

Pemodelan Banjir Lahar Dingin di Daerah Vulkanis dengan Menggunakan SIMLAR

Jazaul Ikhsan^{1*}, Ani Hairani², Ridwan Ardiansyah³
^{1,2,3}Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia

**email*: jazaul.ikhsan@umy.ac.id

Info Artikel

Dikirim: 21 Maret 2024
Diterima: 23 September 2024
Diterbitkan: 30 November 2024

Kata kunci:

Banjir lahar;
Gunung Merapi;
Sedimen;
SIMLAR.

ABSTRAK

Tahun 2010 erupsi Gunung Merapi memuntahkan material vulkanis lebih dari 140.000.000 m³, disusul dengan bencana sekunder yaitu banjir lahar dingin. Kali Putih adalah salah satu sungai yang diterjang banjir tersebut beserta pemukiman di bantaranya. Penyebabnya adalah bagian hulu Kali Putih, Kabupaten Magelang telah tertutup material vulkanis Gunung Merapi sebanyak ±9.3000.000 m³. Untuk mengurangi dampak negatif dari kejadian banjir lahar, perlu dilakukan simulasi kejadian banjir lahar pada suatu daerah aliran sungai (DAS). Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dampak kejadian banjir lahar pada DAS Kali Putih. Simulasi Lahar (SIMLAR) 2.1 digunakan untuk mensimulasikan banjir lahar dingin pada penelitian ini. Data masukan yang diperlukan pada SIMLAR adalah data curah hujan, data sedimen, dan DEM area studi. Efektifitas bangunan sabo dam dikaji dengan membandingkan hasil simulasi antara tanpa bangunan sabo dam dan dengan sabo dam. Hasilnya, bangunan sabo dam mampu memperlambat laju terjangan banjir lahar dingin. Berdasarkan simulasi dengan tambahan sabo dam, pada menit ke 240, banjir lahar belum mencapai titik 12 (Sabo dam PU-C8 Ngaglik) dan 13 (Sabo dam PU-C2 Gempal). Sedangkan simulasi tanpa sabo dam, banjir telah mencapai titik 12 pada menit ke 360 serta titik 13 pada menit ke 600. Selain itu berfungsi sebagai penahan erosi tanah lalu merubahnya menjadi tumpukan sedimentasi sebesar 3,95 m pada sabo dam pertama (PU-D1 Mranggen) menit ke 360.

1. PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia adalah negara kepulauan yang berada di daerah katulistiwa. Terletak di antara dua benua (Asia dan Australia) dan dua samudera (Pasifik dan Hindia), dan di dekat tiga lempeng tektonik utama dunia, negara ini sangat rawan bencana [1]. Posisi ini membuat Indonesia menjadi tempat yang rentan terhadap bencana, terutama gempa dan letusan gunung berapi. Gunung Merapi terletak di perbatasan antara Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta. Gunung ini masih aktif saat erupsi dan mengeluarkan awan, abu panas, dan bahan lainnya [2]. Gunung dengan ketinggian 2.968 meter berbatasan langsung dengan beberapa wilayah. Pada sisi selatan, itu termasuk wilayah administratif Kabupaten Sleman; di sisi barat, itu termasuk Kabupaten Magelang di Provinsi Jawa Tengah; di sisi utara dan timur, itu termasuk Kabupaten Boyolali; dan di sisi tenggara, itu termasuk Kabupaten Klaten. Karena banyaknya penduduk yang tinggal di sekitar lereng gunung Merapi, Pusat Vulkanologi harus selalu memantau aktivitas Gunung Merapi.

[3]. Berdasarkan data [4] Indonesia memiliki 127 gunung aktif, namun hanya 69 gunung aktif yang dipantau 24 jam oleh PVMBG. Lembaga ini membagi tiga tipe gunung api aktif: Tipe A, Tipe B, dan Tipe C. Gunung

Merapi sendiri termasuk ke dalam Tipe B karena dalam historisnya pernah meletus sebelum tahun 1600 M. diperkuat dengan penelitian yang dilakukan oleh Andreastuti dkk. [5], menyebutkan bahwa ditemukan endapan Selo *tefra* yang kemungkinan Gunung Merapi meletus antara tahun 765-911 M.

Indonesia memiliki banyak gunung api yang masih aktif dari Sabang hingga Merauke. Kebanyakan di antaranya masih terjadi aktivitas vulkanis atau erupsi dalam kurun waktu seratus tahun ini [6]. Banjir lahar dingin, yang merupakan bencana sekunder akibat erupsi gunung api, merupakan salah satu ancaman dari letusan gunung api. Banjir lahar dingin adalah sekumpulan lahar yang dikeluarkan oleh gunung berapi dan dibantu oleh air hujan sampai ke permukaan yang lebih rendah. Ketika hujan turun, lahar tersebut dibawa turun melalui lereng gunung. Oleh karena itu, air hujan yang membawa material vulkanik dari lahar ini akan menerjang wilayah di bawahnya dan pemukiman penduduk [7].

Salah satu sungai yang berhulu di Gunung Merapi adalah Kali Putih, yang dianggap rawan terhadap bahaya banjir lahar dingin Gunung Merapi. Sebagai contoh, setelah erupsi Gunung Merapi pada tahun 2010, sungai ini mengalami banjir lahar dingin kiriman dari lereng Gunung Merapi dan sempat meluap ke Jalan Magelang-Yogyakarta, menutup akses jalan karena material vulkanis yang tertimbun [8]. Selain itu banjir lahar juga berpengaruh terhadap aspek ekonomi masyarakat di sekitar wilayah yang diterjang bencana ini [9]. Sisa endapan erupsi membentuk material pada hulu sungai, hujan, dan gravitasi adalah tiga komponen utama yang menyebabkan banjir lahar dingin [10].

Gunung api, sungai, dan DAS mempengaruhi banjir lahar dingin. Salah satu cara untuk menangani bencana adalah dengan simulasi aliran debris menggunakan software SIMLAR untuk mengetahui sebaran aliran debris, volume debris, erosi, dan sedimen yang terjadi. Hasil simulasi dapat digunakan sebagai perbandingan untuk analisis dan sebagai acuan untuk mitigasi bencana [11]. Karena itu, beberapa program yang dirancang untuk menangani ancaman bencana dibuat, salah satunya adalah SIMLAR yang dibuat oleh Miyamoto pada tahun 1997 dengan model numerik berbasis.txt. Balai Litbang Sabo berkolaborasi dengan UGM dan UMY mengembangkannya kembali menjadi SIMLAR dengan memasukkan data hujan, data sedimen, morfologi, dan topografi sungai. Selain menu Analisa Geografi dan antarmuka pengguna umum, pengembangan terus dilakukan. Hasilnya adalah model berbasis sistem informasi geografi (SIG). Hingga saat ini, pengembangan SIMLAR 2.1 masih berlangsung [12]. Untuk mengurangi angka eror pada SIMLAR 2.1, observasi lapangan langsung, ketelitian peta topografi, dan data debit banjir faktual harus dilakukan.

Pada penelitian SIMLAR yang dilakukan Hidayat dkk. [13], menyatakan bahwa kecepatan banjir lahar berbanding lurus atau linear dengan intensitas hujan. Bangunan sabo dam dibangun untuk menghentikan banjir lahar dingin saat hujan deras di hulu. Menurut Hasan dan Ramos, [14], sabo dam adalah bangunan yang mengontrol aktivitas alam seperti tanah, pasir, dan sebagainya. Dam, di sisi lain, adalah bangunan bertingkat, seri, dan tunggal yang berfungsi untuk mengendalikan banjir melalui konsep manajemen (tangkap, tampung, dan lepas), konsolidasi, dan stabilitas. Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan simulasi banjir lahar dingin pada DAS Kali Putih dengan dan tanpa sabo dam untuk mengetahui seberapa efektif konstruksi sabo dam untuk mengontrol banjir lahar dingin. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah pada penelitian ini dilakukan kajian efektifitas bangunan sabo dam, sedangkan penelitian sebelumnya belum ada yang meninjau.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan pada studi ini adalah dengan menggunakan software SIMLAR 2.1. Data masukan yang diperlukan adalah data curah hujan, data DEM dan data sedimen. Dalam SIMLAR, data curah hujan akan dihitung secara otomatis dengan metode Nakayasu untuk menjadi hidrograf.

2.1 Hidrograf Satuan Sintesis Nakayasu

Metode hidrograf satuan sintesis adalah salah satu metode dalam konteks perencanaan sumber daya keairan, salah satu teknik yang digunakan oleh para ahli keairan untuk mengevaluasi debit banjir suatu DAS tidak dapat

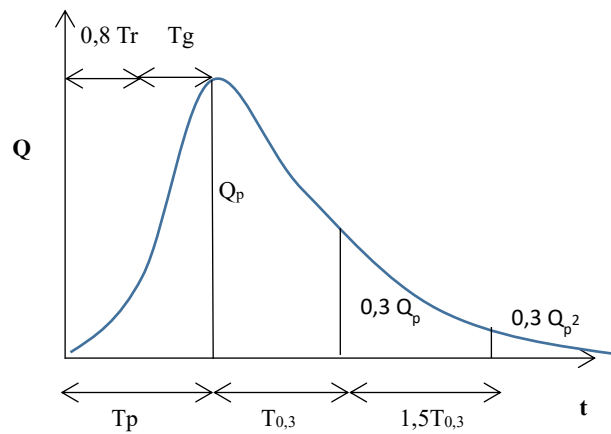
diukur [15]. Beberapa hal yang digunakan dalam perhitungan ini adalah data panjang sungai, luas DAS, dan data tambahan berupa tata guna lahan. Cara ini dipakai untuk membuat simulasi aliran DAS tak terukur dan daerah mana saja yang mengalami perubahan tata guna lahan. Setidaknya terdapat beberapa metode hidrograf satuan sintesis yang populer di dunia. Soemarto [16] menyebut hidrograf satuan sintesis (HSS) Nakayasu dikembangkan di Jepang berdasarkan sungai-sungai yang ada di negara tersebut. Pada simulasi menggunakan aplikasi SIMLAR 2.1 sudah terdapat fitur untuk menghitung HSS Nakayasu. Gambar 1 menunjukkan metode pembentukan hidrograf satuan berdasarkan Nakayasu. Debit puncak (Q_p) dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$Q_p = \frac{AR_0}{(0,3T_p + T_{0,3})} \quad (1)$$

Dimana Q_p adalah debit puncak (m^3/s), A adalah luas DAS (km^2), R_0 adalah hujan satuan (mm), T_p adalah waktu debit puncak (jam), dan $T_{0,3}$ adalah waktu pada $0,3Q_p$. Waktu puncak dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$T_p = t_g + 0,8 T_r \quad (2)$$

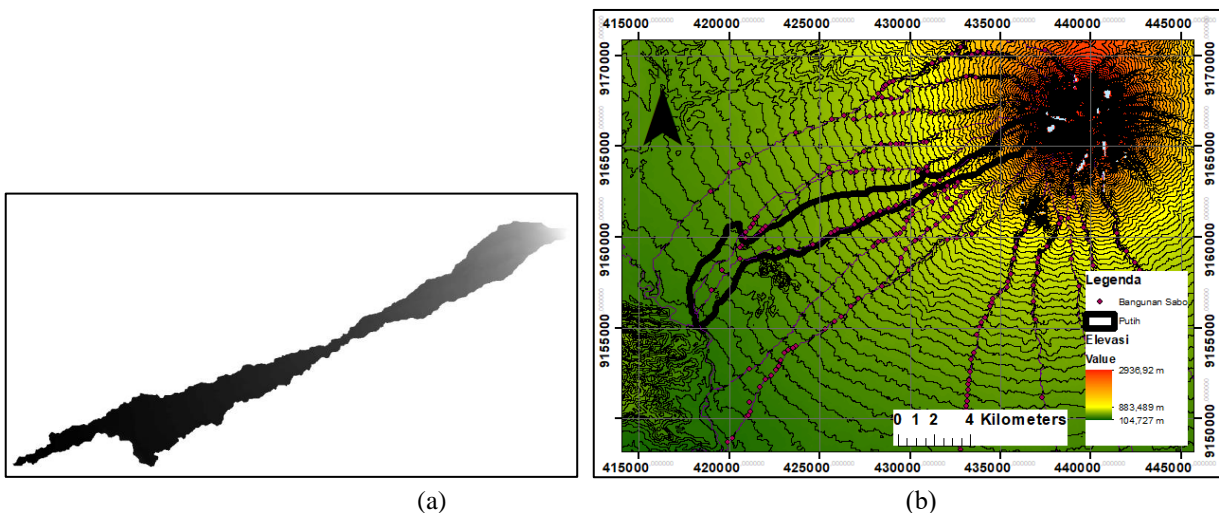
dimana t_r adalah waktu hujan (jam) dan t_g adalah waktu tenggang (jam) ($t_g = 0,21L^{0,7}$ jika panjang sungai < 15 km, $t_g = 0,4 + 0,058L$ jika > 15 km).



Gambar 1: HSS Nakayasu [17]

2.2 Topografi

Menurut Balai Teknik Sabo [12], resolusi peta *DEM* yang digunakan SIMLAR 2.1 sebaiknya $< 10 m^2$. semakin kecil angka resolusi, maka ketelitian juga akan tinggi. Pada penelitian ini menggunakan resolusi *default DEM*, yaitu $8 m^2$. Peta *DEM* (*Digital Elevation Model*) dan topografi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Peta DEM, dan (b) Peta topografi DAS Putih

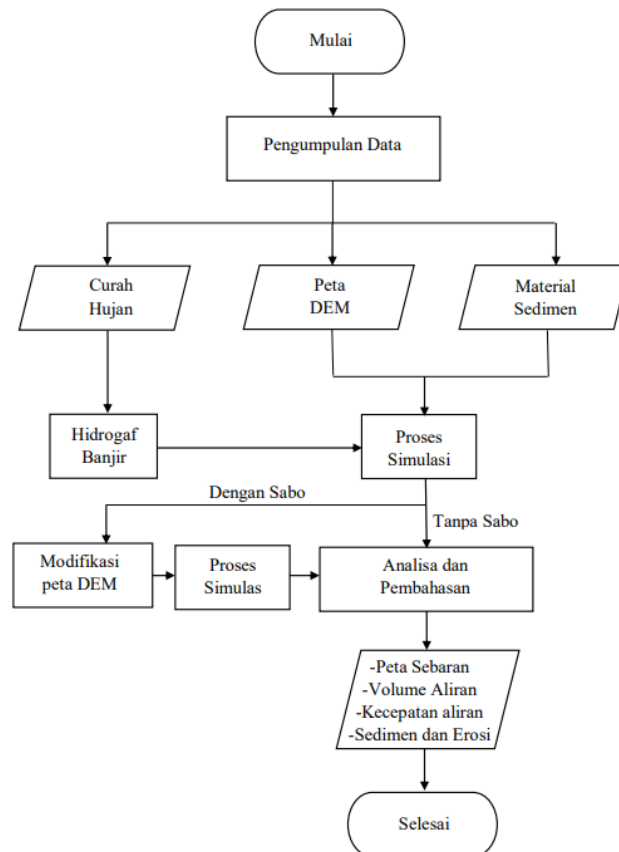
2.3 Karakteristik Sedimen

Perhitungan rumus sedimen angkut yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode Ashida-Takahashi-Mizuyama, fitur perhitungan tersebut sudah tersedia pada aplikasi SIMLAR 2.1. berikut adalah rumus metode Ashida-Takahashi-Mizuyama:

$$\Phi_B = k\tau^{*3/2} \left(1 - 0,85 \frac{\tau^{*c}}{\tau^*}\right) \chi \left(1 - 0,92 \frac{\tau^{*c^{1/2}}}{\tau^{*c^{1/2}}}\right) \quad (3)$$

2.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dijelaskan dengan bagan alir pada Gambar 3.

Gambar 3: *Flow chart* penelitian

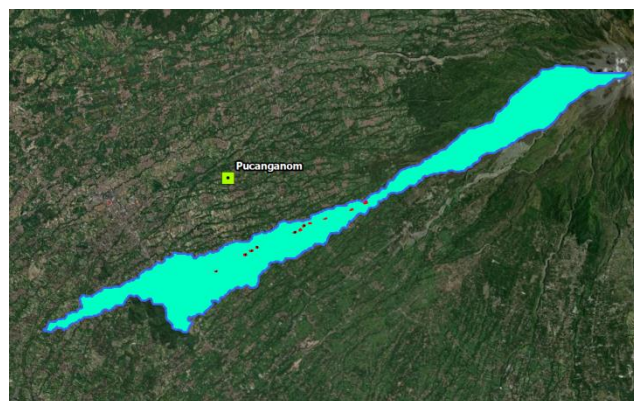
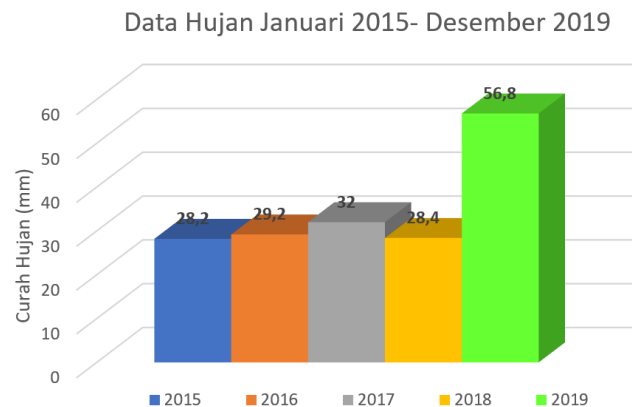
2.5 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada DAS Kali Putih yang seluruhnya terletak di Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. Kali Putih berhulu di Gunung Merapi dan membentuk sebuah kuala dengan Kali Blongkeng. Luas DAS Kali Putih 23,791 km² dengan panjang Kali Putih adalah 23,5 km. Karena terbatasnya kemampuan Software SIMLAR dalam mengatur luas maksimal sumbu x : 2000 dan sumbu y : 400 (20 x 4 km²) maka penelitian ini Kali Putih melewati dua buah kecamatan, yaitu Kecamatan Srumbung dan Kecamatan Salam, Kabupaten Magelang. Penelitian dilakukan pada pertengahan bulan Juni 2020 hingga awal Bulan Februari 2021. Simulasi ini menggunakan 13 sabo dam sebagai bahan masukan, lokasi secara berurutan dari hulu ke hilir diantaranya PU-C8A Srumbung, PU-RD6 Srumbung, PU-RD7 Srumbung, PU-C8 Ngaglik, PU-C2 Gempol: sabo dam PU-D1 Mranggen, PU-C11-12 Gremeng, PU-C9 Cabe Lor, PU-RD 1, PU-RD2, PU-RD3, PU-RD4, dan PU-RD5 Mranggen, Ppenelitian ini mensimulasikan dampak terjangan banjir lahar dingin terhadap aliran Kali Putih

tanpa bangunan sabo dam dan dengan bangunan sabo dam. Simulasi tersebut menghasilkan output berupa volume, debit, kecepatan aliran, sedimentasi dan erosi yang terjadi pada 13 titik pengamatan dengan interval waktu 240, 360, 600, dan 780 menit.

2.6 Data Hujan

Data hujan didapat dari Balai Penelitian dan Pengembangan Sabo Dam Yogyakarta. Data hujan yang digunakan adalah lima tahun terakhir dihitung sejak awal penelitian berlangsung atau pada tahun 2020, maka digunakan data hujan yang digunakan adalah tahun 2015-2019. Terdapat satu stasiun hujan terletak di Pucanganom, Srumbung, Magelang. Data hujan terbesar terjadi bulan November 2019 sebesar 56,8 mm.



Gambar 4: Lokasi stasiun hujan Pucanganom, Srumbung, Magelang dan data hujan jam-jam tahun 2015-2019

2.7 Sedimentasi

Menggunakan sampel pada hulu Kali Putih yang merupakan *sediment production zone*. Diperlukan masukkan berupa volume potensi sedimen dan distribusi gradasi butiran sedimen. Masukkan data sedimentasi pada penelitian ini sebagai berikut, estimasi sumber sedimen: 9.300.000 m³.

2.8 Hidrograf Sintesis

Model hidrograf yang digunakan pada simulasi ini adalah hidrograf sintesis Nakayasu. Dihitung langsung menggunakan aplikasi SIMLAR 2.1 dengan memasukkan parameter-parameter yang dibutuhkan. Berikut parameternya.

Tr (Satuan Waktu)	: 0,5 jam (30 menit)
A (Luas)	: 21,99 km ²
L (Panjang)	: 20 km
Ro (Hujan Efektif)	: 1

2.9 Sabo Dam

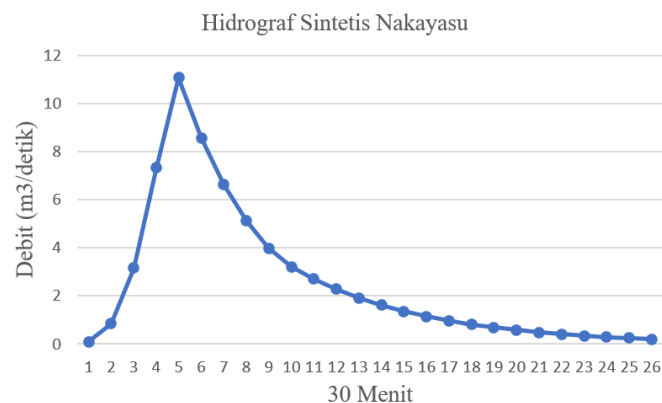
Simulasi ini menggunakan 13 sabo dam sebagai bahan masukan, lokasi secara berurutan dari hulu ke hilir diantaranya: PU-C8A Srumbung, PU-RD6 Srumbung, PU-RD7 Srumbung, PU-C8 Ngaglik, PU-C2 Gempol, sabo dam PU-D1 Mranggen, PU-C11-12 Gremeng, PU-C9 Cabe Lor, PU-RD 1, PU-RD2, PU-RD3, PU-RD4, dan PU-RD5 Mranggen

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hidrograf

Input parameter/data hujan mendapatkan hasil hidrograf sintetis Nakayasu daerah aliran Sungai Putih dengan hasil perhitungan debit yang dimulai jam ke 0,5 (30 menit) hingga yang terakhir jam ke 13 (780 menit). Hasil HSS Nakayasu ditunjukkan pada Gambar 5.

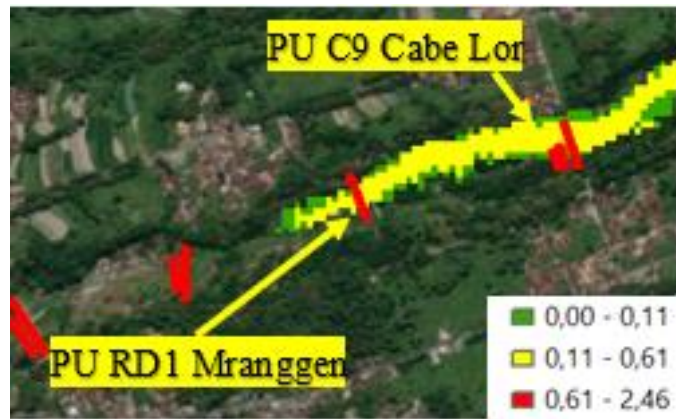
Dari Gambar 5 menunjukkan bahwa pola HSS Nakayasu akan mencapai debit puncak dalam waktu cepat dibandingkan dengan waktu untuk resesinya. Hal ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Ginting (2022) [18] dan Syamsudin dkk (2022) [19].



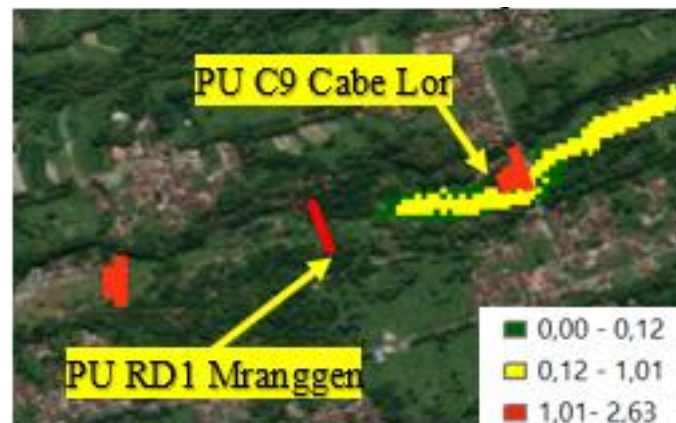
Gambar 5: Grafik HSS Nakayasu

3.2 Peta Sebaran

Pada menit ke-180 pula mulai terjadi sebaran banjir lahar dingin dimana kondisi tanpa sabo, banjir lahar dingin telah mencapai titik pengamatan 4 (PU-RD1 Mranggen) dengan volume sebesar 44.850,662 m³, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 1. Sedangkan kondisi dengan sabo banjir lahar dingin masih mencapai titik pengamatan 3 (PU-C9 Cabe Lor) dengan volume 40.988,639 m³. jarak antar ujung aliran adalah 380 m, seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Tabel 2. Dari kedua gambar tersebut dapat diperoleh kesimpulan bahwa bangunan sabo dapat mengurangi kecepatan aliran banjir lahar dan mengurangi area terdampak dalam periode waktu yang sama. Jumlah volume banjir lahar pada simulasi dengan sabo, hasilnya menunjukkan lebihh kecil dicandingkan simulasi tanpa sabo. Hal ini menunjukkan bahwa material yang diangkut oleh banjir lahar sebagian diendapkan pada sabo dam. Hasil ini bersesuaian dengan yang dilakukan oleh Cahyo[20].



Gambar 6: Peta sebaran tanpa sabo dam



Gambar 7. Peta sebaran dengan sabo dam

Tabel 1. Tanpa bangunan sabo dam

Menit	Volume (m ³)	Debit (m ³ /s)	Kecepatan (m/s)
30	161,999	0,092	0,125
60	1.673,999	0,841	0,306
90	7.324,165	3,158	0,520
120	19.906,359	7,348	0,728
150	35.232,781	11,070	0,858
180	44.850,662	8,559	0,774
210	51.909,001	6,617	0,698
240	57.311,847	5,116	0,630
270	61.751,0,53	3,979	0,570
300	65.325,239	3,213	0,523
330	68.209,921	2,706	0,489
360	65.492,974	2,280	0,456
390	58.215,087	1,921	0,426
420	53.517,817	1,618	0,398
450	47.955,545	1,363	0,371
480	36.670,976	1,148	0,347
510	32.910,599	0,967	0,324
540	29.582,600	0,815	0,301
570	26.455,020	0,686	0,283
600	23.583,640	0,578	0,264
630	21.267,140	0,487	0,247
660	19.359,269	0,410	0,230
690	17.527,377	0,346	0,215
720	16.058,861	0,291	0,200
750	14.756,961	0,245	0,188
780	13.840,781	0,207	0,176

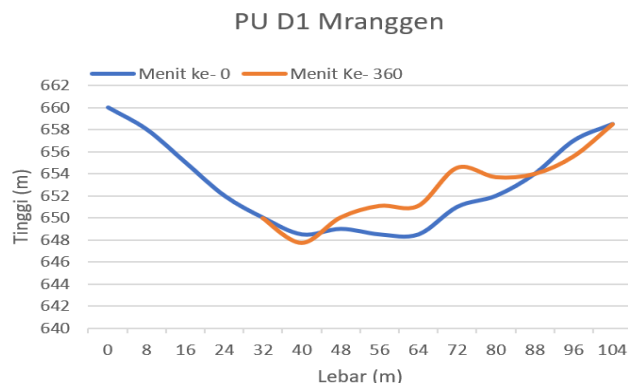
Tabel 2. Dengan bangunan sabo dam

Menit	Volume (m ³)	Debit (m ³ /s)	Kecepatan (m/s)
30	161,9999	0,092	0,136
60	1.658,305	0,841	0,333
90	7.119,356	3,158	0,567
120	18.552,778	7,348	0,794
150	32.073,499	11,070	0,935
180	40.988,639	8,559	0,844
210	47.406,402	6,617	0,762
240	52.135,538	0,092	0,687
270	55.858,615	0,841	0,621
300	57.005,886	3,158	0,570
330	57.370,599	7,348	0,533
360	57.411,272	11,070	0,497
390	41.681,206	8,559	0,464
420	34.249,516	6,617	0,434
450	29.180,670	5,116	0,404
480	24.876,613	3,979	0,378
510	21.108,019	3,213	0,353
540	18.052,146	2,706	0,329
570	15.836,336	2,280	0,308
600	14.093,296	1,921	0,288
630	12.850,265	1,618	0,269
660	11.836,919	1,363	0,250
690	10.917,865	1,148	0,235
720	10.190,918	0,967	0,218
750	9.649,328	0,815	0,205
780	9.113,069	0,686	0,192

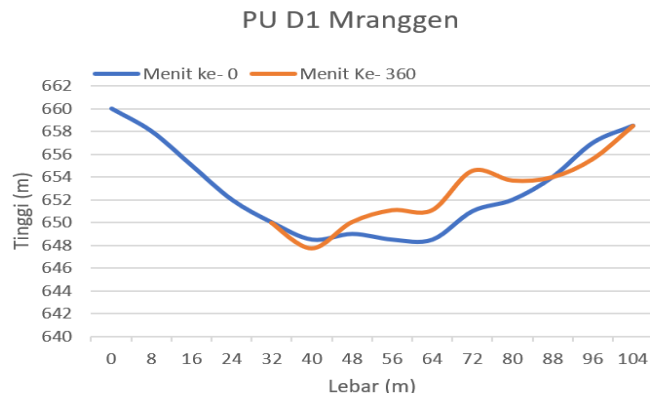
3.3 Sedimentasi dan Erosi

1) Sedimentasi

Berdasarkan perbandingan hasil simulasi menunjukkan bahwa titik pengamatan tanpa sabo mengalami sedimentasi tertinggi pada titik 1 menit ke 240 dan 360 dengan ketinggian 3,56 m (Gambar 8). Titik dan waktu yang sama, simulasi sabo dam terjadi sedimentasi setinggi 3,95 m (Gambar 9). Dari Gambar 8 dan Gambar 9, menunjukkan bahwa bangunan sabo dam dapat meningkatkan potensi sedimentasi. Hal ini dikarenakan, dengan adanya sabo dam maka aliran banjir lahar dapat direduksi kecepatannya sehingga potensi sedimentasi semakin meningkat. Hasil ini bersesuaian dengan hasil dari penelitian dari Jamri dkk (2020)[21].



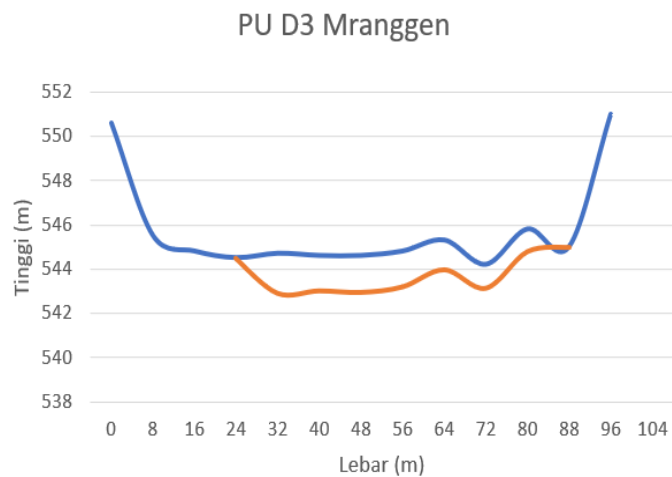
Gambar 8: Titik pengamatan 1, menit ke 360 tanpa sabo



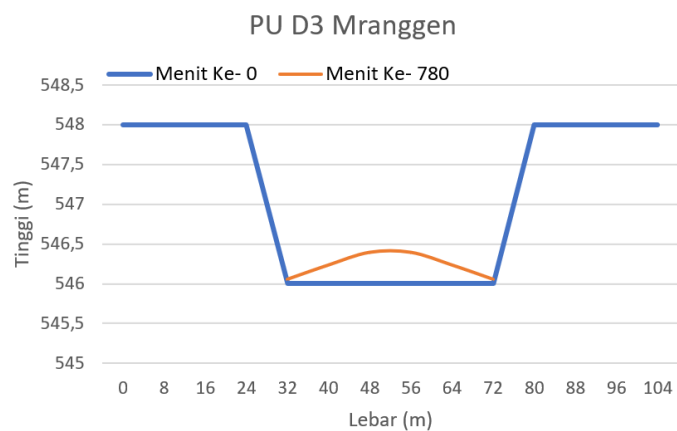
Gambar 9: Titik pengamatan 1, menit ke 360 dengan sabo

2) Erosi

Erosi terbesar terjadi pada titik 6 menit ke 780 dengan kedalaman -1,79 m untuk simulasi tanpa sabo dam, seperti ditunjukkan Gambar 10 Simulasi dengan sabo dam tidak terjadi erosi pada waktu dan titik yang sama, namun justru terjadi sedimentasi setinggi 0,24 m (Gambar 11). Hal ini menunjukkan bahwa bangunan sabo dapat dijadikan infrastruktur untuk mengurangi dampak negative dari banjir lahar [22,23].



Gambar 10: Titik pengamat 6, menit ke 780 tanpa sabo



Gambar 11: Titik pengamat 6, menit ke 780 dengan sabo

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa titik pengamatan tanpa sabo mengalami sedimentasi tertinggi

pada titik 1 menit ke 240 dan 360 dengan ketinggian 3,56 m, erosi terbesar terjadi pada titik 6 menit ke 780 dengan kedalaman -1,79 m. Pada titik pengamatan pertama hingga terakhir terlihat dialiri banjir lahar dingin disertai dengan sedimentasi dan erosi.

Kemudian pada titik pengamatan yang sama dengan bangunan sabo dam menunjukkan jika sedimentasi tertinggi terjadi di titik 1 (PU D1 Mranggen) menit ke 360 dengan sedimentasi sebesar 3,95 m. Sementara erosi tidak terjadi karena bangunan sabo terbuat dari beton. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan sabo dam dapat mencegah erosi akibat banjir lahar dingin. Selain itu pada titik pengamatan 12 hingga 13 baik menit 240, 360, 600 dan 780 belum mengalami banjir lahar dingin yang berarti bangunan sabo dam juga dapat berfungsi sebagai penghambat laju kecepatan banjir lahar dingin [20,22,23].

Tabel 3. Perbandingan simulasi tanpa dan dengan sabo dam

	Waktu (menit)	Tanpa Sabo		Dengan Sabo	
		Sedimen (m)	Erosi (m)	Sedimen (m)	Erosi (m)
Titik 1 (PU D1 Mranggen)	240	3,56	-0,74	3,57	-
	360	3,56	-1,4	3,95	-
	600	1,42	-1,18	3,25	-
	780	1,28	-1,1	3,27	-
Titik 2 (PU C11-12 Gremeng)	240	1,76	-1,76	0,99	-
	360	2,2	-2,2	1,26	-
	600	2,76	-2,76	1,45	-
Titik 3 (PU C9 Cabe Lor)	240	2,12	-0,54	0,3	-
	360	1,93	-0,88	0,34	-
	600	1,33	-1,08	1,07	-
Titik 4 (PU RD1 Mranggen)	240	1,33	-0,23	0,38	-
	240	0,62	-	0,99	-
	360	0,79	-0,01	1,16	-
Titik 5 (PU RD2 Srumbung)	600	0,17	-0,53	0,62	-
	780	0,49	-0,46	1,44	-
	240	0,86	-0,03	0,92	-
Titik 6 (PU RD3 Mranggen)	360	0,92	-0,03	1,16	-
	600	1,26	-	0,62	-
	780	1,36	-	1,44	-
Titik 7 (PU RD4 Srumbung)	240	-	-0,95	0,62	-
	360	-	-1,54	0,62	-
	600	-	-1,66	1,45	-
	780	-	-1,79	0,24	-
Titik 8 (PU RD5 Mranggen)	240	0,57	-	0,65	-
	360	0,7	-0,52	0,74	-
	600	0,7	-	1,45	-
	780	0,71	-	0,76	-
Titik 9 (PU C8A Srumbung)	240	1,57	-	1,36	-
	360	2,34	-0,19	1,73	-
	600	2,53	-	2,29	-
	780	2,57	-	1,46	-
Titik 10 (PU RD6 Srumbung)	240	1,09	-1,09	1,14	-
	360	1,22	-0,68	1,18	-
	600	0,63	-0,97	1,45	-
	780	0,5	-0,84	1,59	-
Titik 11 (PU RD7 Srumbung)	240	2,47	-0,76	2,55	-
	360	2,64	-	2,27	-
	600	2,57	-0,18	2,62	-
	780	2,55	-0,18	2,19	-
Titik 12 (PU C8 Ngaglik)	240	0,82	-0,63	1,42	-
	360	1,93	-	2,28	-
	600	2,15	-	2,7	-
	780	2,18	-	2,12	-
Titik 12 (PU C8 Ngaglik)	240	-	-	-	-
	360	-0,32	-0,41	-	-
	600	-	-0,74	-	-
	780	0,01	-0,73	-	-

	Waktu (menit)	Tanpa Sabo		Dengan Sabo	
		Sedimen (m)	Erosi (m)	Sedimen (m)	Erosi (m)
	240	-	-	-	-
Titik 13	360	-	-	-	-
(PU C2 Gempal)	600	-	-1,35	-	-
	780	-	-1,66	-	-

4. KESIMPULAN

Kesimpulan didapat berdasarkan penjelasan bab sebelumnya. Berikut beberapa kesimpulan yang dapat ditarik.

1. Dari simulasi SIMLAR 2.1 dapat disimpulkan bahwa bangunan sabo dam berpengaruh terhadap pengendalian banjir lahar dingin di DAS Putih, salah satunya adalah untuk memperlambat banjir lahar dingin. Hal ini dibuktikan pada simulasi SIMLAR menit ke- 180 dengan kondisi tanpa sabo dam, banjir lahar dingin telah mencapai titik pengamatan 4 (PU-RD1 Mranggen), sedangkan kondisi dengan sabo banjir lahar dingin masih mencapai titik pengamatan 3 (PU-C9 Cabe Lor). Selisih jarak ujung banjir sebesar 380 m.
2. Volume sedimen terangkut pada simulasi tanpa sabo dan dengan sabo tidak terlalu jauh berbeda. Volume terbesar simulasi tanpa sabo dam terjadi pada menit ke- 330 yaitu sekitar 68 ribu m³, sementara simulasi dengan sabo dam terjadi pada menit ke- 360 dengan nilai sekitar 57 ribu m³. Kecepatan aliran yang terjadi pada kondisi volume terbesar pada dua scenario simulasi tersebut adalah 0,5 m/s.
3. Sedimentasi terbesar tanpa sabo dam terjadi pada titik 1 (PU-D1 Mranggen) setinggi 3,56 m pada menit ke 240 dan 360, sementara sedimentasi dengan sabo dam ketinggian maksimalnya adalah 3,95 m di sabo dam PU-D1 Mranggen pada menit ke- 360. Erosi terbesar terjadi pada simulasi tanpa bangunan sabo dam titik ke- 1 menit ke 780 dengan kedalaman -2,78 m.
4. Efektivitas bangunan sabo dam berdasarkan penelitian menunjukkan bahwa bangunan sabo dam dapat menahan laju banjir lahar dingin, menahan erosi tanah.

REFERENSI

- [1] M. Malthuf and M. H. Reza, "Kontribusi Guru Geografi dalam Mitigasi Bencana Erupsi Gunung Merapi," *WAKTU: Jurnal Teknik UNIPA*, vol. 20, no. 02, 2022, doi: 10.36456/waktu.v20i02.5892.
- [2] N. Setyaningrum, A. I. Darmawan, and N. Nurhidayah, "Pendidikan Video Animasi Bencana Gunung Merapi terhadap Kesiapsiagaan pada Siswa," *Jurnal Ilmiah Permas: Jurnal Ilmiah STIKES Kendal*, vol. 11, no. 4, 2021.
- [3] BNPB and BAPPENAS, *Rencana Aksi Rehabilitasi dan Rekonstruksi Wilayah Pasca Bencana Erupsi Gunung Merapi di Provinsi D.I. Yogyakarta dan Provinsi Jawa Tengah Tahun 2011-2013*. 2011.
- [4] PVMBG, "Tipe Gunung Api di Indonesia." Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Jp4SJM>
- [5] S. D. Andreastuti, C. Newhall, and J. Dwiyanto, "Menelusuri Kebenaran Letusan Gunung Merapi 1006," *Jurnal Geologi Indonesia*, vol. 1, no. 4, pp. 201–207, 2006.
- [6] S. Mulyaningsih, *Vulkanologi*. Ombak, 2015.
- [7] R. A. Asmara, A. Prasetyo, S. Stevani, and R. I. Hapsari, "Prediksi Banjir Lahar Dingin pada Lereng Merapi menggunakan Data Curah Hujan dari Satelit," *Jurnal Informatika Polinema*, vol. 7, no. 2, 2021, doi: 10.33795/jip.v7i2.494.
- [8] F. Hidayat and I. Rudiarto, "Pemodelan Resiko Banjir Lahar Hujan pada Alur Kali Putih Kabupaten Magelang," *Jurnal Teknik PWK*, vol. 2, no. 4, pp. 895–904, 2013, [Online]. Available: <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/pwk>
- [9] S. R. Giarsih and P. Gamayanti, "Dampak Banjir Lahar terhadap Aspek Sosial: Studi Kasus Banjir Lahar Pasca Erupsi Merapi Gunung Merapi 2010 di Kecamatan Cangkringan," in *Gajah Mada University Press.*, 2014.
- [10] H. Kusumosubroto, *Aliran Debris dan Aliran Lahar, Pembentukan, Pengaliran, Pengendapan dan Pengendalian*. 2013.
- [11] H. Ramadhan and L. Makrup, "Analisis Efektivitas Sabo Dam Di Kali Putih Menggunakan Aplikasi SIMLAR V 2.0," (*doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia*, 2020).

- [12] Balai Litbang Sabo, “Pemodelan Lahar dengan Software SIMLAR,” 2017.
- [13] R. Hidayat, A. Musthofa, and P. Bahri, “Pengaruh Intensitas Hujan terhadap Kecepatan dan Tinggi Banjir Lahar Berdasar Pemodelan Simlar 2.1,” *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 8, no. 1, pp. 125–134, 2017.
- [14] C. Hassan and G. F. Ramos, “Perekayasa Ahli Utama Inspektur Bidang Teknologi Sabo,” 2019.
- [15] D. K. Natakusumah, W. Hatmoko, and H. Dhemi, “Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintesis dengan Cara ITB dan Beberapa Contoh Penerapannya,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 18, no. 3, pp. 251–291, 2011.
- [16] C. D. Soemarto, *Hidrologi Teknik*. Usaha Nasional, 1987.
- [17] Triatmodjo, “Hidrologi Terapan,” Ketiga., Beta Offset, 2013.
- [18] S. Ginting, “Evaluasi Penentuan Durasi Hujan Efektif (Tr) Pada Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu,” *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 3, no. 2, 2022, doi: 10.37058/aks.v3i2.4592.
- [19] A. P. Syamsuddin, R. Musa, and H. Ashad, “Kajian Pengaruh Parameter Hidrograf Satuan Sintetik Berdasarkan Karakteristik Daerah Aliran Sungai,” *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.33096/jtsm.v7i1.541.
- [20] H. D. Cahyo, J. Ikhsan, and A. Hairani, “Simulation of Debris Flow Using ‘SIMLAR’ in the Watershed of Gendol River, Indonesia,” in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2023. doi: 10.1007/978-981-16-9348-9_53.
- [21] H. M. Jamri, S. N. Jusoh, A. Marto, K. A. M. Nasir, M. A. Bin Hezmi, and K. N. M. Said, “Estimation of Debris Flow Sedimentation Volume through Numerical Modelling,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/884/1/012044.
- [22] Y. Fajarwati, T. F. Fathani, F. Faris, and W. Wilopo, “Desain Sabo Dam Tipe Conduit Sebagai Pengendali Daya Rusak Aliran Debris,” *INERSIA: Informasi dan Ekspose hasil Riset teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.21831/inersia.v16i2.36897.
- [23] T. F. Fathani, W. Wilopo, A. N. Amalina, and A. Pramaditya, “Debris Flow Hazard Analysis Toward The Implementation Of Mitigation Measures,” *International Journal of GEOMATE*, vol. 23, no. 95, 2022, doi: 10.21660/2022.95.3208.