

Diskretisasi Domain Model 2D HEC-RAS dan Estimasi Parameter Reologi Banjir Lahar di Sungai Gendol

Tabri Budi Darmawan^{1*}, Istiarto¹, Neil Andika¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, INDONESIA

*Corresponding author: tabribudidarmawan@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Aliran banjir lahar merupakan aliran *non-Newtonian* yang terdiri dari campuran air dan sedimen berkonsentrasi tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun *setup* geometri dua dimensi (2D), mengevaluasi kestabilan model geometri, dan mengestimasi parameter reologi aliran banjir lahar. Sungai Gendol yang terletak di lereng Gunung Merapi, Kabupaten Sleman menjadi lokasi penelitian. Model yang dipakai adalah tiga konfigurasi geometri *mesh*. Evaluasi hasil simulasi dilakukan terhadap kedalaman aliran dan kecepatan aliran. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa *Mesh 3* dengan ukuran *mesh* yang lebih halus dan interval waktu komputasi 0,1 detik memberikan hasil yang paling stabil dan realistis dibandingkan *Mesh 1* dan *Mesh 2*, meskipun memerlukan waktu komputasi yang lama. Estimasi parameter reologi dilakukan menggunakan beberapa metode *non-Newtonian*, yaitu Bingham, O'Brien Equation (Quadratic), Herschel-Bulkley, dan *Clastic Grain Flow*. Parameter yang digunakan meliputi konsentrasi volumetrik sedimen (C_v) sebesar 0,62, tegangan luluh sebesar 214 Pa, viskositas sebesar 90 Pa·s, *power index* (n_{HB}) sebesar 1—1,35, ukuran butir median (d_{50}) sebesar 0,2—0,73 mm, dan sudut gesekan internal (ϕ) sebesar 2°—8°.

Kata kunci: banjir lahar, aliran *non-Newtonian*, HEC-RAS, pemodelan 2D, parameter reologi.

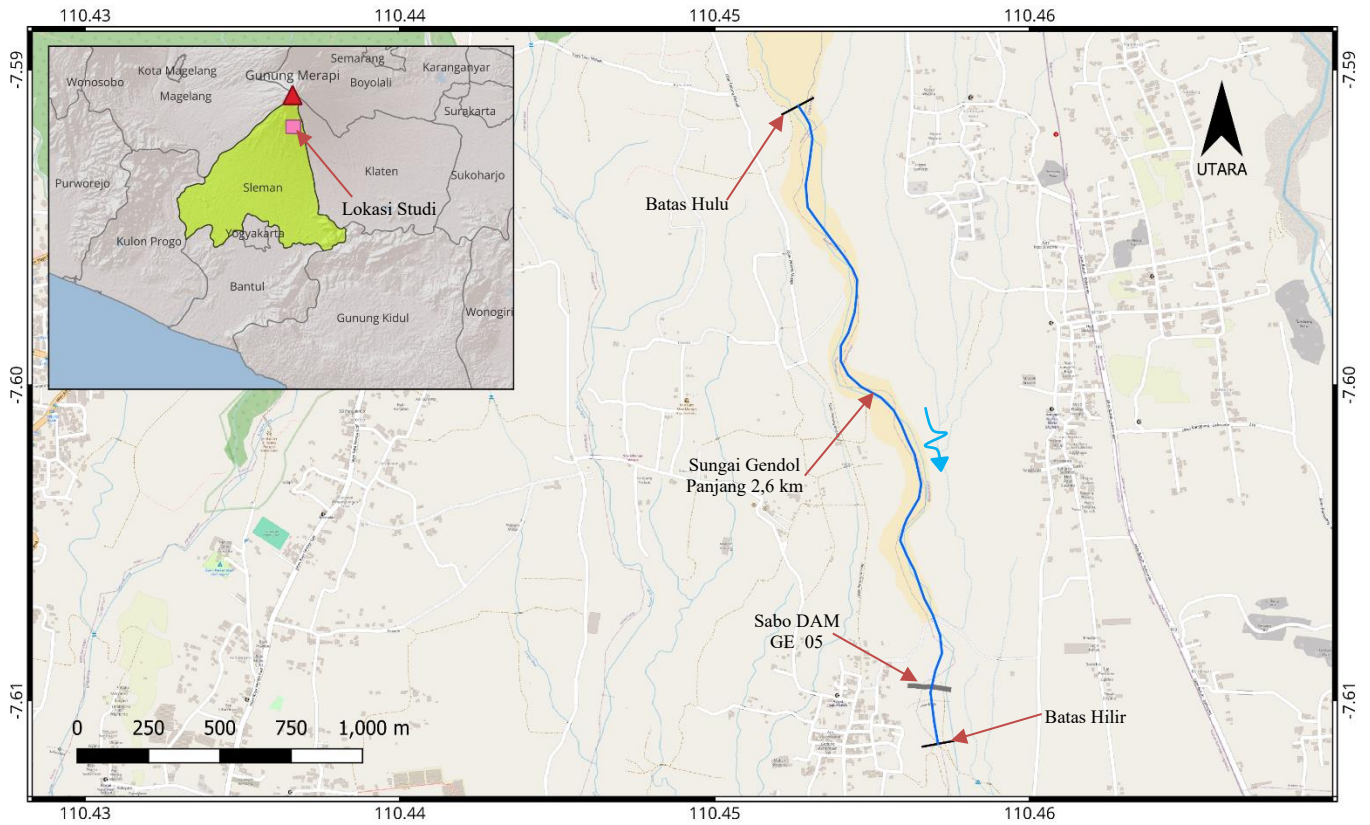
1 PENDAHULUAN

Aliran banjir lahar merupakan fenomena yang sangat destruktif karena membawa campuran air dan sedimen berkonsentrasi tinggi, mulai dari butiran halus hingga bongkah berukuran besar. Campuran tersebut menyebabkan densitas dan viskositas fluida meningkat serta perilaku aliran dapat berubah dari fase cair hingga semi-padat, tergantung pada komposisi material dan kondisi aliran (Iverson, 1997; Pierson & Costa, 1987). Beberapa tahun terakhir, perkembangan perangkat lunak hidraulika HEC-RAS memungkinkan pemodelan aliran *non-Newtonian* sehingga simulasi banjir lahar dapat dilakukan secara lebih representatif. Fitur ini menyediakan beberapa pendekatan reologi untuk memodelkan aliran dengan konsentrasi sedimen tinggi, namun keberagaman metode tersebut sering menimbulkan kesulitan bagi pengguna dalam menentukan pendekatan yang paling sesuai dengan karakteristik aliran yang dimodelkan. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang lebih mendalam untuk memahami penerapan fitur *non-Newtonian* serta pengaruh konfigurasi model terhadap hasil simulasi. Sungai Gendol dipilih sebagai lokasi studi karena merupakan salah satu sungai dengan tingkat kerawanan tinggi terhadap banjir lahar akibat melimpahnya material vulkanik di bagian hulu dan tingginya intensitas curah hujan. Untuk membuat studi permodelan aliran lahar diperlukan *setup* geometri yang baik dan diperlukan parameter aliran lahar yang sesuai dengan karakteristik material di lereng Gunung Merapi. Studi ini berfokus dalam penyusunan *setup* geometri dua dimensi (2D) pada HEC-RAS untuk memodelkan aliran sungai, mengevaluasi pengaruh konfigurasi geometri terhadap stabilitas model, dan mengestimasi parameter reologi aliran banjir lahar. Hasil studi ini digunakan menjadi dasar dalam pengembangan penelitian selanjutnya mengenai pemodelan aliran lahar menggunakan fitur *non-Newtonian* di HEC-RAS.

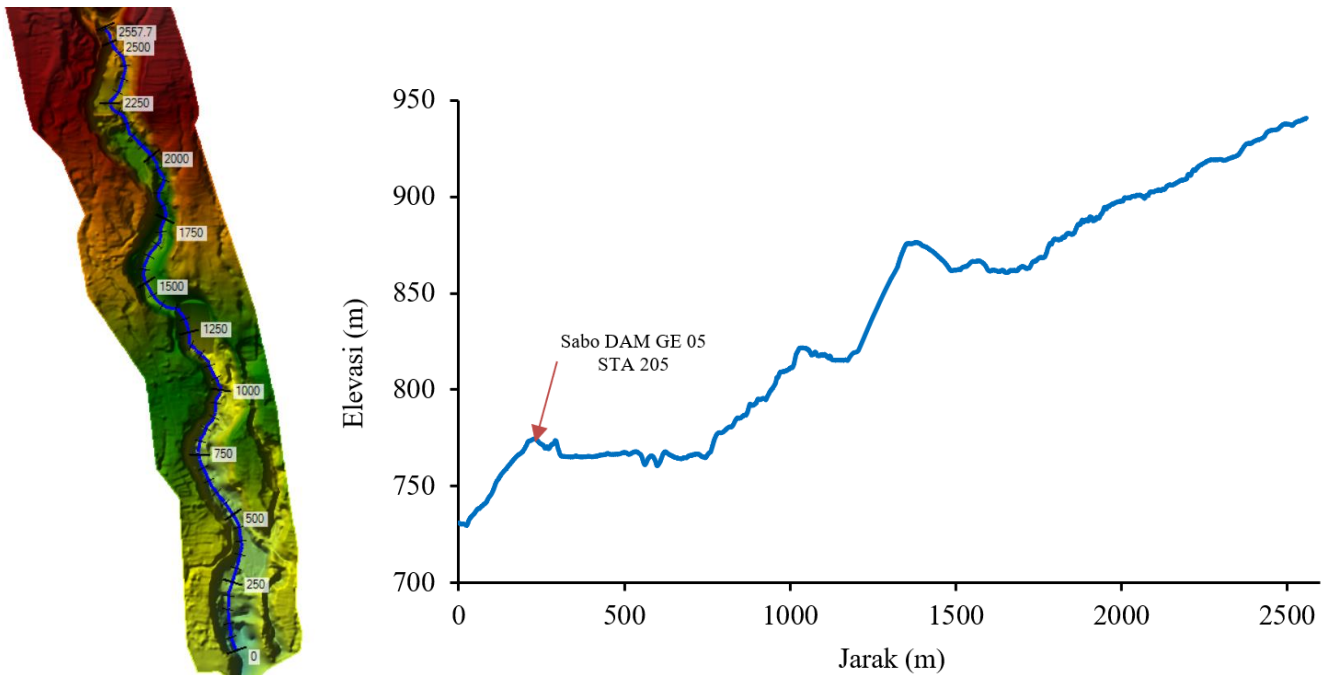
2 METODOLOGI

2.1 Deskripsi Lokasi Studi

Panjang alur sungai yang digunakan dalam pemodelan adalah 2,6 km. Sungai tersebut melewati bangunan Sabo DAM GE 05 dengan batas hulu dan hilir yang telah ditentukan (Gambar 1). Sungai Gendol yang terletak di lereng Gunung Merapi menunjukkan perubahan elevasi yang sangat ekstrem (Gambar 2). Perbedaan ketinggian yang ekstrem ini menyebabkan aliran menjadi sensitif terhadap pengaturan geometri model. Oleh karena itu, penyusunan geometri yang tepat dan detail menjadi hal yang sangat penting. Model geometri yang baik dilakukan dengan pengaturan *setup mesh* yang menyesuaikan dengan alur sungai, agar hasil permodelan hidraulika yang diperoleh akan mendekati kondisi sebenarnya di lapangan.



Gambar 1. Alur Sungai Gendol yang menjadi lokasi penelitian.



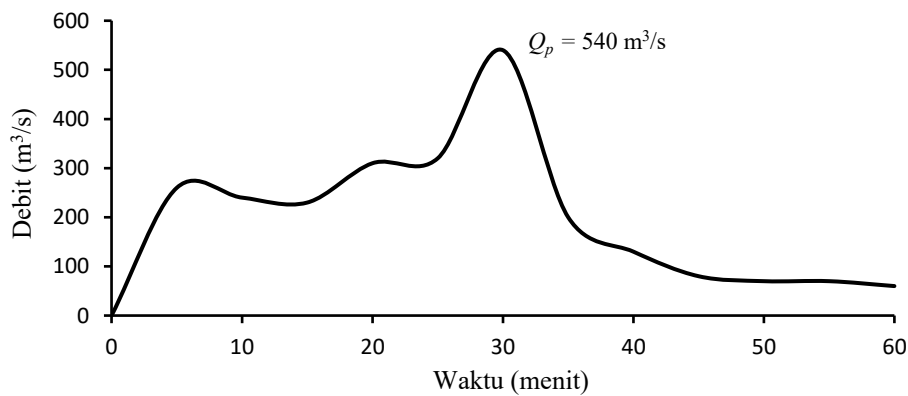
Gambar 2. Terrain dengan garis memanjang Sungai Gendol dari RAS Mapper (gambar kiri) dan profil memanjang Sungai Gendol (gambar kanan).

2.2 Data Penelitian

Data penelitian meliputi topografi, koefisien kekasaran sungai, debit banjir lahar, dan karakteristik lahar (Tabel 1). Data topografi, koefisien kekasaran sungai, dan debit banjir lahar diolah agar sesuai karakteristik Sungai Gendol dengan pemodelan hidraulika berbasis grid 2D. Estimasi parameter reologi dilakukan dengan pendekatan data karakteristik aliran lahar Gunung Merapi dari Balai Teknik Sabo yang disesuaikan dengan referensi terkait.

Tabel 1. Kebutuhan dan sumber data penelitian.

Data penelitian	Keterangan	Sumber data
Digital elevation model (Gambar 2)	LiDAR resolusi 0,1 × 0,1 m	Balai Teknik Sabo
Koefisien kekasaran Sungai	n Manning = 0,04	Pengamatan visual mengacu Chow (1959)
Debit hidrograf banjir (Gambar 3)	Debit puncak = 540 m ³ /s	De Bélizal dkk. (2013)
Data karakteristik lahar	Gradasi material	Balai Teknik Sabo



Gambar 3. Hidrograf banjir lahar di batas hulu (De Bélizal dkk., 2013).

2.3 Persamaan Aliran Dua Dimensi 2D

HEC-RAS menghitung elevasi muka air pada waktu tertentu dengan mengkombinasikan persamaan kontinuitas Persamaan (1) dan bentuk *Diffusion Wave Equation (DWE)* Persamaan (2) dari persamaan momentum (Brunner, 2021).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \nabla \cdot (\beta \nabla \eta) + q \tag{1}$$

Dalam model aliran *non-Newtonian*, digunakan parameter koefisien difusi non-linear yang dilambangkan dengan β . Parameter ini merupakan fungsi dari gesekan dasar dan tegangan *non-Newtonian*.

$$\beta = \cos^{1/2} \psi \cos \varphi \frac{K}{A} \frac{h}{|\nabla \eta|^{1/2}} \tag{2}$$

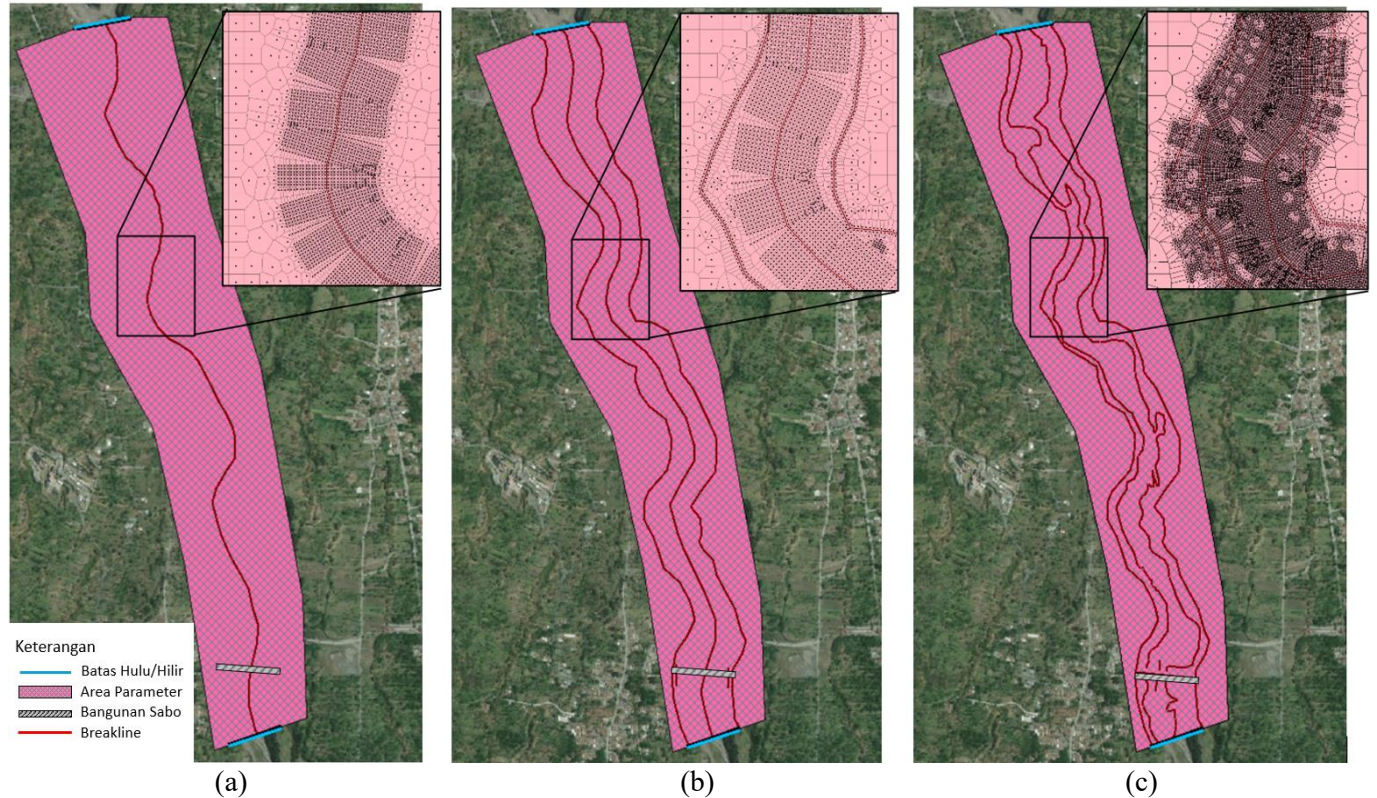
Rasio K/A dapat dinyatakan sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (3).

$$\frac{K}{A} = \left[\frac{n^2}{(R \cos \varphi)^{4/3}} \frac{\tau_{MD}}{\gamma_m R \cos^2 \varphi |V|} \right]^{-1/2} \tag{3}$$

Parameter η merupakan fluktuasi muka air (m), t adalah waktu (s), ∇ menunjukkan operator gradien, q merupakan debit per satuan luas (m³/s/m²) dan β adalah koefisien difusi. Parameter ψ menyatakan sudut arah aliran relatif terhadap grid komputasi, φ adalah sudut kemiringan dasar aliran, h merupakan kedalaman aliran (m), dan $|\nabla \eta|$ menunjukkan gradien elevasi muka air. Selain itu, K merupakan kapasitas pengangkutan aliran, A adalah luas penampang vertikal, n adalah koefisien kekasaran Manning, R adalah jari-jari hidraulik (m), τ_{MD} merupakan tegangan geser akibat material *non-Newtonian*, γ_m adalah berat jenis campuran fluida dan sedimen (N/m³), dan V adalah kecepatan aliran (m/s).

2.4 Model Geometri

Model geometri berpengaruh besar terhadap keberhasilan simulasi aliran. Ukuran *mesh*, detail *breaklines*, dan pengaturan jarak *mesh* yang rapat di alur sungai akan meningkatkan jumlah titik komputasi yang digunakan. Peningkatan detail *mesh* tersebut perlu diimbangi dengan pemilihan interval komputasi yang tepat agar kestabilan model tetap terjaga. *Mesh* disusun dengan tingkat kedetailan yang berbeda (Gambar 4) serta menerapkan skenario komputasi yang berbeda (Tabel 2). Selain itu, penggambaran bangunan Sabo DAM perlu dilakukan agar sesuai dengan kondisi di lapangan. Penggambaran bangunan tersebut menggunakan *layer 2D connection* dengan tipe *weir*.



Gambar 4. Model geometri dengan detail di zona STA 1200—1400 dari *RAS Mapper*: (a) *Mesh 1*, (b) *Mesh 2*, dan (c) *Mesh 3*.

Tabel 2. *Properties* skenario geometri pada *mesh*.

Skenario	Jumlah alur <i>breakline</i>	Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah <i>mesh</i>	Interval komputasi
<i>Mesh 1</i>	1	4—20	20.439	1 detik
<i>Mesh 2</i>	3	5—30	15.432	0,5 detik
<i>Mesh 3</i>	4	3—30	50.267	0,1 detik

2.5 Metode *Non-Newtonian*

Fluida *non-Newtonian* memiliki hubungan antara laju geser dan tegangan geser yang bisa tidak linear dan/atau tidak melewati titik nol (asal). Berbagai aliran alami seperti aliran lumpur, lahar, longsoran material, dan longsoran salju, merupakan contoh fluida *non-Newtonian* karena sifat alirannya tidak seperti air biasa. Beberapa metode *non-Newtonian* yang tersedia di perangkat lunak HEC-RAS yaitu Bingham, O'Brien *Equation (Quadratic)*, Herschel-Bulkley, dan *Clastic Grain Flow*. Persamaan yang digunakan pada masing-masing metode tersebut dalam HEC-RAS *Mud and Debris Flow Manual* ditunjukkan pada Persamaan (4), (5), (6), dan (7) (Gibson & Sanchez, 2023). Masing-masing metode tersebut memiliki parameter *input data* yang berbeda (Tabel 3).

a) Bingham

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{3u}{h} \right) \tag{4}$$

b) O'Brien Equation (*Quadratic*)

$$\tau = \tau_y + \mu_m \left(\frac{3u}{h}\right) + \rho_m l_m^2 \left(\frac{3u}{h}\right)^2 + 0.01 \rho_s \left(\left(\frac{C_{vmax}}{C_v}\right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 d_s^2 \left(\frac{3u}{h}\right)^2 \quad (5)$$

c) Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_y + K \left(\frac{3u}{h}\right)^n \quad (6)$$

d) *Clastic Grain Flow* (Mohr-Coulomb)

$$\tau_y = c + \tan \phi (\rho_m - \rho_w)gh \cos^2 \theta \quad (7)$$

Parameter τ merupakan tegangan geser (Pa), τ_y adalah tegangan luluh (Pa), μ adalah viskositas dinamis (Pa·s), μ_m merupakan viskositas campuran, u adalah kecepatan aliran (m/s), h adalah kedalaman aliran (m), ρ_m adalah densitas campuran (kg/m³), ρ_s adalah densitas sedimen (kg/m³), ρ_w adalah densitas air (kg/m³), l_m adalah panjang karakteristik campuran, C_v adalah konsentrasi volumetrik sedimen, d_s adalah diameter butir sedimen (mm), K adalah koefisien konsistensi fluida, n adalah *power index*, c adalah kohesi material, σ adalah tegangan normal (Pa), g adalah percepatan gravitasi (m/s²), θ adalah sudut kemiringan dasar aliran, dan ϕ adalah sudut gesekan internal material.

Tabel 3. Parameter *input* pada metode *non-Newtonian*.

Parameter	Bingham	O'Brien Equation (<i>Quadratic</i>)	Herschel-Bulkley	<i>Clastic Grain Flow</i> (Mohr-Coulomb)
Konsentrasi volumetrik (C_v)	✓	✓	✓	✓
Tegangan luluh (τ_y)	✓	✓	✓	✗
Viskositas (μ)	✓	✓	Sebagai nilai K	✗
<i>Power index</i> (n_{HB})	✗	✗	✓	✗
Sudut gesekan internal (ϕ)	✗	✗	✗	✓
Median <i>grain size</i> (d_{50})	✗	✓	✗	✗

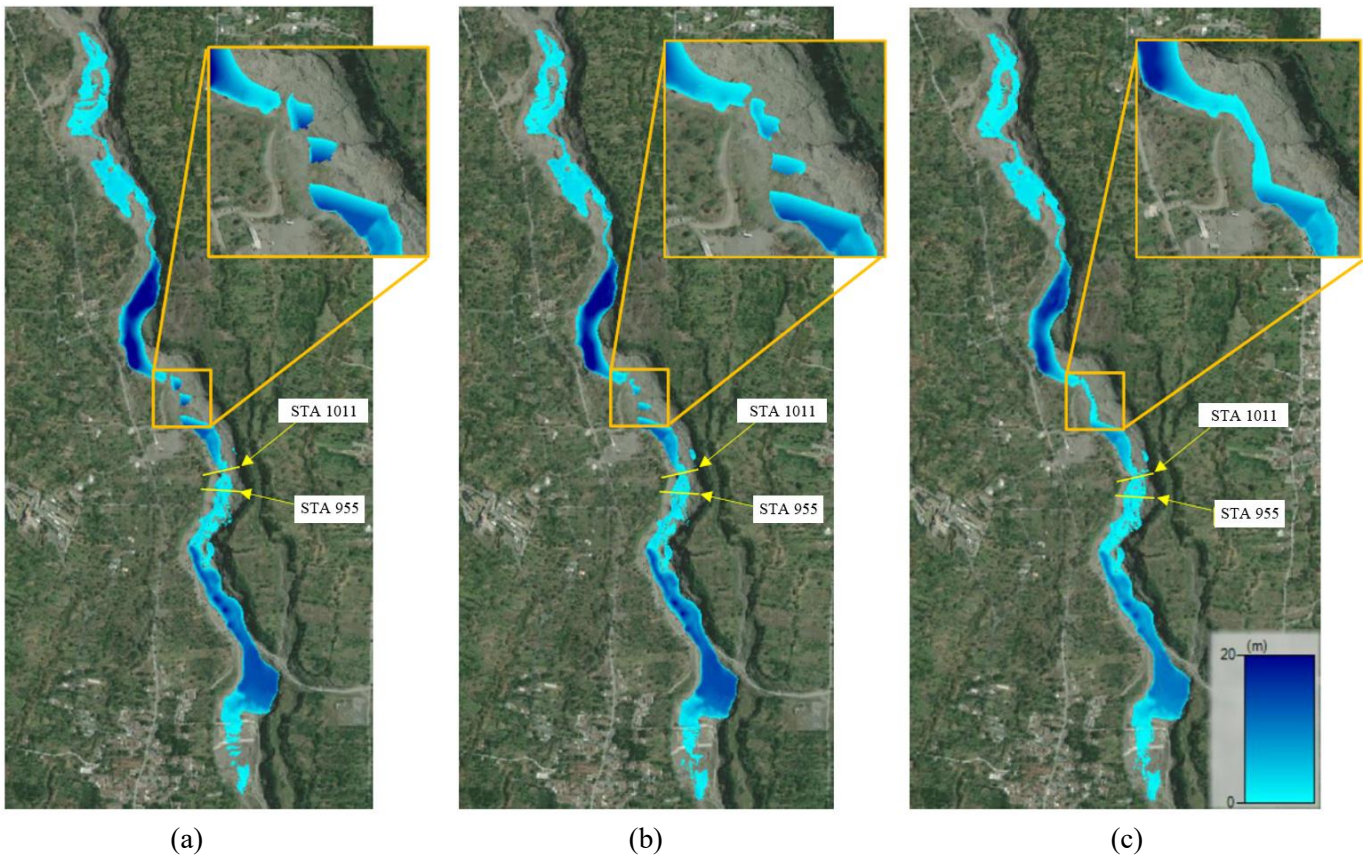
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemodelan Sungai Gendol

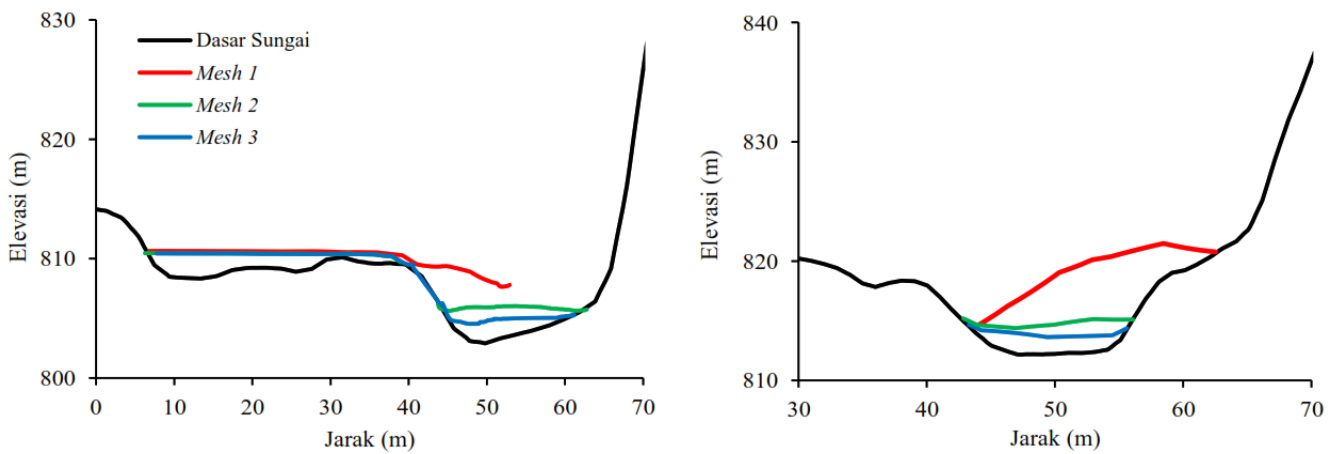
Hasil pemodelan studi kasus digunakan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi geometri terhadap stabilitas model. Stabilitas model tidak hanya dilihat dari keberhasilan simulasi berjalan tanpa gangguan numerik, namun juga dari kewajaran nilai-nilai yang dihasilkan. Beberapa evaluasi dilakukan terhadap hasil kedalaman aliran dan kecepatan aliran.

3.1.1 Kedalaman Aliran

Kedalaman aliran yang digunakan sebagai evaluasi merupakan kedalaman pada menit ke-35 setelah debit puncak. Waktu tersebut dipilih karena aliran pada saat debit puncak membutuhkan waktu untuk mengalir hingga mempengaruhi aliran dan melihat loncatan-loncatan aliran di area turunan ekstrem. Nilai kedalaman yang tidak realistis atau tidak sesuai dengan karakteristik sungai di lapangan dapat menjadi indikasi bahwa model belum sepenuhnya stabil dan masih memerlukan penyesuaian pada aspek geometri yang digunakan dalam simulasi. Hasil simulasi yang didapatkan yaitu pemetaan kedalaman aliran (Gambar 5) dan contoh profil muka air di STA 955 dan STA 1011 (Gambar 6).



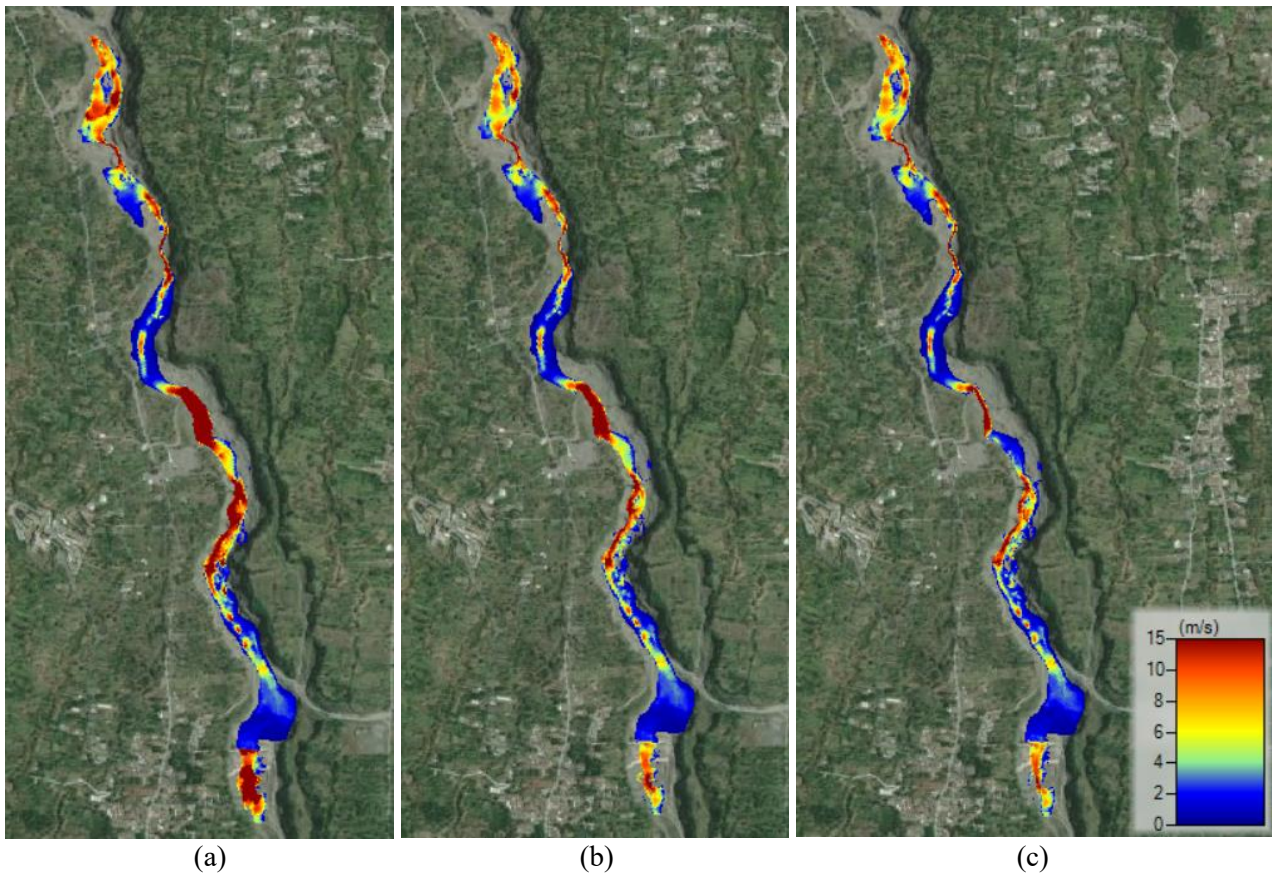
Gambar 5. Kedalaman aliran dan detail di zona STA 1200—1400 pada menit ke-35 dari *RAS Mapper*: (a) *Mesh 1*, (b) *Mesh 2*, dan (c) *Mesh 3*.



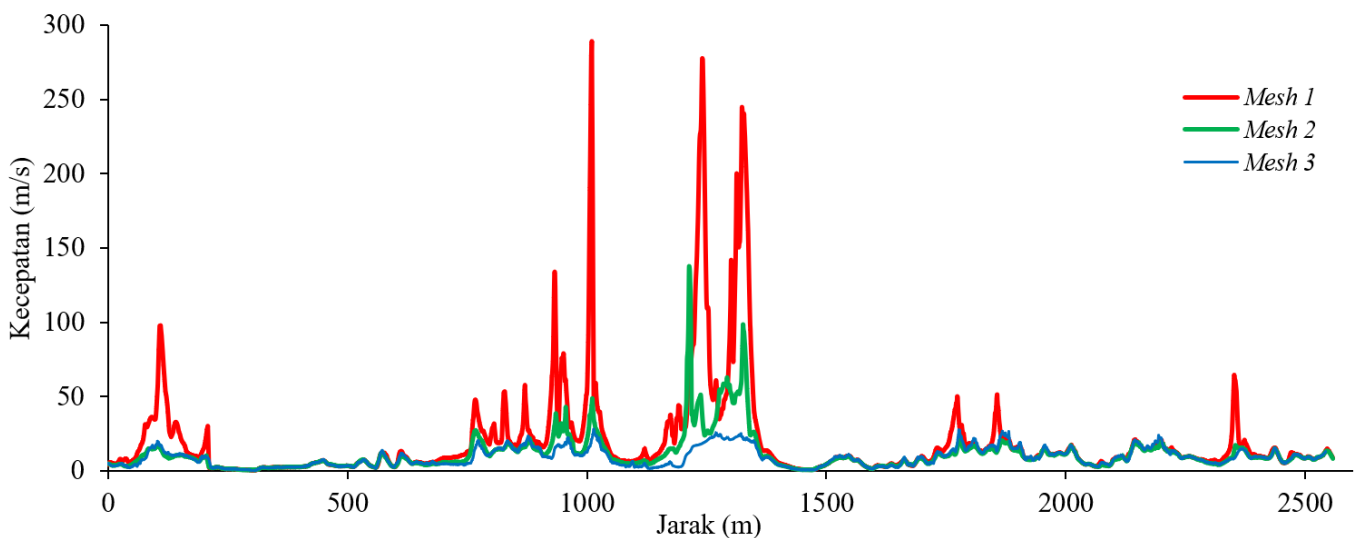
Gambar 6. Profil muka air pada menit ke-35 di STA 955 (gambar kiri) dan STA 1011 (gambar kanan).

3.1.2 Kecepatan Aliran

Evaluasi kecepatan aliran dilakukan dengan menggunakan kecepatan maksimum. Kecepatan maksimum dipilih karena mampu merepresentasikan aliran yang berpotensi memberikan dampak terhadap perilaku sungai. Kecepatan aliran juga menjadi salah satu indikator penting dalam mengevaluasi stabilitas model hidraulika yang telah disusun ketika hasil simulasi menunjukkan nilai kecepatan aliran yang tidak realistis atau menyimpang dari kondisi lapangan, hal tersebut dapat mengindikasikan bahwa model yang digunakan belum stabil atau masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut, baik dari sisi geometri, parameter aliran, maupun asumsi yang digunakan dalam pemodelan. Hasil simulasi yang didapatkan yaitu pemetaan kecepatan maksimum aliran (Gambar 7) dan profil kecepatan maksimal aliran (Gambar 8).



Gambar 7. Kecepatan maksimum aliran dari *RAS Mapper*: (a) *Mesh 1*, (b) *Mesh 2*, dan (c) *Mesh 3*.



Gambar 8. Profil kecepatan maksimum aliran pada *Mesh 1*, *Mesh 2*, dan *Mesh 3*.

3.2 Estimasi Parameter Reologi

Estimasi parameter reologi merupakan tahap penting dalam pemodelan aliran banjir lahar karena parameter tersebut menentukan karakteristik fisik dan perilaku aliran yang akan disimulasikan. Estimasi parameter reologi dilakukan berdasarkan hubungan empiris yang dikembangkan dari penelitian sebelumnya serta mempertimbangkan karakteristik material sedimen yang umum dijumpai pada aliran lahar. Hasil yang didapatkan berupa nilai *input* (Tabel 5) yang digunakan untuk pemodelan banjir lahar.

3.2.1 Konsentrasi Volumetrik (C_v)

Konsentrasi volumetrik sedimen (C_v) merupakan parameter yang menunjukkan perbandingan volume sedimen terhadap total volume campuran air. Nilai C_v memengaruhi sifat reologi aliran, seperti densitas, viskositas, dan tegangan luluh, sehingga berperan penting dalam menentukan perilaku aliran. Data historis kejadian banjir lahar Gunung Merapi didapat dari penelitian Lavigne & Thouret (2003) yang memiliki nilai C_v berkisar 15–62%. Untuk nilai C_v dipilih angka maksimal 62% yang dimana termasuk dalam *debris flow*.

3.2.2 Tegangan Luluh (τ_y) dan Viskositas (μ)

Tegangan luluh (τ_y) merupakan tegangan minimum yang diperlukan agar campuran sedimen dan air mulai mengalir, sedangkan viskositas (μ) menunjukkan besarnya resistensi fluida terhadap deformasi selama proses aliran. Kedua parameter ini penting dalam merepresentasikan sifat *non-Newtonian* pada aliran banjir lahar dan diestimasi berdasarkan hubungan empiris dengan konsentrasi volumetrik sedimen (C_v) dengan tipe *typical soil*. Parameter tersebut akan diestimasi berdasarkan penelitian O'Brien & Julien (1988) yang rumuskan pada Persamaan (8) dan (9).

$$\tau_y = a \cdot e^{b \cdot C_v} \quad (8)$$

$$\mu = 0,001 \cdot e^{c \cdot C_v} \quad (9)$$

Nilai dari a, b , dan c mengacu penelitian O'Brien & Julien (1988) (Tabel 4).

Tabel 4. Estimasi nilai tegangan luluh (τ_y) dan viskositas (μ) mengacu penelitian O'Brien & Julien (1988).

Type	Limit C_v	a	b	c	τ_y Range (Pa)	μ Range (Pa·s)
Typical Soil	65–80%	0,005	17,2	18,4	375–5,000	160–2,500
Kaolinite	40–50%	0,05	20,7	18,4	200–1,600	1.6–10
Sensitive Clays	35–60%	0,3	23,0	11,5	950–300,000	0.1–1
Bentonite	5–20%	0,002	230,3	230,3	200–2×10 ¹⁷	100–1×10 ¹⁷

3.2.3 Power Index (n_{HB})

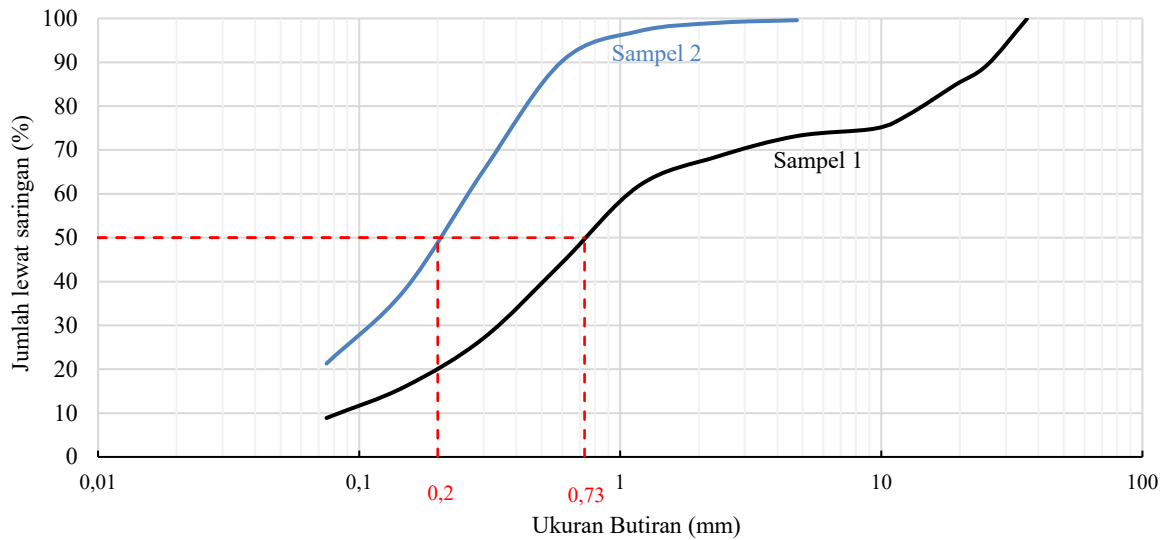
Nilai parameter ini menunjukkan karakter perilaku aliran, jika nilai $n_{HB} = 1$ menunjukkan perilaku yang mendekati fluida *Newtonian*, jika $n_{HB} < 1$ menunjukkan perilaku *shear-thinning* (viskositas menurun saat laju geser meningkat), dan $n_{HB} > 1$ menunjukkan perilaku *shear-thickening* (viskositas meningkat saat laju geser meningkat). Di laboratorium, campuran yang hanya mengandung material kohesif umumnya menunjukkan penurunan viskositas geser yang cukup signifikan. Berbeda dengan itu, sebagian besar hasil pengamatan memperlihatkan bahwa fluida yang mengandung pasir mengalami peningkatan viskositas geser (S.Gibson, 2023). Menurut Sosio & Crosta (2009) material pasir umumnya berada di atas 1 dan bahkan dapat mencapai 1,35.

3.2.4 Sudut Gesekan Internal (ϕ)

Sudut gesekan internal adalah parameter yang mengukur ketahanan geser tanah atau batuan akibat gesekan antar partikel dan penguncian. Dalam konteks aliran lahar material ketahanan geser campuran dianggap pada kondisi jenuh sepenuhnya. Menurut Sari dkk. (2025) berat satuan kering (γ_d) material di Gunung Merapi berkisar 1,5–1,7 t/m³ dimana jika dalam keadaan jenuh sepenuhnya menurut Tian dkk. (2023) sudut gesekan internalnya sebesar 2°–8°.

3.2.5 Median Grain Size (d_{50})

Ukuran butir median (d_{50}) merupakan parameter yang menunjukkan diameter butir sedimen di mana 50% dari total material memiliki ukuran lebih kecil dari nilai tersebut. Parameter ini digunakan untuk merepresentasikan ukuran dominan sedimen dalam campuran aliran dan berpengaruh terhadap karakteristik mekanika serta perilaku aliran banjir lahar. Ukuran butiran d_{50} digunakan untuk menggambarkan dominasi material sedimen berukuran pasir yang umum dijumpai pada aliran lahar, sehingga dapat mendukung representasi kondisi material secara realistis dalam pemodelan menggunakan HEC-RAS. Distribusi sampel ukuran dari material dasar Sungai Gendol di lokasi studi menunjukkan diameter butiran d_{50} berkisar 0,2–0,73 mm (Gambar 9).



Gambar 9. Distribusi ukuran butiran di Sungai Gendol (Data diperoleh dari Balai Teknik Sabo).

Tabel 5. Hasil estimasi parameter *input* pada metode *non-Newtonian*.

Parameter	Bingham	O'Brien Equation (Quadratic)	Herschel-Bulkley	Clastic Grain Flow	Keterangan
Konsentrasi volumetrik (C_v)	0,62	0,62	0,62	0,62	Data historis
Tegangan luluh (τ_y)	214 Pa	214 Pa	214 Pa	×	$\tau_y = a \cdot e^{b \cdot C_v}$
Viskositas (μ)	90 Pa·s	90 Pa·s	90 Pa·s	×	$\mu = 0,001 \cdot e^{c \cdot C_v}$
Power index (n_{HB})	×	×	1—1,35	×	Dominan Pasir
Sudut gesekan internal (ϕ)	×	×	×	2°—8°	Pasir Jenuh
Median grain size (d_{50})	×	0,2—0,73 mm	×	×	Balai Teknik Sabo

3.3 Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbedaan ukuran *mesh* dan interval waktu komputasi berpengaruh terhadap kualitas hasil pemodelan. *Mesh* 1 memiliki ukuran *mesh* yang relatif kasar menyebabkan jarak antar titik komputasi cukup berjauhan sehingga pola aliran di sekitar STA 1200—1400 terlihat tidak mulus dan menunjukkan loncatan antar titik. Profil muka air pada *Mesh* 1 kurang tergambar dengan baik. Untuk nilai kecepatan maksimal *Mesh* 1 yang dihasilkan kurang realistis dengan beberapa titik mengalami lonjakan. *Mesh* 2 memiliki ukuran *mesh* masih relatif kasar, namun penggunaan interval waktu komputasi 0,5 detik sehingga hasilnya profil muka air pada *Mesh* 2 tergambar dengan baik, namun pola aliran di sekitar STA 1200—1400 masih terlihat tidak mulus dan menunjukkan loncatan antar titik. Untuk nilai kecepatan maksimal aliran *Mesh* 2 yang dihasilkan beberapa titik masih kurang realistis. *Mesh* 3 dengan ukuran *mesh* yang lebih halus dan interval waktu komputasi 0,1 detik menghasilkan pola aliran yang lebih mulus tanpa loncatan antar titik serta menunjukkan penggambaran profil muka air dengan baik. Kecepatan maksimal aliran pada *Mesh* 3 menunjukkan tidak adanya nilai ekstrem. Secara keseluruhan, *Mesh* 3 memberikan representasi karakteristik aliran yang paling realistis dibandingkan *Mesh* 1 dan *Mesh* 2, namun tingkat detail geometri dan interval waktu yang lebih kecil menyebabkan waktu komputasi lebih lama.

Estimasi parameter *input* dalam studi ini dilakukan dengan menggunakan beberapa pendekatan reologi yang tersedia pada HEC-RAS, yaitu model Bingham, O'Brien Equation (Quadratic), Herschel-Bulkley, dan Clastic Grain Flow. Konsentrasi volumetrik sedimen (C_v) ditetapkan sebesar 0,62 untuk seluruh model berdasarkan data historis dari Lavigne & Thouret (2003), sehingga perbandingan hasil simulasi dapat dilakukan secara konsisten. Nilai tegangan luluh (τ_y) sebesar 214 Pa dan viskositas dinamis (μ) sebesar 90 Pa·s diperoleh dari rumus empiris O'Brien & Julien (1988) hubungan terhadap nilai C_v . Parameter *power index* (n_{HB}) pada metode Herschel-Bulkley berkisar 1—1,35 untuk campuran yang dominan pasir. Metode O'Brien digunakan tambahan parameter berupa ukuran butir median (d_{50}) sebesar 0,2—0,73 mm, sedangkan pada model Clastic Grain Flow digunakan sudut gesekan internal (ϕ) sebesar 2°—8° untuk material pasir dalam kondisi jenuh. Pemilihan parameter ini bertujuan agar simulasi mampu merepresentasikan kondisi aliran lahar secara lebih realistis.

4 KESIMPULAN

Memodelkan geometri 2D yang akurat dan stabil memerlukan detail parameter yang kompleks. Merubah beberapa parameter menjadikan kualitas *setup* geometri semakin membaik setelah melalui tiga kali percobaan dengan konfigurasi model yang berbeda. Pengaturan model terakhir, aliran air yang dihasilkan menunjukkan kestabilan yang lebih baik dan tidak lagi memperlihatkan gejala aliran yang tidak wajar, seperti loncatan aliran maupun jeda antar segmen. Penggunaan *setup* geometri yang semakin detail dan halus memiliki konsekuensi berupa waktu komputasi yang jauh lebih lama. Pemodelan aliran banjir lahar memerlukan beberapa estimasi parameter reologi. Konsentrasi volumetrik sedimen (C_v) ditetapkan sebesar 0,62 untuk seluruh model berdasarkan data historis agar perbandingan simulasi tetap konsisten. Nilai tegangan luluh (τ_y) sebesar 214 Pa dan viskositas dinamis (μ) sebesar 90 Pa·s diperoleh dari hubungan empiris terhadap nilai C_v . Parameter tambahan seperti ukuran butir median (d_{50}) sebesar 0,2—0,73 mm pada model O'Brien, *power index* (n_{HB}) sebesar 1—1,35 pada model Herschel-Bulkley, dan sudut gesekan internal (ϕ) sebesar 2°—8° pada model *Clastic Grain Flow* digunakan untuk merepresentasikan karakteristik material sedimen yang didominasi pasir. Pemilihan parameter tersebut dilakukan agar simulasi dapat merepresentasikan kondisi aliran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Balai Teknik Sabo yang telah memberikan dukungan dan menyediakan data yang digunakan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Brunner, Gary. W. (2021). HEC-RAS River Analysis System User's manual Version 6.0. *Institute of Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC)*.
- Chow, V. Te. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- De Bélizal, E., Lavigne, F., Hadmoko, D. S., Degeai, J.-P., Dipayana, G. A., Mutaqin, B. W., Marfai, M. A., Coquet, M., Le Mauff, B., & Robin, A.-K. (2013). Rain-triggered lahars following the 2010 eruption of Merapi volcano, Indonesia: A major risk. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, 330–347.
- Gibson, S., & Sanchez, A. (2023). HEC-RAS Mud and Debris Flow Manual. *Institute of Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC)*.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245–296.
- Lavigne, F., & Thouret, J.-C. (2003). Sediment transportation and deposition by rain-triggered lahars at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Geomorphology*, 49(1–2), 45–69.
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of hydraulic engineering*, 114(8), 877–887.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). *A rheologic classification of subaerial sediment-water flows*.
- Sari, N. F., Hardiyatmo, H. C., & Fathani, T. F. (2025). Study on Erosion Mechanisms Caused by Leakage at Culvert Joints and Outlets. *Prosiding Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur*, 3, 118–125.
- Sosio, R., & Crosta, G. B. (2009). Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling. *Water resources research*, 45(3).
- Tian, W., Peiffer, H., Malengier, B., Liu, G., & Cheng, L. (2023). Modified equation of shear strength with respect to saturation. *Applied Sciences*, 13(7), 4305.