pada 14 Desember 2011, melanda Sungai Togurara, Togafu dan Baliaro.

Dampak dari bencana tersebut, alur Sungai Togurara dan Togafu dipenuhi sedimen. Bahkan ketika terjadi hujan lebat pada 27 Desember 2011 volume material lahar yang terangkut aliran

melebihi kapasitas kantong sedimen yang ada di Sungai Togurara hilir. Meluap dan melanda Desa Tubo dan bibir pantai mengakibatkan jatuhnya korban jiwa dan beberapa rumah hilang, dan rusak berat.



Lapan, 2014.

Gambar 2 Peta kawasan rawan bencana Gunungapi Gamalama.

Hujan lebat yang terjadi pasca erupsi pada 9 Mei 2012 dini hari, mengakibatkan banjir lahar di Sungai Togurara. Aliran lahar melanda Desa Tubo, Maliaro, Dufa-dufa dan Ake Huda (Kecamatan Ternate Utara), serta Desa Marikurubu (Kecamatan Ternate Tengah). Radius aliran lahar pada saat itu hingga mencapai bibir pantai. Aliran lahar yang menerjang pemukiman menelan 15 korban jiwa, 14 unit rumah hilang, 273 unit rusak berat dan ringan. Aliran lahar juga merusak infrastruktur diantaranya 4 tanggul, 3 jembatan, dan jalan sepanjang 180 meter.

Sehubungan dengan bencana tersebut Balai Wilayah Sungai Maluku Utara melalui Pejabat Pembuat Komitmen Pengendalian Banjir dan Perbaikan Sungai, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (Ditjend. SDA), Kementerian Pekerjaan Umum, berinisiatif melakukan penanganan. Usaha tersebut berupa pekerjaan Pembuatan Bangunan Pengendali Sedimen dan Perbaikan Sungai Pasca Letusan Gamalama TA. 2013.

Pelaksanaan pekerjaan tersebut dilakukan secara bertahap oleh Satuan Kerja Non Vertikal Tertentu (SNVT) Pelaksanaan Jaringan Sumber Air (PJSA) Maluku Utara, dari tahun 2013 hingga 2016.

Proyek tersebut dinamakan pembangunan bangunan pengendali sedimen dan perbaikan

sungai pasca letusan Gamalama TA. 2013. Pekerjaan proyek tersebut adalah pembangunan sabodam 4 unit di alur sungai pada titik pengukuran (sta.) 1+700 ~ 2+650, *Groundsill* 2 unit di sta.1+850 ~ 2+050, tanggul bronjong sepanjang 4.154 m dan tanggul dinding beton pada kantong sedimen (*sand-pocket*) sepanjang 63 m, normalisasi sungai di 4 lokasi dan revetment pada alur sungai di sta. 1+250 ~ 1+750.

Pada 18 Desember 2014, Gunungapi Gamalama erupsi kembali dengan menyemburkan abu vulkanik, menyebar ke seluruh wilayah Kota Ternate. Aliran lahar yang terjadi pasca erupsi tersebut mengakibatkan beberapa sabodam yang baru saja selesai dibangun terimbun material endapan lahar.

Frekuensi erupsi Gunungapi Gamalama yang berkelanjutan tersebut mengakibatkan material vulkanik yang dikeluarkan semakin banyak sehingga menghantui masyarakat yang tinggal di pulau tersebut. Mereka beranggapan jumlah bangunan sabo yang ada di Sungai Togurara dirasa belum mampu mengendalikan material vulkanik yang semakin banyak dikeluarkan Gunungapi Gamalama. Sehingga masyarakat yang tinggal di hilir Sungai Togurara di sekitar Kota Ternate dan Bandara Sultan Babullah berisiko terdampak aliran lahar.

Berdasarkan hasil studi perhitungan volume endapan yang berpotensi menjadi aliran lahar pada tahun 2016, volume sedimen di Sungai Togurara hulu diperkirakan 130.917,51 m³. Sedangkan kapasitas tampung sabodam yang sudah dibangun di sungai tersebut 40.005,58 m³. Maka pada tahun 2017 dan 2018 perlu membangun beberapa sabodam tambahan sebagai upaya untuk mengendalikan material lahar minimal sekitar 90.911,93 m³ (Puspitosari, D. dkk. 2018).

Sabodam merupakan suatu teknologi yang paling efektif dalam penanggulangan aliran lahar. Kinerja sabodam semakin efektif dan mempunyai fungsi kontrol yang lebih baik, bila dalam satu sistem sungai dibangun sabodam secara seri (KIM, N. 2015).

Setiap bangunan sabo memiliki fungsi mandiri namun dalam pengendalian aliran lahar di suatu sungai peran bangunan sabo selalu diintegrasikan dengan bangunan sabo lainnya. Maka dalam satu sistem sungai sabodam dibangun secara seri dengan jarak tertentu seperti yang disyaratkan. Hal ini bertujuan agar sabodam yang satu dapat mendukung sabodam lainnya agar kinerja tiap sabodam stabil dan aman dari gerusan lokal. (Kusumosubrata, H. 2014).

Untuk itu guna mengetahui efektivitas dan kelayakan serta kondisi dari kelengkapan sabodam

yang telah dibangun di Sungai Togurara dilakukan pengkajian dengan metode pengkajian pendekatan matematis berdasarkan teknik sabo.

METODOLOGI

Untuk mengetahui kinerja dan kelengkapan sabodam yang telah dibangun di Sungai Togurara dilakukan pemantauan dan pengkajian keadaan sabodam di lapangan. Pengkajian tersebut dilakukan dengan metode pendekatan matematis berdasarkan teknologi sabo. Dengan menganalisis data desain bangunan, hasil pengamatan secara visual, pengukuran sederhana, dan wawancara dengan warga sekitar maupun instansi yang terkait. Pemantauan bangunan sabo dilakukan secara terpisah maupun sekaligus pada beberapa bangunan sabo. Untuk memahami berbagai permasalahan yang berhubungan dengan aliran lahar, unjuk kerja bangunan sabo dan permasalahan yang ada di Sungai Togurara, dilakukan dengan cara pendekatan yang bersumber pada hasil observasi kualitatif.

Sedang untuk mengevaluasi bangunan sabo dilakukan dengan menggunakan pendekatan bersumber dari teori dan kebenaran yang bersifat empirik. Dalam penelitian ini teknik pengambilan data menggunakan beberapa metode, diantaranya memanfaatkan dokumentasi dari data sekunder, wawancara, dan pengamatan lapangan.

Dokumentasi data sekunder diperoleh dari SNVT PJSA Maluku Utara yang sekarang disebut Balai Wilayah Sungai Maluku Utara, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Arcitech & Consulting Engineers PT. Bina Karya dan Yachiyo Engineering Consultant.

Pengamatan bangunan sabo dan kelengkapannya dilakukan di sepanjang Sungai Togurara pada 25 ~ 27 September 2018, mulai dari bangunan paling hulu yakni sabodam TG-D21 (sta. 2+650) hingga bangunan paling hilir yakni sabodam TG-D1 (sta. 0+175). Bangunan sabo tersebut terdiri dari kantong sedimen dibangun sebelum 2013, sabodam lama (dibangun pada TA. 2013, dari 2013 ~ 2016) dan sabodam baru (dibangun pada TA. 2016, dari 2017 ~ 2018). Sabodam TA. 2013 (lama) terdiri dari sabodam TG-D1 hingga TG-D9, sedang sabodam TA. 2016 (baru), TG-D10 hingga TG-D21.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Erupsi Gunungapi Gamalama

Berdasarkan peta KRB Gunungapi Gamalama, alur Sungai Togurara berada pada daerah KRB III, II, dan I, rentan terhadap bencana primer maupun sekunder. Daerah KRB I yang menerima sebaran

abu vulkanik paling sedikit menjadikan nilai kepadatan tanahnya paling rendah. Sehingga di daerah KRB I laju infiltrasinya lebih cepat bila dibandingkan dengan daerah KRB II dan III. Sebaliknya karena di daerah KRB III dan II terdapat lapisan abu vulkanik yang lebih tebal maka nilai kepadatan tanahnya lebih besar sehingga kapasitas infiltrasi di daerah tersebut lebih rendah.

Ketika daerah KRB III dan II yang merupakan daerah endapan material vulkanis yang tertutup abu tersiram hujan dengan intensitas tertentu akan lebih mudah mengalami pelepasan limpasan. Sehingga pada saat musim hujan, risiko terpicunya material sedimen yang berada di hulu Sungai Togurara menjadi aliran lahar sangat besar. Dari data sekunder diperoleh data lebar dan tinggi tebing Sungai Togurara seperti dalam tabel 1.

Tabel 1 Data lebar dan tinggi tebing Sungai Togurara

Lokasi (Sta).	Lebar Sungai (m)	Tinggi tebing kiri (m)	Tinggi tebing kanan (m)
0+000~1+500	14,20 ~ 24,00	2,40 ~ 6,30	2,10 ~ 6,40
1+600~3+000	13,30 ~ 23,50	2,10 ~ 8,80	2,10 ~ 9,40
3+100~3+571	9,10 ~ 16,50	3,30 ~ 6,20	3,20 ~ 5,90

Sumber: BWS Maluku Utara

Berdasarkan tabel 1. lebar Sungai Togurara bervariasi, antara 9,10 hingga 24 m. Sedang tinggi tebing sebelah kiri antara 2,10 ~ 8,80 m, dan tebing kanan antara 2,10 ~ 9,40 m.

Penempatan titik dasar Sabo

Dalam memformulasikan perencanaan bangunan sabo di suatu DAS, pada awalnya harus menentukan suatu titik dasar Sabo yang disebut "*Sabo Basic Point*". Titik dasar sabo adalah suatu titik di alur sungai yang dipergunakan sebagai titik dasar dalam menghitung jumlah sedimen yang harus dikendalikan di daerah sasaran.



Sumber: BWS Maluku Utara

Gambar 3 Revetment pada alur sungai di sta. 1+650 ~ 1+750

Penempatan titik dasar Sabo di Sungai Togurara ditentukan pada daerah yang sering mengalami limpasan (*overtopping*), di titik elevasi +200 m dpl. Pertimbangan penetapan titik dasar sabo tersebut sebagai upaya untuk mengendalikan sedimen di bagian hulu dari daerah yang akan dilindungi, seperti pada pusat pemukiman Kota Ternate, dan Bandara Sultan Babullah. Lokasi rumah dan perumahan penduduk di daerah perkotaan Ternate berada di kiri dan kanan alur Sungai Togurara pada ketinggian +200 hingga + 500 m dpl.

Pengendalian sedimen di Sungai Togurara

Penerapan teknologi sabo untuk pengendalian sedimen akibat aliran lahar dibagi menjadi tiga daerah, yakni: daerah produksi sedimen, daerah transportasi, dan daerah pengendapan sedimen.

Desain Pasca Erupsi Gamalama 2013

Material pasca erupsi yang bertengger di hulu sungai masih bersifat lepas, bila bercampur dengan air hujan dengan intensitas tinggi dapat berubah menjadi aliran lahar dan mengalir ke hilir menyusuri sungai. Sungai yang berhulu di lereng gunungapi aktif merupakan alur aliran material vulkanik yang mengalirkan aliran lahar, disebut sebagai sungai lahar. Aliran lahar akan mengendap di alur sungai pada daerah ketinggian < 400 meter, di kemiringan lereng < 3%. (Kumalawati, R. 2015),

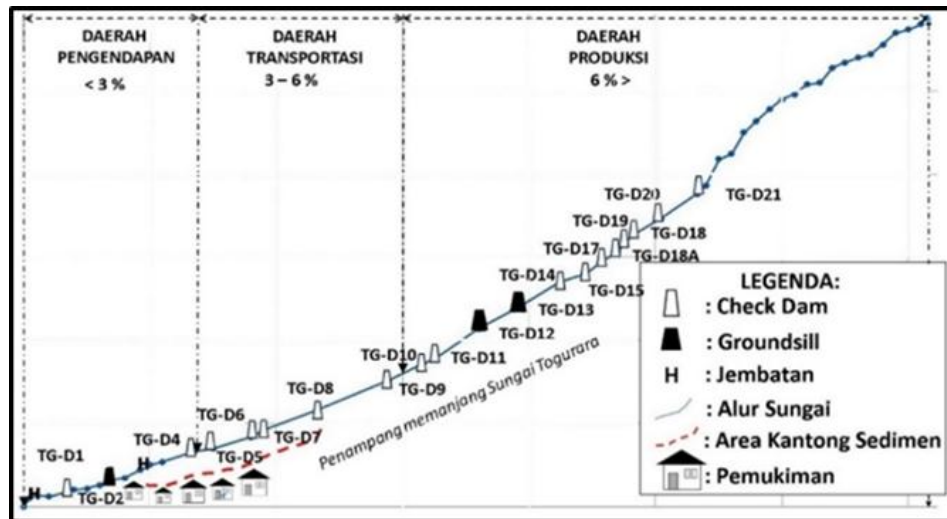
Pekerjaan pengurangan risiko bencana lahar di Sungai Togurara Pasca Erupsi Gamalama 2013 diwujudkan dalam Desain Pembuatan Bangunan Pengendali Sedimen dan Perbaikan Sungai pasca letusan Gunung Gamalama TA. 2013. Desain pekerjaan tersebut, checkdam 4 unit, *ground sill* 2 unit, tanggul bronjong, *revetment* dan normalisasi sungai di 4 lokasi. Gambar 3 menunjukkan *revetment* yang dilaksanakan di sta. 1+650 ~ 1+750.

Pada 10 Desember 2014, ketika pelaksanaan pekerjaan baru menyelesaikan 3 unit sabodam, tanggul bronjong sepanjang 4.154 m, dan normalisasi sungai di bagian hilir, terjadi banjir lahar. Akibat dari kejadian banjir lahar tersebut sabodam TG-D18, dan TG-D15 yang baru saja selesai dibangun belum mampu mengendalikan material aliran lahar yang mengalir dari hulu. Sehingga sabodam yang berada di sta. 2+450, 2+200, dan 1+700 tertimbun material aliran lahar, gambar 4. Disamping itu karena jarak antara bangunan sabo yang satu dengan lainnya masih terlalu jauh maka ada sebagian material yang melimpas ke luar sungai.



Sumber: BWS Maluku Utara

Gambar 4 Sabodam TG-D15 di sta. 2+200 tertimbun material lahar



Gambar 5 Lokasi sabodam, jembatan dan pemukiman d Sungai Togurara

Tabel 2 Keberadaan dan Kondisi Sabodam di Sungai Togurara

Sabodam	Dibangun	Lokasi	Keterangan
TG-D1, TG-D3. TG-D2, TG-D4.	2010 ~ 2012 2016 ~ 2018	Daerah Pengendapan	Berfungsi baik
TG-D5, TG-D6, TG-D7. TG-D8, TG-D9.	2010 ~ 2012. 2016 ~ 2017	Daerah Transportasi	Berfungsi baik
TG-D14*, TG-D19, TG-D20*. TG-D15, TG-D18. TG-D11*. TG-D12*, TG-D13*, TG-D21.	2010 ~ 2012 2013 2014 2015	Daerah Produksi	Berfungsi baik, hanya sabodam bertanda *) tidak efektif karena tidak dilengkapi askes penambangan
TG-D10, TG-17*, TG-D18A.	2017 ~ 2018		

Sumber: BWS Maluku Utara & hasil survei

Sehubungan topografi daerah Pulau Ternate yang terjal dan alur Sungai Togurara yang pendek, bencana lahar yang ditimbulkannya spesifik, sehingga strategi penanganannya disesuaikan dengan daerahnya pula. Seperti pada daerah gunungapi lainnya, secara garis besar sabo dam yang dibangun di Sungai Togurara dimaksudkan untuk mengendalikan aliran lahar atau sedimen dengan cara menahan, menampung sebagian material untuk sementara waktu serta mengalirkan sebagian dari sedimen ke arah hilir. Tata letak pembangunan sabodam di daerah gunungapi dilakukan pada daerah produksi sedimen sampai dengan daerah pengendapan sedimen. (Munir M. D; dan Djudi. 2015). Maka lokasi pembangunan sabodam di Sungai Togurara juga terletak pada daerah produksi sedimen sampai dengan daerah pengendapan sedimen pada gambar 5.

Review Desain Pasca Erupsi Gamalama 2013

Selama pelaksanaan desain pasca erupsi 2013, terjadi perubahan fenomena di lapangan. Seperti suplai material vulkanis dari Gunungapi Gamalama yang berkelanjutan dan peningkatan intensitas hujan di daerah endapan vulkanis. Fenomena tersebut berpengaruh terhadap perhitungan volume angkutan sedimen dan estimasi kapasitas tampung dari bangunan sabo eksisting. Dari hasil analisis di atas menunjukkan bahwa estimasi dari desain pembangunan sabodam pasca erupsi 2013 diperkirakan belum mampu mengendalikan lahar dengan baik. Maka pada tahun 2016 SNVT PJSA Maluku Utara berinisiatif melakukan Review Desain Pembuatan Bangunan Pengendali Sedimen dan Perbaikan Sungai Pasca Letusan Gamalama TA. 2013". Review tersebut diwujudkan berupa "Detail Engineering Design" (DED), perencanaan Pembuatan Bangunan Pengendali Sedimen dan Perbaikan Sungai Pasca Letusan Gunung Gamalama TA. 2016.

Desain Perbaikan Sungai Pasca Erupsi Gamalama TA. 2016

Desain Pembuatan Bangunan Pengendali Sedimen dan Perbaikan Sungai Pasca Erupsi Gunung Gamalama TA. 2016 digunakan sebagai panduan dalam menentukan arah, kebijakan dalam menyusun *sabo-plan* Pengendalian Lahar Gunungapi Gamalama berikutnya. Untuk itu pada tahun 2017 - 2018 BWS Maluku Utara membangun beberapa sabodam pengendali sedimen tambahan di **daerah hulu** Sungai Togu-rara secara seri. Pembangunan tersebut dimaksudkan untuk mencegah longsoran tebing sungai akibat

gerusan kaki tebing oleh aliran lahar dan untuk meredam tenaga gerusan.

Sementara itu, di **daerah tengah** telah dibangun dam sabo dan dam konsolidasi sedimen. Bangunan tersebut dimaksudkan untuk memperlambat kecepatan aliran banjir, menstabilkan dasar sungai, mengarahkan alur sungai, mengubah sifat aliran massa menjadi aliran individu, serta menahan dan mengendalikan material sedimen. Sedang untuk **daerah hilir**, dilakukan kanalisasi, pembangunan kantong sedimen dan *ground sill* serta tanggul di sta. 0+250 m. Kantong sedimen merupakan salah satu bangunan pengendali sedimen yang berada diposisi paling hilir dari semua jenis bangunan pengendali sedimen pada satu sistem sungai (Sutopo, Y. dkk. 2016).

Bangunan ini umumnya berupa tanggul melintang alur sungai dilengkapi bangunan peluap di tengahnya untuk melewati aliran, serta tanggul yang memanjang sejajar alur sungai di kiri dan kanannya. Manfaat dari kantong sedimen untuk menahan dan melokalisasi material sedimen dalam kapasitas besar agar material banjir lahar tidak langsung mengalir ke hilir. Pembangunan *ground sill* (bangunan ambang dasar) dapat digunakan untuk mengatur arah alur sungai dan mencegah limpasan sehingga dapat mengendalikan kestabilan kemiringan dasar sungai (Putra, I. R. dkk. 2015). Untuk itu, pembangunan *ground sill* di Sungai Togurara hilir yang terdapat 2 buah jembatan dimaksudkan untuk meminimalisir gerusan yang terjadi di bagian hilir pilar jembatan

Pembangunan *ground sill* dan tanggul juga berfungsi untuk mengalirkan dan mengarahkan aliran banjir, mencegah erosi dasar sungai, mengatur dan menstabilkan kemiringan dasar sungai, serta melindungi muara sungai dari penyumbatan. Pembangunan sabodam pada satu sistem Sungai Togurara hingga saat ini telah terlaksana 22 bangunan, terdiri dari 5 unit *ground sill*, 1 unit kantong sedimen, dan 16 unit checkdam. Dalam pekerjaan tersebut juga dilakukan normalisasi sungai di 4 lokasi dan *revetment* tebing sungai.

Dari ke 16 unit checkdam tersebut mayoritas sabodam yang berada di hulu dibangun dengan tipe terbuka/celah (*slit*). Pembangunan sabodam tipe terbuka atau tipe celah dalam perencanaannya terbukti tepat dan lebih efektif dalam upaya mitigasi jangka pendek bencana aliran lahar (Silva, M. dkk. 2016). Maka dengan dibangunnya sabodam terbuka dimaksudkan agar semua material yang melewati sabodam dapat dialirkan ke hilir kecuali batu-batu dengan diameter tertentu yang harus ditahan di atas.

Untuk mengantisipasi terjadinya penyumbatan batu-batu besar yang tidak diijinkan mengalir ke hilir pada celah sabodam tipe terbuka maka perlu dilakukan pembersihan material bahan galian yang menyumbatnya. Aktivitas penambangan material galian yang dilakukan sesuai dengan pertimbangan teknis dapat menyediakan ruang tampung sedimen dari sabodam untuk aliran lahar berikutnya. Penambangan yang benar harus dilakukan di hulu sabodam pada area tampungan mati (*dead storage*), di lokasi yang tidak terlalu dekat dengan sabodam maupun tanggul. Pengambilan sedimen dibatasi tidak sampai melebihi dasar sungai agar endapan sedimen tidak longsor dan membahayakan stabilitas bangunan di sekitarnya (Sukatja C. B; dan Alfianto A. 2017).

Untuk itu akses penambangan bahan galian di sekitar sabodam merupakan kelengkapan pendukung yang sangat penting dalam memelihara stabilitas dan unjuk kerja sabodam. Pemilihan sabodam tipe terbuka dimaksudkan untuk:

- Melepaskan mayoritas sedimen ke hilir dengan aman dan menjamin ketersediaan kapasitas tampung sabodam di bagian hilir,
- lebih mudah melepas sedimen pada saat banjir skala kecil dan menengah, sehingga kapasitas tampung akan berfungsi efektif dalam mengatur debit sedimen.
- Menahan batu-batu besar agar tidak mengalir ke hilir yang tinggi tebing kiri kanan sungainya lebih rendah dibandingkan yang di hulu.

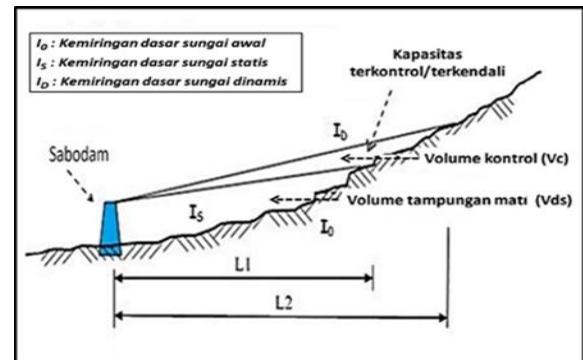
Berdasarkan pengamatan unjuk kerja bangunan sabo di Sungai Togurara dalam pengendalian banjir lahar di daerah vulkanik, pemilihan bangunan sabo dan penempatan lokasinya sudah sesuai dengan kaidah teknik sabo.

Pengendalian sedimen di hulu sabodam

Setelah pembangunan sabodam di Sungai Togurara dilaksanakan berdasarkan hasil DED Pasca Letusan Gunung Gamalama TA. 2016, telah terjadi pengendapan sedimen di hulu bangunan. Pengendapan sedimen di setiap hulu sabodam diharapkan dapat berlanjut sampai endapan sedimen mencapai mercu bangunan dan membentuk kemiringan dasar sungai di hulu bangunan menjadi landai. Pada saat kemiringan dasar sungai mencapai kemiringan ekilibrium statik (I_s), volume endapan sedimen tersebut disebut volume tampungan mati (*dead storage*).

Bila endapan sedimen bertambah terus akan terbentuk kemiringan ekilibrium dinamik (I_D). Seperti dalam gambar 6, endapan sedimen yang terakumulasi antara kemiringan ekilibrium statik dan kemiringan ekilibrium dinamik disebut volume kontrol atau volume terkendali. Dalam gambar

tersebut juga ditunjukkan terjadinya pengendapan sedimen di hulu sabodam dengan sketsa pengendalian aliran sedimen di hulu sabodam, ketika sedimen telah memenuhi kapasitas tampung sabodam.



Gambar 6 Sketsa pengendalian aliran sedimen

Pengendapan tersebut pada awalnya terjadi di daerah permukaan kemiringan dasar sungai awal, hingga mencapai volume tampungan mati (V_{ds}). Ketika suplai sedimen dari hulu terus berlanjut, sedimen berikutnya akan mulai mengisi di daerah permukaan kemiringan dasar sungai statis, hingga mencapai volume tampungan terkendali/kontrol (V_c). Pada saat di daerah hulu sungai terjadi hujan namun tidak memicu terjadinya aliran lahar, yang mengalir di alur sungai tersebut hanya aliran air tanpa membawa sedimen.

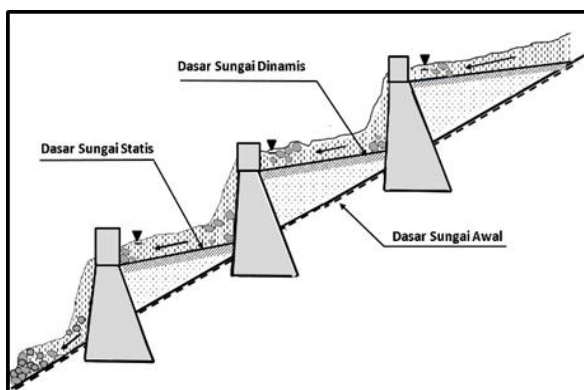
Karena pengaruh gaya gravitasi, aliran air tersebut mampu mengangkut sebagian sedimen yang ada di daerah tampungan kendali/kontrol. Ketika hujan terus berlangsung, aliran air tersebut akan terus mengangkut sedimen yang ada di daerah tampungan kendali/kontrol hingga sampai batas tampungan mati. Dikesempatan lain, ketika terjadi aliran lahar yang membawa sedimen lagi maka sedimen tersebut sebelum dialirkan ke hilir akan kembali mengisi tampungan terkendali. Demikian proses pengendalian transportasi sedimen di hulu sabodam oleh kinerja sabodam agar aliran sedimen tidak secara serentak mengalir ke hilir dalam volume yang besar.

Berdasarkan data profil memanjang Sungai Togurara apabila di sungai tersebut belum dibangun sabodam maka ketika di daerah hulu terjadi aliran lahar, semua material akan langsung mengalir ke hilir tanpa hambatan. Kecepatan aliran lahar tersebut akan semakin bertambah sehubungan dengan adanya faktor percepatan. Setelah sabodam dibangun di sungai tersebut secara seri dengan jarak yang disesuaikan penampang memanjang sungai, material sedimen dari hulu akan mengisi tampungan pada tiap sabodam.

Ketika sedimen yang mengisi tampungan sabodam mencapai kapasitas tampung maksimum akan terbentuk kemiringan dasar sungai yang lebih landai, seperti yang diilustrasikan pada gambar 7. Kemiringan dasar sungai rata-rata yang semula sekitar 9,09 % menjadi 6,83%.

Pembangunan kantong sedimen

Untuk mengantisipasi suplai sedimen dalam skala besar dari aktivitas Gunungapi Gamalama, BWS Maluku Utara sebelum 2013 telah membangun kantong sedimen di Sungai Togurara bagian hilir. Pada gambar 5, lokasi kantong sedimen terletak di antara sabodam TG-D8 sampai jembatan yang berdekatan dengan daerah pemukiman. Penempatan kantong sedimen di lokasi tersebut dimaksudkan untuk menampung dan melokalisasi endapan sedimen dalam jumlah besar. Sehingga alur Sungai Togurara di bagian hilir tidak mengalami aggradasi yang berlebihan.



Gambar 7 Ilustrasi pengendapan sedimen di hulu sabodam seri

Data kemiringan dasar Sungai Togurara di setiap sabodam setelah terjadi pengendapan sedimen di hulu sabodam dapat dilihat dalam tabel 3. Dari Tabel 3 terlihat, penurunan dasar Sungai Togurara di tiap sabodam berbeda hal ini dikarenakan jarak antara sabodam terdapat perbedaan. Semakin pendek jarak antara sabodam mengakibatkan penurunan dasar sungai yang semakin besar. Disamping itu lokasi kemiringan dasar sungai awal yang berbeda juga akan mempengaruhi penurunan dasar sungai. Sehingga dalam pengendalian sedimen di Sungai Togurara membutuhkan lebih banyak sabodam bila dibandingkan dengan sungai lain yang panjangnya sama namun kemiringan dasar sungainya lebih landai. Maka dengan kemiringan dasar Sungai Togurara yang lebih landai dipastikan aliran lahar yang mengalir di sungai tersebut semakin lambat, sehingga daya rusak dari kekuatan aliran lahar akan semakin berkurang. Hasil yang dicapai dengan pembangunan kantong sedimen di daerah hilir

sungai telah berhasil menahan sedimen agar tidak langsung ke muara sungai atau laut.

Tabel 3 Pengendapan sedimen di hulu sabodam

Lokasi (sta.)	Nomor/ kode sabodam	Kemiringan dasar sungai		Penurun- an kemi- ringan dasar sungai
		Sebelum ada sabodam	Sesudah ada sabodam	
0+175	TG-D1	2,50 ⁰	2,40 ⁰	0,10 ⁰
0+350	TG-D2	2,60 ⁰	2,50 ⁰	0,10 ⁰
0+675	TG-D4	2,60 ⁰	2,50 ⁰	0,10 ⁰
0+750	TG-D5	2,67 ⁰	2,50 ⁰	0,17 ⁰
0+900	TG-D6	2,70 ⁰	2,60 ⁰	0,10 ⁰
0+950	TG-D7	2,77 ⁰	2,59 ⁰	0,18 ⁰
1+150	TG-D8	2,93 ⁰	2,76 ⁰	0,17 ⁰
1+450	TG-D9	3,15 ⁰	3,00 ⁰	0,15 ⁰
1+575	TG-D10	3,20 ⁰	3,08 ⁰	0,12 ⁰
1+630	TG-D11	3,30 ⁰	3,20 ⁰	0,10 ⁰
1+960	TG-D13	3,60 ⁰	3,53 ⁰	0,07 ⁰
2+220	TG-D15	3,60 ⁰	3,50 ⁰	0,10 ⁰
2+300	TG-D17	3,63 ⁰	3,58 ⁰	0,05 ⁰
2+350	TG-D19	3,72 ⁰	3,67 ⁰	0,05 ⁰
2+375	TG-D18A	3,76 ⁰	3,70 ⁰	0,04 ⁰
2+425	TG-D18	3,79 ⁰	3,77 ⁰	0,02 ⁰
2+500	TG-D20	4,11 ⁰	3,95 ⁰	0,16 ⁰
2+650	TG-D21	4,14 ⁰	4,05 ⁰	0,09 ⁰

Sumber: BWS Maluku Utara, hasil survei & analisis data

Disamping itu dengan tertahannya sedimen di hilir sungai dapat dimanfaatkan masyarakat sebagai sumber bahan bangunan untuk mendukung pembangunan di daerah sekitarnya serta meningkatkan perekonomian penambang. Sehubungan alasan dana dan waktu pembangunan tanggul kantong sedimen yang memanjang di kiri alur Sungai Togurara dibuat dari bahan bronjong. Mengingat risiko ancaman lahar dalam jangka panjang dan sifat bahan bronjong mempunyai umur terbatas maka saat ini ada sebagian tanggul yang dilapisi dengan beton.

Dalam kegiatan review desain bangunan sabo di daerah Gunungapi Gamalama juga telah dilakukan perbaikan alur sungai di beberapa tempat yang mengalami degradasi dasar sungai, seperti di hilir sabodam T-D14. Dalam usaha mencegah runtuhnya bangunan sabo TG-D14 akibat gerusan lokal dan degradasi dasar sungai telah ditambahkan subdam baru di hilir subdamnya.

Penambahan sub-subdam baru dihilir subdam TG-D14 selain dapat mencegah runtuhnya sabodam tersebut juga sebagai upayaantisipasi mempertahankan keberadaan bangunan sabo di Sungai Togurara secara keseluruhan. Dalam suatu sistem sungai yang sabodamnya dibangun secara seri selalu diupayakan agar setiap bangunan sabo terintegrasi dengan bangunan sabo lainnya. Sistem

kerja sabodam yang saling mendukung dan melengkapi antara sabodam yang satu dengan sabodam lainnya dalam satu sistem seri dapat mencegah efek domino apabila ada salah satu bangunan sabo runtuh.

Pengendalian sedimen di muara sungai

Dalam upaya mengendalikan sedimen di muara sungai, BWS Maluku Utara telah melaksanakan pembangunan kanalisasi. Kanalisasi atau *channel works* bertujuan untuk meluruskan alur sungai sehingga aliran lahar dapat segera menuju ke muara tanpa menimbulkan kerusakan.

Aliran lahar dari hulu yang menuju ke arah muara sungai yang mengalir dari kemiringan lereng tinggi ke landai dengan kecepatan tinggi akan menghasilkan aliran turbulen. Dalam aliran turbulen tersebut terbentuk beberapa pusaran yang menghasilkan percampuran terus menerus antara partikel yang ada dalam aliran lahar di seluruh penampang aliran.



Gambar 8 Salah satu kanalisasi di dekat muara sungai di daerah Gunungapi Gamalama

Dengan adanya kanalisasi ini kemiringan dasar sungai dan arah aliran telah direncanakan sehingga debit sedimen dapat mengalir secara efektif dan aman terhadap turbulensi aliran maupun erosi dasar dan tebing sungai, gambar 8. Agar kinerja bangunan kanal ini dapat optimum umumnya pekerjaan kanalisasi ini dipadukan dengan pembangunan *groundsill* serta tanggul.

Gabungan dari ke 3 bangunan tersebut bermanfaat untuk mengatur arah alur sungai dan menstabilkan kemiringan dasar sungai, mengalirkan air banjir dan mencegah erosi dasar sungai, serta mengamankan muara sungai, gambar 8. Untuk itu pembangunan *groundsill* di hilir jembatan dimaksudkan untuk meminimalisir gerusan yang terjadi di bagian hilir pilar jembatan.

Pekerjaan kanalisasi, *groundsill*, dan tanggul dilaksanakan pada tahun 2013, di mulai dari sta. 0+000 (bibir pantai) hingga 0+825, bertujuan

untuk melindungi dua buah jembatan yang terletak pada sta. 0+025 dan sta. 0+825. Upaya tersebut telah berhasil mengendalikan arah alur sungai di bagian hilir, kestabilan kemiringan dasar sungai dan mencegah erosi, meminimalisir gerusan pada pilar jembatan. Dari data lapangan diketahui bahwa kemiringan dasar Sungai Togurara hilir yang semula sebesar 5,08 % saat itu mengalami penurunan menjadi 4,95 %.

Kondisi muara Sungai Togurara ketika terjadi banjir lahar tahun 2012 sebelum dibangun kanalisasi dapat dilihat pada gambar 9. Dengan keberhasilan tersebut akhirnya pembangunan saluran kanal, dan tanggul di Sungai Togurara dilanjutkan secara bertahap dari 2014 ~ 2016, sampai di sta. 2+700.

Penentuan lokasi bangunan Sabo

Panjang Sungai Togurara yang hanya 3,0 km, mempunyai lebar bervariasi antara 9,10 hingga 24,00 m, dan kemiringan dasar sungai yang relative terjal. Untuk itu dalam menentukan lokasi pembangunan sabodam selain berdasarkan penampang memanjang sungai harus diperhatikan pula lokasi dan kapasitas tampung dari setiap perencanaan sabodam.



Gambar 9 Kondisi bibir pantai yang tererosi pasca banjir lahar 2012 sebelum pembangunan kanalisasi

Pertimbangan tentang lokasi pembangunan sabodam dipilih pada sungai yang kemiringan dasar sungainya belum stabil dan tebing kiri kanannya diperkirakan mempunyai tingkat erosi tinggi. Dari hasil analisis lapangan, BWS Maluku Utara dalam menentukan lokasi pembangunan sabodam sudah berusaha mempertimbangkan unsur ekonomisnya. Hal ini ditunjukkan dalam penempatan sabodam sudah memilih pada alur sungai yang bagian hilirnya mempunyai palung sempit, namun pada bagian hulunya cukup lebar.

Seperti lebar palung sungai yang ada di lokasi sabodam TG-D15 sekitar 17,96 m, tinggi tebing

kanan dan kirinya 7,36 m, dan 3,87 m. Sedang lebar palung sungai di bagian hulunya 19,66 m, dengan tinggi tebing kanan 7,153 m dan kirinya 4,74 m. Dari gambar 5, terlihat pembangunan sabo-dam di Sungai Togurara secara seri dengan jarak antara sabodam tidak sama. Bahkan, ada beberapa sabodam yang jarak antara sabodam satu dengan yang lainnya relatif pendek terutama pada alur sungai yang kemiringan lerengnya terjal.

Dari kriteria pemilihan lokasi sabodam serta data profil memanjang dan kemiringan dasar sungai maka lokasi sabodam di Sungai Togurara seperti dalam tabel 4 berikut.

Tabel 4 Jarak antara sabodam di S. Togurara

Jarak Antara Sabodam (m)	
TG-D1 – TG-D2 : 175	TG-D12 – TG-D13 : 200
TG-D2 – TG-D4 : 325	TG-D13 – TG-D14 : 80
TG-D4 – TG-D5 : 75	TG-D14 – TG-D15 : 90
TG-D5 – TG-D6 : 150	TG-D15 – TG-D17 : 60
TG-D6 – TG-D7 : 50	TG-D17 – TG-D19 : 30
TG-D7 – TG-D8 : 210	TG-D19 – TG-D18A : 70
TG-D8 – TG-D9 : 65	TG-D18A – TG-D18 : 70
TG-D9 – TG-D10 : 135	TG-D18 – TG-D20 : 70
TG-D10 – TG-D11 : 120	TG-D20 – TG-D21 : 105
TG-D11 – TG-D12 : 150	

Sumber: BWS Maluku Utara, hasil survei & analisis data

Disamping itu, pemilihan lokasi sabodam selain berdasarkan pertimbangan agar kapasitas tampung sabodam yang dibangun mampu menampung sedimen cukup banyak juga untuk keamanan sabodam secara keseluruhan. Artinya keberadaan sabodam harus dapat mendukung bangunan sabodam yang berada di hulunya agar tetap stabil dan aman dari gerusan lokal.

Berdasarkan peninjauan lapangan dan data dari Tabel 2 dan 3, dari keseluruhan sabodam yang dibangun di Sungai Togurara terlihat masih cukup efektif dalam mengendalikan aliran lahar pasca erupsi Gunungapi Gamalama terkini.

Dari pengamatan lapangan juga tidak terlihat adanya gerusan lokal pada hilir sabodam dan tanda-tanda melimpasnya aliran ke luar alur sungai. Sehingga belum perlu dilakukan pekerjaan penambahan tinggi mercu bangunan dan sub-dam baru. Meskipun demikian bila dilihat dari kinerja sabodam ada beberapa sabodam yang dinilai kurang optimal karena tidak dilengkapi dengan akses untuk melakukan penambangan bahan galian. Seperti pada sabodam TG-D11, TG-D12, TG-D13, TG-D14, TG-D17, dan TG-D20.

Ada beberapa pekerjaan pemeliharaan ringan yang perlu segera dilakukan pada bangunan sabo di

Togurara. Terutama pada sabo dam yang mengalami abrasi dan benturan pada mercu dan sayapnya, khususnya pada bangunan sabo pembangunannya tahun 2013 ~ 2015. Disamping itu, untuk mempertahankan keawetan umur bangunan perlu juga dilakukan pembersihan semak yang tumbuh di beberapa tempat secara teratur.

Antisipasi pengendalian lahar berikutnya

Sebagai langkah antisipasi dari aktivitas Gunungapi Gamalama yang terus berlanjut yang mensuplai sedimen dalam jumlah besar maka perlu perencanaan sabodam yang mampu mengendalikan aliran lahar dengan baik. Diantaranya dengan menambah jumlah sabodam agar kapasitas tampung sedimennya bertambah besar. Namun dalam kenyataannya lokasi sabodam di Sungai Togurara terbatas dan sudah tidak dapat dikembangkan lagi. Untuk itu sebagai upaya dalam menambah kapasitas tampung dari setiap sabodam yang ada di Sungai Togurara pada saat tertentu perlu dilakukan pengosongan tampungan sabodam. Langkah yang paling efektif dalam mengosongkan tampungan sabodam dilakukan dengan jalan penambangan.

Khusus pada beberapa sabodam yang berfungsi mendukung kestabilan bangunan sabodam yang berada di hulunya ada yang jaraknya relatif pendek sehingga tidak memungkinkan di buat akses jalan penambangan. Untuk itu pada daerah sabodam yang tidak ada akses jalan untuk penambangan sedimen bila suatu saat diperlukan penambangan dapat dilakukan dengan cara manual.

Penentuan tinggi sabodam

Berdasarkan fungsi sabodam, tinggi efektif *main dam* direncanakan pada ketinggian tertentu untuk menghasilkan kemiringan dasar sungai stabil. Untuk memperoleh ketinggian yang sesuai umumnya berdasarkan dengan tinggi tebing di sebelah kiri atau kanan sungai. Namun dalam kenyataannya tinggi tebing di sebelah kiri atau kanan sungai kadang tidak sama. Maka untuk menentukan tinggi *main dam* yang ideal didasarkan pada tinggi tebing di sebelah kiri atau kanan sungai yang berada di sekitar lokasi. Untuk itu dalam menentukan tinggi efektif *main dam* harus berada di bawah dari tinggi tebing di sebelah kiri atau kanan sungai. Hal ini supaya ketika tampungan sedimen telah penuh aliran air masih mampu ditampung oleh alur sungai tersebut.

Sehubungan dengan data tinggi tebing kiri dan kanan Sungai Togurara yang bervariasi seperti yang ditampilkan dalam tabel 1, maka tinggi *main dam* dari masing-masing sabodam yang dibangun juga tidak sama. Sabodam tipe terbuka di Sungai

Togurara tinggi *main dam* 7,00 m sedang yang tipe tertutup ada yang 5,00 m dan 8,00 m. Berikut dicontohkan penentuan tinggi efektif *Main dam* sabodam TG-D21:

Dari data sekunder dan lapangan diketahui:

- 1 Elevasi dasar sungai pada hilir bangunan sabo dam sebelum lokasi: +188,18 m
- 2 Elevasi dasar sungai di lokasi: +187,98 m
- 3 Panjang sungai antar bangunan sebelum sampai ke lokasi: 105 m
- 4 Elevasi tebing sungai sebelah kiri: +196,59 m
- 5 Elevasi tebing sungai sebelah kanan: +195,66 m
- 6 Diameter butiran material
- 7 dasar sungai (d): 2,75 mm
- 8 Percepatan gravitasi (g): 9,81
- 9 Bentang sungai (B): 16,25 m
- 10 Koefisien kekasaran *Manning* (n): 0,04
- 11 Debit banjir rencana (Qd): 92,79 m³/dt.

Kemiringan dasar sungai statis merupakan suatu kondisi dasar sungai menjadi stabil oleh aliran tanpa kandungan sedimen. Untuk menghitung kemiringan dasar sungai statis (Is) di daerah sabodam TG-D21, menggunakan rumus *Iwagaki* pada kondisi tegangan geser kritis (Yunus, M. 2017). Kemiringan dasar sungai statis (Is):

$$Is = \left(\frac{80,9 \cdot d}{g \cdot 10^2} \right)^{10/7} \left(\frac{B}{n \cdot Qd} \right)^{6/7}$$

$$Is = \left(\frac{80,9 \cdot d}{g \cdot 10^2} \right)^{10/7} \left(\frac{B}{n \cdot Qd} \right)^{6/7}$$

$$= \left(\frac{80,9 \times 0,00275}{9,81 \times 10^2} \right)^{10/7} \left(\frac{16,25}{0,04 \times 92,79} \right)^{6/7}$$

$$= 0,000221.$$

Kemiringan dasar sungai statis merupakan kemiringan dasar sungai di hulu sabodam yang terbentuk pasca terjadinya suplai sedimen dari hulu. Pada umumnya besarnya kemiringan dasar sungai statik kurang lebih 1/2 kemiringan dasar sungai semula.

Elevasi dasar sungai teoritis,

Elevasi dasar sungai = Elevasi dasar sungai bagian hilir bangunan - (Panjang sungai antar bangunan sebelum sampai ke lokasi x Kemiringan dasar sungai statis)

$$= 188,18 - (105 \times 0,000221) =$$

$$= 188,18 - 0,023 =$$

$$= +188,15 \text{ m.}$$

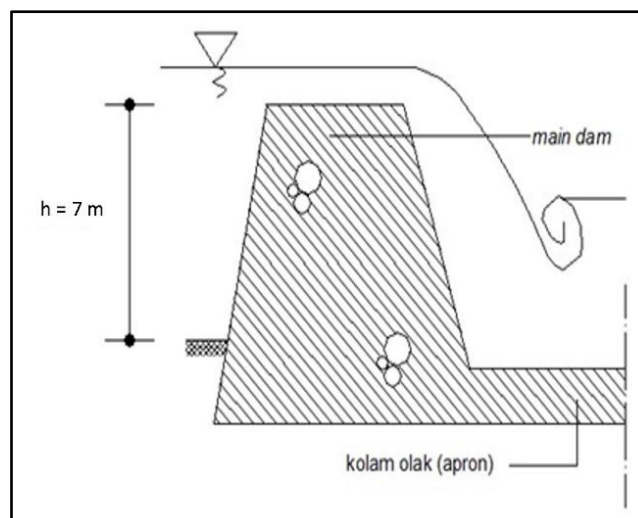
Karena hasil elevasi dasar sungai teoritis lebih mendekati dari elevasi tebing sungai sebelah kanan (+195,66 m), maka yang digunakan sebagai dasar penentuan tinggi efektif *main dam* adalah elevasi tebing sungai sebelah kanan.

Perbedaan tinggi tebing dengan dasar sungai

Perbedaan tinggi tebing dengan dasar sungai = elevasi tebing sungai teoritis - elevasi dasar sungai di lokasi sabodam TG-D21 =

$$= 195,66 - 188,15 = 7,51 \text{ m.}$$

Dari data pengukuran di lapangan diperoleh data bahwa tinggi efektif *main dam* (h) dari sabodam TG-D21 dibuat dengan tinggi 7,0 m. Hal ini telah sesuai dengan ketentuan agar tinggi efektif *main dam* dibuat lebih pendek dari jarak antara tinggi tebing kanan dengan dasar sungai 7,51 m.



Gambar 10 Tinggi efektif *Maindam* TG-D21

KESIMPULAN

Daerah KRB III dan II Gunungapi Gamalama merupakan daerah endapan material hasil erupsi sebelumnya yang tertutup abu vulkanis yang lebih mudah mengalami pelepasan limpasan bila terkena air hujan. Sehingga pada saat musim hujan material sedimen yang berada di daerah KRB III dan II sangat berpotensi terpicu menjadi aliran lahar. Maka Sungai Togurara memiliki zona produksi yang lebih panjang jika dibandingkan dengan zona transportasinya.

Terlebih dengan spesifik daerahnya yang berupa alur sungai yang pendek dan kemiringan dasar sungai yang cukup terjal maka dalam mengendalikan aliran laharnya menggunakan teknologi sabo yang berbeda dengan daerah lainnya. Yakni dengan mengupayakan membangun serangkaian sabodam secara seri untuk membentuk jaringan sabodam dalam tipe bertingkat (*steps*). Hal ini bertujuan selain untuk mempertahankan keutuhan bangunan dari ancaman gerusan lokal, juga menahan agar sedimen tidak langsung ke hilir secara serentak. Hasil kajian sistem sabo lama (TG-D1 ~ TG-D9) dan sabo baru (TG-D10 ~ TG-D21) yang dibangun di Sungai Togurara dalam tipe bertingkat menjadikan kemiringan dasar sungai-nya menjadi semakin landai. Dengan kemiringan dasar sungai yang semakin landai, dipastikan bahwa aliran lahar di sungai tersebut akan semakin lambat. Sehingga daya rusak dari kekuatan aliran lahar akan semakin berkurang.

Disamping itu dengan dibangunnya 22 buah sabodam di sungai tersebut sedimen tidak langsung mengalir ke hilir. Ada sebagian material sedimen yang tertahan dalam tampungan di tiap sabodam selama beberapa waktu. Sehingga di sungai bagian hilir atau muara sungai tidak mengalami aggradasi. Diharapkan pada musim hujan ada hujan yang selain durasinya pendek juga tingkat intensitasnya rendah yang tidak memicu terjadinya aliran lahar dari hulu. Sehingga aliran air hujan yang mengalir di sungai Togurara tersebut dapat mengangkut sedimen yang tertampung di setiap sabodam.

Seperti yang direncanakan bahwa sabodam diperuntukan untuk aliran lahar/debris di masa yang akan datang. Maka perlu diusahakan pada setiap sabodam di Sungai Togurara harus dalam kondisi yang kosong agar siap menampung sedimen dari aliran lahar berikutnya. Untuk itu efektivitas unjuk kerja sabodam selain ditentukan oleh kondisi bangunan sabo di lapangan juga bergantung pada fasilitas pendukungnya. Maka pada sabodam yang berada pada kemiringan dasar sungai tidak terjal serta jarak antara sabodam di

atas dari 60 m perlu tetap mempertimbangkan untuk membuat akses penambangan bahan galian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Kepala BWS Maluku Utara yang telah memberikan ijin dan dukungan data dalam pelaksanaan pengajian. Serta tim inspeksi Balai Litbang Sabo lainnya yang mendukung tersusunnya tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Cahyono, J. 2009. Pengantar Teknologi Sabo. Bab IV halaman 4. jcpoweryogyakarta.blog-spot.com/2009/03/teknologi-sabodam.html.
- Ikhshan, J; Hendrawan, D; dan Sasongko, D. 2019. Study on infiltration capacity at disaster-prone areas in Krasak's watershed of Mount Merapi, Indone-sia. Conference Procee-dings: Exploring Resources, Process and Design for Sustainable Urban Development: Proceedings of the 5th International Conference on Enginee-ring, Technology, and Industrial Application (ICETIA) 2018. 2114(1):050012, DOI: 10.1063/1.5112 456. June 2019.
- Jones, R; Thomas, R. E., Peakall, J., Manville, V. 2017. Rainfall-runoff properties of tephra: Simulated effects of grain-size and antecedent rainfall. *Journal of Geomorphology*. 282 (2017): 39–51. Elsevier.
- KIM, N. 2015. Numerical Study on Debris Flow Behavior. A dissertation of Doctoral Degree in Civil and Earth Resources Engineering, Disaster Prevention Research Institute, River Disaster Prevention Systems Laboratory, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Japan 2015.
- Kumalawati, R. 2015. Buku Pengelolaah Bencana Lahar Gunung Api Merapi. Penerbit Ombak, Yogyakarta:2015.
- Kusumosubrata, H. 2014. Buku Implementasi Sabo. Pemutakhiran Buku Seri Tekno-logi (Cetakan 2014). Kementerian PU, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Lapan, 2014. Deputy Bidang Penginderaan Jauh. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. KawasanRawan Bencana Gunungapi Gamalama. Diunduh tanggal 12 Juni 2018 dari <https://spbn.pusfatja.lapan.go.id/documents/291>.

- Masinu, A. L; Riva,M; Mane,D. L. 2018. Fenomena Gunungapi Gamalama terhadap Dampak Aliran Lahar. Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, dan Praktik dalam Bidang Pendidikan dan Ilmu Geografi. Universitas Negeri Malang Tahun 23, Nomor 1, Jan 2018 Halaman: 113-121. ISSN: 0853-9251 (p) and 2527-628X (e) DOI: <http://dx.doi.org/10.17977/um017v23i22018p113>.
- Munir, M.D; dan Djudi. 2015. Kerusakan Bangunan Pengendali Sedimen (Sabodam) Pasca Erupsi Gunungapi Merapi 2010. Proceeding Seminar Nasional Kebumiharian ke-8. Academia Industry Linkage. 15-16 Oktober 2015: 128-140.
- Puspitosari, D. A; dan Prinadiastari, I. 2018. Peran Bangunan Sabo dalam Pengendalian Banjir Lahar pada Sungai Togurara Gunungapi Gamalama. Kumpulan Intisari Pertemuan Ilmiah Tahunan XXXV HATHI, Medan. 7 – 9 September 2018. ISSN. 978-979-988-5-5-0.
- Putra, I.R ; Imam, P. A; Wahyuni, S.E; Falah, A. 2015. Perencanaan Groundsill di Sungai Senjoyo Kabupaten Semarang. Jurnal Karya Teknik Sipil, Universitas Diponegoro. Volume 4, Nomor 4, Tahun 2015, Halaman 293 – 303. Online di: <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts>.
- Rivaldy, D. R; Jansen, T; Sumarauw,J. S.F. 2018. Evaluasi Kapasitas Penampang Sungai Togurara Kota Ternate terhadap Debit Banjir. Jurnal Sipil Statik. Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado. Vol. 6 No.6 Juni 2018 (397-410) ISSN: 2337-6732.
- Silva, M; Costa, S; Canelas, R.B; Pinheiro, A.N; and Cardoso, A.H; 2016. “Experimental and Numerical Study of Slit-Check Dams”. International Journal for Sustainable Development and Planning. Vol. 11, No. 2 (2016) 107–118.
- Sukatja, C. B; dan Afianto, A. 2017. Revitalisasi Sabodam sebagai Pengendali Aliran Lahar. (Studi Kasus di Daerah Gunungapi Merapi) Jurnal Teknik Hidraulik Vol . 8 No 1, Juni 2017: 29 – 42.
- Sukatja, C. B. 2017. Strategi Terpadu Pengelolaan Penambangan Galian C di Daerah Gunungapi Merapi. Jurnal Sosial Ekonomi Pekerjaan Umum. November 2017.Vol. 9. (2): 79-89.
- Sulistiyono, E. 2016. Laporan Akhir Studi Perhitungan Volume Endapan Yang Berpotensi Menjadi Aliran Lahar Dingin Gunung Gamalama. PT. Rayakonsult.
- Sutopo, Y; Utomo,K. S., Ghifari,S. Z., Nurokhman. 2016. Perencanaan Sand Pocket sebagai Bangunan Pengendali Aliran Sedimen di Kali Opak Yogyakarta. Jurnal Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES). Vol 18, No 2 (2016).
- Yunus, M. 2017. Efisiensi Checkdam type Grid terhadap Pengendalian Aliran Debris di Hulu Sungai. Tesis Program Studi Magister Teknik Sipil Konsentrasi Keairan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin Makassar. (2017).