

Identifikasi Material Piroklastik Banjir Lahar dingin Hasil Erupsi Gunung Merapi yang Merusakkan Jaringan Pipa Air Bersih dengan Metode USCS di Kali Boyong

Dinda Dekarina Pattyra¹⁾, Herwin Lukito^{2a)}, Ayu Utami³⁾

^{1,2,3)}Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral,
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

JL. Padjajaran, Condongcatur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

^{a)}Corresponding author: herwin.lukito@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Kali Boyong berada di hulu Gunung Merapi yang menampung hasil erupsi yaitu material piroklastik. Bahaya sekunder dari erupsi adalah aliran lahar dingin. Aliran mengangkut batu, pasir, dan kerikil terendapkan di lereng bercampur air hujan, menjadi banjir apabila intensitas curah hujan yang terjadi cukup tinggi 40 mm/jam. Akibat peningkatan aktivitas sejak 5 November 2020 terjadi kenaikan jumlah material mengakibatkan kerusakan jaringan pipa air bersih. Tujuan penelitian adalah mengetahui karakteristik banjir lahar dingin yang merusakkan jaringan pipa air berdasarkan tipe material piroklastik yang terbawa aliran banjir lahar dingin. Metode yang digunakan kuantitatif, metode USCS dan metode kualitatif. Sampel diambil pada 3 tabung. Lokasi pengambilan disekitar titik kerusakan. Parameter uji analisis ukuran butir tanah menggunakan sampel sebanyak 100 gram. Hasil pengujian tabung 1, SM (*Sand Silt*) berbutir kasar, gradasi buruk, kategori pasir berlanau. Tabung 2, SW SM (*Sand Well-Sand Silt*) berbutir kasar, bergradasi buruk, dan campuran pasir berlanau. Tabung 3, GW GM (*Gravel Well-Gravel Silt*) berbutir kasar, bergradasi baik, kelompok kerikil sangat berpasir. Material pengujian didominasi ukuran butir pasir halus hingga sedang, menghanyutkan kerikil, kerakal, dan batu besar kerusakan jaringan pipa dimungkinkan material berukuran besar terbawa aliran ke sisi dalam dan menabrak alur sisi luar sungai saat melaluinya, lokasi pengambilan tidak sesuai.

Kata Kunci: Banjir Lahar dingin; Material Piroklastik; USCS.

ABSTRACT

Boyong River located in the upper streams of Mount Merapi contains the product of eruption, pyroclastic material. The secondary hazard from eruption is volcanic debris flow, transporting rocks, sand, and gravel deposited on rivers, mixed with rainwater, becoming flooded if the rainfall is high intensity 40 mm/hour. The effect from increased activity since November 5, 2020 has been an increase of the amount material, which has had an impact on damage to clean water pipelines. The purpose was to determine the characteristics of volcanic debris flood that damaged water pipelines based on the type of pyroclastic material carried by the volcanic debris flood flow. The methods are quantitative and qualitative, USCS methods. The samples are 3 tubes, location around the point of damage, and using 100 grams. The results tube 1, SM (Sand Silt) coarse-grained, poor gradation, silted sand. Tube 2, SW SM (Sand Well-Sand Silt) is coarse-grained, poorly graded, and a mixture of silted sand. Tube 3, GW GM (Gravel Well-Gravel Silt) coarse-grained, well graded, very sandy gravel group. The test material was dominated by fine to medium grain sizes, gravel, and large stones. Larger size material on deposition zone or immediately damage, incor

Keywords: *Volcanic Debris Flood Flow; Pyroclastic material; USCS*

PENDAHULUAN

Gunung Merapi terletak di perbatasan dua provinsi, yaitu Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (Giyarsih, 2014). Gunung Merapi mendominasi sebagian besar Yogyakarta bagian utara (Sudradjat dkk., 2011). Berdasarkan Surat Peningkatan Status Aktivitas gunung api Merapi yang disampaikan melalui pers tanggal 5 November 2020. Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kebencanaan Geologi (BPPTKG) menjelaskan pasca erupsi besar 2010, gunung api Merapi kembali mengalami erupsi magmatis. Berdasarkan data pemantauan yang telah

dilakukan aktivitas vulkanik saat ini dapat berlanjut ke erupsi yang dapat membahayakan penduduk. Sehubungan dengan itu BPPTKG maka status aktivitas gunung api Merapi ditingkatkan menjadi Siaga (level III) berlaku mulai tanggal 5 November 2020 (BPPTKG, 2020). Erupsi gunung api menghasilkan produk material lepas-lepas letusan dengan berbagai ukuran, mulai dari berukuran abu, pasir, brangkal hingga bom, material sering disebut sebagai material piroklastik (Hadmoko dkk., 2018). Peningkatan aktivitas Gunung Merapi memasuki musim hujan mengakibatkan terjadi bencana banjir lahar dingin tau terjadi penambahan aliran di sungai berhulu Merapi, yaitu salah satunya Kali Boyong, Dusun Kaliurang Barat, Kalurahan Hargobinangun, Kapanewon Pakem, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Aliran lahar dingin adalah aliran material piroklastik berupa batu, pasir, dan kerikil yang berada di lereng bercampur dengan air hujan. Material piroklastik tersebut dapat menjadi lahar setelah terjadi hujan dengan intensitas lebih dari 40 mm/jam, memiliki daya rusak tinggi terhadap apapun yang dilaluinya (Hadmoko dkk., 2018). Akibat memiliki daya rusak tinggi, aliran lahar yang mengalir di Kali Boyong tersebut merusakkan jaringan pipa pada 4 Februari 2021 terjadi di titik yang sama (Dinnata, 2021). Kejadian lahar dengan ciri akibat hujan dengan intensitas tinggi dan durasi tertentu biasanya terjadi dalam skala kecil, tetapi kejadian aliran lahar dapat berulang kali selama musim hujan (Kusumosubroto, 2013). Tujuan dari penelitian adalah mengetahui karakteristik banjir lahar dingin yang merusakkan jaringan pipa air berdasarkan tipe material piroklastik yang terbawa aliran banjir lahar dingin.

METODE

Penelitian mengenai identifikasi material piroklastik dilakukan dengan metode kuantitatif dan metode kualitatif. Metode kuantitatif menggunakan angka-angka dalam dari proses pengumpulan data, analisis hingga menyelesaikan penelitian (Ahyar dkk., 2020). Pengumpulan data-data dari lapangan dilaksanakan menggunakan teknik pengambilan sampel *purposive sampling*. Teknik *purposive sampling* dilakukan atas dasar populasi sampel tersebut mempunyai ciri atau kekhususan tersendiri dan hanya dapat dilakukan pada satu lokasi pengamatan (Mulyatiningsih, 2011). Data primer yang dikumpulkan berupa pengambilan sampel menggunakan 3 tabung pipa paralon 3 inci. Lokasi pengambilan berada disekitar titik kerusakan yaitu, termasuk lokasi sekitar sumber mata air, pengambilan dilakukan pada bulan Oktober 2021. Parameter yang diujikan meliputi uji analisis ukuran butir, lokasi pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Balai Litbang Sabo. Pengujian karakteristik fisik dilakukan untuk mengetahui ukuran butiran material piroklastik, dapat berbutir kasar dan berbutir halus. Pengujian analisa ukuran butiran (*grain size*), yaitu penentuan persentase berat butiran pada sekali saringan atau satu kali penyaringan dengan ukuran diameter tertentu (Hardiyatmo, 2012). Notasi D_{10} , D_{30} , D_{60} adalah 10, 30 dan 60 % dari berat butiran total berdiameter lebih kecil dari ukuran butiran tertentu. Pembacaan nilai dari notasi D menggunakan kurva distribusi ukuran butiran (x) dan persen butiran yang lolos (y). Kemiringan dan bentuk umum dari kurva distribusi butiran digambarkan oleh koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*) atau C_u dan koefisien gradasi (*coefficient of gradation*) atau C_c , persamaan sebagai berikut:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60}) \times (D_{10})}$$

Tanah dengan gradasi butir yang baik mempunyai nilai koefisien gradasi $1 < C_c < 3$ dengan $C_u > 4$ untuk kerikil dan untuk $C_u > 6$ untuk pasir, serta tanah dengan gradasi sangat baik $C_u > 15$ (Hardiyatmo, 2012). Hasil pengujian sampel material dilakukan untuk menjawab tujuan, dengan analisis menggunakan metode *USCS*. Penelitian dengan metode *USCS* untuk meneliti tipe material piroklastik sudah ada sebelumnya yaitu menentukan gradasi butiran (Aristantha dkk., 2017). Metode *USCS* merupakan metode klasifikasi tanah telah dipakai sejak tahun 1942 dan dimodifikasi pada tahun 1952 untuk konstruksi (Hainim dan Bowles, 1991). Klasifikasi didasarkan pada pengujian laboratorium dan lapangan (Soepandji, 1994).

Klasifikasi metode *USCS* ditampilkan pada **Gambar 1**.

Divisi		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria Klasifikasi	
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan No.200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar terlahir saringan No. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit/ tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit/ tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_u = \frac{(D_{75})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW
			GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil, sedikit/ tidak mengandung butiran halus	
		Kerikil dengan butiran halus (jumlah butiran halus banyak)	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah asir dari diagram plastisitas, maka dipakai doble simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos saringan No. 4 (4,75 mm)	Pasir bersih (sedikit/tidak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit/ tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 60$ $C_u = \frac{(D_{75})^2}{D_{20} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
			SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit/ tidak mengandung butiran halus	
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah asir dari diagram plastisitas, maka dipakai doble simbol
			SC	Pasir berlanau, campuran pasir-lempung	
	Lanau dan lempung batas cair > 50%		MI	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan/	
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan No.200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair ≤ 50%	pasir halus berlanau/berlempung	CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung kurus (<i>leanclays</i>)
OL					Lanau organik dan lempung, berlanau organik dengan plastisitas rendah
MH			Lanau tak organik plastisitas tinggi		
CH			Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fatclays</i>)		
OH			Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi		
Tanah dengan organik tinggi				Gambut dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat ASTM Designation D-2488

Gambar 1. Klasifikasi USCS

Klasifikasi USCS menggunakan prinsip pembagian, jika:

- < 50% lolos saringan No.200 (0,075 mm) diklasifikasikan: berbutir kasar (kerikil dan pasir).
- > 50% lolos saringan No.200 (0,075 mm) tanah diklasifikasikan: berbutir halus (lanau/lempung).

Prosedur penggunaan klasifikasi *Unified* adalah sebagai berikut: (Hardiyatmo, 2012)

- Mengamati dan menentukan klasifikasi ukuran tanah termasuk butiran halus atau butiran kasar dengan saringan No.200
- Jika tanah berupa butiran kasar:
 - Menyaring tanah (material piroklastik) dan menggambarkan grafik distribusi butiran.

- b. Menentukan persen butiran lolos saringan No. 4. Apabila persentase butiran yang lolos kurang dari 50%, klasifikasikan tanah tersebut sebagai kerikil. Lolos lebih dari 50% merupakan klasifikasi pasir.
 - c. Menentukan jumlah butiran yang lolos saringan No.200. Apabila butiran yang lolos < 5%, mempertimbangkan bentuk grafik distribusi dengan menghitung C_u dan C_c , jika termasuk bergradasi baik maka diklasifikasikan sebagai GW (kerikil) dan SW (pasir). Jika bergradasi buruk, klasifikasi termasuk ke dalam GP (kerikil) dan SP (pasir).
 - d. Hasil persentase butiran tanah yang lolos saringan No. 200 di antara 5 sampai 12%, akan diklasifikasi penamaan ganda. Contoh: GW-GM, GP-GM
 - e. Jika persentase butiran yang lolos saringan No. 200 >12% harus dilakukan pengujian Batas Atterberg dengan menyingkirkan tanah (material piroklastik) yang terdapat pada saringan No.40. Contoh klasifikasi: GM, GC atau SM, SC.
3. Kondisi tertentu dalam menganalisis, dapat nilai C_u dan C_c hanya digunakan dan nilai tidak berpengaruh jika lebih dari 10% lolos saringan No.200 (Hainim & Bowles, 1991).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi pengambilan sampel ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Lokasi Pengambilan Sampel

Uji Analisis Ukuran Butir Tanah Agregat Halus

Pengujian ukuran butir tanah pada agregat halus setiap 100 gram memiliki suhu 23°C dan kelembaban udara 73%. Penjelasan pengujian ketiga tabung ditampilkan pada rangkuman **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Analisis Ukuran Butir Agregat Halus Ketiga Tabung

Tabung	No Saringan	Diameter saringan (mm)	Berat tanah tertahan (gram)	Berat tanah tertahan %	Kumulatif dari tanah tertahan %	Lolos saringan %
1	4	4,75	-	-	-	100
	10	2,00	-	-	-	100
	20	0,85	8,922	8,92	8,92	91,08
	40	0,425	21,747	21,75	30,67	69,33
	60	0,250	23,589	23,59	54,26	45,74
	140	0,106	19,699	19,70	73,96	26,04
	200	0,075	12,603	12,60	86,56	13,44
	>270	<0,075	13,440	13,44	100,00	-
	Berat total (W1)		100,000			-
2	4	4,75	-	-	-	100

Tabung	No Saringan	Diameter saringan (mm)	Berat tanah tertahan (gram)	Berat tanah tertahan %	Kumulatif dari tanah tertahan %	Lolos saringan %
	10	2,00	-	-	-	100
	20	0,85	11,769	11,77	11,77	88,23
	40	0,425	25,741	25,74	37,51	62,49
	60	0,250	23,513	23,51	61,02	38,98
	140	0,106	19,343	19,34	80,37	19,63
	200	0,075	9,393	9,39	89,76	10,24
	>270	<0,075	10,241	10,24	100,00	-
	Berat total (W1)			100,000		
3	4	4,75	-	-	-	100
	10	2,00	-	-	-	100
	20	0,85	7,784	7,78	7,78	92,22
	40	0,425	24,792	24,79	32,58	67,42
	60	0,250	26,255	26,26	58,83	41,17
	140	0,106	24,191	24,19	83,02	16,98
	200	0,075	10,879	10,88	93,90	6,10
	>270	<0,075	6,099	6,10	100,00	-
Berat total (W1)			100,000			

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Mekanika Tanah (2021)

Tabel 2. Pembagian Ukuran Butir dari Ketiga Tabung

T	Keterangan	Lempung koloidal	Lempung	Lanau	Pasir Halus	Pasir Sedang	Pasir Kasar	Kerikil	Boulder
1	Berat tanah tertahan saringan (gram)	-	-	13,44	55,89	30,67	-	-	-
	Diameter lubang saringan (mm)	0,001	0,002	0,075	0,42	2	4,75	75	
2	Berat tanah tertahan saringan (gram)	-	-	10,24	52,25	37,51	-	-	-
	Diameter lubang saringan (mm)	0,001	0,002	0,075	0,42	2	4,75	75	
3	Berat tanah tertahan saringan (gram)	-	-	6,10	61,32	32,58	-	-	-
	Diameter lubang saringan (mm)	0,001	0,002	0,075	0,42	2	4,75	75	

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Mekanika Tanah (2021)

Tabel 3. Hasil Kurva Distribusi Ukuran Butiran Ketiga Tabung

T	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Cu (Koefisien keseragaman)	Cc (Koefisien gradasi)
1	0,045	0,140	0,350	7,78	1,24
2	0,070	0,170	0,400	5,71	1,03
3	0,085	0,18	0,360	4,24	1,06

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Mekanika Tanah (2021)

Penjelasan berdasarkan **Tabel 1** sebanyak 86,56% tertahan pada saringan No.200 atau lebih dari setengah tanah tertahan sehingga sesuai dengan klasifikasi USCS bahwa material piroklastik tabung 1 berbutir kasar. Berbutir kasar spesifiknya bisa kerikil atau pasir, pada data ini menunjukkan ukuran butir pasir karena lebih dari 50% lolos saringan No.4. Penjelasan selanjutnya, pada Tabung 1 memiliki ukuran butir dengan ukuran lanau hingga pasir sedang dan lolos saringan pada range ukuran 0,002 mm sampai 2 mm. Pasir halus memiliki jumlah berat tertahan terbanyak daripada pasir sedang yaitu sebesar 55,89 gram. Persen butir yang lolos saringan No.200 >12% yaitu 13,44% sehingga hal ini bertolak belakang yang menunjukkan koefisien gradasi baik (Cc) $1 < 1,24 < 3$ dan koefisien keseragaman (Cu) pasir yaitu $7,78 > 6$. Walaupun demikian, nilai Cu dan Cc tidak berpengaruh karena jumlah butiran yang lolos pada saringan No.200 sudah melebihi 12%. Berdasarkan hasil analisis sampel tabung 1 klasifikasi SM (*Sand Silt*) yaitu tanah berbutir kasar dengan gradasi butiran buruk atau distribusi ukuran butiran seragam walaupun nilai selisih ukuran butir antara 0,045 dengan 0,35

menghasilkan nilai Cu besar, ukuran butir pasir berlanau atau campuran pasir berlanau. sebanyak 89,76% tertahan pada saringan No.200 atau lebih dari setengah tanah tertahan pada saringan No.200 sehingga sesuai dengan klasifikasi USCS bahwa material piroklastik tabung 2 berbutir kasar jika hasil analisis menunjukkan karakteristik tersebut. Berbutir kasar spesifiknya adalah pasir, karena lebih dari 50% tertahan pada saringan No.4.

Hasil analisis tabung 2 menunjukkan ukuran butir dengan ukuran lanau hingga pasir sedang. Pasir halus memiliki jumlah berat tertahan terbanyak daripada pasir sedang yaitu sebesar 52,25 gram. Hal tersebut sesuai dengan **Tabel 2** menunjukkan tanah bergradasi baik karena mempunyai koefisien gradasi C_c $1 < 1,03 < 3$ dan koefisien keseragaman C_u kerikil yaitu $5,71 > 4$. Bergradasi baik hasil lolos saringan No.200 berada di dalam range $5 < 10,24 < 12\%$ sehingga termasuk kelompok penamaan ganda, SW SM (*Sand Well- Sand Silt*) pasir bergradasi baik – pasir berlanau. Akan tetapi, ada pernyataan bahwa hasil C_u dan C_c tidak berpengaruh jika hasil lolos saringan No.200 $> 10\%$, namun karena nilai 10,24% belum melebihi 12% sehingga penamaan masih ganda, yakni campuran beragam antar pasir, kerikil berpasir hingga ditemukan sedikit butir halus lanau.

Hasil pengujian tabung 3 pada **Tabel 1** sebanyak 93,90% tertahan pada saringan No.200 atau lebih dari setengah tanah tertahan pada saringan No.200 sehingga sesuai dengan klasifikasi USCS bahwa material piroklastik tabung 3 berbutir kasar jika hasil analisis menunjukkan karakteristik tersebut sedangkan, untuk ukuran butirnya termasuk khusus yaitu pasir dan kerikil. Dikategorikan pasir karena hasil material lolos $> 50\%$ saringan No.4 dan kerikil dari hasil material lolos saringan No.200 lebih kecil 10% yaitu sebesar 6,10% sehingga nilai C_u dan C_c tetap berpengaruh. Nilai C_u sebesar $4,24 > 4$ sebagai kerikil dan C_c sebesar 1,06, $1 < 1,06 < 3$ sebagai bergradasi baik. Kelompok klasifikasi untuk sampel tabung 3 termasuk kedalam klasifikasi ganda, karena hasil lolos saringan No.200 berada diantara $5 < 6,10 < 12\%$ dan masih tetap berpengaruh. Klasifikasi yang sesuai adalah GW GM (*Gravel Well – Gravel Silt*) yaitu material berbutir kasar dengan ukuran kerikil tetapi sangat berpasir dengan gradasi butiran baik walaupun tidak sebaik tabung 1 karena selisih nilai D60 dan D10, jumlah butirannya lebih sedikit dan ada kemungkinan tidak tersebar merata.

KESIMPULAN

Karakteristik banjir lahar yang terjadi di Kali Boyong dari hasil pengujian ketiga tabung menunjukkan perbedaan tipe material Kali Boyong. Tipe endapan material piroklastik berukuran lanau hingga pasir sedang, termasuk ke dalam hasil letusan yang berukuran halus hingga sedang karena hasil erupsi material hujan abu gunung api Merapi mengarah ke sisi Barat, sehingga ditemukan material lepas-lepas berukuran lanau hingga sedang. Selain dari itu, hasil ukuran butir dominan pasir daripada kerikil maupun kerakal karena sampel pengujian yang diambil berasal dari endapan lapisan atas atau masih baru saja terjadi aliran banjir dengan debit aliran sedang sehingga material berukuran kerakal hingga bongkah terbawa aliran menuju ke sisi dalam alur sungai atau pengendapan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada bapak Herwin Lukito dan ibu Ayu Utami yang telah dengan baik hati membimbing penulis dalam penyusunan skripsi yang menjadi dasar publikasian jurnal. Ucapan terima kasih disampaikan kepada tim pengelola air bersih Tirtocandi Kaliurang yang telah memberikan kesempatan penulis untuk mengambil data lapangan serta pengalaman saat di lapangan untuk melakukan perbaikan kerusakan, serta pihak-pihak individu dan instansi yang tidak dapat disebutkan satu persatu oleh penulis pertama.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahyar, H., Maret, U. S., Andriani, H., Sukmana, D. J., Mada, U. G., Hardani, S.Pd., M. S., Nur Hikmatul Auliya, G. C. B., Helmina Andriani, M. S., Fardani, R. A., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Sukmana, D. J., & Istiqomah, R. R. (2020). *Buku Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif* (H. Abadi (ed.); Pertama, Issue March). Pustaka Ilmu.
- Aristantha, F., Hendrawan, A. P., & Asmaranto, R. (2017). *Identifikasi Karakteristik Fisik Dan Mineralogi Material Piroklastik Hasil Erupsi Gunung Kelud Di Sungai Kali Sambong Desa Pandansari Kecamatan Ngantang Kabupaten Malang Sebagai Alternatif Material Timbunan*. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Pengairan*, 1(1).

- BPPTKG. (2020). Siaran Pers Peningkatan Status Aktivitas Gunung Merapi. 5 November, 1. <https://bpptkg.esdm.go.id/pub/page.php?id=510>
- Dinnata, R. Y. (2021). Jaringan Air Kaliurang Barat Rusak Kena Banjir Lahar Merapi. 5 Februari 2021, 1. <https://www.ayoyogya.com/ngayogyakarta/pr-39468448/Jaringan-Air-Kaliurang-Barat-Rusak-Kena-Banjir-Lahar-Merapi>
- Giyarsih, S. R. (2014). *Aspek Sosial Banjir Lahar* (Pertama). Gadjah Mada University Press.
- Hadmoko, D. S., Dibyosaputro, S., & Widiyanto. (2018). *Banjir Lahar: Pembentukan, Proses, Dampak, dan Mitigasinya* (Siti (ed.); Kedua). Gadjah Mada University Press.
- Hainim, J. K., & Bowles, J. E. (1991). *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)* (Kedua).
- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika Tanah 1* (Tiga). Gadjah Mada University Press.
- Kusumosubroto, H. (2013). *Aliran Debris dan Lahar: Pembentukan, Pengaliran, Pengendapan, dan Pengendaliannya*. Graha Ilmu.
- Mulyatiningsih, E. (2011). *Riset Terapan: Bidang Pendidikan dan Teknik* (A. Nuryanto (ed.); Pertama). UNY Press.
- Soepandji, B. S. (1994). *Mekanika Tanah* (Keempat). Penerbit Erlangga.
- Sudradjat, A., Syafri, I., & Paripurno, E. T. (2011). *The Characteristics of Lahar in Merapi Volcano, Central Java as the Indicator of the Explosivity during Holocene. Indonesian Journal on Geoscience*, 6(2), 69–74. <https://doi.org/10.17014/ijog.v6i2.116>