

REVITALISASI SABODAM SEBAGAI PENGENDALI ALIRAN LAHAR (STUDI KASUS DI DAERAH GUNUNGAPI MERAPI)

REVITALISATION OF SABO DAM AS LAHAR FLOW CONTROLLER (CASE STUDY IN MERAPI VOLCANO AREA)

Cosmas Bambang Sukatja¹⁾ Ardian Alfianto¹⁾

¹⁾Balai Litbang Sabo, Puslitbang Sumber Daya Air, Jl. Sabo, Maguwoharjo, Kec. Depok, Kab. Sleman, DIY
55282

E-Mail: cosabam@yahoo.com

ABSTRAK

Mega-erupsi Gunungapi Merapi 2010 merupakan erupsi eksplosif dalam skala besar, menghancurkan kubah lava, mengeluarkan kolom awan setinggi 4 km dan semburan awan panas ke berbagai arah di kaki gunung. Sekitar 140 juta m³ material awan panas tersebar ke 13 sungai utama yang berhulu di Merapi. Banjir lahar terjadi di hampir setiap daerah aliran sungai yang terletak di bawah kerucut aktif Merapi. Akibat banjir lahar tersebut, sebanyak 77 dari 264 unit sabodam yang ada di daerah Merapi mengalami kerusakan atau bahkan hanyut terbawa aliran lahar. Sabodam merupakan bangunan pengendali aliran lahar yang dibangun melintang pada alur sungai untuk menahan, menampung dan mengalirkan sebagian material atau sedimen agar terbawa aliran dan meloloskan air ke hilir. Kajian ini dilakukan untuk mencari penyebab rusaknya sabodam, dan solusi yang tepat pasca erupsi Merapi 2010. Metode yang digunakan melalui pendekatan deskriptif kualitatif. Hasil dari kajian ini untuk melakukan revitalisasi sabodam sebagai pengendali aliran lahar dan sebagai acuan dalam meninjau ulang rencana induk sistem pengendalian banjir lahar di daerah vulkanik lainnya.

Kata kunci: mega-erupsi, banjir lahar, pengendalian lahar, sabodam, dan gerusan lokal.

ABSTRACT

Mega-eruption of Merapi Volcano 2010 is a large-scale explosive eruption, destroying lava dome, removing cloud columns as high as 4 kilometers and bursts of in various directions at the volcano foot. Approximately 140 millions m³ of pyroclastic material spread through the 13 major rivers that source from Merapi. Lahar flow occurred in almost every river basin located beneath the active cone of Merapi. As a result of the lahar flow, as many as 77 of the 264 units of the sabo dam in the Merapi area were damaged or washed away by the lahar flows. The sabo dam controls the flow of lahar built up across the river channel to hold, accommodate and drain some of the material or sediment in order to carry the flow and pass water downstream. This study was conducted to find the cause of sabo dam damage, and the right solution after the eruption of Merapi 2010. The method used in qualitative descriptive approach. The results of this study were to revitalize sabo dam as lahar flow controller and as a reference in reviewing the master plan of a lahar flow control system in other volcanic areas.

Keywords: mega-eruption, lahar flow, lahar control, sabo dam and local scouring.

PENDAHULUAN

Aktivitas Gunungapi Merapi pada tahun 2010 diawali dengan erupsi pertama pada tanggal 26 Oktober 2010. Erupsi tersebut bersifat eksplosif disertai dengan awan panas dan dentuman. Hal ini berbeda dengan kejadian 2001 dan 2006, letusannya bersifat efusif dengan pembentukan kubah lava dan awan panas guguran. Erupsi pada 4 November 2010 merupakan erupsi eksplosif terbesar, sehingga banyak pakar kegunungapian

menyebutkan sebagai mega-erupsi. 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 ke arah K. Gendol, tersebar sejauh 14 Km dari puncak Gunungapi Merapi.

Jumlah material vulkanis dari mega-erupsi yang sangat besar terendapkan di sekitar puncak serta lereng-lereng Gunungapi Merapi. Material

tersebut berpotensi menimbulkan aliran lahar pada musim hujan tahun-tahun berikutnya.

Endapan material atau sedimen yang terangkut oleh air meluncur ke hilir sebagai aliran lahar, mempunyai daya rusak tinggi. Karena merupakan suatu aliran dengan angkutan sedimen bersifat kolektif yang mempunyai konsentrasi sangat tinggi. Aliran tersebut meluncur melalui lereng, dasar alur sungai atau lembah curam dengan membawa batu-batu besar, dan atau material lain seperti batang-batang pohon. Aliran yang tidak terkendali dapat menimbulkan bencana, jatuhnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis.

Sabodam merupakan bangunan yang dipasang melintang alur di hulu sungai lahar. Bangunan tersebut berfungsi untuk mengendalikan dasar sungai bagian hilir agar tetap stabil meskipun ada suplai material, atau sedimen yang terangkut oleh aliran air. Dengan kata lain *sabodam* akan mengarahkan laju aliran lahar, dan mengendalikan seberapa banyak material yang diijinkan menuju ke hilir.

Aliran lahar pasca erupsi Merapi 2010 terjadi di hampir setiap daerah aliran sungai yang terletak di bawah kerucut aktif Gunungapi Merapi. Dampak dari terjadinya banjir lahar yang paling dahsyat terjadi di K. Putih dan K. Pabelan. Bahkan menurut Edouard de Bélizal (2013), jumlah terjadinya aliran lahar di K. Putih sekitar 55 % dari aliran lahar yang terjadi di seluruh Merapi. Penjelasan lengkapnya dapat dilihat di Gambar 2.

Akibat dari melimpahnya endapan material vulkanik yang berada di hulu alur sungai memicu terjadinya aliran lahar di beberapa sungai. Dampak dari aliran lahar tersebut mengakibatkan sekitar 77 unit dari 264 bangunan sabo yang dibangun di daerah Merapi rusak, atau hanyut terbawa aliran lahar.

Berdasarkan dari hasil survei lapangan di beberapa *sabodam* yang mengalami kerusakan, runtuhnya bangunan sabo umumnya dipicu oleh terjadinya degradasi dasar sungai, atau gerusan lokal pada bangunan, abrasi pada mercu bangunan, dan luapan pada bagian sayap *sabodam*.

Pengkajian ini dilakukan untuk mengevaluasi kerusakan *sabodam* di daerah Gunungapi Merapi akibat banjir lahar pasca erupsi Merapi tahun 2010. Hasil dari pengkajian ini digunakan sebagai dasar untuk merevitalisasi desain dan struktur bangunan sabo dalam pengendalian banjir lahar.

KAJIAN PUSTAKA

Karakteristik Erupsi Merapi

Menurut Rahayu, dkk. (2014), Gunungapi Merapi merupakan salah satu gunungapi aktif di dunia, erupsi dalam siklus pendek setiap 2 - 5 tahun, sedangkan siklus menengah setiap 5 - 7 tahun. Letusan Gunung Merapi pada tahun 2010 dengan *Volcanic Eruption Index 4* (VEI 4), merupakan letusan vulkanik terbesar sejak 1872. Hal ini berbeda dengan erupsi yang terjadi pada tahun 2006, hanya dengan indeks vulkanik 1. (Preece, 2014).

Menurut Solikhina, dkk. (2015), erupsi Merapi 2010 merupakan tipe eksplosif. Pada erupsi tersebut meruntuhkan kubah lava, mengeluarkan gas ke atas dengan membentuk kolom awan dan semburan awan panas ke berbagai arah di kaki gunung. Karakteristik erupsi tersebut seperti pada erupsi 1930-1931 (VEI 3), dan erupsi 1872 *sub-Plinian* (VEI 4), merupakan periode erupsi '100 tahun', dikenal dengan sebutan *mega-erupsi*.

Banjir lahar Merapi

Menurut Kumalawati, R. (2015), setiap erupsi Merapi mengeluarkan jutaan material vulkanis, seperti pada erupsi 2006 mensuplai 5 juta m³, dan 2010 mengeluarkan 140 juta m³, menyebar di seluruh sungai yang berhulu di pucaknya. Sungai-sungai tersebut merupakan alur material vulkanik, dan transportasi aliran lahar yang disebut sebagai sungai lahar. Deposit material vulkanis mengendap di sekitar puncak, lereng gunung, dan palung sungai di bagian hulu. Material pasca mega-erupsi yang berada di hulu sungai masih bersifat lepas, bila bercampur dengan air hujan yang kumulatifnya tinggi dapat berubah menjadi aliran lahar. Aliran lahar mengalir ke hilir kemudian mengendap pada daerah ketinggian < 400 meter, di kemiringan lereng < 3%. Pada daerah tersebut material aliran lahar umumnya mengendap di alur sungai.

Menurut Triatmodjo B., (2010), permukaan tanah yang tertutup abu vulkanis akan mengalami penurunan kapasitas infiltrasi. Ketika terjadi hujan, air hujan tersebut akan menginduksi limpasan permukaan (*runoff*) dalam jumlah besar, yang pada akhirnya meningkatkan terjadinya erosi pada tanah tersebut.

Menurut Jones R., dkk. (2017), dalam percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa peningkatan hujan yang terjadi sebelumnya, adanya abu vulkanis di permukaan material vulkanis, akan menaikkan tingkat limpasan. Terjadinya peningkatan limpasan tersebut dapat mempercepat terjadinya pelepasan limpasan.

Sabodam sebagai pengendalian banjir lahar

Sabodam dibangun dengan fungsi untuk mengendalikan aliran lahar atau sedimen dengan cara menahan, menampung sebagian material untuk sementara waktu kemudian mengalirkan sebagiannya lagi ke hilir. Tata letak pembangunan *sabodam* di daerah gunungapi dilakukan pada daerah pengendapan sedimen. Di daerah tersebut batuan dasar alur sungai sudah tertimbun endapan hasil letusan gunungapi, sehingga letaknya cukup dalam. Untuk itu pondasi *sabodam* dibuat mengambang karena batuan dasarnya terletak sangat dalam.

Menurut Munir MD, dkk. (2015), penyebab terjadinya kerusakan atau hancurnya *sabodam* di Kali Putih adalah besarnya banjir lahar, produk vulkanik letusan yang melimpah, gerusan lokal, dan indikasi rembesan pada daerah bangunan sabo. Jumlah bangunan *sabodam* yang ada di Kali Putih adalah 22 unit dengan kapasitas tampung hanya sebesar 2,58 juta m³, sehingga perbandingan antara jumlah persediaan material yang harus dikendalikan *sabodam* dengan kapasitas tampung *sabodam* tidak berimbang. *Sabodam* yang ada hanya mampu menampung material berkisar 1 per 7 (14,33%) dari jumlah material yang terkonsentrasi di hulu Kali Putih.

Menurut Herlina L, dkk. (2013), stabilitas bangunan pengendali sedimen bergantung dari morfologi sungai yang dikendalikan karena aliran dari sungai dan anak sungainya berfungsi sebagai pengangkut air dan sedimen ke hilir. Sedimen yang terbawa aliran ke hilir selain dari suplai ketika terjadi erupsi, juga dihasilkan oleh erosi dasar sungai/aliran, longsor pada tebing-tebing sungai, maupun hasil erosi dari lereng bukit di sekitar sungai, sehingga merubah topologi permukaan lereng di sekitar sungai.

Sistem *Sabodam* bersifat Seri

Peristiwa degradasi dasar sungai akibat runtuhnya salah satu *sabodam*, mengakibatkan efek terganggunya kestabilan *sabodam* yang lain, yang sering disebut dengan efek domino. Menurut Kusumosubrata H., (2014), bangunan sabo umumnya tidak pernah berdiri sendiri tanpa ada bangunan lainnya, meskipun setiap bangunan memiliki fungsi mandiri. Ini merupakan ciri khusus bahwa setiap bangunan sabo diharapkan bekerja sama dengan bangunan lainnya dalam sistem seri. Mengingat sistem kerja *sabodam* adalah saling mendukung dan melengkapi antara *sabodam* yang satu dengan yang lainnya dalam satu sistem seri.

Dari hasil penelitian yang dilakukan KIM N tahun 2013, di laboratorium Kyoto University,

dan hasil survei di lapangan, menunjukkan bahwa penurunan jarak antara *sabodam* yang dibangun secara seri dalam satu sungai akan meningkatkan keseimbangan lereng dasar dari *sabodam* yang berada di bagian hulunya. Bahkan dalam desertasinya untuk meraih gelar Doktor, KIM N (2015), juga menyatakan bahwa *sabodam* merupakan suatu teknologi yang paling efektif dalam penanggulangan aliran lahar. Kinerja *sabodam* akan semakin efektif dan mempunyai fungsi kontrol yang lebih baik, bila pembangunannya secara seri dalam satu sistem sungai.

Sabodam jangkar

Stabilitas serangkaian dari *sabodam* dalam satu sistem sungai sangat tergantung oleh *sabodam* yang berada di hilirnya. Apabila *sabodam* di hilir runtuh, maka lapisan endapan yang berada di hulunya akan segera terbawa aliran banjir, menyebabkan pondasi *sabodam* yang berada di hulunya menggantung. Apabila hal ini berlangsung terus, maka beberapa *sabodam* di hulu sungai akan runtuh.

Menurut Cahyono J. (2012), *sabodam* jangkar diperlukan untuk memperkuat *sabodam* yang berada di paling hilir dari suatu sistem seri *sabodam* pada satu sistem sungai. Hal ini bertujuan agar stabilitas dari keseluruhan *sabodam* tersebut tetap terjaga.

Salah satu pemicu kerusakan *sabodam* karena abrasi pada mercu bangunan. Menurut Saifudin, dkk. (2015), untuk melindungi mercu pelimpah *sabodam* dibuat dengan lapisan beton kualitas tinggi. Diantaranya dengan melakukan campuran beton dengan serat baja. Berdasarkan analisisnya, semakin banyak jumlah serat semakin besar pula nilai kuat lentur dan kuat tarik belah beton tersebut. Dosis serta aspek rasio serat mempengaruhi nilai indeks ketangguhan beton serat.

Perlemahan stabilitas *sabodam* juga diperbesar dengan adanya penambangan galian golongan C yang melebihi batas ketersediaan sedimen suplai dari hulu. Bahkan kadangkala penambangan dilakukan pada tempat-tempat yang karena alasan keselamatan bangunan sabo tidak diijinkan ditambang. Hal ini berbahaya karena dapat memicu timbulnya longsor tebing atau degradasi alur sungai lebih parah.

Kesan masyarakat luas selama ini bahwa penambangan sumber daya alam yang pengelolaannya tidak tepat mengakibatkan permasalahan baru. Pendapat Shrestha H.K, (2013), penambangan pasir di Nepal yang tidak dikelola dan tidak terpantau dengan baik akan

mengubah sumber daya alam menjadi sumber masalah. Dampak negatif penambangan pasir menimbulkan kerusakan sungai, longsor, pembabatan hutan, kerusakan infrastruktur, degradasi lingkungan, membengkaknya biaya rehabilitasi, dan munculnya “mafia” disetiap urusan terkait.

Untuk mengantisipasi penurunan stabilitas yang membahayakan keamanan *sabodam* maka penambangan di sekitar *sabodam* perlu dikelola secara baik dan bijaksana. Aktivitas penambangan material galian golongan C sebenarnya juga diperlukan untuk menyediakan ruang tampung sedimen pasca letusan berikutnya. Sebaiknya penambangan dilakukan di tempat yang dianjurkan. Seperti di lokasi hulu *sabodam* di area tampungan mati (*dead storage*), lokasi yang tidak terlalu dekat dengan *sabodam* maupun tanggul namun pengambilannya tidak melebihi volume suplai.

METODOLOGI

Metode untuk mengetahui penyebab rusaknya *sabodam*, dan mencari solusi yang tepat dalam sistem pengendalian banjir lahar dilakukan melalui pendekatan penelitian deskriptif kualitatif. Sedang untuk memahami berbagai permasalahan yang berhubungan dengan banyaknya bangunan sabo yang rusak akibat banjir lahar dilakukan dengan pendekatan penelitian yang bersumber pada observasi kualitatif. Maka untuk mencari solusi dari kerusakan bangunan sabo diperlukan pendekatan bersumber dari teori dan kebenaran empirik. Teknik pengambilan data menggunakan beberapa metode, meliputi dokumentasi data sekunder, wawancara, dan pengamatan lapangan. Dokumentasi data sekunder diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Serayu Opak – Yogyakarta, dan Yachiyo Engineering Consultant. Sementara untuk pengamatan lapangan dilakukan dari Desember 2010 ~ Februari 2012. Pengamatan dilakukan di sepanjang Kali Putih,

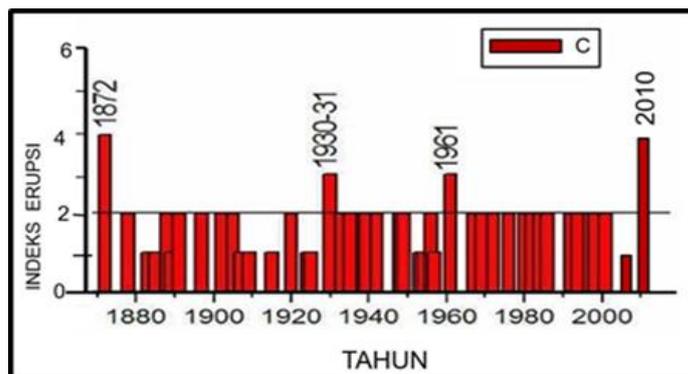
serta Gendol di daerah Propinsi Jawa Tengah, dan DIY. Pengamatan difokuskan untuk kondisi fisik bangunan sabo yang rusak, kondisi daerah dan akitivitas penambangan yang ada di sekitar *sabodam* yang rusak akibat banjir lahar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Erupsi Gunungapi Merapi

Berdasarkan PVMBG (2014), informasi pada Grafik erupsi Merapi tahun 1872 ~ 2010 dalam Gambar 1, terlihat indeks erupsi Gunungapi Merapi sejak 1872 ~ 2010. Munculnya lava baru biasanya disertai dengan pengrusakan kubah lava lama, yang menutup aliran lava, sehingga terjadi guguran lava. Namun juga ada sebagian aliran lava berhenti ketika mencapai permukaan, membetuk kubah lava baru yang tumbuh membesar. Pertumbuhan kubah lava sebanding dengan laju aliran magma yang bervariasi hingga mencapai ratusan ribu meter kubik per hari. Kubah lava yang tumbuh di kawah dan membesar menyebabkan ketidakstabilan. Kubah lava yang posisinya tidak stabil bila terdorong oleh tekanan gas dari dalam menyebabkan sebagian longsor sehingga terjadi awan panas guguran. Karena pengaruh gravitasi, awan panas tersebut mengalir menyusur lembah sungai dan akan berhenti ketika energi gerakanya habis. Selama ini erupsi diawali dengan pertumbuhan kubah lava yang membesar dan akhirnya runtuh mengakibatkan awan panas guguran. Erupsi yang spesifik tersebut populer dengan sebutan Tipe Merapi dengan skala indeks erupsi 2.

Mega-erupsi Gunungapi Merapi 2010 yang diawali dengan erupsi eksplosif kecil, berlanjut tanpa ada proses pembentukan kubah lava baru kemudian langsung erupsi dalam skala besar. Erupsi Merapi 2010 dengan skala indeks erupsi 4 (VEI 4), menghancurkan kubah lava lama, menghasilkan kolom awan ke atas dan mengeluarkan material awan panas sekitar 140 juta m³.



Sumber: PVMBG (2014)

Gambar 1 Grafik erupsi Merapi Th. 1872 ~ 2010

Material tersebut menuju ke kaki gunung, ke berbagai arah, menyebar ke 13 sungai utama yang berhulu di Merapi. Dampak dari *mega-erupsi* tersebut, menimbulkan sebaran awan panas, menghanguskan area sejauh 8,5 km ke arah lereng Selatan dengan konsentrasi endapan di Kali Gendol mencapai 14 km (PVMBG, 2014).

Dari grafik erupsi Merapi tahun 1872 ~ 2010, juga terlihat bahwa erupsi Merapi dengan skala indeks erupsi 4, terjadi pada tahun 1872, dan 2010. Erupsi dengan skala besar tersebut dikenal sebagai periode erupsi '100 tahun'. Erupsi eksplosif Gunungapi Merapi 2010 dengan skala indeks erupsi 4, menunjukkan ciri-ciri seperti pada erupsi 1872. Erupsi semacam ini disebut erupsi tipe *Perret* atau *Plinian*. Tipe erupsi tersebut mampu mengeluarkan material erupsi sampai ketinggian beberapa puluh ribu meter, bahkan bisa menghancurkan lubang kepundan, dan puncak gunung. Mengakibatkan sebagian besar permukaan dari material vulkanis yang terletak di bawah kerucut aktif Gunungapi Merapi terselimuti abu vulkanis.

Pada saat turun hujan koefisien pelimpasan (*runoff*) bervariasi, bergantung dari topografi, tipe tanah, dan kelengasan tanah. Terlebih koefisien pelimpasan untuk frekuensi hujan pada kala ulang 25, 50, dan 100 tahun. Adanya material halus dari abu vulkanis yang ada di permukaan material vulkanis akan menaikkan tingkat limpasan serta mempercepat terjadinya pelepasan limpasan. Karena permukaan material vulkanis yang tertutup abu vulkanis akan mengalami penurunan kapasitas infiltrasi. Sehingga ketika terjadi hujan akan menginduksi limpasan permukaan dalam jumlah besar yang pada akhirnya meningkatkan terjadinya erosi.

Ketika musim hujan terjadi di daerah Merapi pasca *mega-erupsi* 2010 mengakibatkan terjadinya aliran lahar di hampir setiap daerah aliran sungai yang terletak di bawah kerucut aktif gunung tersebut. Sebaran aliran laharnya terlihat di Gambar 2. Sebaran dan jumlah material endapan lahar tertinggi terjadi di K. Putih, Boyong, Ladon, dan Gendol (Bélizal, 2013).

Berdasarkan catatan sejarah erupsi Gunungapi Merapi yang terdapat dalam Gambar 1, sejak 1962 hingga 2006 hanya sebatas pada skala indeks erupsi 2 (VEI 2) dengan erupsi tipe Merapi. Aliran lahar yang terjadi dari tahun 1962 ~ 2006 hanya terjadi di daerah aliran sungai tertentu. Aliran lahar yang terjadi hanya tergantung dari arah awan panas guguran dan hanya masuk ke beberapa hulu sungai saja.

Kejadian *Mega-erupsi* Merapi 2010, telah mengalami perubahan pola erupsi, skala indeks erupsi, dan suplai volume material endapan

vulkanis. volume material endapan vulkanis tersebut, terkonsentrasi di daerah hulu Kali Putih sekitar 18 juta m³. Sehingga ketika musim hujan terjadi pasca erupsi Merapi 2010, kawasan yang paling sering dilanda aliran lahar adalah Kali Putih.

Pengendalian aliran Lahar Merapi

Gunungapi Merapi yang mempunyai predikat sebagai gunungapi aktif di dunia dalam sejarah erupsinya mensuplai material vulkanis yang bervariasi, terlebih bila diperhitungkan dengan periode 100 tahunannya. Sehingga dalam merencanakan *sabodam* sebagai pengendali lahar di daerah Merapi hendaknya mempunyai *master-plan* untuk perencanaan *sabodam* dalam jangka panjang yang memperhitungkan periode erupsi 100 tahun.

Pada *mega-erupsi* Merapi 2010 menelan banyak korban jiwa dan merusak infrastruktur dalam jumlah yang besar. Namun mensuplai material vulkanis dalam jumlah besar di setiap hulu sungai utama yang berhulu dari Merapi.

Berdasarkan hasil kajian, jumlah material yang harus dikendalikan di K. Putih tidak berimbang dengan kapasitas tampung *sabodam* yang dibangun di sungai tersebut. Hasil tersebut terlihat dari pengamatan Tim Yachiyo Engineering Consultant terhadap tanda-tanda bekas banjir di Jembatan Ngepos, Kali Putih, pada Januari 2011. Dari hasil pengamatan tersebut diperoleh data debit banjir lahar yang terjadi di Kali Putih sebesar 963 m³/detik. Angka tersebut sudah mendekati angka debit puncak untuk perencanaan bangunan sabo, sebesar 946 m³/detik. Kesimpulan yang diambil oleh tim konsultan tersebut, menyatakan bahwa volume material vulkanis pasca *mega-erupsi* Merapi 2010 yang berada di tiap sungai di daerah Merapi, merupakan 28 kali lebih besar dari volume desain (Yachiyo Engineering Consultant, 2013).

Tabel 1 menunjukkan hasil survei *sabodam* di Kali Apu, Putih, dan Kuning yang mengalami kerusakan hampir di semua *sabodam* pasca *mega-erupsi* Merapi 2010. Terlihat jumlah *sabodam* yang mengalami kerusakan hampir 100 % berada di beberapa sungai di daerah Merapi. Tabel 2 menunjukkan jumlah kerusakan *sabodam* di Kali Putih pasca *mega-erupsi* Merapi 2010. Dari Tabel tersebut terlihat beberapa unit *sabodam* yang rusak, dan 3 unit diantaranya mengalami kerusakan parah karena tubuh *sabodam* mengalami patah dan hanyut. *Sabodam* yang rusak parah dan hanyut, diantaranya *sabodam* PU-D1 Mranggen, PU-C11/12 Gremeng, dan PU-C10 Ngepos. Dampak dari keruntuhan *sabodam* tersebut adalah hilangnya fungsi penahanan

material sedimen, sehingga terjadi degradasi dasar sungai.

Pembangunan *sabodam* untuk pengendalian aliran lahar Merapi, menggunakan konsep pondasi mengambang, dibangun di dasar sungai tanpa pondasi yang mencapai lapisan tanah keras. Konsep tersebut dengan asumsi sudah mampu didukung oleh berat bangunan itu sendiri (*gravity dam*), endapan sedimen dan direncanakan tidak mengguling ataupun bergeser.

Mekanisme kejadian banjir lahar

Mekanisme kejadian banjir lahar yang menyebabkan rusak dan hancurnya bangunan sabo pada pondasi mengambang karena material sedimen yang dibawa aliran memiliki konsentrasi tinggi dan secara cepat memenuhi tampungan sedimen yang ada. Dengan pondasi sabodam yang tidak begitu dalam diindikasikan terjadi rembesan (*piping*) di bagian bawah bangunan yang terjadi sebelumnya sehingga mengurangi kekuatan struktur bangunan (Balai Sabo, 2014).

Hal ini terutama terjadi apabila rembesan tersebut juga mengangkut material-material.

Disamping itu, banjir lahar yang terjadi dengan kecepatan aliran yang tinggi dapat

menyebabkan tergerusnya dasar sungai di bagian hilir bangunan sabo, dan melemahkan konstruksi bangunan tersebut. Gerusan lokal yang terjadi akan membuat bangunan sabo mengalami penurunan kekuatan struktural.

Pelemahan kondisi struktural dan besarnya banjir lahar menyebabkan bangunan sabo akan runtuh dan hanyut terbawa aliran lahar.

Di daerah gunungapi aktif, lahar mengalir tidak kontinyu, melainkan gelombang demi gelombang (*translator waves*). Dalam kondisi volume endapan material di daerah hulu sungai sangat banyak, maka konsentrasi sedimen dalam aliran lahar mendekati konsentrasi endapan sedimen sebelum mengalir menjadi lahar.

Alirannya sangat kental dan cenderung seperti aliran granular atau aliran massa tanah. Aliran lahar yang mengalir membawa sedimen terdiri dari sedimen dasar (*bed-load*), sedimen layang (*suspended-load*), maupun sedimen terlarut (*dissolved-load*). Jumlah transport sedimen tergantung dari material yang tersedia dan debit air. Material sedimen terangkut berasal dari hasil erupsi, dari erosi aliran dasar sungai, erosi tebing-tebing sungai, maupun hasil erosi dari lereng bukit di sekitar sungai.

Tabel 1 Kerusakan *Sabodam* di beberapa aliran sungai

No	Nama Sungai	Jumlah Sabodam	Jumlah Kerusakan Sabodam
1.	Kali Apu	5 unit	5 unit
2.	Kali Putih	22 unit	21 unit (95,5%)
3.	Kali Kuning	15 unit	14 unit (93,3%)

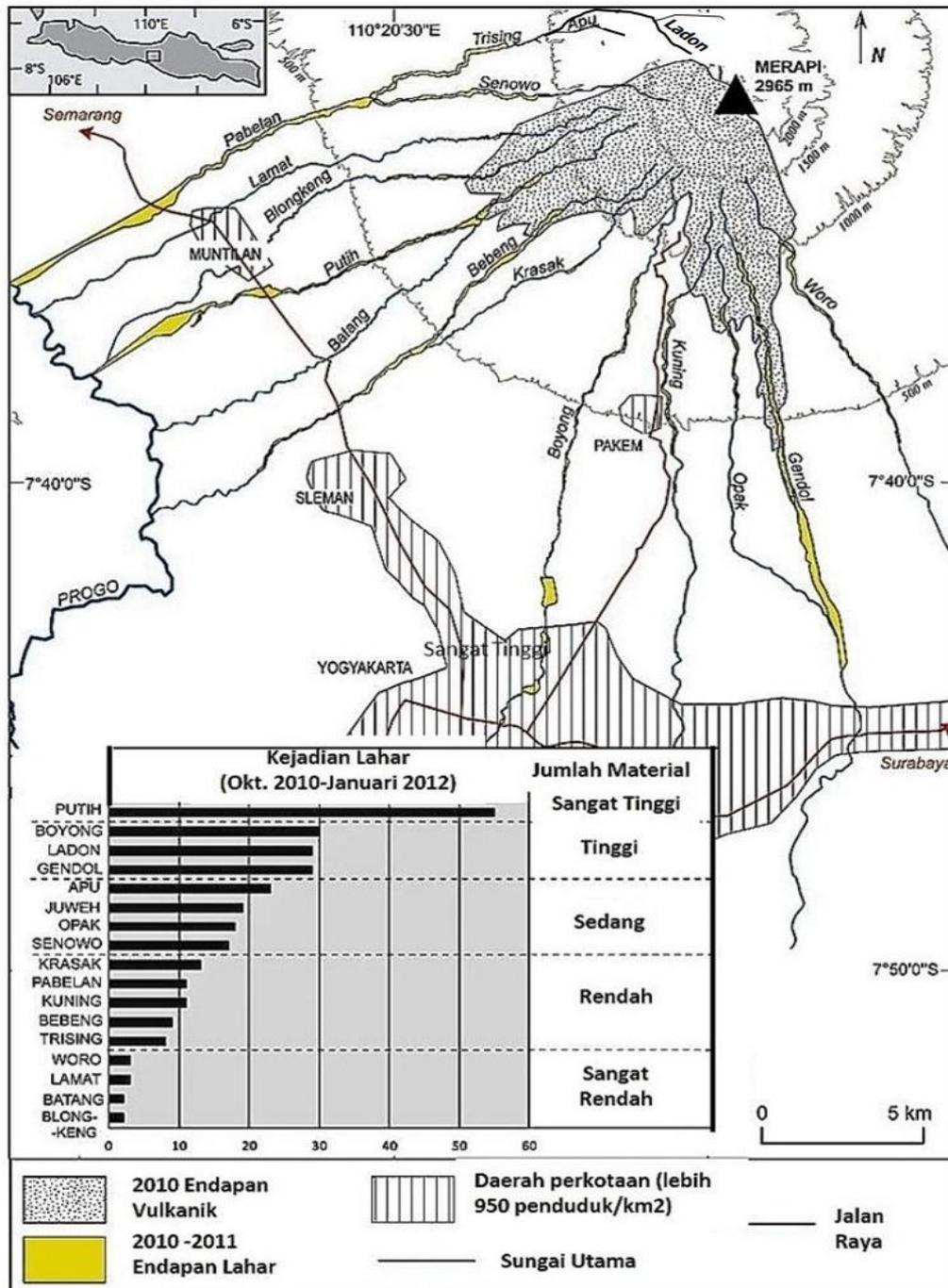
Sumber: Tim Balai Sabo (2013)

Tabel 2 Data Kerusakan Sabodam di Kali Putih

No	Nama Sabodam	Jenis Kerusakan
1	PU-D1 Mranggen	<i>Main-dam</i> , <i>Sub-dam</i> , <i>Apron</i> , tembok samping kiri, kanan runtuh total dan hanyut.
2	PU-D2 Mranggen	Pondasi <i>Sub-Sub-Dam</i> runtuh akibat tergerus sedalam 9 m panjang 25 m.
3	PU-D3 Salamsari	Bangunan pelindung yang terdiri dari <i>Sub-dam</i> , tembok tepi kiri-kanan, <i>Sub-Sub-dam</i> , tembok tepi kiri-kanan termasuk <i>Apron</i> runtuh dan hanyut, serta pondasi bangunan utama yaitu <i>Main-dam</i> tergerus sedalam 21 m dari pelimpah.
4	PU-D4 Salamsari	Pondasi <i>Sub-Sub-Dam</i> tergerus sedalam 8 m.
5	PU-D5 Salamsari	Pelup <i>Main-dam</i> terabrasi, lantai apron, tembok tepi dan <i>Sub-dam</i> runtuh dan hanyut.
6	PU-C14 Gejungan	Bangunan pelindung tebing kiri di hulu <i>Main-dam</i> rusak sebagian, mercu pelimpah <i>Main dam</i> terabrasi tidak terlalu dalam, dan tembok tepi kanan pelindung tebing runtuh akibat pembelokan arah aliran. Namun bangunan utama <i>sabodam</i> cukup baik.
7	PU-C13 Gejungan II	Bangunan pelindung tebing kiri di hulu <i>Main-dam</i> rusak sebagian, mercu pelimpah <i>Main-dam</i> terabrasi tidak terlalu dalam, dan tembok tepi kanan pelindung tebing runtuh akibat pembelokan arah aliran. Namun bangunan utama <i>sabodam</i> cukup baik.
8	PU-C11/12 Gremeng	<i>Main-dam</i> , <i>Sub-dam</i> , <i>Apron</i> , tembok samping kiri, kanan runtuh total dan hanyut.
9	PU-C10 Ngepos	<i>Main-dam</i> runtuh, kemudian terjadi degradasi dasar sungai.
10	PU-C9 Cabe Lor	Lantai <i>Apron</i> dan <i>Sub-dam</i> rusak.

Sumber: Tim Balai Sabo (2013).

*) Catatan: Untuk memudahkan mengetahui lokasi sabodam yang rusak di Kali Putih, lihat gambar 3.



Sumber: Edouard de Bézizal (2013).

Gambar 2 Sebaran dan jumlah material vulkanis erupsi Merapi 2010

Mekanisme Kerusakan *Sabodam*

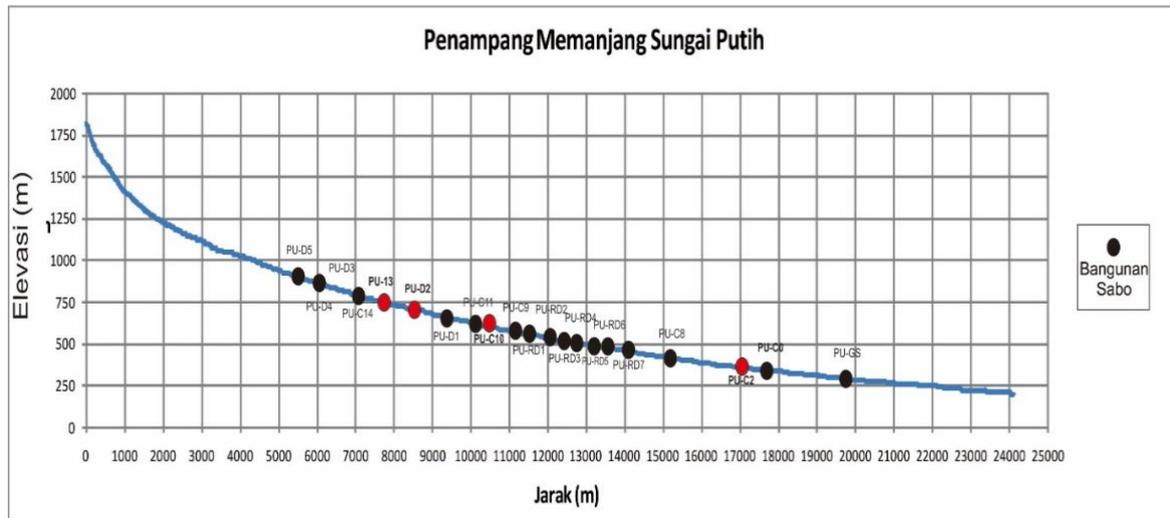
Pengendalian aliran lahar di gunungapi aktif harus mempertimbangkan perubahan aktivitas vulkanik yang terjadi (periode erupsi) dan perubahan kondisi daerah tangkapan air wilayah sungainya. Bila mengabaikan faktor perubahan aktivitas vulkanik yang terjadi, *sabodam* akan dipenuhi sedimen hanya dengan beberapa gelombang aliran lahar saja. Akumulasi dari material sedimen yang datanganya dalam beberapa

gelombang yang tertahan dan memenuhi di bagian tengah *sabodam* umumnya berbentuk

cebung dengan bagian yang rendah berada di kaki tebing sungai. Maka ketika aliran lahar berikutnya mengalir akan melalui bagian yang rendah, merambat melalui tumpukan material lama. Kemudian melimpas melampaui sayap-sayap *sabodam*, serta jatuh mengenai tebing sungai di hilir *sabodam*, mengakibatkan tebing sungainya tergerus. Disamping itu ada juga

gelombang aliran lahar yang mengalir melalui pelimpah *sabodam* dalam beberapa kali, mengakibatkan gerusan lokal semakin dalam. Bila

hal ini terjadi secara berulang kali akan mengakibatkan *sabodam* runtuh atau rusak berat.



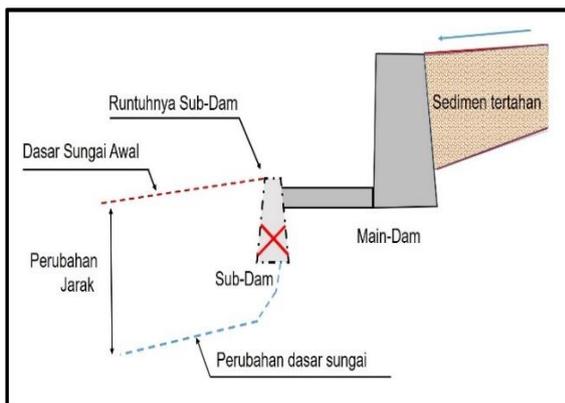
Gambar 3 Lokasi *sabodam* pada penampang memanjang Sungai Putih

Penyebab kerusakan *Sabodam*

Berdasarkan identifikasi dari keseluruhan data kerusakan *sabodam* akibat banjir lahar pasca erupsi 2010, diketahui penyebab utama dari kerusakan *sabodam*, diantaranya karena:

1. Degradasi Dasar Sungai

Kecepatan aliran lahar yang tinggi, dengan perbandingan antara sedimen pasokan dan sedimen yang terangkut tidak seimbang menyebabkan degradasi dasar sungai di bagian hilir *sabodam*. Degradasi dasar sungai di bagian hilir tersebut bila terjadi secara terus-menerus akan melemahkan pondasi *sabodam*. Hal ini dapat mengakibatkan pondasi dari sub-dam menggantung, yang pada akhirnya memicu runtuhnya bangunan secara keseluruhan. Ilustrasi ini bisa dilihat pada Gambar 4.

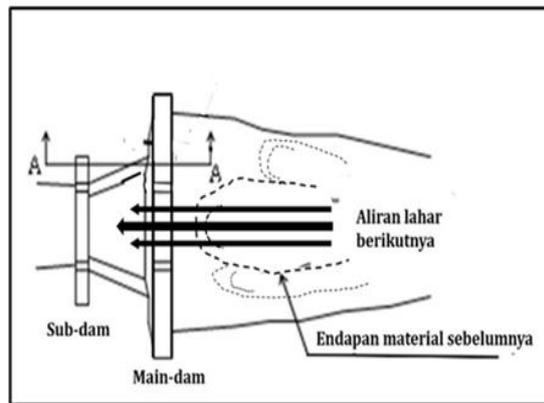


Gambar 4 Runtuhnya *sabodam* akibat degradasi dasar sungai

Berdasarkan hasil survei lapangan pada April 2013, terjadi degradasi dasar sungai di bagian hilir *sabodam* antara 8~12,8 m. Tinggi rata-rata *sub-dam* saat ini hanya 6 m, lihat Tabel 2.

2. Abrasi pada pelimpah *Main-dam*

Material sedimen dari aliran lahar yang tertahan di hulu *sabodam* bila terjadi secara periodik, dapat menimbulkan pengendapan sedimen pada bagian tengah bangunan. Sehingga ketika terjadi aliran lahar berikutnya aliran tersebut akan langsung mengalir melalui bagian pelimpah. Aliran lahar yang mempunyai daya rusak tinggi ketika mengalir pada pelimpah *sabodam* secara terus-menerus menyebabkan abrasi pada pelimpah *sabodam*. Abrasi yang terjadi secara terus-menerus pada pelimpah *Main-dam* dapat meruntuhkan *sabodam*, lebih jelasnya lihat Gambar 5.

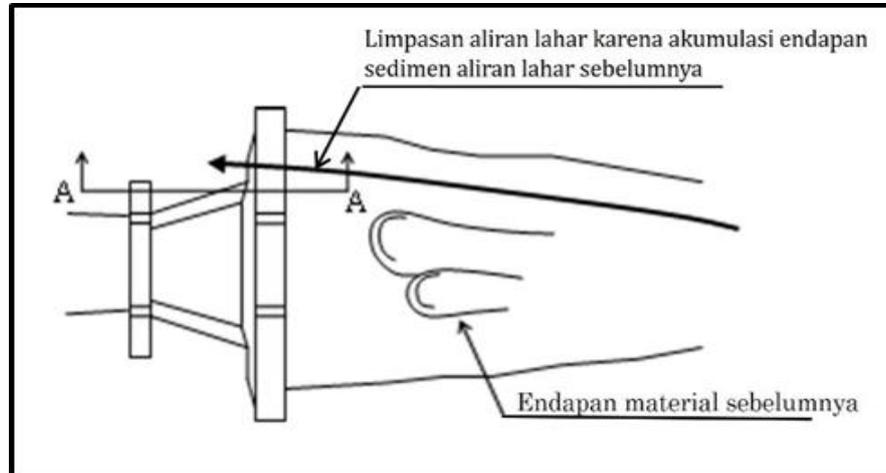


Gambar 5 Kerusakan *sabodam* akibat abrasi di pelimpah bangunan utama

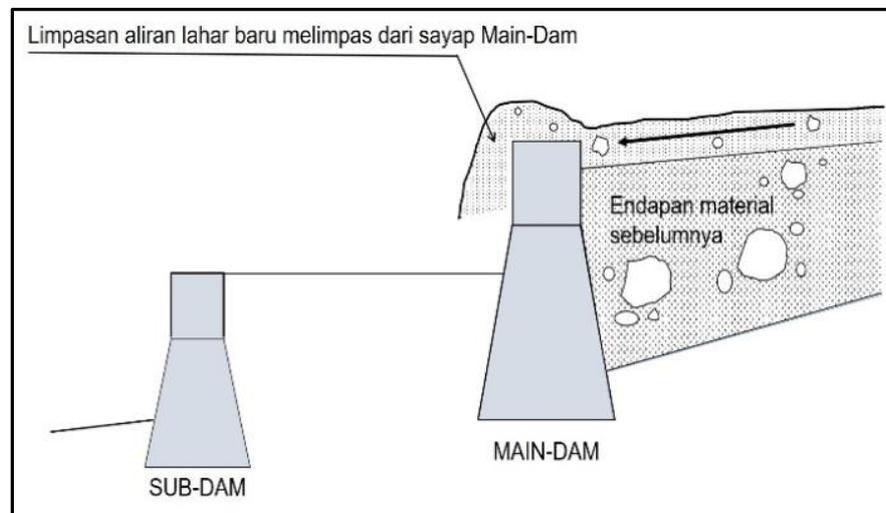
3. Lahar melimpas pada sayap *Main-dam*

Aliran lahar yang melimpas pada timbunan endapan material lahar yang mengendap di bagian tengah *sabodam* karena mempunyai tenaga yang besar akan merambat menaiki

tumpukan material endapan lama dan melimpas pada sayap *Main-dam*. Limpasan aliran lahar yang melimpas pada bagian sayap *Main-dam* akan jatuh mengenai tebing sungai di hilir bangunan sabo. Hal ini mengakibatkan tebing sungainya tergerus.



Gambar 6 Kronologis terjadinya limpasan aliran lahar pada sayap bangunan utama



Gambar 7 Limpasan aliran lahar di sayap *sabodam*

Gambar 6 dan 7 menunjukkan terjadinya limpasan aliran lahar pada sayap bangunan utama mengakibatkan tergerusnya tebing sungai, menyebabkan fondasi *Main dam* menggantung, sehingga mengakibatkan runtuhnya *sabodam*.

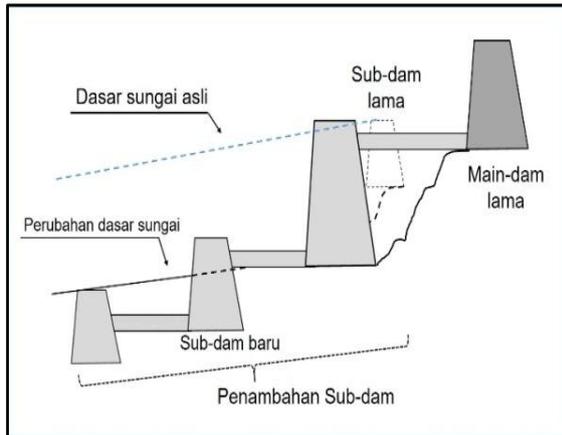
Usaha Penanggulangan kerusakan *Sabodam*

Berdasarkan data kerusakan bangunan *sabodam* di lapangan dan sebagai usaha penanggulangannya dapat disarankan, diantaranya:

1. Penanggulangan degradasi dasar sungai

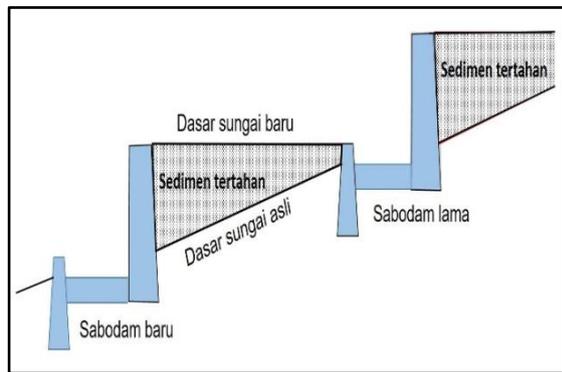
Berdasarkan hasil survei lapangan pada April 2013, terjadi degradasi dasar sungai di bagian hilir *sabodam* antara 8 ~ 12,8 m. Pada saat ini tinggi rata-rata *Sub-dam* eksisting hanya 6 m. Untuk menanggulangi kerusakan *sabodam* akibat degradasi dasar sungai, dilakukan dengan memperpanjang pondasi *Sub-dam* dan atau membangun *Sub-dam* tambahan. Penambahan *Sub-dam* tersebut seperti membuat serangkaian *sabodam* seri. Tujuannya untuk memperbaiki atau mempertinggi dasar sungai dan mengurangi

kemiringan lereng, lebih jelasnya lihat Gambar 8 dan 9.



Sumber: Yachiyo Consulant, 2013.

Gambar 8 Penambahan kedalaman dan jumlah Sub-dam



Gambar 9 Penambahan sabodam untuk mengurangi kemiringan lereng

2. Penanggulangan abrasi pelimpah Main-dam

Untuk melindungi abrasi pada bagian pelimpah *sabodam* dilakukan penguatan bagian pelimpah. Penguatan tersebut dilakukan dengan memasang batu keras dipermukaan pelimpah, melapisi permukaan dengan plat beton atau besi dan menerapkan campuran beton khusus sebagai penguat. Penjelasan tentang penguatan permukaan pelimpah dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah.

Saat ini telah diupayakan penggunaan lapisan beton kualitas tinggi dengan campuran beton kaya atau bahan lainnya untuk penguatan permukaan pelimpah. Penggunaan lapisan beton kualitas tinggi untuk penguatan permukaan pelimpah, seperti campuran beton dengan serat baja, campuran beton *fero-con*, *master-plate*, *non-shrink*, *ambil-top*, *epoxy-*

plate dan sebagainya (Kusumosubrata H., 2014).



Sumber: Yachiyo Consulant (2013)

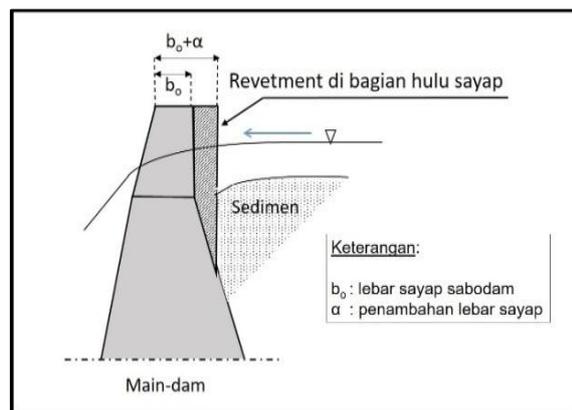
Gambar 10 Perkuatan permukaan pelimpah untuk mengurangi abrasi

3. Penanggulangan limpasan lahar pada sayap dan pelimpah Main-dam

Untuk menanggulangi terjadinya limpasan lahar di sayap *sabodam* dapat dilakukan penanggulangan dengan membangun, diantaranya:

a. *Revetment* di bagian hulu sayap

Revetment di bagian hulu sayap dimaksudkan untuk memperkuat konstruksi sayap *Main-dam* dari ancaman tergerusnya tebing sungai. Pekerjaan tersebut sebagai antisipasi untuk mencegah runtuhnya *sabodam* akibat pondasi *Main-dam* menggantung, lihat Gambar 11. Sedangkan puncak sayap *Main dam* yang dibuat miring ke dalam selain untuk mencegah berhentinya batu di lokasi tersebut juga sebagai estetika bentuk bangunan. Penjelasan tentang *Revetment* di bagian hulu sayap, dan pelebaran pelimpah dapat dilihat pada Gambar 10, 11, dan 12.



Gambar 11 *Revetment* dilakukan di bagian hulu sayap



Sumber: Yachiyo Consultant (2013)

Gambar 12 *Revetment* dilakukan di bagian hulu sayap, dan pelebaran peluap

Pelebaran bagian pelimpah

Pelebaran bagian pelimpah dimaksudkan sebagai upaya untuk memperkuat hubungan antara bagian sayap dengan pelimpah menjadi satu konstruksi yang kuat. Pekerjaan tersebut sebagai antisipasi bila terjadi gerusan pada tebing sungai. Perkuatan yang dilakukan di bagian sayap dan pelimpah akan memperkuat bangunan dari gerusan di tebing sungai.

***Sabodam* "Jangkar"**

Dalam suatu sistem seri beberapa *sabodam*, stabilitas suatu *sabodam* sangat tergantung oleh *sabodam* yang berada di hilirnya. Apabila *sabodam* di hilir runtuh, maka lapisan endapan yang berada di hulunya akan segera mengalir dan menyebabkan pondasi *sabodam* yang berada di hulunya menggantung. Apabila hal ini terus berlanjut, maka kemungkinan *sabodam* tersebut juga akan runtuh. Kejadian tersebut akan berlangsung secara beruntun, mulai dari *sabodam* yang berada di bagian hilir, beranjak ke *sabodam* di hulu (efek domino).

Untuk mencegah terjadinya kerusakan *sabodam* karena pengaruh efek domino tersebut perlu upaya dalam menyempurnakan penggunaan sistem seri *sabodam* yang sudah dilaksanakan selama ini. Agar sistem pengendalian banjir lahar

secara keseluruhan tetap berlangsung, beberapa petugas BBWS-Serayu Opak mengusulkan perlunya segera melakukan rehabilitasi atau rekonstruksi beberapa *sabodam* yang rusak tersebut. Karena dana untuk rehabilitasi atau rekonstruksi terbatas, maka diprioritaskan untuk beberapa *sabodam* saja. Rehabilitasi tersebut dikhususkan untuk *sabodam* yang memiliki fungsi sebagai pengunci atau sebagai "jangkar" terhadap sederetan *sabodam* yang dibangun secara seri.

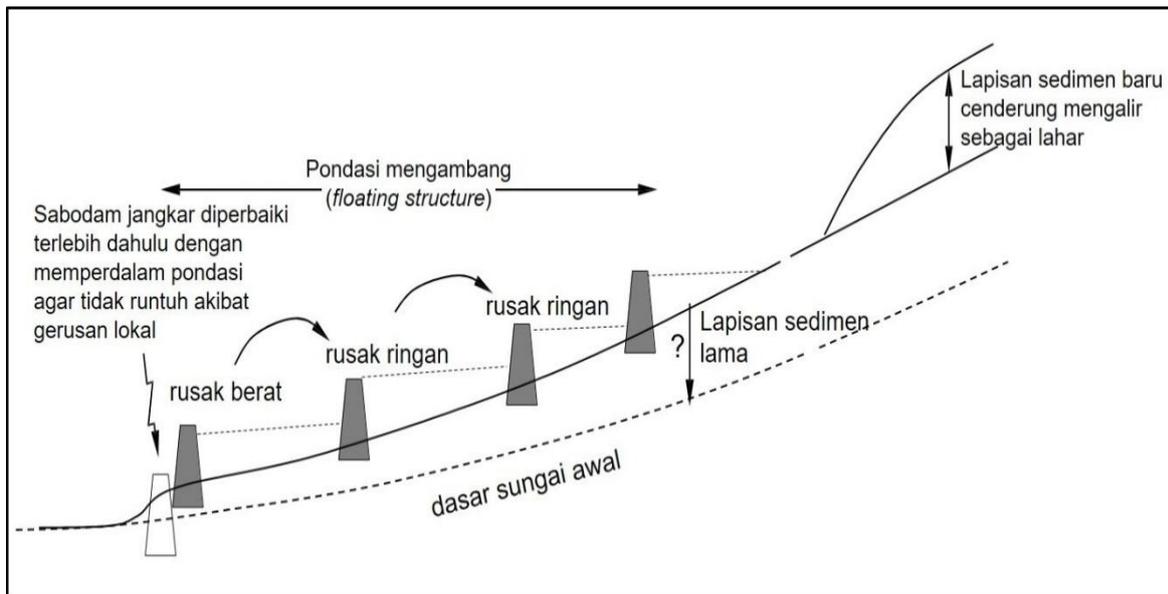
Penetapan *sabodam* yang memiliki fungsi sebagai "jangkar" terhadap serangkaian *sabodam* seri, dalam satu sungai secara teknis dapat dikonsepsikan seperti Gambar 13. Namun demikian masih diperlukan kajian lebih lanjut yang lebih detail agar dapat diterapkan dalam lingkup yang lebih luas.

Sabodam jangkar dibangun pada lokasi titik awal dari dasar sungai awal sebelum dibangun *sabodam*, pada formasi batuan yang keras (*bedrock*). Bila sulit menemukan formasi batuan keras, pondasi dari *sabodam* tersebut dibuat lebih dalam agar tidak runtuh akibat gerusan lokal.

Lokasi *Sabodam* Jangkar

Pembangunan *sabodam* Jangkar di sungai lahar dengan bagian hulu yang memiliki endapan sedimen yang relatif cukup besar. Hal ini bertujuan untuk mengendalikan sedimen yang turun ke hilir atau longsor dapat mengalir sedikit demi sedikit sehingga tidak menimbulkan bencana alam. Pengendalian tersebut dengan membangun beberapa buah *sabodam* secara seri dalam satu alur sungai. Khusus untuk *sabodam* di lokasi titik awal dari *sabodam* seri di satu alur sungai, desainnya menggunakan *sabodam* jangkar.

Banjir lahar pasca erupsi Merapi tahun 2010 banyak *sabodam* dalam satu rangkaian sistem seri, mengalami kerusakan. Agar kerusakan tidak menjadi semakin parah dan kemungkinan runtuh, maka *sabodam* yang rusak harus segera diperbaiki. Perbaikan *sabodam* di bagian hilir sungai tersebut perlu dilakukan dengan desain *sabodam* jangkar.



Sumber: Cahyono J., (2012).

Gambar 13 Perbaikan *sabodam* di wilayah G. Merapi pasca erupsi 2010 dengan konsep *sabodam* jangkar

Penambangan berbasis masyarakat

Pengelolaan penambangan berbasis masyarakat yang dikelola BUMDes bekerja sama dengan instansi terkait, diharapkan dapat mengelola penambangan secara terpadu. Hal ini bertujuan agar pelaksanaan penambangan yang aman, tetap terjaga pelestarian morfologi dan geometris sungai, mencegah penambang *ilegal*, serta agar penambangan sesuai aturan yang berlaku. Penambangan yang tertib akan menjamin lokasi dan jumlah material yang ditambang secara terencana, terkendali, tidak merusak ekosistem lingkungan. Disamping itu juga dapat mengamankan fasilitas sarana dan prasarana pengendalian aliran lahar yang berada di sepanjang alur sungai lahar akibat penambangan yang tidak terkendali. Diharapkan, dengan pengelolaan penambangan berbasis masyarakat dapat ikut menjaga kapasitas tampung *sabodam* agar selalu siap menerima suplai material pasca erupsi baru.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Pengendalian aliran lahar pada gunungapi aktif harus mempertimbangkan perubahan aktivitas vulkanik yang terjadi, terutama skala erupsi berdasarkan periode erupsi dan perubahan kondisi daerah tangkapan sungainya,
2. Pengendalian aliran lahar, harus mempertimbangkan perbandingan antara jumlah persediaan material vulkanis di hulu

sungai yang harus dikendalikan dengan *sabodam* yang akan dibangun,

3. Usaha penanggulangan kerusakan *sabodam* pasca erupsi Merapi 2010 dapat digunakan sebagai dasar untuk merevitalisasi desain dan struktur bangunan sabo dalam pengendalian banjir lahar,
4. Revitalisasi desain dan struktur bangunan sabo dalam pengendalian banjir lahar yang memenuhi 3 aspek kelayakan dalam hal keamanan, kinerja, dan pemanfaatan *sabodam* secara internal dan eksternal bertujuan untuk optimalisasi *sabodam* sebagai pengendali banjir lahar,
5. Usaha revitalisasi *sabodam* sebagai pengendali banjir lahar dapat digunakan untuk meninjau ulang rencana induk sistem pengendalian banjir lahar di daerah vulkanik lainnya.

Saran

1. Perlu didorong usaha penelitian di bidang penggunaan lapisan beton kualitas tinggi untuk memperoleh campuran beton yang mampu melindungi pelimpah *sabodam* dari abrasi,
2. Perlu didorong terlaksananya pengelolaan penambangan galian C secara terpadu berbasis masyarakat melalui BUMDes dengan instansi terkait,
3. Pemikiran konsep *sabodam* "jangkar" perlu disempurnakan melalui pengkajian lanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Yachiyo Engineering Consultant dan Tim Survei Balai Sabo yang telah memberikan dukungan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Anjaribowo N, Setyawan, D.I., Salamun. , Budienny. H. 2014. Perencanaan Sabodam Kali Putih (KM 16,7) Kabupaten Magelang Jawa Tengah. Jurnal Karya Teknik Sipil, Volume 3, Nomor 4, Tahun 2014, Halaman {Bibliography} 956 – 962. <http://ejournal-1.undip.ac.id/index.php/jkts>. (diunduh 8 Juni 2016).
- Balai Sabo. 2014. Kajian Konsep Pondasi Mengambang Pada Bangunan Sabo, Badan Litbang, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Cahyono J. 2012. Konsepsi Awal Sabo Dam "Jangkar". JC Power "Panta Rei". November 2012.
- Edouard de Bélizal. 2013. Volcaniclastic Deposits as a Resource and Sand Mining: New Insights for Disaster Risk Reduction. Workshop Sedimer – Yogyakarta, 30-31 July 2013.
- Gonda Y, Legono D, Sukatja B, dan Santosa UB. 2013. Debris Flow and Flash Flood at Putih' River after the 2010 Eruption. 4th HATHI International Seminar, Water-Related Disaster Solutions Seminar. September 6-7, 2013.
- Herlina L, Kurniyaningrum E. 2013. Analisis Stabilitas Bangunan Pengendali Sedimen (Sabodam) Berdasarkan Morfologi Sungai di Sungai Warmake, Kabupaten Manokwari. Jurnal Sipil, 13 (1). pp. 1-8. ISSN 1411-9064.
- 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.
- Kumalawati R. 2015. Buku Pengelolaah Bencana Lahar Gunung Api Merapi. Penerbit Ombak, Yogyakarta: 2015.
- Kusumosubrata H. 2014. Implementasi Sabo. Pemutakhiran Buku Seri Teknologi Sabo Tahun 2012 (Cetakan 2014). *Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat SDA, Direktorat Sungai dan Pantai*. ISBN:978-602-96989-4-7.
- KIM N, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, and Hao ZHANG. 2013. A Study on Debris-Flow Deposition by The Arrangement of Sabodam, *Journal of Japan Society of Civil Engineers. Ser. Hydraulic Engineering*. Vol. 69. (4): 97 -102.
- 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*.
- Munir, M.D dan Djudi. 2015. Kerusakan Bangunan Pengendali Sedimen (Sabodam) Pasca Erupsi Gunungapi Merapi 2010. Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke-8. Academia Industry Linkage. 15-16 Oktober 2015: 128-140.
- Preece K. J. 2014. Transitions between effusive and explosive activity at Merapi volcano, Indonesia: A Volcanological and Petrological Study of the 2006 and 2010 eruptions.
- PVMBG. 2014. Gunung Merapi – Sejarah Letusan. Laporan 03 June 2014. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Badan Geologi. <http://www.vsi.esdm.go.id>. (diunduh 5 Februari 2017).
- Rahayu, Ariyanto DP, Komariah, Hartati S, Syamsiah J, dan Dewi WS. 2014. Dampak Erupsi Gunung Merapi terhadap Lahan dan Upaya-upaya Pemulihannya. *Caraka Tani – Jurnal Ilmu Ilmu Pertanian*. Vol. XXIX No. 1 Maret 2014.
- Shrestha HK. 2013. Sand mining: As an adaptation measure to climate change induced disaster in Chitwan District of Nepal. Inception workshop on Developing regional collaboration in river basin management in response to climate change. *Monash University*, February 27, 2013.
- Saifudin A, As'ad S, Sunarmasto. 2015. Pengaruh Dosis, Aspek Rasio, dan Distribusi Serat terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Belah Beton Berserat Baja. e-Jurnal Matriks Teknik Sipil/Universitas Sebelas Maret/Juni 2015/369. <https://eprints.uns.ac.id> (diunduh 6 Juni 2017).
- Solikhina A, Jean-Claude Thouret, Gupta A, Sayudia D.S, Oehlerd J.F, and Soo Chin Liew. 2015. Effects and Behavior of Pyroclastic and Lahar Deposits of the 2010 Merapi Eruption based on High-Resolution Optical Imagery. 3rd International Symposium on Earthquake and Disaster Mitigation. *ISED 2013. Elsevier. Procedia Earth and Planetary Science* 12 (2015) 1 – 10.

Triatmodjo B, 2010. Buku Hidrologi Terapan.
Yogyakarta : Beta Offset. Cetakan kedua
2010. ISBN: 978-979-8541-40-7.

Yachiyo Engineering Co., Ltd. 2013. Effect and
Damage of Sabo Facility in 2010 Eruption of

Mount Merapi. *Report on the study of sabo
dam damage as lahar flow controller in
Merapi volcano area.* 9 September, 2013.