

SIMULASI ALIRAN DEBRIS DI DAS PUTIH GUNUNG MERAPI DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE RAMMS DEBRIS FLOW

Silfia Dwi Putri^{1*}, Anggi Hermawan¹, Ardian Alfianto², Jati Iswardoyo²,
Fery Moun Hepy², dan Andi Arwik²

¹Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

²Balai Teknik Sabo, Direktorat Jenderal SDA, Kementerian PU

*silfiadwiputri12@gmail.com

Pemasukan: 3 Nopember 2025 Perbaikan: 22 Juni 2026 Diterima: 24 Juni 2026

Intisari

Gunung Merapi merupakan salah satu gunung berapi paling aktif di Indonesia yang menyisakan material vulkanik dalam jumlah besar pasca erupsi, sehingga berpotensi memicu aliran bahan rombakan (*debris flow*) pada sungai-sungai berhulu di kawasan Merapi, salah satunya Sungai Putih. Penelitian ini bertujuan memodelkan aliran debris di Daerah Aliran Sungai Putih menggunakan perangkat lunak RAMMS *Debris Flow* untuk mengidentifikasi karakteristik aliran dan wilayah yang berpotensi terdampak. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan debit banjir lahar kala ulang 100 tahun sebagai input simulasi RAMMS serta analisis sensitivitas dua skenario parameter koefisien gesek basal (μ). Berdasarkan analisis hidrologi, diperoleh curah hujan rencana kala ulang 100 tahun sebesar 128 mm, koefisien limpasan rata-rata sebesar 0,16, debit banjir rencana sebesar 41,05 m³/s, dan debit banjir lahar sebesar 65,68 m³/s. Hasil simulasi menunjukkan panjang aliran debris mencapai 3,98 km pada skenario pertama dan 5 km pada skenario kedua. Kecepatan maksimum aliran tercatat sebesar 4,55-4,68 m/s, ketinggian aliran maksimum sebesar 2,80-2,85 m, dan tekanan maksimum sebesar 47,74-50,55 kPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan nilai koefisien gesek basal meningkatkan kecepatan, tekanan, dan panjang aliran debris. Secara spasial, zona bahaya tinggi berada pada segmen hulu Sungai Putih dengan lereng curam, sedangkan pada kedua skenario aliran debris belum mencapai sabodam maupun kawasan permukiman. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam evaluasi zona bahaya dan mitigasi bencana sedimen di DAS Putih.

Kata Kunci: Gunung Merapi, *debris flow*, DAS Putih, RAMMS, HSS Nakayasu

Latar Belakang

Indonesia memiliki jumlah gunung berapi sebanyak 13% dari total gunung berapi di dunia, dengan 500 gunung berapi tidak aktif dan 129 gunung berapi aktif yang salah satunya adalah Gunung Merapi yang terletak di perbatasan Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (Gosal dkk., 2018; Ikhsan dkk., 2024). Gunung ini termasuk salah satu gunung berapi paling aktif di Indonesia, dengan erupsi besar pada tahun 2010 yang meninggalkan material hasil letusan berupa batu, pasir dan

abu yang tersebar di lereng dan sungai sekitarnya. Material ini berpotensi membentuk aliran bahan rombakan (*debris flow*) apabila terbawa oleh curah hujan berintensitas tinggi (Setyawan dkk., 2013). Salah satu sungai yang berhulu di Gunung Merapi adalah Daerah Aliran Sungai (DAS) Putih yang terletak di wilayah Kabupaten Magelang, yang masih rawan terjadi aliran bahan rombakan (*debris flow*) pasca erupsi besar Gunung Merapi tahun 2010 (Ikhsan dkk., 2024). Faktor utama yang memengaruhi terbentuknya aliran debris meliputi sedimen, curah hujan dan kemiringan (Hidayat dan Rudiarto, 2013).

Topografi gunung api, kondisi sungai, dan karakteristik DAS memiliki pengaruh terhadap banjir debris. Untuk mendukung mitigasi bencana tersebut, berbagai perangkat lunak telah digunakan dalam studi sebelumnya. Ulinuha dkk. (2020), misalnya, menggunakan kombinasi HEC-HMS dan HEC-RAS untuk menganalisis spasial aliran lahar di Sungai Gendol-Opak. Namun pendekatan ini lebih sesuai untuk simulasi aliran air pada saluran sungai dan memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan dinamika pergerakan massa cepat seperti *debris flow*, terutama dalam memprediksi tekanan aliran debris. Oleh karena itu, perangkat lunak RAMMS (*Rapid Mass Movement Simulation*) menjadi salah satu alternatif yang lebih tepat digunakan dalam memodelkan aliran debris, karena mampu digunakan dalam menganalisis parameter bahaya, seperti *runout*, ketinggian aliran, kecepatan aliran, dan terutama pada tekanan aliran debris (Rajaneesh dkk., 2025). RAMMS (*Rapid Mass Movement Simulation*) dikembangkan oleh *WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF* dan *the Swiss Federal Institute for Forest, Snow, and Landscape Research WSL*, serta telah digunakan secara internasional untuk memodelkan pergerakan massa cepat. Studi sebelumnya oleh Simoni dkk. (2012) menerapkan RAMMS untuk melakukan *back-analysis* terhadap kejadian aliran debris di wilayah Pegunungan Alpen, Italia. Studi lainnya oleh Kristiawan dan Sumaryono (2020) menerapkan RAMMS untuk memodelkan aliran bahan rombakan di Kecamatan Sambelia, Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat.

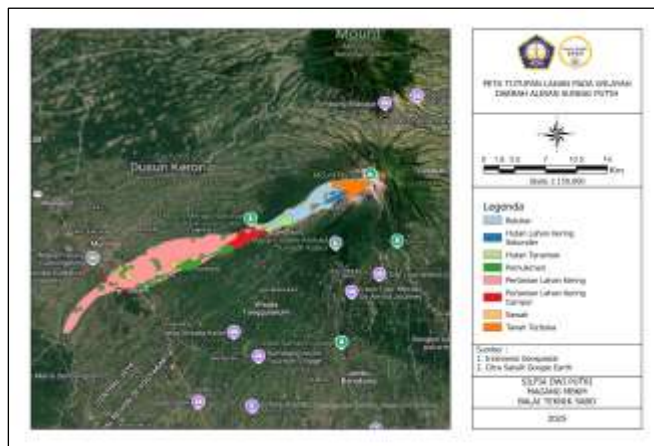
Berdasarkan studi terdahulu, penerapan RAMMS untuk simulasi aliran debris di DAS Putih masih belum pernah dilakukan. Kebaruan penelitian ini terletak pada perhitungan debit banjir lahar kala ulang 100 tahun sebagai input simulasi RAMMS dan penggunaan dua skenario parameter koefisien gesek (μ) untuk mengetahui sensitivitas hasil simulasi terhadap perubahan parameter aliran. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan memodelkan aliran debris di DAS Putih menggunakan RAMMS *Debris Flow* serta mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak aliran debris.

Metodologi Studi

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah pemodelan aliran debris dengan perangkat lunak RAMMS, menggunakan data tutupan lahan, data DEM, data morfometri DAS, data curah hujan, dan data parameter fisik aliran.

1. Tutupan Lahan

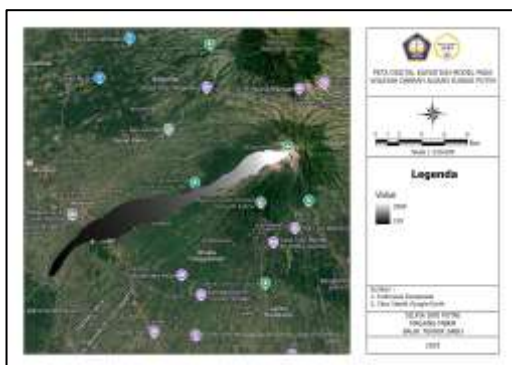
Data tutupan lahan dalam format *shapefile* (SHP) diperoleh dari laman Indonesia Geospasial, mencakup wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Data ini diolah menggunakan ArcGIS untuk klasifikasi penutup lahan dan perhitungan koefisien limpasan (C) pada wilayah DAS Putih. Nilai koefisien limpasan ditentukan berdasarkan klasifikasi penggunaan lahan dan digunakan sebagai salah satu parameter dalam analisis hidrologi untuk menghitung debit banjir rencana.



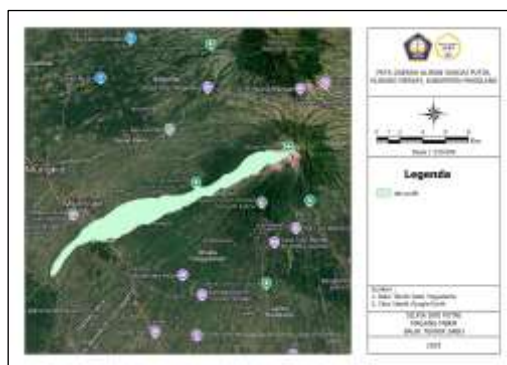
Gambar 1. Tutupan Lahan di Wilayah DAS Putih

2. Data Topografi

Peta DEM resolusi 8 m diperoleh dari laman Ina-Geoportal. Batas DAS Putih diperoleh dari Balai Teknik Sabo Yogyakarta. DEM disesuaikan dengan DAS untuk memperoleh informasi morfometri DAS, seperti luas, panjang sungai, dan kemiringan lereng, yang digunakan dalam analisis hidrologi dan simulasi RAMMS.



Gambar 2. Layout DEM Sungai Putih



Gambar 3. Layout DAS Putih

3. Data Curah Hujan

Data curah hujan maksimum 20 tahun dari tahun 2005-2024 diperoleh dari laman Giovanni NASA karena keterbatasan data hujan dari stasiun penakar hujan di wilayah DAS Putih. Data curah hujan satelit dapat digunakan sebagai alternatif,

karena memiliki korelasi yang kuat terhadap data observasi lapangan dengan kesalahan relatif rendah (Munanjar dkk., 2025). Data ini kemudian dianalisis menggunakan AProb 5.1 untuk melakukan analisis frekuensi dan menentukan jenis distribusi yang paling sesuai. Berdasarkan hasil AProb 5.1 dan perbandingan dengan persyaratan distribusi dalam Triatmodjo (2008), distribusi *Log Pearson III* yang paling sesuai. Digunakan untuk hujan rencana kala ulang 100 tahun.

Tabel 1. Data Tinggi Hujan Maksimum Harian Tahun 2005 - 2024

Tahun	Tinggi hujan (mm)	Tahun	Tinggi hujan (mm)
2005	69,025	2015	85,405
2006	64,360	2016	92,175
2007	94,735	2017	82,790
2008	65,770	2018	68,975
2009	100,690	2019	74,700
2010	100,640	2020	83,345
2011	62,905	2021	79,330
2012	59,675	2022	68,745
2013	79,410	2023	74,425
2014	97,855	2024	117,170

(sumber: Giovanni NASA, 2025)

Tabel 2. Estimasi Hujan Rencana dengan Distribusi *Log Pearson III*

Kala Ulang (Tahun)	Hujan Rencana (mm/hari)
2	79
5	93
10	102
20	110
25	112
50	120
100	128
200	136
500	146
1000	155

(sumber: AProb5.1, 2025)

Nilai hujan rencana digunakan untuk menghitung debit banjir rencana menggunakan metode HSS Nakayasu. Pemilihan metode ini berdasarkan keterbatasan data debit observasi dan telah banyak digunakan dalam analisis hidrologi di Indonesia untuk memperkirakan hidrograf banjir berdasarkan karakteristik morfometri DAS. Parameter yang digunakan dalam metode ini meliputi luas DAS, panjang sungai, kemiringan sungai, dan waktu konsentrasi. Waktu konsentrasi ini merepresentasikan waktu tempuh aliran dari titik terjauh DAS menuju outlet. Debit banjir rencana yang diperoleh selanjutnya digunakan dalam perhitungan debit banjir lahar. Perhitungan debit banjir lahar dapat dilakukan dengan menggunakan rumus yang mengacu pada Pedoman Konstruksi dan

Bangunan Perencanaan Teknis Tanggul pada Sungai Lahar oleh Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah tahun 2004 (Ulinuha dkk., 2020):

$$Q_p = (1 + C^*)Q_0 \tag{1}$$

dengan keterangan:

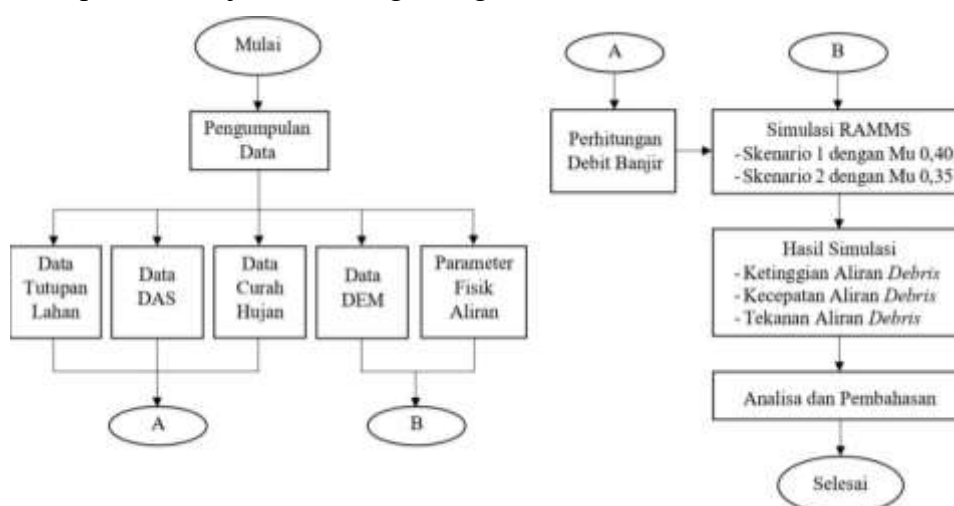
- Q_p : debit sedimen/debit banjir lahar (m^3/s)
- C^* : konsentrasi butiran dalam volume material debris pada dasar sungai sebelum bergerak (0,6)
- Q_0 : debit banjir rencana (m^3/s)

4. Parameter Fisik Aliran

Simulasi RAMMS menggunakan parameter koefisien gesek (μ) dan koefisien turbulensi (ζ), dengan rentang nilai sesuai RAMMS Manual (RAMMS AG, 2024). Pemilihan parameter dilakukan berdasarkan pendekatan literatur dan kondisi kemiringan lereng hulu Sungai Putih. Dalam studi ini dilakukan dua skenario simulasi dengan skenario pertama menggunakan $\mu = 0,40$, berdasarkan kemiringan lereng hulu Sungai Putih sebesar 22° , serta nilai $\zeta = 200 m/s^2$. Sedangkan untuk skenario kedua menggunakan $\mu = 0,35$, berdasarkan kemiringan lereng hulu Sungai Putih sebesar $19,3^\circ$, serta nilai $\zeta = 200 m/s^2$. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter gesekan terhadap hasil simulasi. Karena keterbatasan data debit terukur serta belum adanya observasi lapangan yang dilakukan pada penelitian ini, oleh karenanya hasil simulasi pada penelitian ini digunakan sebagai gambaran awal mengenai potensi perilaku aliran debris di DAS Putih berdasarkan skenario parameter yang digunakan.

5. Tahapan Studi

Alur tahapan studi dijelaskan dengan bagan alir berikut.



Gambar 4. Bagan Alir Studi

Hasil Studi dan Pembahasan

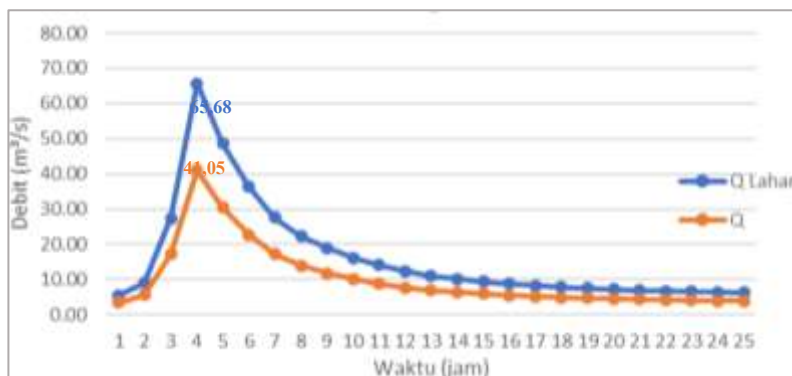
Data tutupan lahan di wilayah DAS Putih menunjukkan luas total 31,20 km² dengan koefisien limpasan (C) rata-rata sebesar 0,16. Berdasarkan Tabel 3, penggunaan lahan terbesar adalah pertanian lahan kering seluas 14,86 km² dengan nilai C 0,10, sehingga sangat berpengaruh terhadap nilai C rata-rata. Sementara itu, pemukiman meskipun luasannya hanya 3,51 km², tetap memberikan kontribusi yang signifikan terhadap limpasan karena nilai C relatif tinggi yaitu sebesar 0,60. Kondisi ini menunjukkan bahwa perubahan tata guna lahan, khususnya peningkatan pemukiman, dapat memengaruhi peningkatan nilai koefisien limpasan rata-rata.

Tabel 3. Koefisien Tutupan Lahan pada Wilayah DAS Putih

Penutupan Lahan	Luas km ² (A)	C.A
Belukar	4,55	0,070,32
Hutan Lahan Kering Sekunder	0,62	0,030,02
Hutan Tanaman	1,63	0,050,08
Pemukiman	3,51	0,602,10
Pertanian Lahan Kering	14,86	0,101,49
Pertanian Lahan Kering Campur	2,12	0,100,21
Sawah	1,75	0,150,26
Tanah Terbuka	2,16	0,200,43
Total	31,20	4,92
C rata-rata		0,16

(sumber: Analisis, 2025)

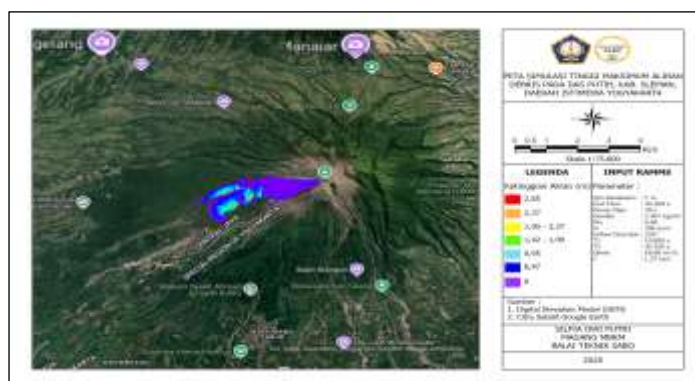
Perhitungan debit banjir rencana menggunakan HSS Nakayasu dengan input curah hujan rencana 128 mm, koefisien limpasan sebesar 0,16, luas DAS sebesar 31,20 km², dan panjang sungai sebesar 24,16 km. Hasil perhitungan debit banjir ditunjukkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut terlihat bahwa debit banjir rencana sebesar 41,05 m³/s, dan debit banjir lahar sebesar 65,68 m³/s pada kala ulang 100 tahun. Hal ini juga divisualisasikan pada Gambar 5 yang menunjukkan bentuk hidrograf dengan puncak tertinggi, setelah puncak, debit mengalami penurunan secara bertahap hingga mencapai kondisi stabil.



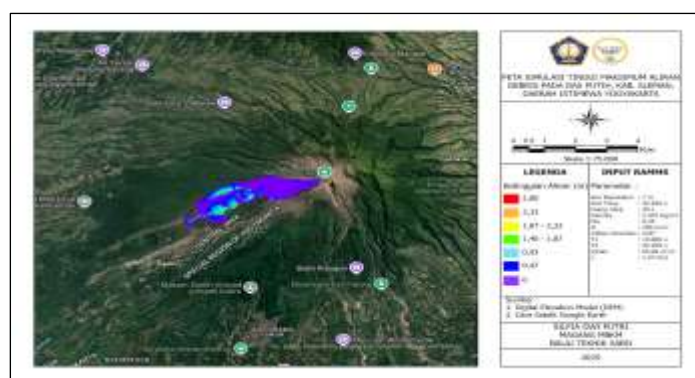
Gambar 5. Hidrograf Debit Banjir Kala Ulang 100 Tahun

Simulasi menggunakan perangkat lunak RAMMS *Debris Flow* menghasilkan beberapa parameter penting terkait karakteristik aliran bahan rombakan (*debris flow*) seperti ketinggian aliran maksimum (*max height*), kecepatan aliran maksimum (*max velocity*) dan tekanan maksimum aliran (*max pressure*). Simulasi ini memberikan gambaran spasial terhadap distribusi aliran, area terdampak, serta akumulasi material, yang berguna sebagai dasar teknis dalam perencanaan mitigasi bencana sedimen.

Distribusi ketinggian aliran debris ditampilkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Pada skenario pertama, ketinggian maksimum tercatat 2,85 m, sedangkan pada skenario kedua ketinggian maksimum 2,80 m. Perbedaan yang kecil ini menunjukkan bahwa perubahan parameter gesekan tidak terlalu memengaruhi tinggi aliran, sehingga ketinggian aliran lebih dipengaruhi oleh volume material dan geometri lembah sungai. Area dengan ketinggian aliran terbesar umumnya berada pada segmen sungai yang sempit, di mana material debris mengalami konsentrasi aliran yang lebih besar.



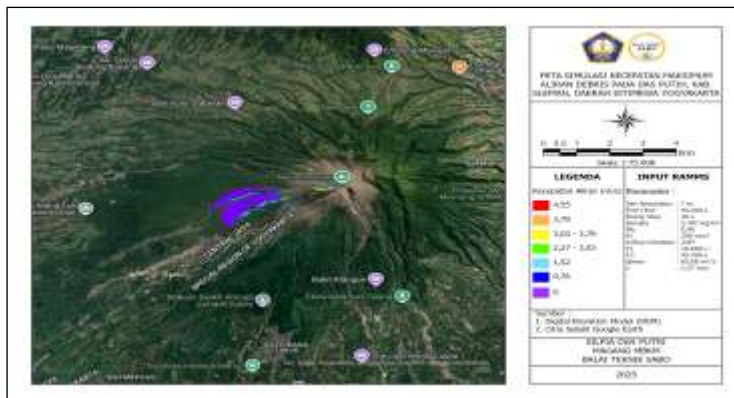
Gambar 6. Ketinggian Aliran Debris Skenario Pertama



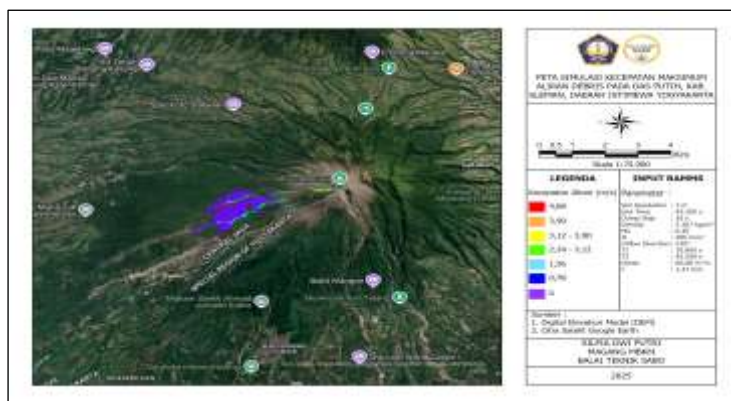
Gambar 7. Ketinggian Aliran Debris Skenario Kedua

Kecepatan aliran debris divisualisasikan pada Gambar 8 yang memperlihatkan kecepatan aliran maksimum pada skenario pertama sebesar 4,55 m/s. Sedangkan pada Gambar 9, skenario kedua menghasilkan kecepatan maksimum lebih tinggi, yaitu 4,68 m/s. Perbedaan ini dipengaruhi oleh nilai koefisien gesek basal (μ) yang lebih rendah, sehingga tahanan gesek antara material debris dan dasar sungai

berkurang. Akibatnya, material bergerak lebih cepat dan memiliki mobilitas yang lebih tinggi.

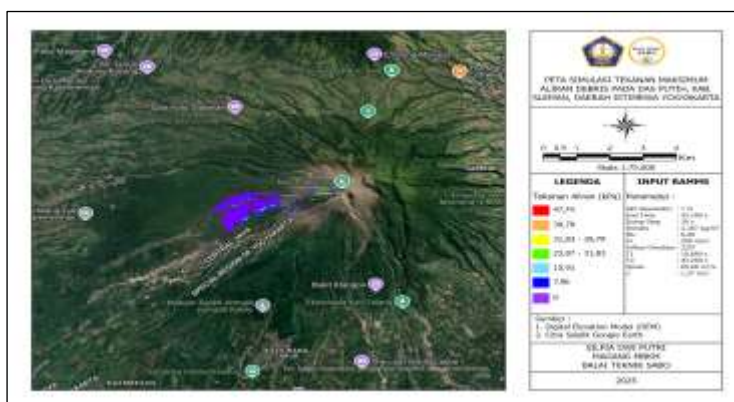


Gambar 8. Kecepatan Aliran Debris Skenario Pertama

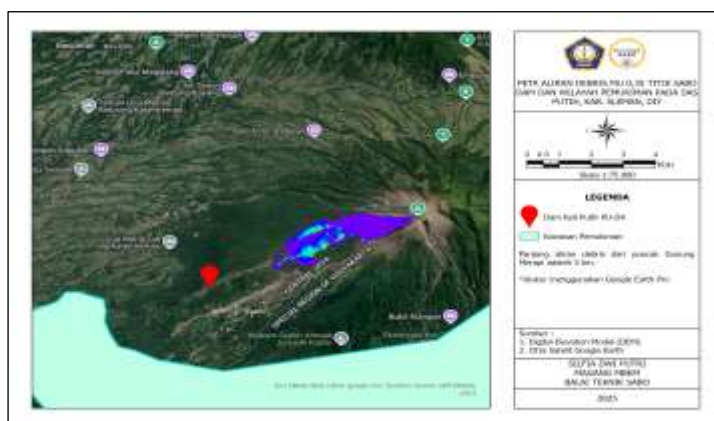


Gambar 9. Kecepatan Aliran Debris Skenario Kedua

Tekanan aliran ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Pada skenario pertama, tekanan maksimum mencapai 47,74 kPa, sedangkan pada skenario kedua meningkat menjadi 50,55 kPa. Peningkatan tekanan ini berkorelasi dengan kenaikan kecepatan aliran dan menunjukkan potensi gaya rusak yang lebih besar terhadap lingkungan dan infrastruktur di sekitar jalur aliran.



Gambar 10. Tekanan Aliran Debris Skenario Pertama



Gambar 13. Titik Sabodam dan Pemukiman Skenario Kedua

Simulasi aliran bahan rombakan (*debris flow*) menggunakan perangkat lunak RAMMS menunjukkan bahwa perangkat lunak ini mampu menggambarkan sebaran aliran secara spasial dan mengidentifikasi wilayah yang berpotensi terdampak, khususnya di wilayah Sungai Putih. Kemampuan RAMMS dalam memodelkan dinamika aliran debris juga ditunjukkan oleh Simoni, dkk. (2012) dalam studi *back-analysis* kejadian *debris flow* di Pegunungan Alpen serta oleh Kristiawan dan Sumaryono (2020) dalam studi pemodelan aliran bahan rombakan (*debris flow*) di Kecamatan Sambelia, Nusa Tenggara Barat.

Penelitian ini juga menguatkan hasil studi dari Hidayat dan Rudiarto (2013) yang telah memetakan risiko banjir lahar hujan di alur Sungai Putih. Dengan pendekatan spasial, mereka mengidentifikasi tingkat kerentanan kawasan dari kategori rendah hingga sangat tinggi. Dari aspek struktur pengendali, Setyawan, dkk. (2013) telah menyusun rencana teknis bangunan pengendali sedimen di KM 16,7 Sungai Putih. Namun, dengan adanya pemodelan spasial menggunakan RAMMS, evaluasi terhadap kapasitas bangunan tersebut dapat dilakukan secara lebih terarah, termasuk dalam skenario ekstrem.

Lebih lanjut, pendekatan numerik seperti HEC-RAS yang digunakan oleh Iswardoyo dan Satria (2023) dalam memodelkan banjir di Sungai Sat, Kabupaten Pati, menunjukkan bahwa pemodelan numerik berbasis data sangat penting dalam upaya peningkatan kewaspadaan terhadap ancaman di masa mendatang, khususnya bencana banjir dan banjir bandang. Studi lain oleh Ulinuha dkk. (2020) juga menerapkan kombinasi HEC-HMS dan HEC-RAS dalam analisis spasial aliran lahar di Sungai Gendol-Opak, Gunung Merapi. Meskipun menggunakan model yang berbeda, pendekatan RAMMS dan HEC-RAS dapat saling melengkapi, khususnya dalam penanganan risiko bencana banjir debris.

Sebagai pembandingan, Ikhsan, dkk. (2024) memanfaatkan perangkat lunak SIMLAR dalam pemodelan lahar dingin di daerah vulkanik pada Sungai Putih. Meskipun berbeda perangkat lunak, pendekatan yang digunakan tetap berbasis pada keakuratan data topografi dan hidrologi. Secara keseluruhan, hasil studi ini menunjukkan bahwa penggunaan RAMMS dapat menjadi dukungan teknis dalam kajian kebencanaan, khususnya bahaya *debris flow*. Pemodelan ini menjadi dasar

dalam evaluasi struktur pengendali, penentuan zona evakuasi, dan pengembangan sistem peringatan dini di kawasan rawan bencana sedimen di Sungai Putih.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Pemodelan *debris flow* di Daerah Aliran Sungai (DAS) Putih menggunakan perangkat lunak RAMMS menunjukkan bahwa RAMMS dapat digunakan untuk memodelkan dinamika aliran debris dengan baik. Berdasarkan hasil penelitian, analisis hidrologi pada DAS Putih dengan hujan rencana kala ulang 100 tahun sebesar 128 mm menghasilkan debit banjir rencana sebesar 41,05 m³/s dan debit banjir lahar sebesar 65,68 m³/s. Simulasi menggunakan RAMMS *Debris Flow* menunjukkan panjang aliran debris mencapai 3,98 km pada skenario pertama dan 5 km pada skenario kedua, dengan kecepatan maksimum 4,55 - 4,68 m/s, ketinggian aliran maksimum 2,80 - 2,85 m, serta tekanan maksimum 47,74 - 50,55 kPa. Penurunan nilai koefisien gesek basal (μ) terbukti meningkatkan kecepatan, tekanan, dan panjang aliran, sehingga menunjukkan pengaruh signifikan parameter gesekan terhadap mobilitas aliran debris. Secara spasial, zona bahaya tinggi berada pada segmen hulu Sungai Putih yang memiliki lereng curam, sedangkan pada kedua skenario aliran debris belum mencapai sabodam maupun kawasan permukiman. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan debit banjir lahar kala ulang 100 tahun sebagai input simulasi RAMMS dan analisis sensitivitas dua skenario parameter gesekan, meskipun penelitian ini masih memiliki keterbatasan berupa belum dilakukannya kalibrasi dan validasi model secara kuantitatif.

Saran

Berdasarkan hasil studi, terdapat beberapa saran yang dapat dilakukan untuk memperkuat sistem mitigasi bencana, di antaranya adalah peningkatan efektivitas sabodam yang telah ada, walaupun dalam hasil simulasi aliran belum mencapai bangunan sabodam. Diperlukan validasi data melalui observasi lapangan guna meningkatkan ketepatan dalam input parameter pada pemodelan menggunakan RAMMS. Selain itu, pengembangan sistem mitigasi dapat diperkuat melalui pemasangan sensor curah hujan otomatis (*automatic rain gauge*) dan monitoring *sediment transport* secara *real-time* yang terintegrasi dengan *dashboard warning system*, sehingga informasi potensi bahaya dapat diakses secara cepat dan akurat. Pemodelan multi-skenario dengan variasi debit, volume material, dan parameter gesekan juga disarankan untuk memperoleh gambaran potensi bahaya yang lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Teknik Sabo Yogyakarta atas bantuan dalam penyediaan data dan pendampingan teknis selama pelaksanaan studi ini, serta kepada dosen pembimbing dan institusi pendidikan atas dukungan akademik dalam penyusunan makalah ini.

Daftar Referensi

- Gosal, L. C., Tarore, R. C., dan Karongkong, H. H. (2018). Analisis Spasial Tingkat Kerentanan Bencana Gunung Api Lokon di Kota Tomohon. *Jurnal Spasial*, 5(2): 229-237. <https://doi.org/10.35793/sp.v5i2.20810>.
- Hidayat, F., dan Rudiarto, I. (2013). Pemodelan Resiko Banjir Lahar Hujan Pada Alur Kali Putih Kabupaten Magelang. *Jurnal Teknik PWK (Perencanaan Wilayah Kota)*, 2(4): 895-904. <https://doi.org/10.14710/tpwk.2013.3477>
- Ikhsan, J., Hairani, A., dan Ardiansyah, R. (2024). Pemodelan Banjir Lahar Dingin di Daerah Vulkanis dengan Menggunakan SIMLAR. *Jurnal Konstruksi*, 22(2): 86-97. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.22-2.1632>.
- Iswardoyo, J., Satria, H. (2023). Analisis Daerah Terdampak Banjir Bandang Menggunakan HEC-RAS 2 Dimensi di Sungai Sat, Kabupaten Pati, Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(1): 13-26. <https://doi.org/10.32679/jth.v14i1.717>.
- Kristiawan, Y., dan Sumaryono. (2020). Pemodelan Aliran Bahan Rombakan (*Debris Flow*) di Kecamatan Sambelia, Kabupaten Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 11(1): 49-62. <http://dx.doi.org/10.34126/jlbg.v11i1.220>.
- Munanjar, M. C., Ariska, J., dan Safitri, I. (2025). Validasi Data Curah Hujan Maksimum Bulanan GPM. *Jurnal Konstruksi*, 23(2): 706-711. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.2708>.
- Rajaneesh, A., Krishnapriya, V. K., Sajinkumar, K. S. et al. (2025). Predicting debris flow pathways using volume-based thresholds for effective risk assessment. *npj Nat. Hazards*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00055-2>.
- RAMMS AG. (2024). RAMMS:Debrisflow User Manual v1.8.0, halaman 83, WSL, Switzerland.
- Setyawan, D. I., Anjariwibowo, N., Salamun, dan Budienny, H. (2013). Perencanaan Bangunan Pengendali Sedimen Kali Putih KM 16,7 Yogyakarta. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 2(4): 391-399.
- Simoni, A., Mammoliti, M., dan Graf, C. (2012). Performance of 2D Debris Flow Simulation Model RAMMS: Back-Analysis of Field Events in Italian Alps. In: *Annual International Conference on Geological and Earth Sciences (GEOS 2012)*, Singapore.
- Triatmodjo, B. (2008). Hidrologi Terapan. Cetakan pertama, Penerbit Beta Offset. Yogyakarta.
- Ulinuha, I., Prasetyo, Y., dan Sabri, L. (2020). Analisis Spasial Aliran Lahar Menggunakan HEC-HMS dan HEC-RAS Pada Kali Gendol-Opak Kawasan Gunung Merapi. *Jurnal Geodesi Undip*, 9(1): 20-28. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2020.26030>.