

Model Aliran Bahan Rombakan Menggunakan RAMMS Pada Bencana Banjir Bandang Kota Batu November 2021

Debris Flow Modelling using RAMMS in Batu City Debris Flow Disaster November 2021

Yohandi Kristiawan¹, Anjar Heriwaseso¹, M. Nizar Firmansyah¹, Sumaryono¹, Dicky Muslim², dan
Zufialdi Zakaria²

¹Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM

²Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjajaran

e-mail: yohandikristiawan@gmail.com

Naskah diterima 08 September 2023, selesai direvisi 27 Desember 2024, dan disetujui 30 Desember 2024

ABSTRAK

Kejadian aliran bahan rombakan di Kota Batu, Jawa Timur melanda 3 (tiga) kecamatan di wilayah Kota Batu pada hari Kamis, 4 November 2021. Kejadian tersebut berada pada aliran anak Sungai Brantas di lereng selatan Kompleks Gunungapi Arjuno Welirang. Bencana aliran bahan rombakan yang melanda wilayah Kota Batu dikontrol oleh luapan air akibat peningkatan volume air saat curah hujan tinggi dan adanya pembendungan di bagian hulu dari material bahan rombakan berupa kayu, bongkah batu dan material longsoran. Penyelidikan lapangan dan pemodelan numerik menjadi pendekatan yang signifikan dalam studi aliran bahan rombakan. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS). Input data RAMMS meliputi data Digital Elevation Model (DEM), volume, daerah inisiasi, densitas, kohesi, serta parameter gesekan μ (Mu) dan ξ (xi). Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis RAMMS menunjukkan bahwa parameter gesekan dan resolusi DEM sangat berpengaruh. Hasil model aliran bahan rombakan untuk μ : 0.04 dan ξ : 500 secara umum mendekati dengan landaan aliran bahan rombakan 2021 dengan panjang landaan 4.85 km dan luas 238622.83 m². Nilai parameter gesekan hasil pemodelan dapat dimanfaatkan untuk simulasi aliran bahan rombakan lain di kawasan selatan G. Arjuno Welirang untuk mengetahui potensi ancaman bahaya aliran bahan rombakan khususnya di wilayah Kota Batu, Jawa Timur.

Kata kunci: aliran bahan rombakan, Kota Batu, pemodelan, RAMMS

ABSTRACT

The debris flow disaster in Batu City, East Java hit 3 (three) sub-districts in the Batu City area on Thursday, November 4th, 2021. The debris flow occurred in a tributary of the Brantas River on the southern slope of the Arjuno Welirang Volcano Complex. The debris flow was controlled by water overflow due to increased water volume during high rainfall and dams upstream of the debris material consisting of wood, boulders, and landslide material. Field investigations and numerical modeling have become significant approaches in debris flow studies. Modeling was carried out using Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS) software. RAMMS data input includes Digital Elevation Model (DEM) data, volume, initiation area, density, cohesion, as well as friction parameters μ (Mu) and ξ (xi). The results of RAMMS modeling and analysis, show that the friction parameters and DEM resolution are very influential. The results of the debris flow model for μ : 0.04 and ξ : 500 are generally close to the 2021 debris flow with a maximum distance of 4.85 km and an area of 238622.83 m². The friction parameter values resulting from modeling can be used to simulate the flow of other debris in the southern area of Mt. Arjuno Welirang to determine the potential threat of debris flow, especially in the Batu City area, East Jawa in the future.

Keywords: debris flow, Kota Batu, modeling, RAMMS

PENDAHULUAN

Kejadian bencana aliran bahan rombakan di Kota Batu, Jawa Timur melanda 3 (tiga) kecamatan di wilayah Kota Batu pada hari Kamis, 4 November 2021 sekitar pukul 14.00 WIB. Di Kecamatan Bumiaji, wilayah yang terdampak di Desa Sumberbrantas, Desa Bulukerto, Desa Tulungrejo, Desa Sumbergondo, Desa Giripurno dan Desa Puntan. Di Kecamatan Batu Kota, wilayah terdampak di Desa Sidomulyo dan Kelurahan Temas. Sedangkan di Kecamatan Junrejo wilayah terdampak di Desa Pendem. Sebagian besar wilayah terdampak merupakan pemukiman di sempadan anak Kali Brantas. Wilayah yang cukup banyak terdampak pemukiman di Desa Bulukerto, Kecamatan Bumiaji. Berdasarkan penelusuran dan informasi dari BPBD Kota Batu, tercatat 7 (tujuh) orang meninggal dunia; 124 KK terdampak ; 29 unit rumah rusak ringan ; 7 unit rumah rusak sedang; 17 unit rumah rusak berat. Kejadian tersebut berada pada Kali Pucung yang merupakan aliran anak Sungai Brantas di lereng selatan Kompleks Gunungapi Arjuno Welirang (Gambar 1).

Aliran bahan rombakan berdasarkan klasifikasi Varnes (Hungr *et al* 2014) adalah aliran yang berupa campuran air, lumpur, dan kerikil sampai bongkah yang mengalir dengan kecepatan tinggi menuruni lereng. Aliran bahan rombakan merupakan aliran masif dengan campuran material rombakan terbawa oleh aliran air permukaan akibat curah hujan yang tinggi (Choi *et al*, 2021). Aliran tersebut dapat terjadi secara tiba-tiba dan mampu bergerak cepat serta mentran-

sport material hingga bongkah besar (Yan *et al*, 2023). Aliran bahan rombakan dapat terjadi karena longsoran-longsoran yang terjadi di wilayah pegunungan dan dapat menyebabkan kerusakan besar terhadap lingkungan dan masyarakat lokal (Huang *et al*, 2022). Aliran bahan rombakan biasanya terbentuk pada lereng gunung yang curam selama hujan lebat, pencairan salju, atau gempa bumi (Panek, 2020). Aliran bahan rombakan akibat longsor yang terjadi kemudian membendung aliran sungai hingga titik tertentu membentuk bendung alam (*natural dam*). Bendung alam yang lantas jebol berkembang menjadi aliran bahan rombakan yang dapat bergerak cepat dan menghantam bangunan dan infrastruktur yang berada pada bagian hilir (Zakaria *et al*, 2017). Revellino *et al* (2004) menyatakan *debris flow* umumnya terjadi tanpa peringatan dini karena memiliki kecepatan dan kemampuan mengangkut sedimen yang tinggi. Karakter tersebut seringkali membentuk bentukan morfologi kipas aluvial yang mempengaruhi rejim sedimen (Tsunetaka *et al*, 2024). Menurut Grelle *et al* (2014), aliran bahan rombakan berbeda dengan tanah longsor yang bergerak lambat, yang prekursornya dan tanda-tandanya dapat diketahui terkait dengan deformasi tanah yang sering dikontrol oleh kondisi geologi, lereng dan struktur geologi. Banyak aliran bahan rombakan berasal dari longsor dangkal yang berubah akibat kondisi hidrologi tertentu misalnya curah hujan yang berkepanjangan dapat menyebabkan mobilisasi aliran bahan rombakan dalam hitungan detik (Reid



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian (kiri). Foto kejadian bencana di Desa Bulukerto, Bumiaji, Kota Batu pada November 2021 (sumber : Sudarwito (BPBD Kota Batu) (Kanan).

& Ochiai, 2023). Aliran bahan rombakan dapat terbentuk oleh interaksi antara fase padat dan cair dalam kanal/saluran dan bergerak dengan kecepatan yang berbeda dalam tinggi aliran yang berbeda akibat tegangan geser (Liu *et al.*, 2021). Aliran ini dapat bergerak sebagai aliran granular (*granular flow*), aliran lumpur, atau aliran yang berangsur berubah menjadi banjir seiring penambahan air sehingga menjadi *hyper-concentrated flows* (Jakob & Hungr, 2005). Aliran yang terbentuk dapat menjadi sangat berbahaya karena mampu bergerak sekitar 15 km/jam dan mampu mencapai kecepatan hingga 60 km/jam (Iverson, 2005). Beberapa studi lapangan mengindikasikan kecepatan aliran mempunyai kecepatan antara 0,8 hingga 6,6 m/s dengan akurasi bergantung pada pengukuran superelevasi yang presisi (Aberg *et al.*, 2023; Aberg *et al.*, 2024). Campuran material tersebut (rombakan) dapat berdampak buruk pada kehidupan dan infrastruktur (Rengers *et al.*, 2023).

Banjir bandang yang melanda wilayah Kota Batu dikontrol oleh luapan air akibat peningkatan volume air saat curah hujan tinggi dan adanya pembendungan di bagian hulu dari material bahan rombakan berupa kayu, bongkah batu dan material longsoran. Luapan terjadi karena suplai air dari alur-alur air dan jeram-jeram di bagian hulu yang tinggi dan mengalir dan bermuara di lembah-lembah. Selain itu, ditemukan juga beberapa titik gerakan tanah di bagian hulu yang dapat menjadi penyebab terjadinya luapan air. Material rombakan berupa lumpur, bongkah batu, dan batang-batang pohon terbentuk karena erosi lateral sepanjang alur alir air yang volumenya meningkat dan longsoran-longsoran pada perbukitan di sepanjang alur air sungai (Firmansyah *et al.*, 2021).

Aliran bahan rombakan dapat dimodelkan sebagai fluida 2 fase dimana partikel padat dan cair berinteraksi melalui gaya seperti buoyancy dan gaya gesek (Xie *et al.*, 2022). Model dinamis sulit diterapkan dan membutuhkan kalibrasi parameter reologi atau gesekan yang memerlukan perhitungan kembali peristiwa masa lalu (Gan dan Zhang 2019; Calista *et al.*,

2020). Mengingat sulitnya model eksperimen dan pengamatan lapangan, model simulasi numerik telah menjadi pendekatan yang signifikan dalam studi aliran bahan rombakan (Wang *et al.*, 2018). Oleh karena itu, apa yang disebut analisis balik (*back analysis*) peristiwa aliran bahan rombakan masa lalu dapat digunakan untuk merancang langkah-langkah rekayasa untuk mengurangi risiko bencana (Simoni *et al.*, 2012; Bezak *et al.*, 2020).

Tujuan penelitian adalah untuk melakukan analisis balik (*back analysis*) pada kejadian aliran bahan rombakan di Kota Batu tahun 2021 dengan membuat model aliran bahan rombakan untuk mendapatkan nilai parameter friksi terbaik berdasarkan hasil pemodelan yang mendekati dengan kejadian bencana tahun 2021. Model aliran bahan rombakan untuk penelitian ini menggunakan RAMMS. RAMMS (*Rapid Mass Movement*) adalah sebuah perangkat lunak untuk pemodelan numerik dinamik yang didesain awalnya untuk pemodelan longsoran salju (*snow avalanches*) (Christen *et al.*, 2010) yang kemudian diaplikasikan untuk pemodelan aliran massa yang lain seperti lahar (Quan Luna, 2007) dan aliran debris (Kowalski, 2008). RAMMS mengadopsi persamaan Voellmy-Salm yang disempurnakan di mana koefisien turbulensi ditambahkan sejalan dengan kondisi nyata, berdasarkan sistem informasi geografis (GIS) (Gan dan Zhang 2019). RAMMS menjelaskan aliran debris sebagai hidrolika berdasarkan kedalaman rata-rata model kontinum (Frank *et al.*, 2017). RAMMS dikembangkan oleh tim ahli dari WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF dan the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL (Kumar *et al.*, 2025; Shafique *et al.*, 2021).

Model RAMMS menggunakan pendekatan 2 dimensi untuk mensimulasikan aliran bahan rombakan yang cepat yang memungkinkan penilaian kedalaman aliran, kecepatan, gaya tumbukan dengan berbagai skenario yang berbeda (Oh *et al.*, 2021). Model dinamis aliran bahan rombakan membutuhkan kalibrasi parameter reologi atau gesekan yang memerlukan perhi-

tungan kembali peristiwa masa lalu (Scheidl *et al*, 2013). Model dinamis aliran bahan rombakan sudah diaplikasikan oleh praktisi bencana untuk beberapa penggunaan seperti : pembuatan peta bahaya, membantu mendesain counter measure seperti dam dan peringatan dini, mengeksplorasi potensi landaan untuk kejadian skenario tertentu seperti pembentukan bendung alam, serta untuk mengilustrasikan bahaya aliran bahaya rombakan kepada stakeholder dan pengambil keputusan (Graf *et al*, 2021). Beberapa studi menggunakan RAMMS sebagai perangkat lunak untuk memodelkan aliran bahan rombakan di berbagai belahan dunia seperti di Illgraben, Swiss (Bolliger *et al*, 2023), DAS Rinjani, NTB (Qodri *et al*, 2021;Noviardi *et al*, 2021), bahkan hingga aliran Tangni, Garhwal Himalaya (Dash *et al*, 2021).

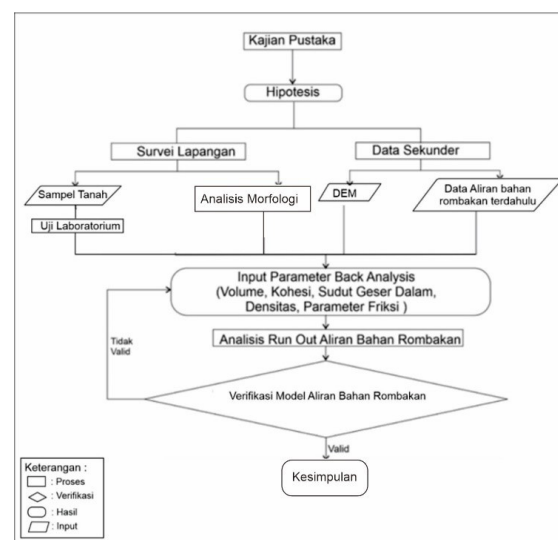
METODE PENELITIAN

Metode penelitian dilakukan dengan pengambilan data langsung di lapangan (data primer) serta data dukung lainnya (data sekunder). Sedangkan untuk pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pemodelan RAMMS. Secara umum metode penelitian dapat dilihat pada bagan alir penelitian (Gambar 2). Pengambilan data primer meliputi pengambilan data-data lapangan seperti pengamatan morfologi, geologi, jalur aliran sungai, data fotogrametri (foto udara), serta pengambilan contoh tanah/batuan untuk uji laboratorium (analisis sifat keteknikan tanah). Data fotogrametri didapatkan dengan pesawat nirawak (UAV) untuk mendapatkan data kondisi terkini khususnya di daerah hulu anak S. Brantas. UAV mempunyai resolusi spasial yang tinggi, kemampuan multisensor, dan sangat efektif untuk pemetaan serta mensimulasikan aliran bahan rombakan (Shafique *et al*, 2021). Dari data fotogrametri juga dapat dibuat DEM terkini di kawasan hulu untuk analisis morfologi khususnya untuk mengetahui area inisiasi dan prakiraan volume di hulu sungai. Uji laboratorium dilakukan pada contoh tanah di jalur aliran bahan rombakan. Uji

laboratorium mencakup uji kadar air dan berat jenis untuk mengetahui spesifikasi densitas material. Prosedur pengujian menggunakan ASTM (*American Standart for Testing and Material*) C-29. Uji kuat geser langsung untuk mengetahui kohesi serta sudut geser dalam material sebagai salah satu input parameter dalam pemodelan aliran bahan rombakan. Prosedur pengujian berdasarkan ASTM D 3090.

Pengambilan data sekunder meliputi data DEM (Digital Elevation Model), data geologi, dan data kejadian bencana banjir bandang Kota Batu 2021. Data DEMNAS didapatkan dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Data geologi spasial format shapefile didapatkan dari Pusat Survey Geologi (PSG), Badan Geologi. Data sekunder meliputi juga data kejadian bencana aliran bahan rombakan terdahulu seperti zona landaan bencana, asumsi volume, serta zona sumber aliran bahan rombakan.

Input data RAMMS meliputi data DEM, volume, daerah inisiasi, densitas, kohesi, serta parameter gesekan. Data topografi mempunyai peran yang penting, dimana resolusi dan akurasi mempengaruhi hasil simulasi (Liu *et al*, 2021). Semakin banyak jumlah elemen DEM, semakin lebih akurat hasil simulasi/model, tetapi juga membutuhkan kapasitas komputasi dan waktu pemodelan yang lebih lama.



Gambar 2. Bagan alir penelitian.

Model numerik menggunakan 2 parameter hubungan Voellmy untuk menggambarkan perilaku gesekan aliran debris. Model ini membagi resistansi friksi menjadi dua yaitu *dry-Coulomb type friction* (μ) yang berskala dengan tegangan normal dan *viscous-turbulent friction* (ξ) (Bartelt *et al*, 2017). Sehingga persamaan friksi menjadi :

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} \quad \text{with} \quad N = \rho h g \cos(\varphi)$$

ρ : berat jenis aliran

ϕ : sudut kelerengan

g : percepatan gravitasi

h : tinggi aliran

u : kecepatan aliran

RAMMS sejak versi 1.6.2 sudah memodifikasi persamaan Voellmy dengan memasukkan nilai kohesi (*yield stress*) (Bartelt *et al*, 2017). Dengan pendekatan input kohesi memungkinkan untuk memodelkan material plastis. Sehingga persamaan friksi berubah menjadi:

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} + (1 - \mu)N_0 - (1 - \mu)N_0 e^{-\frac{N}{N_0}}$$

Di mana N_0 merupakan kohesi dari material aliran dan N sama dengan $\rho h g \cos(\Phi)$. Nilai kohesi berfungsi untuk meningkatkan tegangan geser untuk tekanan normal yang lebih tinggi. Jika $\mu = 0$, maka menunjukkan aliran dengan karakteristik *viscoplastic* (Bartelt *et al*, 2017). Model Voellmy memperhitungkan resistensi fase padat (μ dinyatakan sebagai ekspresi dari sudut geser dalam) dan fase cairan kental atau turbulen (ξ). Koefisien gesekan berperan atas perilaku aliran di mana ξ dominan saat bahan rombakan dalam keadaan mengalir cepat dan μ dominan saat aliran mengalir dalam keadaan hampir statis (Liu *et al*, 2021). Nilai parameter gesekan mempunyai pengaruh yang nyata terhadap hasil simulasi numerik (Bezak *et al*, 2020; Mikos *et al*, 2021). Hasil pemodelan RAMMS dibandingkan dengan kondisi pengukuran lapangan yaitu panjang landaan, ketinggian (tebal) aliran pada area tertentu (Caviezel *et al*, 2019).

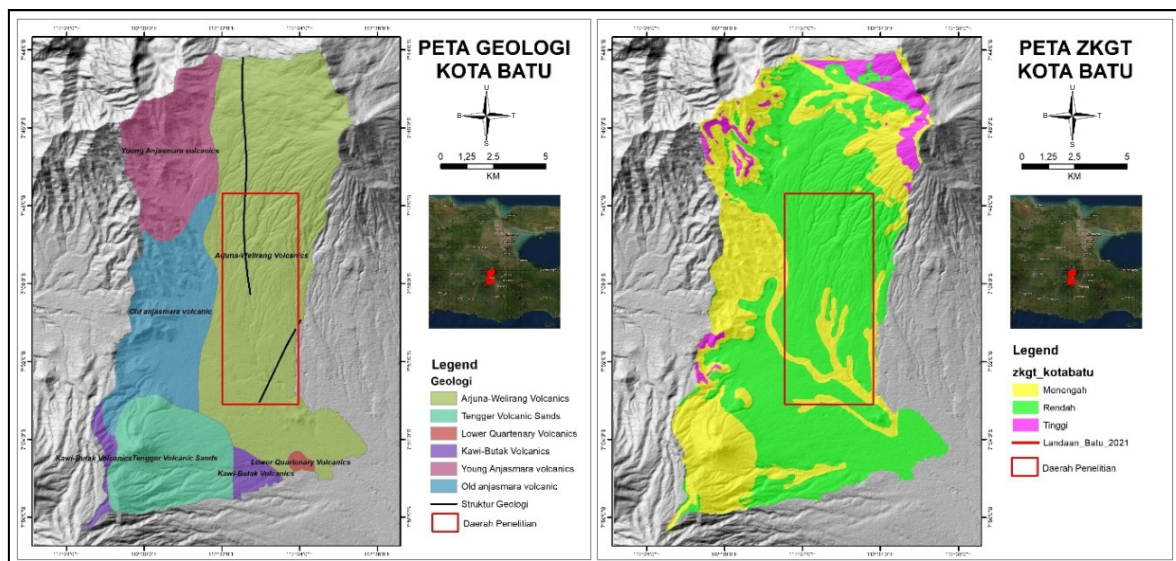
HASIL DAN PEMBAHASAN

Survei banjir bandang dilakukan dengan penelusuran jejak endapan material debris di sepanjang aliran anak sungai brantas dari hilir hingga hulu sungainya. Pengamatan dilakukan pada karakter morfologi, sungai/keairan, serta litologi.

Berdasarkan Peta Geologi Regional daerah Mojokerto dan Sekitarnya (Santosa dan Atmawinata, 1992) (Gambar 3), daerah penyelidikan secara umum berada pada endapan batuan gunungapi Kuartar (Batuan Gunungapi Kuartar atas dan Batuan Gunungapi Arjuno-Welirang) yang dibatasi dengan Formasi batuan yang lebih tua dari antiklinorium Kendeng dan endapan alluvium.

Berdasarkan Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah (ZKGT) Kota Batu (PVMBG, 2016), daerah yang menempati lereng dari G. Anjasmoro, Arjuno Welirang, dan Panderman (Kawi) merupakan daerah dengan kerentanan gerakan tanah menengah – tinggi. Pada zona ini dapat terjadi gerakan tanah jika curah hujan di atas normal, terutama pada daerah yang berbatasan dengan lembah sungai, gawir, tebing jalan atau jika lereng mengalami gangguan, dan gerakan tanah lama dapat aktif kembali. Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah menunjukkan bahwa daerah sumber aliran bahan rombakan berada pada ZKGT tinggi, tetapi zona pengendapan aliran bahan rombakan menempati daerah aliran sungai yang lebih landai yang berada pada ZKGT rendah.

Pada bagian hulu merupakan daerah inisiasi atau sumber dari aliran bahan rombakan. Daerah inisiasi dapat terbentuk dari akumulasi longsoran yang menimbun aliran sungai atau pertemuan aliran dari percabangan/anak sungai (Gambar 4). Morfologi terjal dengan kemiringan lereng $> 30^\circ$. Jejak – jejak longsoran lama teramati pada tebing tebing yang relatif sangat terjal (kemiringan lereng mencapai $> 60^\circ$). Perubahan morfologi teramati ke bagian hilir dengan kemiringan yang berubah semakin melandai (Gambar 5).



Gambar 3. Peta Geologi Kota Batu (Modifikasi dari Santosa dan Suwarti, 1992) (kiri) Dan Peta ZKGT Kota Batu dan landaan aliran bahan rombakan 2021 (kanan).

Sungai yang teramati nampak kering/tidak berair yang menunjukkan bahwa anak Sungai Brantas ini merupakan sungai musiman atau sungai yang berair saat hujan. Beberapa diantaranya menunjukkan celah sempit terutama di sekitar pertemuan anak-anak sungai (Gambar 4). Karakter seperti ini yang berpotensi terbedung bila celah tersebut tertutup akibat bendung alam. Namun pada bagian hilir, anak sungai Brantas berubah dengan aliran kecil akibat bercampur dengan air dari aliran irigasi. Dimensi sungai pada bagian hulu mempunyai lebar 5 – 10 m dengan diapit oleh lereng atau tebing yang curam. Namun dimensi sungai berubah semakin menyempit khususnya saat mendekati area

pemukiman warga. Pengamatan lapangan pada lokasi bencana (lokasi korban jiwa) di Desa Bulukerto menunjukkan aliran sungai yang kecil namun rapat pemukiman. Pada lokasi bencana tidak menunjukkan aliran yang *overflow* membentuk kipas aluvial, namun hanya luapan dari sungai yang tidak mampu menampung debit aliran (Gambar 5).

Pengamatan foto udara dilakukan untuk mengetahui kondisi morfologi, khususnya pada pertemuan dua anak sungai pada daerah hulu anak S. Brantas di selatan G. Arjuna Welirang. Analisis fotogrametri dilakukan pada kawasan hulu untuk mengetahui karakteristik morfologi. Beberapa penampang morfologi dibuat untuk



Gambar 4. Kawasan hulu/inisiasi aliran bahan rombakan dengan kemiringan lereng $> 30^\circ$. Sungai menunjukkan celah sempit terutama di sekitar pertemuan anak-anak sungai.



Gambar 5. Perubahan morfologi di bagian hilir yang melandai sebagai zona pengendapan aliran bahan rombakan. Pada lokasi bencana tidak menunjukkan aliran yang *overflow* membentuk kipas aluvial, namun hanya luapan dari sungai yang tidak mampu menampung debit aliran.

mengetahui karakter morfologi pada pertemuan dua anak sungai tersebut. Pengambilan lokasi penampang berdasarkan pengamatan area longsor di mana longsor sudah mulai terbentuk (area inisiasi).

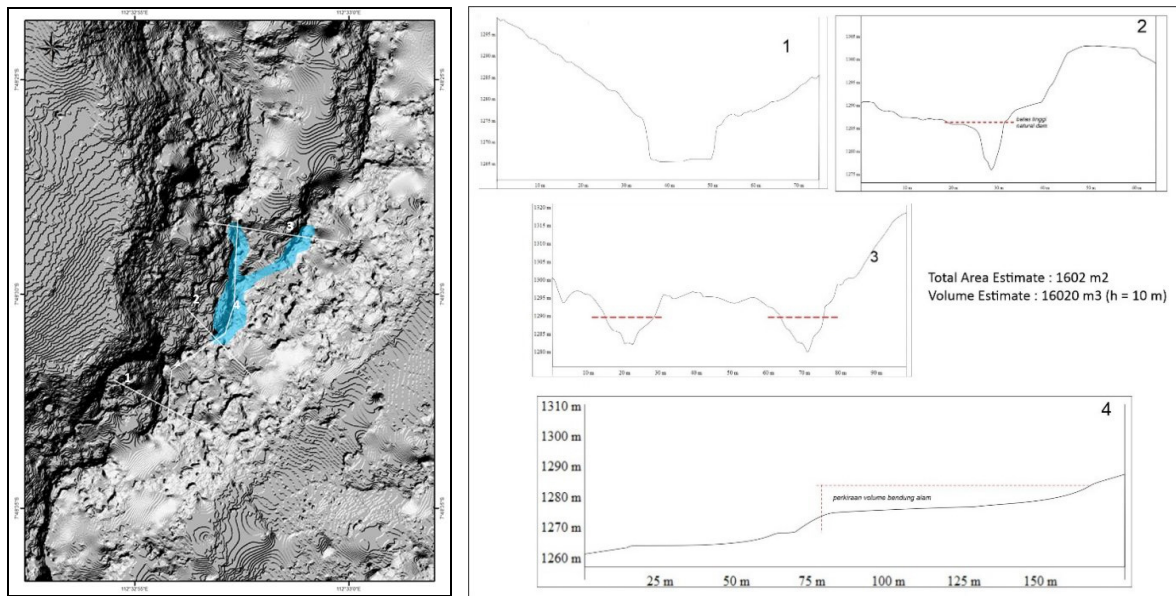
Penampang 1, 2, dan 3 mempunyai arah relatif barat timur dan memotong anak sungai. Sedangkan penampang 4 dibuat pada aliran sungai (utara - selatan). Pada penampang 1, morfologi sungai sudah membentuk lembah “U” dengan lebar sungai sekitar 15 m. Penampang 2 memiliki lembah sungai bentuk “V” yang curam dengan tinggi beda elevasi 10 m. Penampang 3 memotong 2 anak sungai dengan lebar sungai masing masing sekitar 8 – 10 m. Sedangkan penampang 4 menunjukkan perubahan morfologi pada jalur aliran sungai di mana terdapat perubahan lereng yang terjal pada area perpotongan dengan penampang 2. Pada lokasi tersebut diperkirakan menjadi lokasi terbentuknya bendung alam (*natural dam*). Bentuk morfologi seperti pada penampang 2 menunjukkan lembah yang sempit bila dibandingkan dengan area sekitarnya. Morfologi berubah dengan lebar sungai yang melebar (penampang 1) dan perubahan kontras pada penampang (4) menunjukkan potensi terbentuknya genangan air apabila lembah “V” tersebut tertutup oleh material longsor. Prakiraan genangan/bendung alam disesuaikan berdasarkan elevasi maksimal dari tinggi lembah yang terbandung. Sehingga didapatkan

luasan area bending alam yang terbentuk yaitu 1.602 m². Volume estimasi dihitung berdasarkan tinggi/tebal material yang menutup lembah sungai yaitu sekitar 10 m. Sehingga didapatkan volume estimasi yaitu 16.020 m³ (Gambar 6).

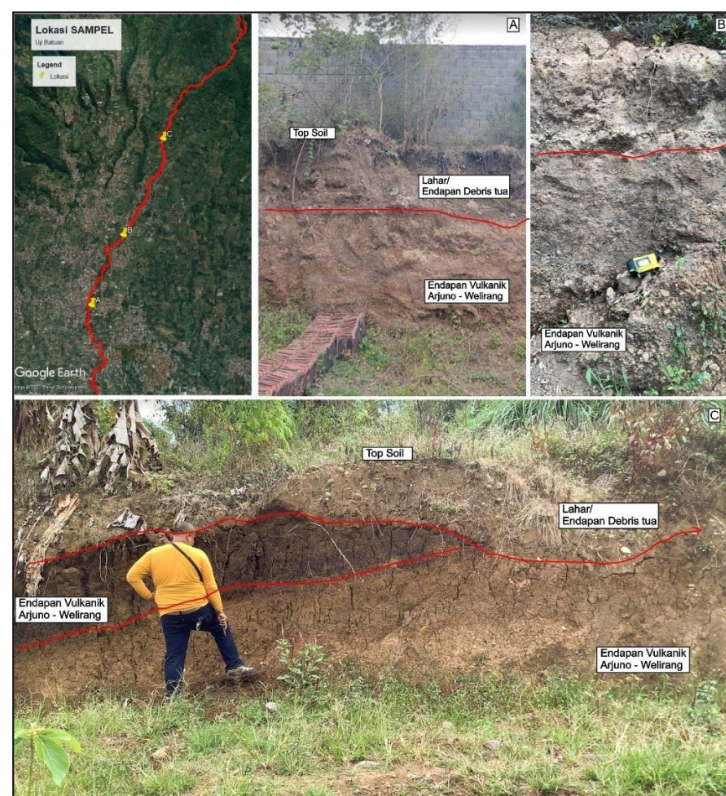
Pengamatan batuan di lapangan secara umum batuan yang dijumpai merupakan batuan vulkanik G. Arjuno Welirang berupa tuff dan breksi, dan lahar/endapan aliran debris lama. Karakter batuan tersebut relatif sama dari bagian hulu ke bagian hilir yang menunjukkan karakter batuan yang relatif seragam (Gambar 7). Secara setempat batuan dijumpai pelapukan dari tuff berwarna kecoklatan, sebagian lapuk dan berubah menjadi tanah lapukan (Gambar 7). Diatasnya dijumpai endapan lahar berupa fragmen andesit, terpilah buruk, sebagian sudah mengalami proses pelapukan di bagian atas. Endapan lahar yang menumpang pada tanah lapukan menunjukkan bahwa daerah ini pernah mengalami kejadian aliran bahan rombakan di masa lampau.

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada 3 lokasi mewakili masing masing di bagian hulu, tengah, dan hilir dengan hasil pengujian sesuai dengan Tabel 1.

Hasil uji laboratorium menjadi salah satu input parameter pemodelan aliran bahan rombakan. Nilai rerata *bulk density* menjadi parameter input berat jenis. Sedangkan sudut geser dalam menjadi salah satu acuan untuk parameter friksi (μ).



Gambar 6. Penampang morfologi pada daerah inisiasi banjir bandang.



Gambar 7. Pengamatan litologi di lapangan dan lokasi pengambilan Contoh Batuan.

Pemodelan aliran bahan rombakan menggunakan RAMMS dilakukan dengan memasukkan input parameter yang digunakan. DEM yang digunakan bersumber dari DEMNAS. Untuk tampilan 2D dipergunakan hillshade dari DEM

untuk data orthophoto. Area inisiasi didapatkan dari analisis morfologi yaitu area lembah perpotongan dari 2 anak sungai yang menjadi tempat bendung alam. Volume didapatkan dari analisis morfologi yaitu 16.020 m³. Densitas

Tabel 1. Hasil Uji Contoh tanah

Sample No.		: ATAS (C)	: TENGAH (B)	: BAWAH (A)
DENSITY TEST				
Wt. Ring + Wet Soil	gr	105,37	118,19	134,67
Wt. Ring		47,96	47,96	47,96
Vol. Wet Soil (Vol. Ring)		60,38	60,38	60,38
BULK DENSITY (gm)		0,951	1,163	1,436
TRIAxIAL TEST				
ϕ°		7,71	9,53	10,40

material didapatkan berdasarkan uji densitas batuan yaitu 1183 gr/cm³. Sudut geser dalam didapatkan dari uji triaxial tanah didapatkan sudut rerata 9.214° sehingga tan (9.214) adalah 0.16. Nilai tersebut menjadi acuan awal untuk input parameter friksi untuk μ (*dry-Coulomb type friction*). Pemodelan dilakukan dengan variasi kalibrasi parameter *dry-Coulomb type friction* (μ) dan *viscous-turbulent friction* (ξ) dengan nilai (μ) dari 0,16 – 0.01 dengan interval 0.04 sedangkan (ξ) 100 – 900 dengan interval 200. Nilai parameter friksi menjadi skenario model aliran apakah pekat atau cair. Untuk waktu aliran dibuat hingga 21600 detik dengan asumsi model aliran dibuat 6 jam dari area inisiasi hingga daerah pengendapannya. Input parameter dan hasil pemodelan dapat dilihat pada tabel 2 dan 3.

Hasil model untuk nilai μ (Mu) 0.16 dan 0.12 menunjukkan model yang tidak valid dengan area landaan tidak mencapai target lokasi bencana (lokasi korban) serta aliran yang *low flux* (model aliran berhenti sebelum mencapai waktu yang ditetapkan). Model untuk nilai μ (Mu) 0.08 tidak valid karena aliran model yang *low flux*. Model untuk nilai μ (Mu) 0.04 menjadi model yang valid dibandingkan yang lain karena mencapai target lokasi bencana dan

landaan yang tidak *overflow*. Sedangkan untuk μ (Mu) 0.01 menunjukkan model yang tidak valid karena landaan yang *overflow* (Gambar 8).

Untuk model dengan μ (Mu) 0.04 dibandingkan dengan lokasi pengamatan di lokasi bencana di Desa Bulukerto. Hasilnya menunjukkan waktu (t) aliran hingga menuju lokasi bencana didapatkan hasil 5400 detik untuk varian xi 500, 700, dan 900. Sedangkan untuk varian 100 dan 300 membutuhkan waktu yang lebih lama yaitu 7200 dan 6300 detik. Namun untuk varian 700 dan 900 adalah varian yang lebih turbulen dengan kecepatan dan tekanan maksimal yang lebih tinggi. Sehingga varian dengan xi 500 merupakan varian model yang paling mendekati dengan aliran bencana. Area landaan model aliran tersebut secara umum mendekati dengan aliran bahan rombakan 2021.

Hasil model menunjukkan bagaimana pengaruh parameter friksi μ (Mu) dan ξ (xi) terhadap area landaan dan panjang landaan. Varian nilai μ secara umum menunjukkan semakin kecil μ maka panjang landaan dan luas meningkat. Sedangkan variasi nilai xi berpengaruh pada perubahan kecepatan dan tekanan aliran.

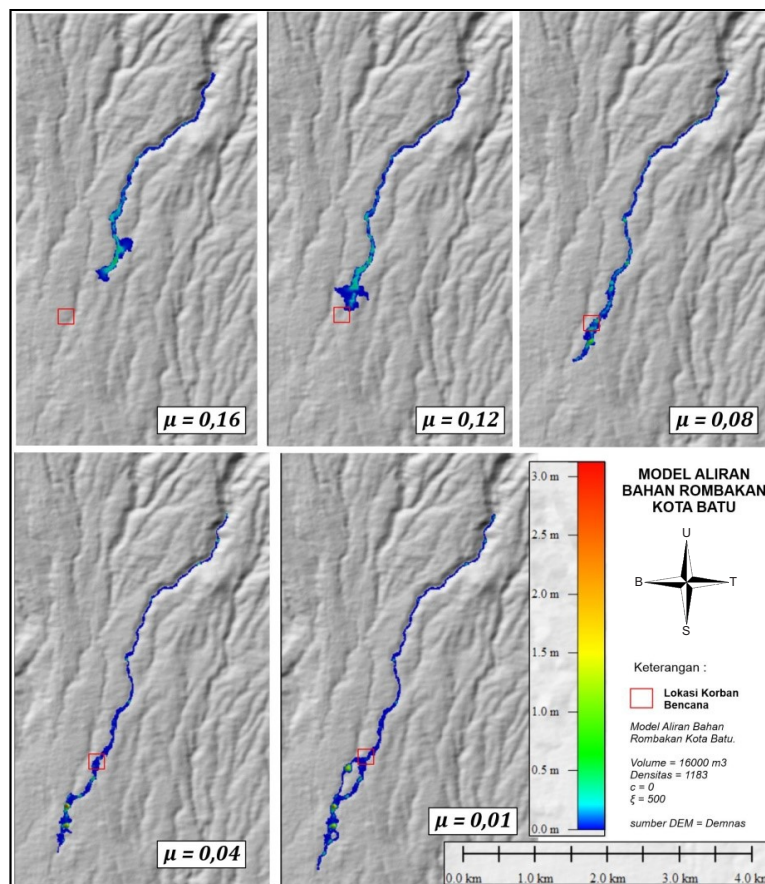
Pengujian model menunjukkan model dengan $\mu = 0.04$ dan $\xi = 500$ memberikan hasil yang paling sesuai dibandingkan hasil model yang lain. Nilai parameter friksi tersebut bersifat lokal dan dapat berbeda-beda di daerah lain tergantung dengan karakter aliran bahan rombakan yang dimodelkan. Hasil kalibrasi parameter di Morrone Ridge, Italia (Calista *et al*, 2020) menghasilkan nilai $\mu = 0.17$ dan $\xi = 175$. Berbeda dengan pemodelan di Himalaya (Dash *et al*, 2021) menghasilkan nilai $\mu =$

Tabel 2. Input Parameter RAMMS

Volume	16020 m ³
Densitas	1,183
Kohesi	0
μ	0.01, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16
ξ	100,300,500,700,900
t	21600 (s)

Tabel 3. Hasil Pemodelan RAMMS

Friction Parameter		panjang landa (km)	luas landa (m ²)	Max velocity (m/s)	Max Flow Height (m)	Max P (kPa)	t bencana (s)	v bencana (m/s)	h bencana (m)	Keterangan
Mu	Xi									
0,16	100	2,8	166126.35	7.75	9.509	71.083				Model Tidak Valid (Landaan Tidak Mencapai lokasi bencana)(Low Flux)
0,16	300	2,73	157919.2	8.738	9.596	90.328				
0,16	500	2,73	158329.56	9.219	9.613	100.564				
0,16	700	2,66	151011.52	9.474	9.619	106.204				
0,16	900	2,66	150874.73	9.626	9.623	109.635				
0,12	100	3,33	187601.72	7.83	9.528	72.68				Model Tidak Valid (Landaan Tidak Mencapai lokasi bencana)(Low Flux)
0,12	300	3,22	178163.5	9.065	9.613	97.226				
0,12	500	3,21	178368.68	9.524	9.629	107.321				
0,12	700	3,18	170229.9	9.767	9.635	112.872				
0,12	900	3,18	170229.92	9.910	9.639	116.184				
0,08	100	4,21	216643.52	7.923	9.546	74.264				Model Tidak Valid (Low Flux)
0,08	300	4,24	221114.24	9.358	9.629	103.603				
0,08	500	4,22	213385.84	9.81	9.644	113.913				
0,08	700	4,24	215095.67	10.103	9.651	120.767				
0,08	900	4,37	226927.64	10.554	9.655	131.777				
0,04	100	4,64	239990.68	8.03	9.56	76.38	7200	1	0.1 - 1.5	valid
0,04	300	4,81	237870.5	9.64	9.64	110.001	6300	1.47	0.1 - 1.6	valid
0,04	500	4,85	238622.83	10.126	9.66	121.306	5400	1.7	0.1 - 1.7	valid
0,04	700	4,9	240401.04	10.735	9.666	136.332	5400	1.9	0.1 - 1.8	valid (turbulens)
0,04	900	4,9	242589.61	11.592	9.669	158.973	5400	2.1	0.1 - 1.9	valid (turbulens)
0,01	100	4,63	234587.64	08.22	9.57	80.08				Model Tidak Valid (Landaan overflow)
0,01	300	4,63	237870.5	9.829	9.656	114.3				
0,01	500	4,64	230894.43	10.477	9.670	129.87				
0,01	700	4,64	232604.25	11.413	9.675	154.099				
0,01	900	4,65	230210.5	12.34	9.678	180.173				

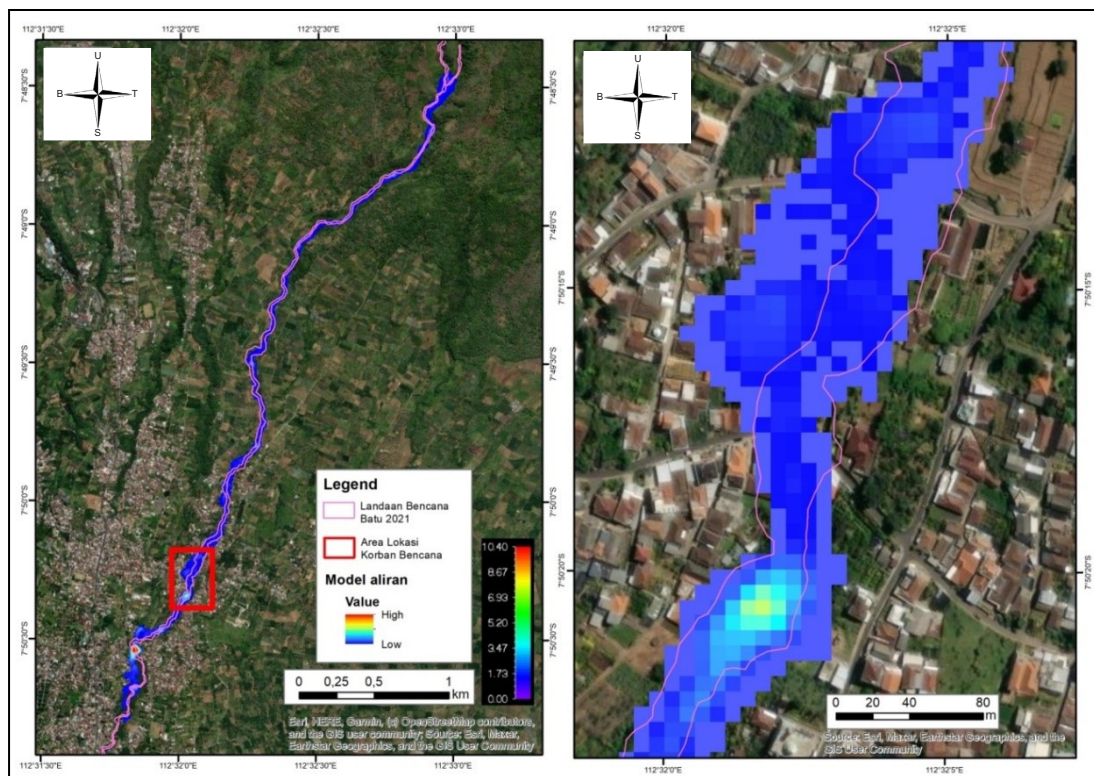


Gambar 8. Hasil model aliran dengan variasi μ . Model dengan $\mu = 0,04$ menunjukkan hasil yang paling mendekati dengan kondisi bencana.

0.1 dan $\xi = 400$. Artinya dalam pemodelan RAMMS kalibrasi nilai parameter friksi menjadi penting karena karakter aliran yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan RAMMS menggunakan model fase tunggal yang tidak dapat membedakan antara fase fluida dan fase padat yang memodelkan material sebagai satu aliran (Calista *et al*, 2020)

Hasil model aliran bahan rombakan untuk $\mu : 0,04$ dan $\xi : 500$ (Gambar 9) dibandingkan dengan landaan bencana tahun 2021 (Firmansyah *et al*, 2021) (Gambar 9). Hasilnya menunjukkan bahwa hasil model mengisi hampir jalur aliran bahan rombakan pada bencana 2021. Namun hasil model masih *overestimate* dengan area landaan yang melebar 5 – 30 m pada aliran sungai. Hasil tersebut juga dipengaruhi oleh resolusi DEMNAS yang masih belum sesuai dengan kondisi asli lapangan. Sedangkan waktu tempuh dari titik

inisiasi hingga lokasi bencana dibutuhkan 5400 s atau 90 menit. Sedangkan berdasarkan informasi dari penduduk lokal dan BPBD Kota Batu menyebutkan waktu hingga 2 jam kejadian aliran bahan rombakan terjadi. Area landaan hingga total waktu pemodelan 6 jam menjangkau panjang hingga 4.5 km dan luas 238.622,83 m². Area landaan masih mungkin dapat lebih jauh lagi apabila waktu model aliran ditambah. Pada ujung area pengendapan dijumpai pengendapan hingga tebal 3 m serta beda alur yang kurang sesuai dengan kondisi lapangan. Hal tersebut disebabkan dipengaruhi oleh resolusi DEMNAS yang masih belum sesuai dengan kondisi asli lapangan. Sehingga pada beberapa area dijumpai alur yang sedikit berbeda khususnya di ujung area pengendapan. Selain itu pada kasus endapan hingga 3 m disebabkan adanya cerukan pada DEMNAS di jalur aliran. Kondisi tersebut menyebabkan



Gambar 9. Model aliran bahan rombakan untuk $\mu : 0.04$ dan $\xi : 500$ (kiri). Inset lokasi bencana (kanan).

material mengisi ceruk lebih lama dan sulit untuk mengalir. Sehingga faktor DEM mempunyai peranan yang cukup vital untuk pemodelan aliran bahan rombakan. Resolusi DEM yang semakin baik akan memberikan model yang lebih detail. Namun resolusi DEM yang semakin tinggi akan membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama dan lambat.

KESIMPULAN

Hasil model dengan RAMMS sangat dipengaruhi oleh parameter friksi (μ (Mu) dan ξ (xi)) serta resolusi DEM. Varian nilai μ secara umum menunjukkan semakin kecil μ maka panjang landaan dan luas meningkat. Sedangkan variasi nilai ξ berpengaruh pada perubahan kecepatan dan tekanan aliran. Resolusi DEM yang semakin baik akan memberikan model yang lebih detail. Hasil model aliran bahan rombakan untuk $\mu : 0.04$ dan $\xi : 500$ secara umum mendekati dengan landaan aliran bahan rombakan 2021 dengan panjang landaan 4.85 km dan luas

238.622,83 m². Parameter friksi yang didapatkan dari pemodelan dapat dimanfaatkan untuk simulasi aliran bahan rombakan lain di kawasan selatan G. Arjuno Welirang untuk mengetahui potensi ancaman bahaya aliran bahan rombakan khususnya di wilayah Kota Batu, Jawa Timur. Hasil simulasi aliran bahan rombakan dapat digunakan untuk persiapan dan kesiapsiagaan mitigasi bencana aliran bahan rombakan khususnya di wilayah Kota Batu di selatan Gunung Arjuno Welirang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pusat Vulkanologi Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) yang telah memberi kesempatan untuk melakukan penyelidikan lapangan. Terima kasih untuk BPBD Kota Batu dan perangkat Desa Bulukerto untuk bantuan dan pendampingan selama kegiatan pengambilan data di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Åberg, A., Aaron, J., Hirschberg, J., de Haas, T., McArdell, B., and Kirchner, J.: LiDAR-based investigation of debris flow superelevation and velocity, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-12134, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12134>, 2023.
- Åberg, A., Aaron, J., McArdell, B. W., Kirchner, J., de Haas, T., & Hirschberg, J. (2024). Field validation of the superelevation method for debris-flow velocity estimation using high-resolution lidar and UAV data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129, e2024JF007857. <https://doi.org/10.1029/2024JF007857>
- Bartelt, P., Bieler C., Bühler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Graf C., & Schneider, M. 2017. RAMMS: debris flow user manual. 15-16
- Bezák, N., Jez, J., Sodnik, J., Jemec A., Čilič, M., and Mikoš, M. (2020). An extreme May 2018 debris flood case study in northern Slovenia: analysis, modelling, and mitigation. *Landslides* 17, 2373–2383. doi:10.1007/s10346-019-01325-1
- Bolliger, D., Schlunegger, F., and McArdell, B. W. (2023). Modelling debris flow runout considering grain size distributions of debris flows at the Illgraben, Swiss Alps, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2023-126>,
- Calista, Monia, Valeria Menna, Vania Mancinelli, Nicola Sciarra, and Enrico Miccadei. 2020. "Rockfall and Debris Flow Hazard Assessment in the SW Escarpment of Montagna del Morrone Ridge (Abruzzo, Central Italy)" *Water* 12, no. 4: 1206. <https://doi.org/10.3390/w12041206>
- Caviezel A, Lu G, Demmel S, Ringenbach A, Bühler Y, Christen M, Bartelt P (2019) In RAMMS::ROCKFALL- a modern 3-dimensional simulation tool calibrated on real world data, ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA: 2019; pp ARMA-2019-0223
- Choi, SK., Park, JY., Lee, DH. *et al.* Assessment of barrier location effect on debris flow based on smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation on 3D terrains. *Landslides* 18, 217–234 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01477-5>
- Christen, M., Kowalski, J., & Bartelt, P. (2010c). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63 (1-2), 1-14
- Dash, R.K., Kanungo, D.P. & Malet, J.P. (2021). Runout modelling and hazard assessment of Tangni debris flow in Garhwal Himalayas, India. *Environ Earth Sci* 80, 338. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09637-z>
- Firmansyah, M.N. & Nursalim, A., 2021, *Laporan Penyelidikan Tanggap Darurat Gerakan Tanah Kota Batu Jawa Timur*, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung (Tidak dipublikasikan)
- Frank, Florian & McArdell, Brian & Oggier, Nicole & Baer, Patrick & Christen, Marc & Vieli, Andreas. (2017). Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: Sensitivity testing of field-data-based entrainment model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 17. 801-815.
- Gan J, Zhang YS (2019) Numerical simulation of debris flow runout using Ramms: a case study of Luzhuang Gully in China. *Computer Model Eng Sci*:981–1009
- Graf, C.; Christen, M.; McArdell, B.W.; Bartelt, P. (2021). An overview of a decade of applied debris-flow runout modeling in Switzerland: Challenges and recommendations. In *Proceedings of the Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Monitoring, Modeling, and Assessment—Proceedings of the 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Golden, CO, USA; pp. 685–692
- Grelle, G.; Soriano, M.; Revellino, P.; Diodato, N.; Guadagno, F.M. Space-time prediction of rainfall-induced shallow

- landslides through a combined probabilistic/deterministic approach, optimized for initial water table conditions. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2014**, 73, 877–890
- Huang, Y., Sun, J., & Zhu, C. (2022). Mechanism and Prevention of Debris Flow Disaster. *Water*, 14(7), 1143. <https://doi.org/10.3390/w14071143>
- Hungr, O. (2005) Classification and Terminology. In: Jakob, M. and Hungr, O., Eds., Debris Flow Hazards and Related Phenomena, Springer Verlag, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_2
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11, 167–194 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Iverson, R.M. (2005). Debris-flow mechanics. In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_6
- Kowalski, J. (2008). *Two-Phase Modeling of Debris Flows*. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Kumar, S. , Sharma, A. and Singh, K. (2025). RAPID MASS MOVEMENT SIMULATIONS BASED ANALYSIS OF LANDSLIDES ALONG NATIONAL HIGHWAY 205 IN HIMACHAL PRADESH, INDIA. *Journal of Mining and Environment*, 16(1), 161-182. doi: 10.22044/jme.2024.14667.2771
- Liu, Bo & Hu, Xiewen & Ma, Guotao & He, Kun & Wu, Mingyan & Liu, Dingyi. (2021). Back calculation and hazard prediction of a debris flow in Wenchuan meizoseismal area, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80. 10.1007/s10064-021-02127-3.
- Mikoš, M., & Bezak, N. (2021). Debris Flow Modelling Using RAMMS Model in the Alpine Environment With Focus on the Model Parameters and Main Characteristics. *Frontiers in Earth Science*.
- Noviardi, N., Qodri, M. F. and Rizqi, A. H. F. (2021) “Pengolahan Data Digital Elevation Model Untuk Pembuatan Peta Aliran Debris Pada Sungai Palung Pulau Lombok Provinsi Nusa Tenggara Barat”, *ReTII*, pp. 509 - 516.
- Oh, C.-H., Choo, K.-S., Go, C.-M., Choi, J.-R., & Kim, B.-S. (2021). Forecasting of Debris Flow Using Machine Learning-Based Adjusted Rainfall Information and RAMMS Model. *Water*, 13(17), 2360. <https://doi.org/10.3390/w13172360>
- Pánek, T. (2020). Landslides and related sediments. *Encyclopedia of Geology*, 2nd ed.; Alderton, D., Elias, SA, Eds, 708-728.
- Qodri, M., Noviardi, N., Rizqi, A., & Mase, L. (2021). Numerical Modelling Based on Digital Elevation Model (DEM) Analysis of Debris Flow at Rinjani Volcano, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 7(3), 279 - 288.
- Quan Luna, B., (2007). *Assesment and modelling of two lahars caused by “Hurricane Stan” at Atitlan, Guatemala*, October 2005. M. Sc. Thesis, University of Oslo, Oslo
- Reid, M. and Ochiai, H.: Abrupt debris-flow mobilization in a hillslope experiment, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-4021, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-4021>, 2023.
- Rengers, Francis & Mcguire, Luke & Barnhart, Katherine & Youberg, Ann & Cadol, Daniel & Gorr, Alexander & Hoch, Olivia & Beers, Rebecca & Kean, Jason. (2023). The influence of large woody debris on post-wildfire debris flow sediment storage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 23. 2075-2088. 10.5194/nhess-23-2075-2023.
- Revellino, P., Hungr, O., Guadagno, F.M. *et al.* Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania region, Italy. *Env Geol* **45**, 295–311 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0885-z>
- Santosa, S. dan Suwarti, T., 1992, Peta Geologi Lembar Malang, Jawa Timur, skala 1 : 100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

- Scheidl, C., Rickenmann, D., & Mcardell, B. W. (2013). Runout Prediction of Debris Flows and Similar Mass Movements. *Landslide Science and Practice*, 3, 221- 227.
- Shafique, Muhammad & Ahmad, Naseem & Luqman, Mian. (2021). Evaluating the Landslides Characterization and Deformation Using Multi-Temporal Uav Imageries in Northern Pakistan. 10.21203/rs.3.rs-475414/v1.
- Simoni, A., Mammoliti, M., 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
- Tsunetaka, H., Hotta, N., Imaizumi, F. & Hayakawa, Y.S. (2024) Debris-flow fan channel avulsions: An important secondary erosional process along the Ichino-sawa torrent, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(14), 4759–4775. Available from: <https://doi.org/10.1002/esp.5994>
- Wang J, Yang S, Ou G, Gong Q, Yuan S (2018) Debris flow hazard assessment by combining numerical simulation and land utilization. *Bull Eng Geol Environ* 77(1):13–27
- Xie, Y., Zhou, G.G., Cui, K.F., & Lu, X. (2022). Numerical investigation of debris flows using a two-phase continuum model incorporating a visco-inertial rheology. *Engineering Geology*.
- Yan, Y., Zeng, C., Cui, Y., Hu, S., Wang, X., & Tang, H. (2023). Real-time Monitoring and Analysis of Debris Flow Events: Insight from seismic signal features and dynamic flow characteristics. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2015>
- Zakaria, Z., Mulyo, A., Muslim, D. and Jihadi, L.H., 2017, July. The role of geological forensic methods for disaster assessment in Cigintung, West Java. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1857, No. 1). AIP Publishing.