

Simulasi aliran bahan rombakan di Gunung Bawakaraeng, Sulawesi Selatan

Sumaryono dan Yunara Dasa Triyana

Badan Geologi

Jln. Diponegoro 57 Bandung 40122

SARI

Aliran bahan rombakan (*debris flow*) adalah fenomena di mana percampuran air, lumpur, dan kerikil mengalir dengan kecepatan tinggi. Karena aliran *debris flow* memiliki viskositas dan kecepatan yang tinggi, maka bersifat sangat merusak karena mengangkut material yang dilalui di sepanjang sungai sehingga volume dan energinya semakin meningkat dan dapat merusak rumah, jembatan, dan infrastruktur, dan mengakibatkan korban jiwa. Simulasi numerik penting untuk memastikan bahwa bangunan penahan bekerja secara efisien sebelum dilaksanakan pekerjaan konstruksi seperti dam sabo. Makalah ini menyajikan simulasi numerik dua dimensi dengan menggunakan Kanako, GUI dilengkapi simulator aliran debris, yang memungkinkan visualisasi dengan baik dan mudah. Kanako (ver. 2.0) diterapkan pada studi kasus di Gunung Bawakaraeng, Sulawesi Selatan, Indonesia. Simulasi diuji dalam berbagai kondisi termasuk kasus tanpa dam sabo dan dengan dam sabo seri. Hasil simulasi menunjukkan jika tidak ada dam sabo di Kampung Paragang, Lengkesse, dan Raulo berpotensi terlanda *debris flow*. *Over flow* dan *debris flow* dapat ditanggulangi dengan 4 seri dam sabo tipe celah.

Kata kunci: aliran bahan rombakan, pencegahan efektif, simulasi numerik, dam sabo

ABSTRACT

Debris flow is a phenomenon in which a mixture of large quantities of water, mud, and gravel flows down stream in high speed. Due to its high density and velocity, debris flow is very devastating, it carries along every things on its path that increases its volume and energy, hence it can destroy settlements, bridges, infrastructures as well as loss of lives. Numerical simulation is important to ensure that retaining construction works efficiently before sabo dam is built. This paper presents two-dimensional numerical simulations of a debris flow using Kanako, a user-friendly GUI-equipped with debris flow simulator that allows good visualization and easy explanation. Kanako (Ver. 2.0) was applied as to a case study at Bawakaraeng Mountain, south Sulawesi, Indonesia. Simulations were tested in various conditions with and without sabo dams including sabo dam series. The simulation results showed that without sabo dams, Paragang, Lengkesse and Raulo are potentially affected by debris flow. Slit sabo dam of 4 series type is the most appropriate construction from being affected by over flow and debris flow.

Keywords: debris flow, effective countermeasure, numerical simulation, sabo dam

Naskah diterima 9 September 2011, selesai direvisi 18 November 2011

Korespondensi, email: sumaryono@vsi.esdm.go.id

PENDAHULUAN

Kipas aluvial adalah kerucut yang berbentuk kipas dengan lereng landai terbentuk mulai dari ribuan sampai jutaan tahun yang lalu oleh pengendapan sedimen terkikis di pegunungan. Kipas aluvial mempunyai kondisi yang sangat aktif terutama terhadap banjir dan *debris flow* yang dapat terjadi secara episodik. Bencana alam yang utama di daerah kipas aluvial adalah banjir dan *debris flow* yang disebabkan oleh intensitas curah hujan yang tinggi dan berlangsung lama. Banjir dan *debris flow* di kipas aluvial umumnya terjadi tanpa peringatan dini karena memiliki kecepatan dan kemampuan mengangkut sedimen yang tinggi. *Debris flow* juga dapat terjadi karena penumpukan sedimen di hulu sungai atau terjadinya bendungan alam di hulu sungai. Gunung Bawakaraeng di Sulawesi Selatan pernah terjadi keruntuhan dinding Gunung Bawakaraeng yang mengakibatkan 33 orang meninggal, 10 rumah dan 1 sekolah hancur tertimbun, puluhan hektar sawah tertimbun, puluhan rumah terancam, dan ribuan orang mengungsi. Material runtuh banyak terakumulasi di hulu sungai Jeneberang sehingga mengakibatkan sering terjadi *debris flow* atau *mud flow* di daerah ini. Oleh karena itu diperlukan usaha mengurangi potensi bahaya aliran debris yang sewaktu-waktu dapat terjadi. Simulasi 2-Dimensi Kanako, dapat digunakan untuk mengetahui efisiensi pencegahan sebelum perencanaan konstruksi dan mudah memperoleh visualisasi maupun penjelasan yang baik dan mudah dipahami tentang efek *debris flow*.

Lokasi Penelitian

Gunung Bawakaraeng memiliki ketinggian sekitar 2.830 m di atas permukaan laut terletak sekitar 75 km dari Kota Makasar. Secara administratif termasuk wilayah Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan, (Gambar 1). Daerah lereng barat Gunung Bawakaraeng ini hulu Sungai Jeneberang yang bagian hilirnya terdapat waduk Bili-Bili yang merupakan daerah tangkapan air untuk Kabupaten Gowa dan Makasar.

Pemodelan *Debris Flow*

Model simulasi ini menggunakan model integrasi antara simulasi numerik 1-Dimensi dan 2-Dimensi. Simulasi 1-Dimensi digunakan pada sungai/selokan dengan masukan *riverbed material* dan akumulasi material di hulu Sungai Bawakaraeng dengan variasi beberapa tipe dam, antara lain adalah dam tertutup dan dam celah atau grid (Satofuka dan Mizuyama, 2005). Perhitungan pada daerah landaan seperti kipas aluvial menggunakan simulasi 2-Dimensi. Perhitungan atau rumus *debris flow* untuk 2-Dimensi berdasarkan pada persamaan momentum, persamaan kontinuitas (*continuation equation*), persamaan *riverbed deformation*, persamaan erosi/deposisi, dan *riverbed shearing stress* (Takahashi and Nakagawa, 1991).

persamaan kontinuitas (*continuation equation*) untuk volume total *debris flow* adalah:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = iz \quad (1)$$



Gambar 1. Lokasi penyelidikan gerakan tanah di Gunung Bawakaraeng, Kecamatan Tinggi Moncong, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.

persamaan kontinu (*continuation equation*) untuk menentukan partikel k adalah:

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{\partial C_k h u}{\partial x} + \frac{\partial C_k h v}{\partial y} = i_k C_* \quad (2)$$

Dalam penentuan partikel digunakan rata-rata ukuran butir material sedimen. Fenomena arah aliran dalam sumbu-x menggunakan persamaan momentum, sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta_{wx} - \frac{\tau_x}{\rho h} \quad (3)$$

Fenomena arah aliran sumbu-y (arah aliran memotong) menggunakan persamaan momentum, sebagai berikut:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \sin \theta_{wy} - \frac{\tau_y}{\rho h} \quad (4)$$

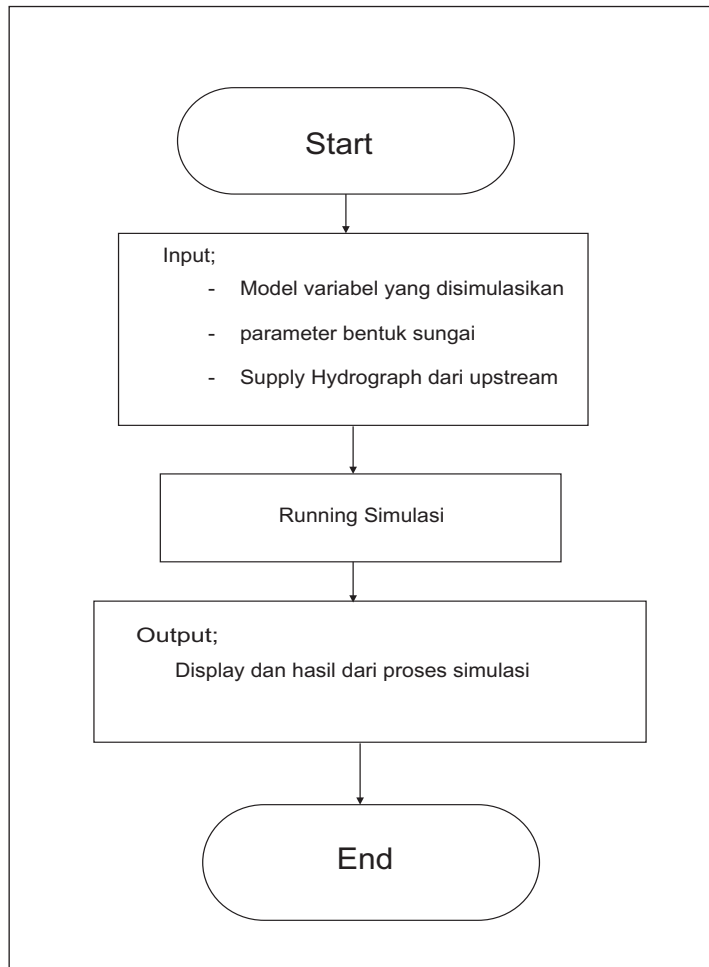
Persamaan untuk menentukan perubahan elevasi permukaan dasar sungai sebagai berikut:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

Untuk persamaan (1) sampai persamaan (5), h adalah kedalaman aliran, u adalah kecepatan aliran arah sumbu-x, v adalah kecepatan aliran arah sumbu y, C_k adalah konsentrasi sedimen di dalam volume aliran *debris flow*, z adalah ketinggian dasar sungai, t adalah waktu, i adalah kecepatan erosi/deposisi, i_k adalah kecepatan erosi/deposisi sedimen/partikel k, g adalah percepatan gravitasi, ρ adalah densitas cairan, θ_{wx} dan θ_{wy} adalah gradien aliran permukaan pada sumbu x dan sumbu y, C^* adalah konsentrasi sedimen dengan volume pada lapisan dasar yang bergerak (*moveable bed layer*), τ_x dan τ_y adalah tegangan geser dasar sungai pada arah sumbu x dan sumbu y.

Dalam pemodelan ini digunakan dua skenario, skenario pertama kondisi sungai tanpa dam sabo, sedangkan skenario ke dua kondisi dengan dam sabo. *Supply material* dari *debris*

flow diperkirakan lebih kurang 30 sampai 60 menit. Masing-masing kasus disimulasikan dengan kondisi nyata Sungai Jeneberang (Gambar 2).



Gambar 2. Prosedur simulasi *debris flow*.

Variabel yang dimasukkan

Parameter yang digunakan dalam simulasi ini ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variabel Pemodelan *Debris Flow*

Parameter/Variabel	Nilai	Satuan
Waktu simulasi	1800	detik
Interval perhitungan	0,01	detik
Diameter butir	0,1	m
Densitas <i>bed material</i>	2550	kg/m ³
Densitas fluida (<i>water and mud, silt</i>)	1180	kg/m ³
Konsentrasi material yang bergerak	0,6	
<i>Gravity</i>	9,8	m/s ²
Koefisien rata-rata erosi	0,0007	
Koefisien rata-rata akumulasi	0,05	
Koefisien akumulasi rata-rata berkaitan <i>inertial force</i>	0,9	
Kedalaman minimum muka of <i>debris flow</i>	0,05	m
Minimum <i>flow depth</i>	0,01	m
Koefisien Manning's roughness	0,03	
Pai	3,14159265358	
<hr/>		
Parameter - parameter yang digunakan di area 2D;	Nilai	Satuan
Arah <i>inflow</i>	0	
Sumbu pusat <i>inflow</i> pada area 2D [jc]	10	
Interval 2D-x titik perhitungan	5	m
Interval 2D-y titik perhitungan	5	m
Kedalaman minimum muka <i>debris flow</i> di 2D	0,01	m
Jumlah titik perhitungan pada arah sumbu x	60	
Jumlah titik perhitungan pada arah sumbu y	60	
<hr/>		
Parameter-parameter yang digunakan di area 1D;	Nilai	Satuan
Jumlah titik perhitungan di area 1D	49	
Interval titik perhitungan di area 1D	20	m
Kedalaman minimum muka <i>debris flow</i> di area 1D	0,05	m

HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi dan tingkat erosi

Daerah penyelidikan merupakan lereng barat laut dan selatan Gunung Bawakaraeng dengan relief yang terjal mempunyai kemiringan lereng antara 30° hingga hampir tegak, dan ketinggian tempat antara 1000 – 2830 m di atas permukaan laut. Material longsor tahun 2004 yang menutupi lembah sungai yang merupakan salah satu hulu Sungai Jeneberang berpotensi terjadi *debris flow* atau *mud flow*. Morfologi sungai akibat longsor membentuk Sungai yang sangat curam dan mempunyai tingkat erosi samping yang tinggi.

Kondisi Geologi

Geologi di sekitar Gunung Bawakaraeng dibangun oleh Endapan Vulkanik Gunung Lompobatang yang terdiri dari lava, tufa lahar dan breksi vulkanik yang telah mengalami pelapukan pada bagian permukaannya menjadi lempung lanauan hingga pasir lanauan berwarna kuning kecoklatan hingga coklat kehitaman, bersifat gembur, dengan ketebalan antara 0,5 – 3 m. Batuan lainnya yang terdapat di sekitar lokasi penelitian antara lain Endapan Aluvium, Endapan Sumbat, Endapan Erupsi Parasitik, Anggota Breksi, Endapan Vulkanik Baturepe, dan Formasi Camba. Penyebaran struktur geologi di puncak Gunung Bawakaraeng sangat intensif berupa sesar normal dengan arah sesar utara – selatan dan barat laut – tenggara. Dengan keberadaan struktur geologi ini menyebabkan kekuatan batuan menjadi berkurang dan cenderung mudah runtuh jika dipicu curah hujan yang tinggi atau getaran yang intensif.

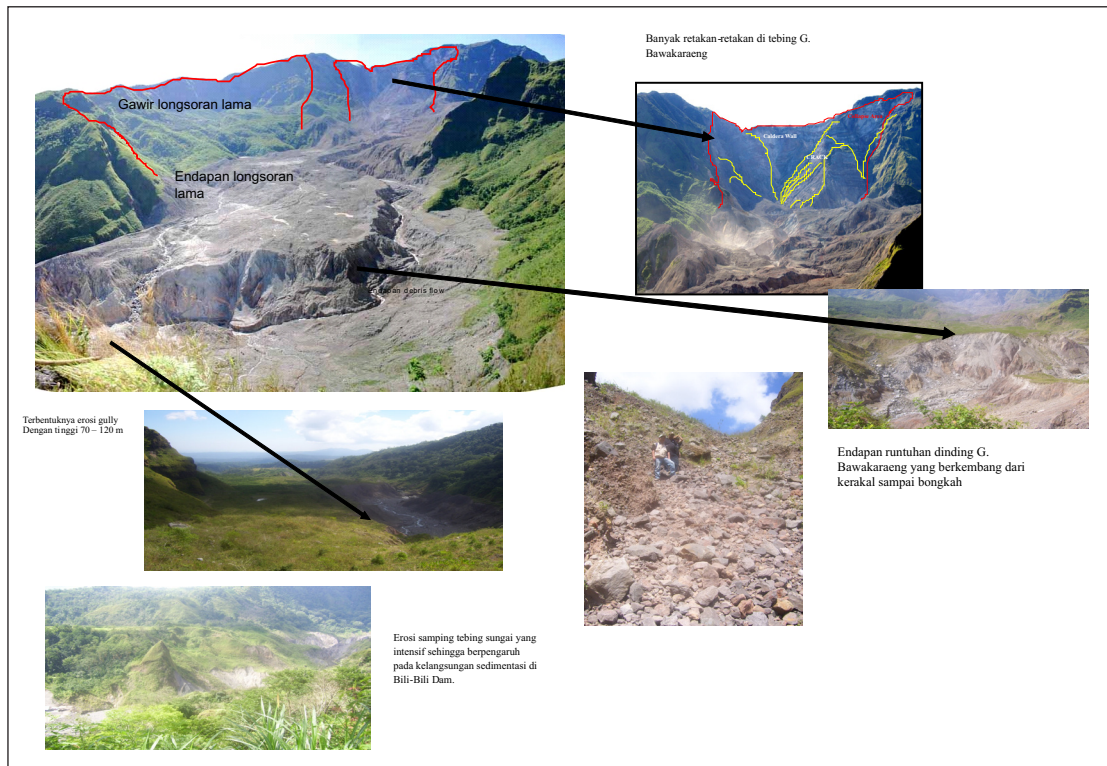
Kondisi Keairan

Daerah penyelidikan banyak terdapat alur sungai salah satunya Sungai Jeneberang yang mempunyai tingkat erosi yang tinggi. Beberapa kolam kecil muncul akibat longsor/*slope collapse* pada tahun 2004 (Gambar 3 dan 4). Curah Hujan di daerah Sulawesi Selatan umumnya untuk bulan Januari - Maret berada di atas normal, sifat hujan seperti ini kadang-kadang akan berlangsung sampai bulan April, sedangkan curah hujan rata-rata tahunan daerah ini cukup tinggi, yaitu di kisaran curah hujan antara 2500 - 3500 mm/tahun. Sedangkan curah hujan dipuncak Gunung Bawakaraeng berkisar antara 3500 – 4500 mm/tahun

Kondisi Kebencanaan Geologi

Di sekitar Gunung Bawakaraeng sering terjadi bencana terutama *debris flow* atau *mud flow* karena masih banyak volume material longsor di atas Gunung Bawakaraeng. Berdasarkan citra landsat material longsor menyebar sejauh 7 km dari gawir longsor dengan lebar antara 100 – 300 m. Pada kejadian pertama, Maret 2004, ada yang menyebutkan bahwa peristiwa ini disebut runtuhnya lereng (*Slope Collapse*), yaitu longornya sebagian atau seluruh lereng suatu bukit atau dinding bukit runtuh ke bawah akibat jenuh air hujan. Runtuhnya/guguran lereng termasuk ke dalam gerakan tanah berbeda dengan guguran material gunung api karena guguran lereng ini tidak ada kaitannya dengan aktivitas gunung api.

Bencana *debris flow* atau *mud flow* di Gunung Bawakaraeng ini bisa kembali mengancam



Gambar 3. Kondisi endapan *debris flow* Gunung Bawakaraeng di aliran Sungai Jeneberang (Departemen Pekerjaan Umum, 2008)

wilayah yang berada di sekitarnya pada masa yang akan datang. Ancaman itu bertambah besar dengan volume air yang tertampung di sejumlah gawir longsoran lama Gunung Bawakaraeng dan banyaknya material longsor di Sungai Jeneberang. Data menunjukkan banyak retakan di beberapa tempat di Gunung Bawakaraeng (Tabel 2). Retakan itu makin lebar akibat pengikisan oleh aliran anak-anak Sungai Jeneberang dan curah hujan yang tinggi.

Potensi *Debris Flow* di Lereng Timurlaut Gunung Bawakaraeng

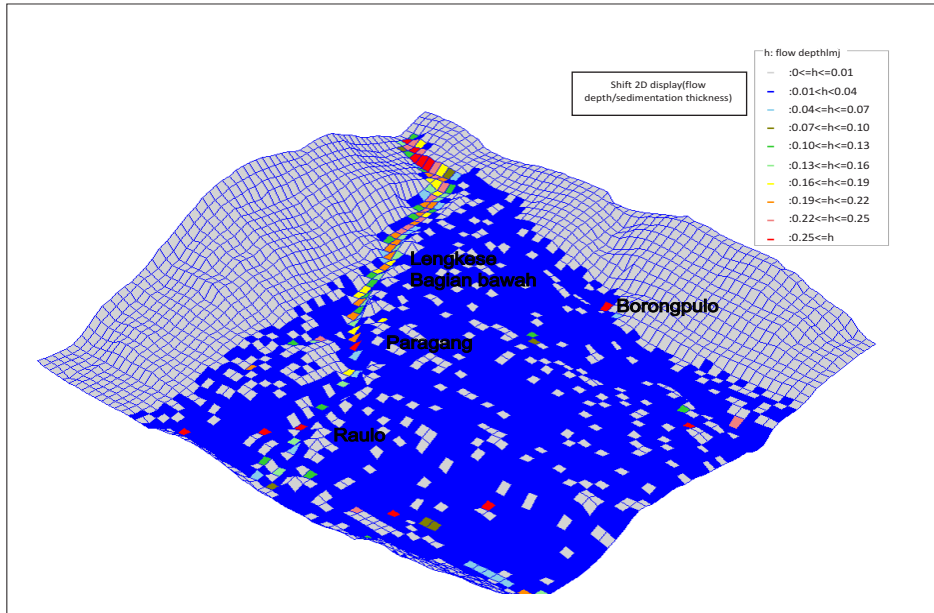
Berdasarkan simulasi numerik 2-D di sungai Jeneberang tanpa seri dam sabo dengan debit tertinggi 530 m³/detik dan volume endapan sebanyak 530.000 m³ di daerah ini masih berpotensi terjadi *debris flow* ke area perkampungan. Daerah yang berpotensi terlanda *debris flow*, yaitu Kampung Paragang dan Raulo (Gambar 5). Potensi limpasan aliran akan terjadi di Lengkes bagian bawah.



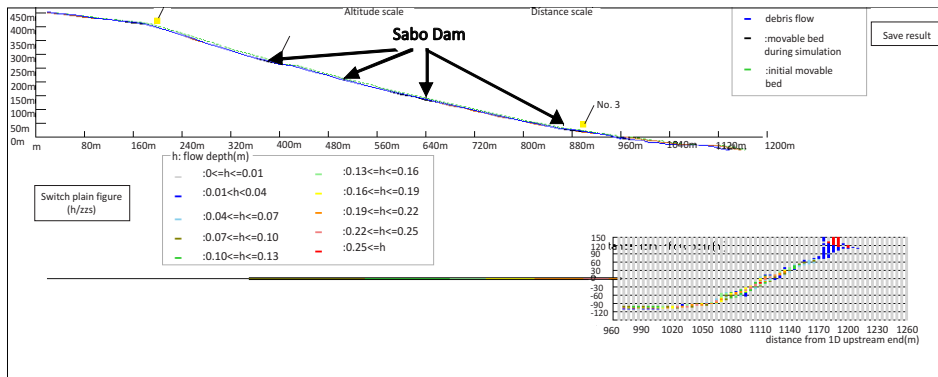
Gambar 4. a. Penyebaran endapan longsoran di bagian barat daya Gunung Bawakaraeng (Departemen Pekerjaan Umum, 2008). dan b. endapan Sungai Jeneberang yang telah menghanyutkan Jembatan Daraha (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2007).

Pembuatan dam sabo yang ada di Gunung Bawakaraeng sangat efektif untuk menampung material longsoran dan mencegah dan atau memperlambat potensi *debris flow*. Pembuatan dam sabo ini menyebabkan lereng sungai menjadi lebih landai sehingga akan memperlambat aliran sungai. Dam sabo tipe *slit* atau celah sangat cocok di daerah ini di

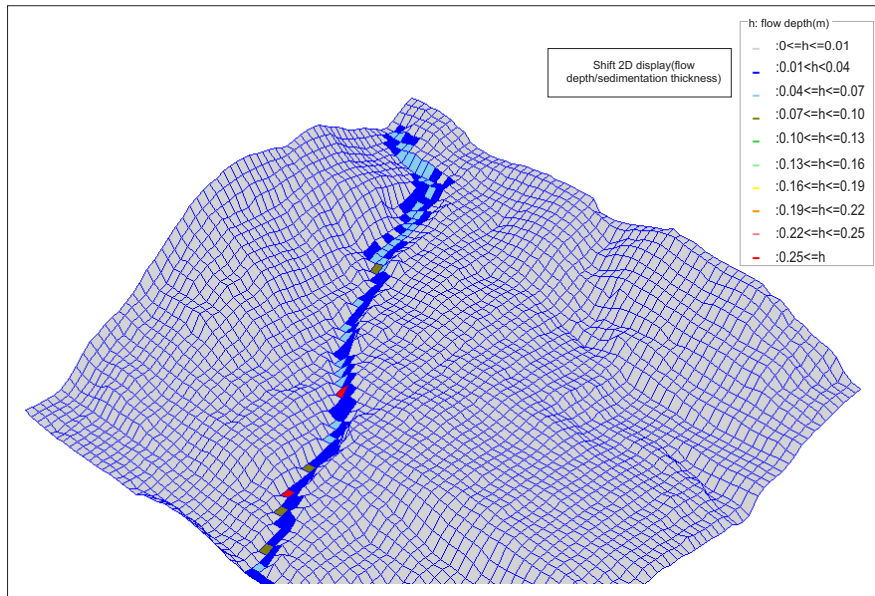
banding dengan *Screen* dam sabo. Hasil Simulasi dengan 4 seri sabo dam tipe *slit* dengan tinggi 15 m (Gambar 6) menunjukkan tidak terjadi *over flow* dan *debris flow* (Gambar 7). Dam sabo dapat mengatasi masalah sedimentasi di Dam Bili-Bili karena material longsoran dapat ditampung di dam sabo tersebut, tetapi perlu di analisis lebih lanjut



Gambar 5. Simulasi Numerik 2-D Sungai Jeneberang tanpa dam sabo, terjadi *debris flow* pada volume endapan 530.000 m³ dan debit tertinggi 530 m³/detik terjadi setelah 730 detik.



Gambar 6. Simulasi Numerik 2-D Sungai Jeneberang dengan 4 seri dam Sabo tipe *Slit* dengan volume endapan 530.000 m³ dan debit tertinggi 530 m³/detik.



Gambar 7. Simulasi numerik 2-D menunjukkan efektivitas 4 seri dam Sabo tipe *Slit* dan tidak terjadi *over flow* ataupun *debris flow*.

jika dam sabo tersebut jika diaplikasikan ke tempat/sungai lain karena efek sedimentasi di bagian bawah sungai atau *downstream* jadi berkurang sehingga berpotensi memicu erosi samping dan mengganggu stabilitas tebing kanan dan kiri sungai.

Dari identifikasi dan simulasi menunjukkan bahwa tanah longsor dan *debris flow* atau *mud flow* skala kecil berpotensi terjadi di lereng Timur laut Gunung Bawakaraeng dan masih mengancam beberapa pemukiman.

KESIMPULAN

Material longsor tahun 2004 yang menutupi hulu Sungai Jeneberang masih berpotensi

terjadi *debris flow* atau *mud flow*. Morfologi sungai akibat longsor membentuk Sungai yang sangat curam dan mempunyai tingkat erosi samping yang tinggi.

Penyebaran struktur geologi di puncak Gunung Bawakaraeng sangat intensif berupa sesar normal dengan arah sesar utara – selatan dan baratlaut – tenggara Keberadaan struktur geologi ini menyebabkan kekuatan batuan menjadi berkurang dan cenderung mudah runtuh jika dipicu curah hujan yang tinggi atau getaran yang intensif.

Berdasarkan simulasi numerik 2-D di sungai Jeneberang tanpa seri dam sabo dengan debit tertinggi 530 m³/det dan volume endapan 530.000 m³ di daerah ini masih berpotensi

terjadi *debris flow* ke area perkampungan. Potensi *over flow* terjadi di Lengkesa bagian bawah. Daerah yang berpotensi terlanda *debris flow*, yaitu Kampung Paragang, Lengkesa bagian bawah, dan Raulo. Pembuatan dam sabo yang ada di Gunung Bawakaraeng sangat efektif menampung material longsoran untuk mencegah dan memperlambat potensi *debris flow*. Pembuatan dam sabo ini menyebabkan lereng sungai menjadi lebih landai sehingga memperlambat aliran sungai atau *debris flow* atau *mud flow*. Dam sabo tipe *slit* atau celah sangat cocok di daerah ini di banding dengan *Screen* dam sabo. Hasil simulasi dengan 4 seri dam sabo tipe celah dengan tinggi 15 m, menunjukan tidak terjadi *over flow* dan *debris flow*. Dam sabo tersebut juga dapat mengatasi masalah sedimentasi di Dam Bili-Bili karena material longsoran dapat ditampung di dam sabo, tetapi perlu di analisis lebih lanjut jika dam sabo tersebut mau diaplikasikan ke tempat/sungai lain karena efek sedimentasi di bagian bawah sungai atau *downstream* jadi berkurang sehingga berpotensi memicu erosi

samping dan mengganggu stabilitas tebing kanan dan kiri sungai.

ACUAN

Departemen Pekerjaan Umum, 2008, Urgent Disaster Reduction Project For Mt. Bawakaraeng, (tidak dipublikasikan).

Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2007, Laporan Pemeriksaan Gerakan Tanah di Gunung Bawakaraeng, (tidak dipublikasikan).

Satofuka, Y. and Mizuyama, T., 2005, Numerical simulation on debris flow control by a grid dam, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 57, No. 6.

Satofuka, Y. and Mizuyama, T., 2005, Numerical simulation on a debris flow in a mountainous river with a sabo dam, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 58, No. 1.

Takahashi, T. and Nakagawa, H., 1991, Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 44, No. 3, pp.12–19.