

Analisa Potensi Aliran Lahar Kali Putih, Gunungapi Kelud

Hayu Rahayu^{1*}, Suharyanto², Sri Sangkawati³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

E-mail: ^{1*}hayurahayu75@gmail.com, ²suharyanto20k@gmail.com, ³srisangkawati@gmail.com

Received 10 June 2020; Reviewed 31 August 2020; Accepted 19 September 2020

Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>

Abstract

Kelud Volcano is one of the active volcanoes and located in East Java. After the eruption, Kelud Volcano left a number of volcanic material from the rock, sand and the ash on residential land, plantations and the surrounding area. The main problem is the eruption of Kelud Volcanoes has the potential to experience an increase in the frequency of eruptions and there has been no development of a regional reconstruction model for secondary impacts due to eruptions in the field of water resources infrastructure. Based on these problems, a test of the Sabo and modular hydraulic physical models will be planned. This study discusses the identification of the location and volume of sediments that have the potential to become Kali Putih lava flows from Kelud Volcanoes. The Takahashi analysis method is used to analyze the estimated excess volume of the target sediment which must be controlled by sabo technology. Identification of sediment transport zones is obtained from the classification of slope on existing buildings obtained from satellite imagery. The results of the analysis are as follows: 1.) Sediment transport areas in the Putih Watershed have an area of 863 km². 2.) The total volume of Kali Putih sediment that has the potential to become cold lava after eruption is 4,139,414.23 m³. 3.) Sabo and modular hydraulic physical model testing is required. 4) A model of regional reconstruction is needed for secondary impacts due to eruptions in water resources field. 5) New sabo plan planning is needed

Keywords: cold lava flow, cold lava volume, sabodam, affected area

Abstrak

Gunungapi Kelud merupakan salah satu gunungapi yang masih aktif dan terletak di Jawa Timur. Pasca erupsi, Gunungapi Kelud menyisakan sejumlah material vulkanik berupa batu, pasir, dan abu dilahan pemukiman, perkebunan dan area sekitarnya. Permasalahan utamanya adalah erupsi Gunungapi Kelud berpotensi mengalami peningkatan frekuensi letusan dan belum adanya pengembangan model rekonstruksi kawasan terhadap dampak sekunder akibat erupsi dalam bidang infrastruktur sumber daya air. Berdasarkan permasalahan tersebut maka akan direncanakan pengujian model fisik hidraulik sabo dan modular. Dalam studi ini dibahas tentang identifikasi lokasi dan volume sedimen yang berpotensi menjadi aliran lahar Kali Putih, Gunungapi Kelud. Metode analisis Takahashi digunakan untuk menganalisis estimasi kelebihan volume sedimen sasaran yang harus dikendalikan oleh teknologi sabo. Identifikasi zona angkutan sedimen didapatkan dari pengklasifikasian kemiringan lereng pada bangunan eksisting yang diperoleh dari citra satelit. Hasil-hasil analisis tersebut adalah sebagai berikut : 1) Daerah transport sedimen pada DAS Putih memiliki luas 863 km². 2) Total volume sedimen Kali Putih yang berpotensi menjadi lahar dingin pasca erupsi adalah 4.139.414,23 m³ 3) Diperlukan pengujian model fisik hidraulik sabo dan modular 4) Diperlukan model rekonstruksi kawasan terhadap dampak sekunder akibat erupsi dalam bidang infrastruktur sumber daya air 5) Diperlukan perencanaan sabo plan baru.

Kata kunci : aliran lahar dingin, volume lahar dingin, sabodam, daerah terdampak

1. Pendahuluan

Gunungapi Kelud, merupakan salah satu gunung api yang masih aktif dan terletak di Jawa Timur. Secara administratif Gunungapi Kelud termasuk dalam 5 wilayah, yaitu Kabupaten Blitar, Kabupaten Kediri, Kabupaten Malang, Kota Blitar dan Kota Kediri. Gunungapi Kelud berdampingan dengan gunung tua, yakni Gunung Kawi- Butak pada sisi timur dan Gunung Anjasmoro pada sisi timur laut (ESDM, 2014). Sedangkan secara geografis Gunungapi Kelud terletak pada $7^{\circ}56'$ LS dan $112^{\circ}18'30''$ BT dengan ketinggian puncak 1731 m.dpl, sedangkan tinggi danau kawah 1.113,9 m.dpl dan tinggi dataran Kediri 1650 m.

Gunungapi ini termasuk dalam tipe stratovulkan yang diklasifikasikan sebagai gunungapi aktif tipe A bersifat freato magmatik sampai magmatik dengan karakteristik letusan eksplosif, secara morfologis Gunungapi Kelud ditandai oleh keberadaan bekas kawah yang tumpang tindih yang berbentuk tapal kuda pada bagian tertentu, hal ini menandakan telah terjadi erupsi secara berulang dan bersifat eksplosif (Kadarsetia, 2006). Gunungapi Kelud terbentuk akibat proses subduksi lempeng benua Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia.

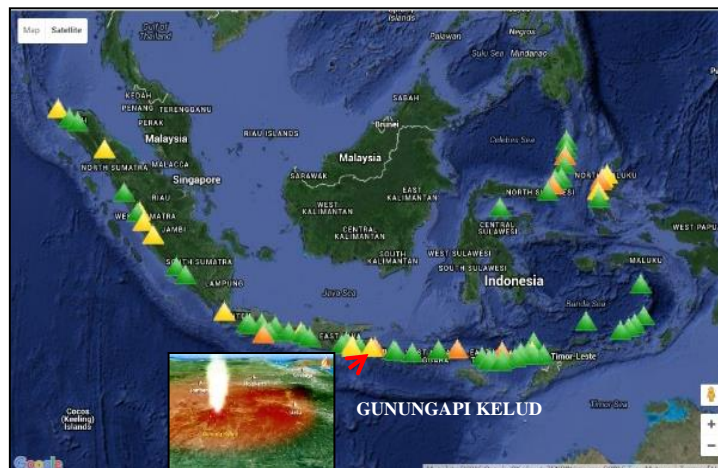
Pasca erupsi, Gunungapi Kelud menyisakan sejumlah material vulkanik berupa batu, pasir, dan abu dilahan pemukiman, perkebunan dan area sekitarnya. Material-material tersebut apabila bercampur dengan air hujan dalam jumlah besar akan membentuk suatu aliran yang disebut lahar dingin. Tingginya curah hujan dan kondisi lereng yang ada dapat menimbulkan aliran lahar yang memiliki daya rusak tinggi. Untuk mengurangi dampak negatif tersebut, perlu dibuat suatu bangunan-bangunan pengendali sedimen (*Sabodam*) yang diletakkan secara serial pada sungai-sungai yang berpotensi dilalui aliran lahar dingin.

Menurut D.A. Puspitosari, 2011 kapasitas tampungan kantong lahar di daerah Gunungapi Kelud masih cukup besar, dimana kajian tersebut dilakukan sebelum terjadinya erupsi pada tahun 2014. Sedangkan menurut Sutikno hardjisuwarno, dkk, 2012, akibat elevasi 630 m sampai 318 m kecepatan rambat banjir sebesar 8,41 m/dtk dan terjadi perlambatan rata-rata sebesar 1,59 m/dtk pada elevasi 318 m karena adanya perubahan kemiringan dasar sungai telah menelan banyak korban sehingga diperlukan sistem prakiraan dan peringatan dini aliran debris di DAS Putih. Pada tahun erupsi, menurut Sitti Febriyani, dkk, 2014 kawasan yang mempunyai resiko tinggi setelah letusan yaitu Desa Pandansari, Desa Ngantru dan Desa Pagersari.

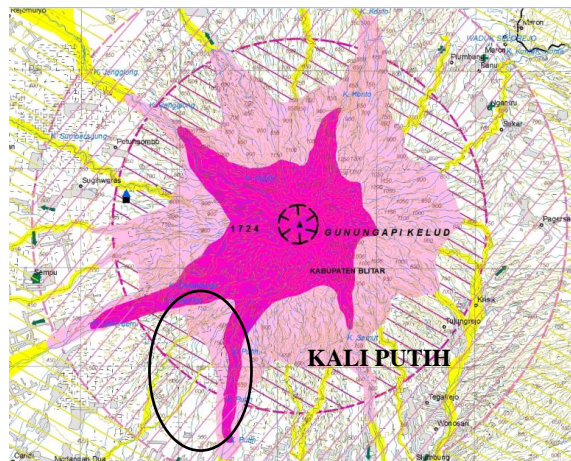
Permasalahan utama di sini adalah, aktivitas erupsi Gunungapi Kelud berpotensi mengalami peningkatan frekuensi letusan pada tahun-tahun berikutnya, dan belum adanya pengembangan model rekonstruksi kawasan terhadap dampak sekunder akibat erupsi dalam bidang infrastruktur sumber daya air.

Studi ini dilakukan untuk identifikasi lokasi dan volume sedimen yang berpotensi menjadi aliran lahar di Kali Putih, Gunungapi Kelud, dan terciptanya suatu sistem sabo plan pada Kali Putih yang dapat mengendalikan sedimen lahar secara signifikan dan efektif. Dalam studi ini juga mengidentifikasi lokasi dan volume sedimen yang berpotensi dialiri lahar dingin pasca erupsi.

Lokasi penelitian di kawasan DAS Putih di Kecamatan Garum, Kabupaten Blitar, Jawa Timur. Lokasi studi dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1 Peta Lokasi Gunungapi Kelud



(Sumber: ESDM, 2016)

Gambar 2 Peta Lokasi Kali Putih Gunungapi Kelud

Dalam penelitian tidak menggunakan pengukuran topografi aktual dan analisis dilakukan untuk sedimen lahar saat ini yang ada pasca erupsi Tahun 2014, tanpa memperhitungkan kemungkinan erupsi baru.

2. Metode Penelitian

Lahar merupakan terminologi bahasa Indonesia untuk mendeskripsikan campuran panas atau dingin dari air dan batuan yang mengalir ke bawah di lembah gunung atau lereng sungai (USGS, 2013). Berbeda dengan aliran sedimen biasa, lahar atau dapat disebut juga aliran sedimen merupakan cairan atau fluida khusus dengan perbedaan yang besar pada gradasi sedimen, karakteristik, dan pergerakan dari air bersedimen normal (Pan, et al. 2013).

Sedimen Lahar adalah suatu kepingan atau potongan yang terbentuk oleh proses fisik dan kimia berbentuk batuan atau tanah yang berasal dari muntahan material piroklastik gunungapi dan dapat

bergerak membentuk aliran lahar serta mengendap disuatu tempat. Bentuk dari material beraneka ragam dan tidak terbatas dari mulai yang berbentuk bulat sampai berbentuk tajam.

2.1 Zonasi Angkutan Sedimen

Identifikasi zona angkutan sedimen pada sungai di daerah vulkanik menurut Takahashi dapat dibedakan menjadi 3 (tiga), yaitu: 1) Daerah produksi sedimen, memiliki kemiringan alur sungai $\geq 15^\circ$. 2) Transportasi sedimen, memiliki kemiringan alur sungai antara $10^\circ < \theta < 15^\circ$. 3) Sedimentasi/pengendapan sedimen $2^\circ \leq \theta < 10^\circ$. (Takahashi, 2007)

2.2 Intensitas Hujan Rencana

Analisis intensitas curah hujan menggunakan rumus yang diberikan oleh DR. Mononobe yaitu: (Soewarno, 1995)

$$I = (R24 / 24) \times (24 / t)^{2/3} \quad (1)$$

dimana:

I = Intensitas Curah Hujan (mm/jam)

R24 = Curah hujan maksimum dalam 1 hari (mm)

t = Lamanya Curah Hujan (jam).

2.3 Estimasi Jumlah Sedimen Sasaran

Perhitungan jumlah sedimen sasaran yang harus dikendalikan oleh Teknologi Sabo dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Kusumosubroto, 2013)

$$VT = VSE + VSF + VRS + VRB \quad (2)$$

Dimana,

VT = Jumlah potensi sedimen (m^3)

VSE = Sedimen hasil erosi lereng/*slope erosion* (m^3)

$$VSE = A1.a.d1 + A2.a.d2 \quad (3)$$

VSF = Sedimen akibat tebing sungai yang runtuh/*slope failure* (m^3)

$$VSF = B.b.R.d \quad (4)$$

VR = sedimen akibat erosi tebing sungai / *riverbank erosion* (m^3)

$$VRS = 0,1HH2.LH + 0,5HL.LL \quad (5)$$

VRB = sedimen yang sudah ada di sepanjang / dasar sungai / *sediment amount in riverbed* (m^3)

$$VRB = Vd + Va \quad (6)$$

Perhitungan volume sedimen terangkut dihitung menggunakan rumus berikut (Takahashi, T, 1991):

(7)

Dimana,

V_t = Volume sedimen terangkut/transportable (m³)

C_d = Konsentrasi sedimen aliran debris

A = Luas daerah tangkapan sungai (m²)

Fr = $(0,05 \times (\log A) - 2,0)^2 + 0,05$

= Faktor koreksi run-off aliran debris (nilai 0,1 – 0,5)

R_{24} = Curah hujan maksimum dengan kala ulang (mm)

λ = Angka pori (Void ratio) nilai sekitar 0,4

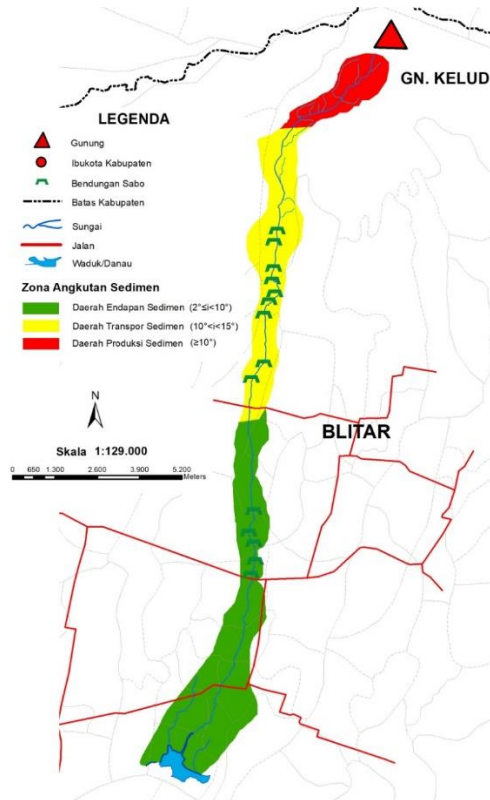
3. Analisis dan Pembahasan

3.1 Identifikasi Zona Angkutan Sedimen

Menurut Takahashi, zona angkutan sedimen dapat dibagi menjadi 3 bagian berdasarkan kemiringan lerengnya, yaitu daerah produksi sedimen, daerah transport sedimen dan daerah endapan sedimen. Daerah produksi sedimen berada di kemiringan > 15 meliputi puncak gunung. Bagian puncak gunung menghasilkan semburan lahar saat terjadi erupsi dan sebagian besar tertinggal dan menempel pada sisi puncak menjadi lahar dingin. Tingkat kecuraman puncak tersebut menimbulkan potensi keruntuhan lahar dingin yang tinggi, sehingga zona tersebut dikategorikan sebagai daerah produksi sedimen.

Daerah potensi sedimen memiliki potensi bencana diantaranya rawan erosi, longsor dan pergerakan material dalam jumlah besar, rawan longsor tebing sungai dan benturan (impak) bangunan air dan jembatan, rawan limpasan (overtopping) sedimen, benturan (impak) pada bangunan air dan jembatan. Daerah transport sedimen berada pada kemiringan 10 - 15 meliputi lereng gunung. Kemiringan lereng gunung ini sangat ideal untuk aliran debris yang dapat memindahkan sedimen dengan kecepatan yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi karena kemiringan lereng dan debit air yang terjadi, sehingga zona ini dikategorikan sebagai daerah transport sedimen. Daerah transport sedimen memiliki potensi bencana rawan longsor tebing sungai dan benturan (impak) bangunan air dan jembatan. Sedangkan daerah endapan sedimen berada - pada kemiringan 2 - 10 meliputi kaki gunung. Kemiringan kaki gunung cenderung landai, di daerah ini pergerakan transportasi sedimen berhenti karena tidak ada lagi pengaruh gravitasi. Sedimen yang terhenti tersebut pada akhirnya akan mengendap, sehingga zona ini dikategorikan sebagai daerah endapan sedimen. Daerah endapan sedimen memiliki potensi bencana rawan limpasan dan pengendapan material boulders, pengendapan material pasir dan pendangkalan alur.

Pengklasifikasian zona angkutan sedimen pada DAS Putih dilakukan menggunakan ArcGis pada setiap letak bangunan sabo kemudian dihitung luasannya. Peta zonasi angkutan sedimen DAS Putih ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Zonasi Angkutan Sedimen Sub DAS Putih

DAS Putih dikelompokkan berdasarkan kemiringan sungai yang diambil tepat pada posisi bangunan sabo, kemudian dikelompokkan sesuai dengan derajat kemiringannya. Pengelompokan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Pengelompokan Bangunan Berdasarkan Kemiringan Lokasi di Kali Putih

Bangunan Sabo	Kemiringan	Derajat
PUCD3	>15 Derajat	16,56
PUCD4	>15 Derajat	18
PUCD5	10-15 Derajat	10,8
PUCD6	>15 Derajat	19,5
PUKD2	>15 Derajat	19,44
PUKD3	>15 Derajat	17,54
PUKD4	>15 Derajat	18,72
PUKD9	>15 Derajat	23,4
PUKL1	2 - 10 Derajat	4,68
PUSDT1-4KM	2 - 10 Derajat	5,4
PUPD6	2 - 10 Derajat	3,6
PUPD5	2 - 10 Derajat	2,88
PUPD7	10-15 Derajat	12,24
PUDP11	2 - 10 Derajat	5,04
PODP12	>15 Derajat	23,4
PUDP3LD	10-15 Derajat	10,04
PUDP3	2 - 10 Derajat	3,6
PUDP2LD	10-15 Derajat	10,8
PUDP2TENGAH	>15 Derajat	26,64
PUDP2	>15 Derajat	17,64

Bangunan Sabo	Kemiringan	Derajat
PUKL1LD	>15 Derajat	22,32
PUDP1LD	2 - 10 Derajat	3,6
PUDP1	2 - 10 Derajat	7,2
PUKL2	2 - 10 Derajat	4,32
PUKD12	10-15 Derajat	10,44
PUKD13	2 - 10 Derajat	8,64
PUKD1LD	2 - 10 Derajat	6,84
PUKD2LD	2 - 10 Derajat	3,96
PUKD3LD	2 - 10 Derajat	4,32
PU CONFLUENCE	2 - 10 Derajat	6,84

Berdasarkan data pengelompokan pada Tabel 1 dibuatlah zona angkutan sedimen DAS Putih. Luas zona angkutan sedimen DAS Putih dapat dilihat pada

Tabel 2 berikut:

Tabel 2 Luas Zona Angkutan Sedimen DAS Putih

NAME	Keterangan (°)	Kategori	KM2
DAS Putih	2 -10	Daerah Endapan Sedimen	1437
DAS Putih	10 -15	Daerah Transpor Sedimen	863
DAS Putih	>15	Daerah Produksi Sedimen	322

3.2 Perhitungan estimasi kelebihan volume produksi sedimen

Estimasi kelebihan volume produksi sedimen yang tertransport dihitung menggunakan Rumus Takahashi. Selain sedimen transport perlu dipertimbangkan pula potensi sedimen atau sedimen yield. Sedimen yield adalah suatu massa material yang tidak stabil di daerah sungai, yang apabila mendapat pengaruh eksternal dapat menjadi aliran luruh.

1. Sedimen Hasil Erosi Lereng (VSE)

Estimasi sedimen hasil erosi lereng (*slope erosion*) adalah perhitungan volume erosi lahar dingin pada lereng yang dipengaruhi oleh kemiringan lahan. Estimasi sedimen erosi tebing mengacu pada **Error! Reference source not found.**, membutuhkan data luas lahan progressive, luas lahan normal, nilai rata-rata berdasarkan kemiringan lahan dan estimasi ketebalan erosi. Perhitungan Sedimen Erosi Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Perhitungan Sedimen Hasil Erosi Lereng (VSE) Kali Putih

Bangunan Sabo	L (meter)	Lahan Progressive (M2)	Lahan Normal (M2)	" (Sudut Lereng)	a	d1	d2	(VSE)
PUCD3	574,79	-	-	18,00	1,05	0,30	0,10	-
PUCD4	484,58	-	-	16,56	1,04	0,30	0,10	-
PUCD5	361,58	-	-	10,80	1,02	0,30	0,10	-
PUCD6	371,00	-	-	19,50	1,06	0,30	0,10	-
PUKD2	284,11	-	-	19,44	1,06	0,30	0,10	-
PUKD3	466,90	-	-	17,54	1,05	0,30	0,10	-
PUKD4	898,91	-	-	18,72	1,06	0,30	0,10	-
PUKD9	861,00	-	-	23,40	1,09	0,30	0,10	-

Bangunan Sabo	L (meter)	Lahan Progresive (M2)	Lahan Normal (M2)	" (Sudut Lereng)	a	d1	d2	(VSE)
PUKL1	743,44		-	23,40	1,09	0,30	0,10	-
PUSDT1-4KM	3.350,00	4.000	-	5,40	1,00	0,30	0,10	1.205,35
PUPD6	3.531,66	4.000	-	4,68	1,00	0,30	0,10	1.204,01
PUPD5	973,85	2.800	-	2,88	1,00	0,30	0,10	841,06
PUPD7	973,85	2.800	-	3,60	1,00	0,30	0,10	841,66
PUDP11	1.763,00		-	5,04	1,00	0,30	0,10	-
PODP12	911,09		-	12,24	1,02	0,30	0,10	-
PUDP3LD	621,23		-	10,04	1,02	0,30	0,10	-
PUDP3	266,10		-	11,52	1,02	0,30	0,10	-
PUDP2LD	266,10		-	10,80	1,02	0,30	0,10	-
PUDP2TENGAH	358,20		-	25,20	1,11	0,30	0,10	-
PUDP2	801,72		-	12,24	1,02	0,30	0,10	-
PUKL1LD	380,45		-	9,36	1,01	0,30	0,10	-
PUDP1LD	400,00		-	9,00	1,01	0,30	0,10	-
PUDP1	292,91		-	19,44	1,06	0,30	0,10	-
PUKL2	438,78		-	3,96	1,00	0,30	0,10	-
PUKD12	1.498,76		-	18,72	1,06	0,30	0,10	-
PUKD13	606,07		-	9,36	1,01	0,30	0,10	-
PUKD1LD	4.074,13		-	5,04	1,00	0,30	0,10	-
PUKD2LD	668,37	6.100	-	3,60	1,00	0,30	0,10	1.833,62
PUKD3LD	363,51	800	-	1,88	1,00	0,30	0,10	240,13
PU								
CONFLUENCE	542,00		-	8,28	1,01	0,30	0,10	-

2. Sedimen Akibat Tebing Sungai yang Runtuh (VSF)

Perhitungan sedimen akibat tebing sungai yang runtuh adalah perhitungan volume tebing kanan dan kiri aliran sungai yang runtuh. Sedimen akibat runtuhnya tebing mengacu pada **Error! Reference source not found.**, membutuhkan data luas sub basin, luas sub basin yang berpegunungan, nilai daerah runtuh dan ketebalan runtuh. Perhitungan sedimen akibat runtuhnya tebing kali putih dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Perhitungan Sedimen Akibat Runtuhnya Tebing (VSF) Kali Putih

Bangunan Sabo	L (meter)	B (M2)	b (M2)	R	d	(VSF)
PUCD3	574,79	17.875.000	8.340.000	-	10	-
PUCD4	484,58	17.436.000	440.000	-	10	-
PUCD5	361,58	17.112.000	330.000	-	10	-
PUCD6	371,00	16.849.000	250.000	-	10	-
PUKD2	284,11	16.638.000	210.000	-	10	-
PUKD3	466,90	16.292.000	340.000	-	10	-
PUKD4	898,91	15.845.000	440.000	-	10	-
PUKD9	861,00	15.132.000	7.100.000	-	10	-
PUKL1	743,44	14.580.000	550.000	-	10	-
PUSDT1-4KM	3.350,00	12.109.000	2.470.000	-	10	-
PUPD6	3.531,66	12.109.000	2.470.000	-	10	-
PUPD5	973,85	11.504.000	600.000	-	10	-
PUPD7	973,85	11.504.000	600.000	-	10	-
PUDP11	1.763,00	10.813.000	690.000	-	10	-
PODP12	911,09	10.581.000	230.000	-	10	-
PUDP3LD	621,23	10.161.000	410.000	-	10	-
PUDP3	266,10	10.031.000	120.000	-	10	-
PUDP2LD	266,10	9.993.000	30.000	-	10	-
PUDP2TENGAH	358,20	19.603.000	6.610.000	-	10	-
PUDP2	801,72	19.038.000	560.000	-	10	-

Bangunan Sabo	L (meter)	B (M2)	b (M2)	R	d	(VSF)
PUKL1LD	380,45	17.987.000	1.060.000	-	10	-
PUDP1LD	400,00	17.659.000	310.000	-	10	-
PUDP1	292,91	17.366.000	290.000	-	10	-
PUKL2	438,78	17.205.000	160.000	-	10	-
PUKD12	1.498,76	16.903.000	300.000	-	10	-
PUKD13	606,07	15.726.000	1.170.000	-	10	-
PUKD1LD	4.074,13	15.271.000	450.000	-	10	-
PUKD2LD	668,37	11.901.000	3.370.000	-	10	-
PUKD3LD	363,51	11.220.000	670.000	-	10	-
PU						
CONFLUENCE	542,00	10.913.000	310.000	-	10	-

3. Sedimen Akibat Erosi Tebing Sungai (VRS)

Perhitungan sedimen akibat erosi tebing sungai (*riverbank erosion*) adalah perhitungan volume sedimen akibat tergerusnya tepi sungai. Perhitungan sedimen akibat erosi tebing sungai mengacu pada **Error! Reference source not found.** yang membutuhkan data panjang teras atas dan bawah serta ketebalan tererosinya teras atas dan bawah. Perhitungan sedimen akibat erosi tebing Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Perhitungan Akibat Erosi Tebing (VSR) Kali Putih

Bangunan Sabo	L (meter)	Teras bawah (Meter)	Teras atas (Meter)	(VSR)
PUCD3	574,79	36,60	13,30	87.164,03
PUCD4	484,58	20,40	13,70	29.261,36
PUCD5	361,58	4,35	1,00	720,36
PUCD6	371,00	2,85	2,57	546,39
PUKD2	284,11	1,00	0,35	31,89
PUKD3	466,90	1,43	0,50	107,15
PUKD4	898,91	1,00	0,70	133,94
PUKD9	861,00	1,06	0,27	103,02
PUKL1	743,44	2,36	0,66	446,45
PUSDT1-4KM	3.350,00	0,30	0,06	31,36
PUPD6	3.531,66	0,36	0,15	53,72
PUPD5	973,85	0,12	0,06	1,75
PUPD7	973,85	0,13	0,02	1,68
PUDP11	1.763,00	0,09	0,06	2,06
PODP12	911,09	0,05	0,01	0,24
PUDP3LD	621,23	0,48	0,15	15,71
PUDP3	266,10	0,35	0,15	3,86
PUDP2LD	266,10	0,17	0,03	0,79
PUDP2TENGAH	358,20	18,90	20,40	27.702,11
PUDP2	801,72	37,30	23,50	155.817,49
PUKL1LD	380,45	5,39	3,00	1.447,69
PUDP1LD	400,00	13,30	3,22	7.490,34
PUDP1	292,91	2,50	1,43	242,97
PUKL2	438,78	0,50	0,23	13,29
PUKD12	1.498,76	0,15	0,03	3,51
PUKD13	606,07	0,16	0,09	2,04
PUKD1LD	4.074,13	1,16	0,38	607,05
PUKD2LD	668,37	0,32	0,11	7,65
PUKD3LD	363,51	0,05	0,03	0,12
PU				
CONFLUENCE	542,00	0,07	0,04	0,35

4. Sedimen di Dasar Sungai (VRB)

Perhitungan Sedimen didasar sungai adalah perhitungan volume sedimen yang sudah ada disepanjang dasar sungai. Perhitungan ini mengacu pada **Error! Reference source not found.** yang membutuhkan data jarak antar *cross section*, luas potensi sedimen setiap *cross section*, luas sedimen dasar sungai, ketebalan sedimen dasar sungai, dan lebar dasar sungai. Perhitungan sedimen di dasar sungai Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Perhitungan Sedimen di Dasar Sungai (VRB) Kali Putih

Bangunan Sabo	L (meter)	w (meter)	A	d	(Va)	VRB (1.000m3)
PUCD3	574,79	224,00	128.752,96	3,69	474885,86	475.460,65
PUCD4	484,58	399,00	193.347,42	5,42	1047901,1	1.048.385,72
PUCD5	361,58	67,10	24.262,02	1,65	40062,859	40.424,44
PUCD6	371,00	58,80	21.814,80	1,51	32986,491	33.357,49
PUKD2	284,11	27,30	7.756,20	0,91	7032,1954	7.316,31
PUKD3	466,90	30,20	14.100,38	0,97	13674,206	14.141,11
PUKD4	898,91	23,90	21.483,95	0,83	17825,678	18.724,59
PUKD9	861,00	17,00	14.637,00	0,66	9677,2365	10.538,24
PUKL1	743,44	58,80	43.714,27	1,51	66101,016	66.844,46
PUSDT1-4KM	3.350,00	7,72	25.862,00	0,39	10101,991	13.451,99
PUPD6	3.531,66	7,68	27.123,15	0,39	10557,982	14.089,64
PUPD5	973,85	7,40	7.206,49	0,38	2736,6018	3.710,45
PUPD7	973,85	7,40	7.206,49	0,38	2736,6018	3.710,45
PUDP11	1.763,00	7,87	13.874,81	0,40	5489,6358	7.252,64
PODP12	911,09	6,89	6.277,41	0,36	2272,968	3.184,06
PUDP3LD	621,23	9,69	6.019,72	0,45	2736,0585	3.357,29
PUDP3	266,10	5,77	1.535,40	0,32	493,93662	760,04
PUDP2LD	266,10	7,15	1.902,62	0,37	706,13588	972,24
PUDP2TENGAH	358,20	192,00	68.774,40	3,33	228890,43	229.248,63
PUDP2	801,72	218,00	174.774,96	3,62	633067,77	633.869,49
PUKL1LD	380,45	310,00	117.939,50	4,58	540215,55	540.596,00
PUDP1LD	400,00	333,00	133.200,00	4,80	639931,83	640.331,83
PUDP1	292,91	101,00	29.583,91	2,17	64160,808	64.453,72
PUKL2	438,78	7,12	3.124,11	0,37	1156,2369	1.595,02
PUKD12	1.498,76	15,00	22.481,40	0,61	13673,642	15.172,40
PUKD13	606,07	8,90	5.394,02	0,43	2316,5382	2.922,61
PUKD1LD	4.074,13	47,30	192.706,35	1,31	252040,38	256.114,51
PUKD2LD	668,37	25,66	17.150,37	0,87	14920,316	15.588,69
PUKD3LD	363,51	4,50	1.635,80	0,27	445,86552	809,38
PU						
CONFLUENCE	542,00	4,30	2.330,60	0,26	616,2828	1.158,28

5. Jumlah Potensi Sedimen (VT)

Perhitungan potensi sedimen (VT) mengacu pada **Error! Reference source not found.**, diperoleh dari hasil penjumlahan sedimen hasil erosi lereng, sedimen akibat tebing sungai yang runtuh, sedimen akibat erosi tebing sungai, dan sedimen yang sudah ada disepanjang dasar sungai. Perhitungan potensi sedimen Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Perhitungan Jumlah Potensi Sedimen (VT) Kali Putih

Bangunan Sabo	(VSE)	(VSF)	(VSR)	(VRB)	Jumlah Potensi Sedimen (VT)
PUCD3	13537,88737	0	87164,02955	474885,8556	575.587,77
PUCD4	20171,41626	0	29261,3633	1047901,137	1.097.333,92
PUCD5	2469,95143	0	720,357755	40062,85858	43.253,17
PUCD6	2314,220221	0	546,38654	32986,49105	35.847,10
PUKD2	822,5112241	0	31,8913475	7032,195434	7.886,60
PUKD3	1478,791783	0	107,148881	13674,20581	15.260,15
PUKD4	2268,396943	0	133,93759	17825,67757	20.228,01
PUKD9	1594,870741	0	103,01865	9677,236476	11.375,13
PUKL1	4763,176428	0	446,4505888	66101,01592	71.310,64
PUSDT1-4KM	3803,078196	0	31,356	10101,99093	13.936,43
PUPD6	3925,402454	0	53,7165486	10557,98206	14.537,10
PUPD5	1562,62266	0	1,75293	2736,601757	4.300,98
PUPD7	1563,734673	0	1,6847605	2736,601757	4.302,02
PUDP11	1392,866366	0	2,06271	5489,6358	6.884,56
PODP12	642,3426641	0	0,2368834	2272,967973	2.915,55
PUDP3LD	611,3336602	0	15,7109067	2736,05852	3.363,10
PUDP3	156,6963396	0	3,85845	493,9366249	654,49
PUDP2LD	193,6923236	0	0,792978	706,1358771	900,62
PUDP2TENGAH	7600,833752	0	27702,1134	228890,427	264.193,37
PUDP2	17884,03364	0	155817,4889	633067,7749	806.769,30
PUKL1LD	11953,09416	0	1447,692145	540215,5463	553.616,33
PUDP1LD	13486,03548	0	7490,336	639931,8322	660.908,20
PUDP1	3137,243575	0	242,9659159	64160,8076	67.541,02
PUKL2	313,1590252	0	13,2906462	1156,236868	1.482,69
PUKD12	2373,713466	0	3,5070984	13673,64159	16.050,86
PUKD13	546,6808392	0	2,0424559	2316,538194	2.865,26
PUKD1LD	19345,4319	0	607,04537	252040,3751	271.992,85
PUKD2LD	3552,046573	0	7,6528365	14920,31647	18.480,02
PUKD3LD	403,7968524	0	0,1235934	445,865517	849,79
PU					
CONFLUENCE	235,5149802	0	0,3523	616,2827983	852,15

6. Sedimen yang Tertransport Takahashi (Vt)

Perhitungan sedimen yang tertransport Takahashi mengacu pada **Error! Reference source not found.**, membutuhkan data curah hujan rencana, luas daerah tangkapan sungai, konsentrasi sedimen aliran debris, faktor koreksi run-off aliran debris, dan angka pori (Void ratio). Curah hujan rencana yang digunakan adalah curah hujan rencana periode 2 tahun mengacu pada Persamaan 1, dapat dilihat pada Tabel 8. Perhitungan sedimen yang tertransport Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 8 Curah Hujan Rencana (R24)

No	Periode ulang	Peluang	log Xr	S log x	Cs	k	Y = Log (Xt)	Xt (mm)
1	2	50	1,9	0,115		0,099	1,918	83
2	5	20	1,9	0,115		0,877	2,008	102
3	10	10	1,9	0,115	-0,58	1,224	2,048	112
4	25	4	1,9	0,115		1,554	2,086	122

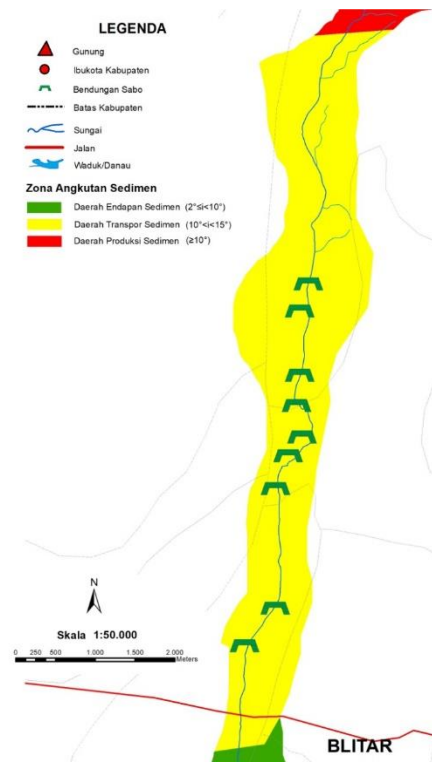
5	50	2	1,9	0,115	1,747	2,108	128
6	100	1	1,9	0,115	1,897	2,125	133
7	200	0,5	1,9	0,115	2,031	2,140	138
8	1000	0,1	1,9	0,115	2,249	2,166	146

Tabel 9 Perhitungan Sedimen yang Tertransport Takahashi (Vt) Kali Putih

Bangunan Sabo	R24	A (M2)	Cd	Fr	Vt (M3)	
PUCD3	83	128753	0,4	0,4	0,3	3.562.165.226,67
PUCD4	83	193347,4	0,4	0,4	0,3	5.349.278.620,00
PUCD5	83	24262,02	0,4	0,4	0,3	671.249.164,67
PUCD6	83	21814,8	0,4	0,4	0,3	603.542.800,00
PUKD2	83	7756,203	0,4	0,4	0,3	214.588.283,00
PUKD3	83	14100,38	0,4	0,4	0,3	390.110.513,33
PUKD4	83	21483,95	0,4	0,4	0,3	594.389.255,67
PUKD9	83	14637	0,4	0,4	0,3	404.957.000,00
PUKL1	83	43714,27	0,4	0,4	0,3	1.209.428.192,00
PUSDT1-4KM	83	25862	0,4	0,4	0,3	715.515.333,33
PUPD6	83	27123,15	0,4	0,4	0,3	750.407.116,80
PUPD5	83	7206,49	0,4	0,4	0,3	199.379.556,67
PUPD7	83	7206,49	0,4	0,4	0,3	199.379.556,67
PUDP11	83	13874,81	0,4	0,4	0,3	383.869.743,33
PUDP12	83	6277,41	0,4	0,4	0,3	173.675.012,77
PUDP3LD	83	6019,719	0,4	0,4	0,3	166.545.550,70
PUDP3	83	1535,397	0,4	0,4	0,3	42.479.317,00
PUDP2LD	83	1902,615	0,4	0,4	0,3	52.639.015,00
PUDP2TENGAH	83	68774,4	0,4	0,4	0,3	1.902.758.400,00
PUDP2	83	174775	0,4	0,4	0,3	4.835.440.560,00
PUKL1LD	83	117939,5	0,4	0,4	0,3	3.262.992.833,33
PUDP1LD	83	133200	0,4	0,4	0,3	3.685.200.000,00
PUDP1	83	29583,91	0,4	0,4	0,3	818.488.176,67
PUKL2	83	3124,114	0,4	0,4	0,3	86.433.809,60
PUKD12	83	22481,4	0,4	0,4	0,3	621.985.400,00
PUKD13	83	5394,023	0,4	0,4	0,3	149.234.636,33
PUKD1LD	83	192706,3	0,4	0,4	0,3	5.331.542.322,33
PUKD2LD	83	17150,37	0,4	0,4	0,3	474.493.686,20
PUKD3LD	83	1635,795	0,4	0,4	0,3	45.256.995,00
PU						
CONFLUENCE	83	2330,6	0,4	0,4	0,3	64.479.933,33

3.3 Lokasi yang berpotensi dialiri lahar dingin pasca erupsi

Lokasi yang berpotensi dialiri lahar dingin pasca erupsi yaitu daerah transport sedimen dalam peta zona angkutan sedimen. Daerah transport sedimen pada DAS Putih memiliki luas 863 km². Daerah ini memiliki potensi bencana rawan longsor tebing sungai dan benturan (impak) bangunan air dan jembatan. Direkomendasikan perencanaan saboplan baru disepanjang zona ini, mengingat hasil analisis diatas yang menunjukkan bahwa saboplan eksisting tidak mampu menampung potensi aliran lahar dingin. Lokasi transport lahar dingin pada DAS Putih ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Lokasi Transport Lahar Dingin Kali Putih

3.4. Volume sedimen yang berpotensi menjadi aliran lahar pasca erupsi

Total volume sedimen Kali Putih yang berpotensi menjadi lahar dingin pasca erupsi yaitu 4,139,414.23 m³. Jumlah potensi sedimen masing-masing bangunan sabo di Kali Putih dapat dilihat pada Tabel 10 .

Tabel 10 Volume Sedimen yang Berpotensi Menjadi Aliran Lahar Dingin Kali Putih

Bangunan Sabo	Jumlah Potensi Sedimen (VT)	Bangunan Sabo	Jumlah Potensi Sedimen (VT)
PUCD3	575.587,77	PUDP3LD	3.363,10
PUCD4	1.097.333,92	PUDP3	654,49
PUCD5	43.253,17	PUDP2LD	900,62
PUCD6	35.847,10	PUDP2TENGAH	264.193,37
PUKD2	7.886,60	PUDP2	806.769,30
PUKD3	15.260,15	PUKL1LD	553.616,33
PUKD4	20.228,01	PUDP1LD	660.908,20
PUKD9	11.375,13	PUDP1	67.541,02
PUKL1	71.310,64	PUKL2	1.482,69
PUSDT1-4KM	13.936,43	PUKD12	16.050,86
PUPD6	14.537,10	PUKD13	2.865,26
PUPD5	4.300,98	PUKD1LD	271.992,85
PUPD7	4.302,02	PUKD2LD	18.480,02
PUDP11	6.884,56	PUKD3LD	849,79
PODP12	2.915,55	PU CONFLUENCE	852,15

4. Kesimpulan

Dari hasil analisis disimpulkan bahwa kondisi sabo plan dilapangan membutuhkan pengujian model fisik hidraulik sabo dan modular, diperlukan model rekonstruksi kawasan terhadap dampak sekunder akibat erupsi dalam bidang infrastruktur sumber daya air serta diperlukan perbaikan dan perencanaan sabo plan baru mengingat volume sedimen lahar dingin yang dapat ditampung oleh bangunan sabo masih sebagian kecil dari volume sedimen yang tertransport berdasarkan hasil perhitungan takahashi.

Daftar Pustaka

- Argitalia, F.K., (2012), *Pengaruh Perubahan Digital Elevation Model (DEM) dalam Simulasi Banjir dengan Software SIMLAR V.1.0 (Studi Kasus Banjir Bandang di Kali Putih, Kabupaten Jember Tahun 2006)*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- D.A. Puspitosari, (2011). *Kantong Lahar sebagai Bangunan Sabo Andalan untuk Menanggulangi Bencana Banjir Lahar di Daerah Gunungapi Kelud*.
- ESDM, Gunung Kelud. (2014). <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/538-g-kelud/> (accessed May 17, 2017).
- ESDM, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana. *Sebaran Gunungapi*. 2017. <http://www.vsi.esdm.go.id/> (accessed September 17, 2017).
- Kadarsetia, Eka et all. 2006. "Karakteristik Kimiawi Air Danau Kawah Gunung Api Kelud, Jawa Timur Pasca Letusan Tahun 1990". *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol. 1 No. 4.
- Kusumosubroto, H. (2013), *Aliran Debris dan Lahar*, Jilid I, Edisi I, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Pan, Huali, Ren Wang, Jiangcheng Huang, Guoqiang ou. "Study on The Ultimate Depth of Scour Pit Downstream of Debris Flow Sabo Dam based on The Energy Method." *Engineering Geology*, 2013: doi:10.1016/j.enggeo.2013.03.026.
- PUPR. (2017). *RMP Pengembangan Rekonstruksi Balai Litbang Sabo*. Yogyakarta.
- Rancangan Pedoman Manajemen Penanggulangan Bencana Banjir Bandang. 2012.
- Republik Indonesia. Sekretariat Negara RI. 2007. Undang Undang Republik Indonesia No.24 Tahun 2007 Tentang Penanggulangan Bencana, Sekretariat Negara. Jakarta.
- Sitti Febriyani Syiko, Turniningtyas Ayu Rachmawati, Arief Rachmansyah, 2014. *Analisis Resiko Bencana Sebelum dan Setelah Letusan Gunung Kelud Tahun 2014 (Studi kasus di Kecamatan Ngantang, Malang)*.
- Soewarno. 1995. *Hidrologi, Aplikasi metode statistic untuk Analisa jilid I*, Penerbid Nova, Bandung
- Sutikno Hardjosuwarno, Adam Pamudji Rahardjo, Jazanul Ikhsan, Oriza Andamari, Yanuar Tri Kurniawan, 2012. *Pengembangan Sistem Prakiraan dan Peringatan Dini Aliran Debris Di Kali Putih, Kabupaten Jember*.
- Takahashi, T. *Debris Flow: Mechanics, Prediction, and Countermeasures*. London, UK: Routledge Taylor & Francis Group, 2007.
- USGS. "Lahars and Theirs Effects." Februari 21, 2013. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lahar/> (accessed Agustus 8, 2015).