

Analisis Eksperimental Pengaruh Sabo Dam Tipe Beam terhadap Karakteristik Aliran Debris pada Variasi Kemiringan Saluran

Musdalifah Yusuf¹, Andi Bunga Tongeng^{*1}, Marupah Marupah¹, Sahabuddin Latif²

¹Program Studi Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

²Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makassar

ABSTRAK

Aliran debris merupakan salah satu bencana hidrometeorologi yang berdampak besar terhadap infrastruktur, lingkungan, dan keselamatan masyarakat, khususnya di wilayah dengan topografi curam. Untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan, berbagai strategi mitigasi struktural telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan sabo dam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh sabo dam tipe beam terhadap karakteristik aliran debris dengan mempertimbangkan variasi kemiringan saluran, yakni 6°, 8°, dan 10°. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium menggunakan flume pada debit konstan, dengan fokus pengamatan pada tiga parameter utama: tinggi muka air, kecepatan aliran, dan bilangan Froude. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan sabo dam secara signifikan memengaruhi dinamika aliran, dengan peningkatan nilai Froude yang mengindikasikan pergeseran rezim aliran dari subkritis menjadi superkritis. Di sisi lain, sabo dam tipe beam terbukti efektif dalam menahan material debris seperti sedimen, batu besar (boulder), dan kayu, meskipun efektivitas retensi mengalami penurunan pada saluran dengan kemiringan lebih tinggi akibat meningkatnya gaya inersia dan kecepatan aliran. Temuan ini menunjukkan adanya korelasi langsung antara geometri saluran dan kinerja hidraulik sabo dam. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam desain struktur pengendali sedimen yang adaptif terhadap kondisi medan, serta dapat menjadi referensi teknis dalam pengembangan kebijakan mitigasi bencana berbasis infrastruktur di daerah rawan aliran debris.

ABSTRACT

Debris flow is a hydrometeorological disaster with significant impacts on infrastructure, the environment, and public safety, particularly in areas with steep topography. To mitigate the associated risks, various structural mitigation strategies have been developed, one of which is the use of sabo dams. This study aims to analyze the effect of beam-type sabo dams on debris flow characteristics by considering variations in channel slope, namely 6°, 8°, and 10°. The method employed is a laboratory experiment using a flume with constant discharge, focusing on three main parameters: water surface elevation, flow velocity, and Froude number. The results show that the installation of sabo dams significantly affects flow dynamics, with an increase in Froude numbers indicating a shift in flow regime from subcritical to supercritical conditions. On the other hand, beam-type sabo dams were proven effective in retaining debris materials such as sediment, large boulders, and woody debris, although retention efficiency decreased at higher slopes due to increased inertial forces and flow velocity. These findings demonstrate a direct correlation between channel geometry and the hydraulic performance of sabo dams. This research provides important contributions to the design of sediment control structures that are adaptive to field conditions and can serve as a technical reference in the development of infrastructure-based disaster mitigation policies in debris flow-prone areas.

ARTICLE HISTORY

Received December 25, 2025
Received in revised form
January 17, 2026
Accepted February 2, 2026
Available online February 09,
2026.

KEYWORDS

aliran debris, sabo dam tipe beam, bilangan Froude, kecepatan aliran, efisiensi retensi

Debris flow, Beam-type sabo dam, Froude number, Flow velocity, Retention efficiency

1. Pendahuluan

Bencana alam merupakan fenomena yang memiliki dampak signifikan terhadap kehidupan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Salah satu jenis bencana hidrometeorologi yang kerap terjadi di daerah pegunungan atau wilayah dengan kemiringan lereng tinggi adalah aliran debris. Peristiwa ini tidak hanya berisiko menghancurkan infrastruktur seperti jembatan dan bangunan, tetapi juga mengancam keselamatan jiwa manusia dan ekosistem. Dalam konteks ini, urgensi penanganan aliran debris menjadi semakin penting, terlebih di tengah meningkatnya intensitas curah hujan akibat perubahan iklim global [1].

Aliran debris terjadi ketika air dengan kandungan sedimen tinggi mengalir melalui saluran yang curam, membawa serta material seperti batu, kayu, dan lumpur. Kecepatan dan kekuatan aliran ini membuatnya sangat merusak. Selain menghancurkan infrastruktur, aliran debris juga menyebabkan erosi tanah, penggundulan vegetasi, serta pencemaran badan air [2,3]. Di berbagai negara dengan kondisi topografi kompleks seperti Indonesia, penanganan aliran debris merupakan tantangan teknis yang harus dijawab melalui pendekatan struktural dan non-struktural.

Salah satu solusi struktural yang terbukti efektif adalah pembangunan sabo dam. Sabo dam adalah bangunan pengendali sedimen yang umumnya dibangun di bagian

hulu sungai untuk menahan laju material dari aliran debris sebelum mencapai wilayah permukiman. Sabo dam telah lama digunakan di Jepang dan negara-negara Asia lainnya sebagai bagian dari sistem mitigasi bencana berbasis struktur [4]. Dengan mengatur energi aliran dan menangkap sebagian besar material berat, sabo dam secara signifikan mengurangi risiko bencana di wilayah hilir [5].

Efektivitas sabo dam dalam menahan aliran debris telah dibuktikan dalam berbagai studi empiris dan numerik. Bangunan ini mampu menurunkan intensitas aliran dan mengatur distribusi sedimen sehingga dampak destruktifnya berkurang secara signifikan [6]. Lebih lanjut, konstruksi sabo dam tidak hanya berperan sebagai penghalang, tetapi juga sebagai regulator aliran sedimen yang dapat menstabilkan sistem morfologi sungai.

Pada dekade terakhir, kemajuan dalam kajian aliran saluran terbuka yang membawa sedimen memberikan pemahaman baru tentang perilaku aliran debris. Wu, Tsai and Wu [7] menekankan pentingnya karakterisasi probabilistik dalam menjelaskan peristiwa turbulen yang mempengaruhi transportasi sedimen. Sementara itu, [8] mengembangkan model transportasi sedimen dengan mempertimbangkan efek memori struktur turbulen. Selain itu, simulasi numerik satu dan dua dimensi digunakan untuk memahami dinamika morfologi sungai dan prediksi pola transportasi sedimen dalam geometri kompleks [9].

Sabo dam tipe terbuka, seperti tipe beam, slit, dan grid, semakin banyak digunakan karena kemampuannya menyaring material besar seperti kayu dan batu tanpa menghambat aliran sedimen halus yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan ekosistem. Harada, Kimura [10] menunjukkan bahwa sabo dam tipe terbuka dapat secara efektif menahan debris tanpa mengganggu kontinuitas sedimen. Penelitian eksperimental oleh Xie, Wang [11] juga menunjukkan bahwa sabo slit-check dam mampu menyaring debris kasar, sementara sedimen halus tetap dapat mengalir, menjaga fungsi ekologis sungai tetap berjalan normal.

Dalam merancang sabo dam, diperlukan pertimbangan teknis yang komprehensif. Kriteria utama mencakup kapasitas hidrolik, kekuatan struktural terhadap beban benturan, serta efektivitas penjebaran sedimen. Aspek geoteknik juga penting dalam menentukan kestabilan bangunan di bawah tekanan kombinasi air dan sedimen. Lestari, Fathani [12] menekankan pentingnya efisiensi jebakan dan kapasitas pelepasan banjir sebagai indikator kinerja sabo dam. Pendekatan sistematis yang mengintegrasikan model numerik dan analisis risiko menjadi standar dalam desain struktur ini.

Meskipun banyak kajian telah dilakukan terkait desain dan efektivitas sabo dam, terdapat kesenjangan literatur yang signifikan dalam hal pengaruh variasi kemiringan saluran terhadap karakteristik aliran debris setelah melewati sabo dam. Beberapa studi seperti Shen, Yang [13] memang membahas pemisahan air dan sedimen akibat perubahan kemiringan, namun belum ada penelitian komprehensif yang mengkaji bagaimana variasi gradien saluran mempengaruhi kecepatan aliran, pola sedimentasi, serta nilai bilangan Froude di hilir sabo dam. Kurangnya data empiris tentang respons transisional aliran debris terhadap perubahan kemiringan menyulitkan prediksi perilaku sedimen setelah pembangunan struktur mitigasi.

Menanggapi kesenjangan ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran debris pada berbagai variasi kemiringan (6° , 8° , dan 10°) setelah melewati sabo dam tipe beam melalui metode eksperimen laboratorium. Studi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman baru mengenai hubungan antara geometri saluran dan efektivitas sabo dam dalam mengendalikan aliran debris. Selain itu, hasil penelitian ini berpotensi menjadi acuan teknis dalam perencanaan bangunan pengendali sedimen di wilayah rawan bencana. Kebaruan riset ini terletak pada pendekatannya yang fokus pada variabel kemiringan dan karakteristik hidraulik, menjadikannya kontribusi penting dalam pengembangan sistem mitigasi berbasis infrastruktur.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengamati karakteristik aliran debris yang melintasi sabo dam tipe beam dengan variasi kemiringan saluran. Tujuannya adalah untuk menganalisis perubahan tinggi muka air, kecepatan aliran, dan bilangan Froude sebelum dan sesudah pemasangan sabo dam. Metode ini memungkinkan kontrol variabel yang ketat dalam skenario laboratorium untuk mengidentifikasi pengaruh kemiringan terhadap performa sabo dam.

Menurut Han, Xie [14], eksperimen flume sangat bermanfaat dalam meniru dinamika aliran debris secara terkendali, meskipun terdapat keterbatasan dalam skalabilitas dan kompleksitas topografi. Kendati begitu, metode ini tetap memberikan data dasar yang sangat relevan bagi pengembangan desain struktur pengendali sedimen di lapangan.

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Hidrolika, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, yang terletak di Jl. Poros Malino Km. 6, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Lokasi ini dipilih karena memiliki fasilitas laboratorium yang memadai untuk eksperimen flume dan simulasi model sabo dam dalam skala kecil.

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan konteks geografis dan visual lokasi penelitian:



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian



Gambar 2. Lokasi Terpilih: Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2.2 Pengumpulan dan Analisis Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Metode pengumpulan data mengacu pada tujuan utama penelitian, yaitu menganalisis karakteristik aliran sebelum dan sesudah sabo dam dengan berbagai variasi kemiringan saluran.

Data Primer

Pengambilan data primer dilakukan melalui percobaan fisik pada flume menggunakan model sabo dam tipe beam dengan skala tertentu. Variasi kemiringan yang digunakan adalah 6° , 8° , dan 10° . Pengamatan dilakukan terhadap tiga parameter utama: tinggi muka air (h), kecepatan aliran (V), dan bilangan Froude (Fr).

Prosedur pengambilan data melibatkan dua tahap:

- Sebelum Sabo Dam: Flume dioperasikan untuk mendapatkan data dasar. Pengamatan dilakukan pada tiga titik pengamatan Sebelum sabo dam.
- Setelah Sabo Dam: Sabo dam tipe beam dipasang pada posisi tetap di flume. Dengan debit yang sama, dilakukan pengukuran ulang terhadap variabel yang sama di tiga titik pengamatan Sebelum dan Setelah

Alat yang digunakan dalam pengukuran meliputi current meter untuk mengukur kecepatan, point gauge untuk tinggi muka air, stopwatch, dan penggaris. Dokumentasi visual mendukung setiap sesi pengamatan

Model sabo dam dirancang berdasarkan referensi [15] dengan perbandingan skala:

- Lebar sungai prototipe: 30 m
- Lebar flume model: 0,3 m
- Skala: 1:100

Model ini disesuaikan agar memenuhi prinsip kemiripan aliran, khususnya kesamaan bilangan Froude, sebagaimana dijelaskan oleh Harada, Satofuka and Mizuyama [16]. Dengan skala ini, flume memungkinkan simulasi interaksi antara aliran debris dan struktur sabo dam dalam kondisi realistis namun terkontrol

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bentuk model sabo dam tipe beam yang digunakan.

Data Sekunder

Data sekunder dikumpulkan dari:

- Jurnal ilmiah terkait aliran debris dan sabo dam.
- Laporan penelitian terdahulu.
- Literatur teknis mengenai flume modeling dan parameter hidrolika.

Data ini digunakan sebagai dasar teoritis, acuan perbandingan, serta untuk memperkuat analisis hasil

eksperimen. Selain itu, literatur ini membantu menjelaskan pentingnya prinsip kemiripan (*flow similarity*) dalam eksperimen laboratorium. Penelitian Qiu, Wang [17] menunjukkan bahwa penggunaan parameter tanpa dimensi seperti bilangan Froude dalam model skala dapat mempermudah ekstrapolasi hasil laboratorium ke kondisi nyata.



Gambar 3 Tampak Depan Sabo Dam Tipe Beam.



Gambar 4 Tampak Samping Sabo Dam Tipe

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan kekurangannya, eksperimen flume tetap menjadi metode yang sangat berguna untuk memahami pengaruh geometri saluran dan desain sabo dam terhadap aliran debris. Temuan dari eksperimen ini nantinya akan digunakan sebagai dasar evaluasi efektivitas sabo dam tipe beam dalam konteks variasi kemiringan.

3. Hasil

Bab ini menyajikan hasil eksperimen laboratorium mengenai karakteristik aliran debris pada tiga variasi kemiringan saluran (6° , 8° , dan 10°) sebelum dan sesudah melewati sabo dam tipe beam. Analisis difokuskan pada tinggi muka air, kecepatan aliran, bilangan Froude, serta efisiensi sabo dam dalam menahan sedimen, batu (boulder), dan kayu

3.1 Tinggi Muka Air dan Kecepatan

Variasi kemiringan saluran secara signifikan memengaruhi distribusi kecepatan dan tinggi muka air. Semakin besar

kemiringan, semakin tinggi kecepatan aliran dan semakin dangkal tinggi muka air [18].

Pemasangan sabo dam menyebabkan penurunan kecepatan dan redistribusi muka air, menghasilkan profil aliran yang lebih seragam [19]. Hasil eksperimen menunjukkan perubahan nyata pada parameter hidraulik sebelum dan sesudah sabo dam di masing-masing variasi kemiringan.

Tabel 1. Tinggi Muka Air dan Kecepatan Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 6°)

Debit (Q) 0.0053 m³/s					
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam	
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s
1	0,025	0,375	0,756	0,025	0,814
2	0,022	0,251	0,537	0,022	0,852
3	0,028	0,524	0,992	0,022	0,892

Tabel 2. Tinggi Muka Air dan Kecepatan Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 8°)

Debit (Q) 0.0053 m³/s					
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam	
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s
1	0,020	0,438	0,989	0,024	0,976
2	0,021	0,260	0,579	0,021	0,991
3	0,021	0,450	0,998	0,022	1,041

Tabel 3. Tinggi Muka Air dan Kecepatan Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 10°)

Debit (Q) 0.0053 m³/s					
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam	
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s
1	0,020	0,345	0,651	0,022	1,002
2	0,017	0,269	0,434	0,020	1,099
3	0,020	0,434	0,999	0,020	1,089

3.2 Eksplorasi Bentuk Bangunan

Bilangan Froude digunakan untuk menentukan jenis rezim aliran, apakah subkritis ($Fr < 1$), kritis ($Fr = 1$), atau superkritis ($Fr > 1$) (Chowdhury et al., 2024). Nilai Fr meningkat seiring bertambahnya kemiringan saluran dan kecepatan aliran [20].

Sebelum pemasangan sabo dam, sebagian besar aliran tergolong subkritis. Namun setelah dam dipasang, terjadi perubahan menjadi aliran superkritis di hampir seluruh titik pengamatan. Peningkatan nilai Fr menunjukkan bahwa pemasangan sabo dam, meskipun meredam kecepatan secara lokal, menyebabkan redistribusi energi yang menghasilkan percepatan aliran di hilir.

Tabel 4. Nilai Bilangan Froude Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 6°)

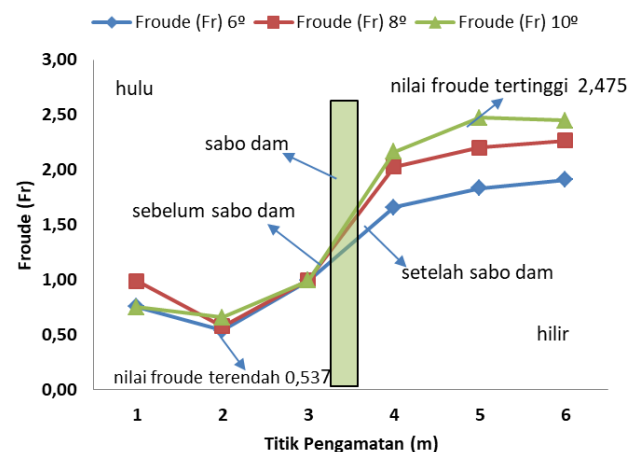
Debit (Q) 0.0053 m³/s						
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam		
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr
1	0,025	0,375	0,756	0,025	0,814	1,660
2	0,022	0,251	0,537	0,022	0,852	1,833
3	0,028	0,524	0,992	0,022	0,892	1,909

Tabel 5. Nilai Bilangan Froude Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 8°)

Debit (Q) 0.0053 m³/s						
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam		
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr
1	0,020	0,438	0,989	0,024	0,976	2,026
2	0,021	0,260	0,579	0,021	0,991	2,203
3	0,021	0,450	0,998	0,022	1,041	2,267

Tabel 6. Nilai Bilangan Froude Sebelum dan Sesudah Sabo Dam (Kemiringan 10°)

Debit (Q) 0.0053 m³/s						
Titik Pengamatan	Sebelum Sabo Dam			Setelah Sabo Dam		
	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr	Tinggi Muka Air (h) m	Kecepatan (V) m/s	Fr
1	0,022	0,345	0,751	0,022	1,002	2,163
2	0,017	0,269	0,656	0,020	1,099	2,475
3	0,020	0,434	0,999	0,020	1,089	2,448



Gambar 5. Perbandingan Bilangan Froude dengan Variasi Kemiringan

Dari hasil pengamatan Gambar 5 untuk bilangan Froude (Fr) nilai Froude terendah terdapat di kemiringan 6° sebelum sabo di titik pengamatan 2 dengan nilai 0,537 dan untuk nilai Froude tertinggi terdapat di kemiringan 10° setelah sabo di titik pengamatan 2 dengan nilai 2,475

Keberadaan sabo dam menyebabkan perubahan signifikan pada karakteristik aliran, yang ditandai dengan peningkatan bilangan Froude dari kondisi subkritis di hulu menjadi superkritis di hilir. Peningkatan ini semakin besar seiring bertambahnya kemiringan saluran, dengan nilai Froude tertinggi sebesar 2,475 pada kemiringan 10°.

3.3 Persentase Sedimen, Kayu, dan Boulder

Efektivitas sabo dam dalam menahan material debris diuji pada masing-masing variasi kemiringan. Faktor-faktor seperti ukuran, bentuk, dan kecepatan partikel memengaruhi kinerja filtrasi dam [11,21].

Pada kemiringan 6°, sabo dam menunjukkan efisiensi tinggi dalam menahan sedimen dan boulder, dengan sebagian kecil kayu yang lolos. Pada kemiringan 8°, peningkatan kecepatan aliran menyebabkan lebih banyak

kayu dan sedimen lolos. Sementara pada kemiringan 10°, efektivitas menurun terhadap partikel besar, sejalan dengan peningkatan gaya inersia akibat gradien curam [22].

Tabel 7. Persentase sedimen, boulder dan kayu (Kemiringan 6°)

KEMIRINGAN 6°	Berat tertahan (kg)	% Tertahan	Berat lolos (kg)	% Tertahan
SEDIMEN	18,9	100	4,906	100
BOULDER	2,109	100	0,401	100
KAYU	123	100	27	100

Tabel 8. Persentase sedimen, boulder dan kayu (Kemiringan 8°)

KEMIRINGAN 8°	Berat lolos (kg)	% Tertahan	Berat lolos (kg)	% Tertahan
SEDIMEN	21,885	100	24,274	100
BOULDER	1,631	100	2,223	100
KAYU	120	100	30	100

Tabel 9. Persentase sedimen, boulder dan kayu (Kemiringan 10°)

KEMIRINGAN 10°	Berat lolos (kg)	% Tertahan	Berat lolos (kg)	% Tertahan
SEDIMEN	14	100	29,7	100
BOULDER	2,23	100	1,18	100
KAYU	92	100	58	100

Hasil ini menunjukkan bahwa desain sabo dam perlu mempertimbangkan kondisi topografi dan karakteristik debris secara spesifik. Semakin tinggi kemiringan saluran, maka semakin besar gaya yang harus dihadapi dam dalam menangkap material berukuran besar. Selain desain fisik, pemahaman terhadap karakteristik dinamika aliran sangat penting untuk menentukan efektivitas dan keberlanjutan fungsi sabo dam dalam jangka panjang [22].

4. Pembahasan

Hasil eksperimen laboratorium mengenai aliran debris dan performa sabo dam tipe beam menunjukkan kecenderungan yang selaras dengan temuan-temuan lapangan dalam konteks pengendalian bencana aliran debris. Secara umum, pola aliran, nilai kecepatan, tinggi muka air, dan bilangan Froude yang diperoleh dalam pengujian skala model menggambarkan kondisi nyata yang terjadi di sungai-sungai dengan risiko tinggi terhadap aliran debris. Temuan ini memperkuat validitas metode eksperimen flume sebagai pendekatan ilmiah untuk mengevaluasi dinamika aliran dalam sistem saluran terbuka [21].

Eksperimen ini menunjukkan bahwa pemasangan sabo dam tidak selalu menyebabkan penurunan kecepatan aliran, namun pada kondisi tertentu justru mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran di bagian hilir. Fenomena ini berkaitan erat dengan perubahan tinggi muka air dan dinamika aliran di sekitar struktur sabo dam.

Peningkatan tinggi muka air di bagian hulu dan tepat di atas sabo dam menyebabkan akumulasi energi potensial. Ketika aliran melewati struktur sabo dam, energi tersebut dilepaskan dalam bentuk percepatan aliran dan terjadinya loncatan air (*hydraulic jump*), sehingga kecepatan aliran di hilir mengalami peningkatan yang signifikan.

Hal ini tercermin dari nilai bilangan Froude yang meningkat setelah melewati sabo dam, menunjukkan terjadinya transisi rezim aliran dari subkritis menjadi superkritis. Semakin besar kemiringan saluran, semakin

dominan gaya inersia dibandingkan gaya gravitasi, yang menyebabkan kecepatan aliran semakin tinggi.

Fenomena ini juga terkonfirmasi oleh studi lapangan yang menemukan bahwa keberadaan sabo dam tidak hanya mengurangi energi aliran tetapi juga mengubah pola sedimentasi di hilir, menciptakan zona deposisi yang lebih stabil [4]. Hasil ini menegaskan bahwa meskipun kondisi laboratorium bersifat terkontrol, data yang dihasilkan tetap memiliki nilai prediktif yang tinggi terhadap perilaku sabo dam di lapangan nyata.

Dalam konteks nilai bilangan Froude, ditemukan bahwa variasi kemiringan saluran memiliki pengaruh yang konsisten terhadap transisi rezim aliran dari subkritis menjadi superkritis setelah melewati sabo dam. Semakin curam saluran, semakin tinggi nilai Fr , yang mencerminkan dominasi gaya inersia dalam aliran. Penelitian Pasculli, Zito [20] menekankan bahwa perubahan rezim ini memengaruhi mekanisme transportasi sedimen dan potensi propagasi gelombang ke hilir. Oleh karena itu, pemahaman terhadap parameter Fr dalam evaluasi performa sabo dam menjadi aspek penting dalam desain bangunan pengendali.

Efektivitas sabo dam tipe beam dalam menahan material besar seperti batu dan kayu menunjukkan kinerja yang variatif tergantung pada kondisi kemiringan dan kecepatan aliran. Pada kemiringan 6°, sebagian besar sedimen dan kayu berhasil ditahan, menunjukkan efisiensi tinggi. Namun, pada kemiringan 10°, terdapat peningkatan jumlah material yang lolos karena gaya inersia yang lebih tinggi, yang meningkatkan energi kinetik material saat menabrak struktur dam. Hal ini sesuai dengan temuan Pramesthi, Harlan and Irianto [23] yang menyebutkan bahwa semakin curam saluran, semakin sulit menahan debris berukuran besar akibat peningkatan momentum partikel.

Dari sisi desain, hasil eksperimen ini memberikan beberapa implikasi teknis yang dapat digunakan sebagai rekomendasi perbaikan kinerja sabo dam tipe beam. Pertama, perlu adanya konfigurasi bukaan yang variatif, misalnya kombinasi ukuran celah besar dan kecil, untuk menyesuaikan dengan berbagai ukuran debris seperti kayu, batu besar, dan pasir halus. Lestari, Fathani [12] menyatakan bahwa variasi bukaan ini meningkatkan kapasitas retensi dalam menghadapi kondisi aliran berbeda.

Kedua, integrasi elemen peredam energi seperti baffle atau permukaan kasar pada struktur dam dapat membantu mengurangi kecepatan aliran sebelum mencapai bagian utama dam. Halim, Nugroho and Lestari [24] menemukan bahwa fitur ini meningkatkan efektivitas dam dalam menjebak sedimen sambil mengurangi potensi erosi pada dasar saluran. Dalam konteks eksperimen ini, fitur peredam tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi sabo dam pada kemiringan tinggi.

Ketiga, bahan konstruksi yang adaptif terhadap gaya dinamis dari aliran debris direkomendasikan, terutama di wilayah rawan gempa atau dengan risiko erosi tinggi. Wang, Yao [3] menyebutkan bahwa meskipun sebagian besar literatur fokus pada desain struktural, pemilihan material yang memiliki kekuatan dan fleksibilitas menjadi aspek yang belum banyak dieksplorasi namun sangat penting untuk ketahanan jangka panjang.

Akhirnya, perlu ditegaskan pentingnya inspeksi dan pemeliharaan rutin terhadap sabo dam. Bernard, Barbini [22] menyatakan bahwa akumulasi sedimen dapat mengurangi kapasitas fungsional dam dan meningkatkan risiko kegagalan struktur. Oleh karena itu, strategi pemeliharaan perlu diintegrasikan dalam siklus desain dan operasi sabo dam untuk memastikan efektivitasnya dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil laboratorium ini memperkaya pemahaman teknis terhadap interaksi antara geometri saluran, rezim aliran, dan performa struktural sabo dam. Diskusi ini menegaskan bahwa penggunaan pendekatan eksperimen yang didukung literatur dan praktik lapangan dapat memberikan rekomendasi desain yang lebih adaptif terhadap kondisi topografi dan dinamika aliran debris di berbagai wilayah rawan bencana.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sabo dam tipe beam memiliki efektivitas signifikan dalam mengubah karakteristik aliran debris serta menahan material besar seperti sedimen, boulder, dan kayu. Hasil eksperimen pada variasi kemiringan 6°, 8°, dan 10° menunjukkan bahwa setelah melewati sabo dam, terjadi peningkatan nilai bilangan Froude yang mengindikasikan transisi aliran dari subkritis menjadi superkritis. Meskipun kecepatan aliran meningkat, struktur sabo dam tetap mampu menahan sebagian besar material debris, meski efisiensinya menurun seiring peningkatan kemiringan. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa gaya inersia meningkat pada saluran lebih curam, sehingga perancangan sabo dam harus mempertimbangkan konfigurasi bukaan, fitur peredam energi, dan bahan konstruksi adaptif. Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan dasar teknis bagi perencanaan sabo dam di wilayah rawan bencana, khususnya yang memiliki variasi geometri saluran ekstrem.

Daftar Pustaka

- [1] Wahab M, Mohd Remy Rozainy Mohd Arif Z, Ikhsan J, Zawawi MH, Abas A, Noor NM, et al. Assessment of Debris Flow Impact Based on Experimental Analysis Along a Deposition Area. *Sustainability*. 2023;15(17):13132.
- [2] Ikhsan J, Ardiansyah R, Legono D. Simulation of Debris Flows in the Watershed of the Putih River, Indonesia Using SIMLAR 2.1. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;930(1):012034.
- [3] Wang X, Yao Y, Wang S-L, Feng ZJ, Chu YE. Experimental Study on Dynamic Performance of Tubular Flange Grid-Type Dam Under Impact Load. *Symmetry*. 2022;14(7):1486.
- [4] Fathani TF. Debris Flow Hazard Analysis Toward the Implementation of Mitigation Measures. *International Journal of Geomate*. 2022;23(95).
- [5] Kim M-I, Kim N. Analysis of Debris Flow Reduction Effect of Check Dam Types Considering the Mountain Stream Shape: A Case Study of 2016 Debris Flow Hazard in Ulleung-do Island, South Korea. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021(1).
- [6] Wei L, Hu K, Liu S, Nan N, Zhang X, Zhang Q, Rahim A. The Vulnerability of Buildings to a Large-Scale Debris Flow and Outburst Flood Hazard Chain That Occurred on 30 August 2020 in Ganluo, Southwest China. 2023.
- [7] Wu KT, Tsai CW, Wu M-J. Probabilistic Characterization of Sweep and Ejection Events in Turbulent Flows and Its Implications on Sediment Transport. *Water Resources Research*. 2022;58(5).
- [8] Tsai CW, Huang SH, Hung SY. Incorporating the Memory Effect of Turbulence Structures Into Suspended Sediment Transport Modeling. *Water Resources Research*. 2021;57(3).
- [9] Goswami A, Kalita HM. Semicoupled and Fully Coupled Numerical Models for Morphodynamic Flow Simulation in River With Irregular Planforms. 2024.
- [10] Harada N, Kimura I, Satofuka Y, Mizuyama T. Proposed Countermeasures Against Woody Debris Damage Considering Runoff Characteristics. *Water*. 2023;15(8):1588.
- [11] Xie X, Wang X, Liu Z, Liu Z, Zhao S. Regulation Effect of Slit-Check Dam Against Woody Debris Flow: Laboratory Test. *Frontiers in Earth Science*. 2023;10.
- [12] Lestari DA, Fathani TF, Faris F, Wilopo W. Designing Conduit Sabo Dam Series as a Debris Flow Protection Structure. *E3s Web of Conferences*. 2021;331:08001.
- [13] Shen H, Yang Z, Hu G, Tian S, Rahman M, Ren J, Zhang Y. Causal Mechanisms and Evolution Processes of "Block-Burst" Debris Flow Hazard Chains in Mountainous Urban Areas: A Case Study of Meilong Gully in Danba County, Sichuan Province, China. *Frontiers in Earth Science*. 2024;12.
- [14] Han Z, Xie W, Zeng C, Li Y, Li C, Ding H, et al. Exploring the Temporal-Varying and Depth-Nonlinear Velocity Profile of Debris Flows Based on a Stratification Statistical Algorithm for 3d-HBP-SPH Particles. 2023.
- [15] Wicaksono PH, Dermawan V. Uji Model Fisik Hidraulik Terjunan Tegak dengan Kisi Peredam (Longitudinal Racks) untuk Pengendalian Loncatan Hidraulik. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*. 2010;1(2):147-57.
- [16] Harada N, Satofuka Y, Mizuyama T. A Proposal for Sediment Control Countermeasures in Non-Flowing Mountain Streams. *Water*. 2024;16(9):1197.
- [17] Qiu E, Wang B, Sun X, Zhang R, Qu M, Wan X, Jianjun H. Study on the Movement Characteristics and Predicted Prevention Effect of Debris Flow in Zile Valley, Ganluo, Sichuan, China. 2022.
- [18] Arkesteijn L, Blom A, Labeur RJ. A Rapid Method for Modeling Transient River Response Under Stochastic Controls With Applications to Sea Level Rise and Sediment Nourishment. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*. 2021;126(12).
- [19] Gaagai A, Aouissi HA, Krauklis AE, Burlakovs J, Athamena A, Zekker I, et al. Modeling and Risk Analysis of Dam-Break Flooding in a Semi-Arid Montane Watershed: A Case Study of the Yabous Dam, Northeastern Algeria. *Water*. 2022;14(5):767.
- [20] Pasculli A, Zito C, Sciarra N, Mangifesta M. Back Analysis of a Real Debris Flow, the Morino-Rendinara Test Case (Italy), Using RAMMS Software. *Land*. 2024;13(12):2078.
- [21] Piton G, Goodwin SR, Mark E, Strouth A. Debris Flows, Boulders and Constrictions: A Simple Framework for Modeling Jamming, and Its Consequences on Outflow. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*. 2022;127(5).
- [22] Bernard M, Barbini M, Boreggio M, Biasuzzi K, Gregoretti C. Deposition Areas: An Effective Solution for the Reduction of the Sediment Volume Transported by Stony Debris Flows on the High-sloping Reach of Channels Incising Fans and Debris Cones. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2023;49(2):664-83.
- [23] Pramesthi ZY, Harlan D, Irianto EW. Modeling of 2D Hec-Ras Simulation on Debris Flow Analysis on Morphological Changes of the Omu River, Sigi Regency, Central Sulawesi. *E3s Web of Conferences*. 2024;500:03041.
- [24] Halim FK, Nugroho J, Lestari S. The Effect of Sabo Works Design and River Improvement on the Magila River With Consideration on Morphological Changes Influenced by Debris Flow Events. *E3s Web of Conferences*. 2024;500:03034.

