

STRATEGI PENANGANAN DARURAT *Groundsill* SRANDAKAN DENGAN INTEGRASI MODEL NUMERIK DAN METODE ANALITIS SHIELDS–IZBASH

Sri Wahyuni^{1*}, Afif Rachmadi¹, Harianto¹, dan M. Rizky Devianto¹

¹Balai Teknik Sungai, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PU.

* sriwahyuni7596@gmail.com

Pemasukan: 14 November 2025

Perbaikan: 30 Desember 2025

Diterima: 31 Desember 2025

Intisari

Sungai Progo, yang berhulu di Gunung Sindoro dan bermuara di Samudera Hindia, memiliki peran penting dalam menopang infrastruktur strategis dan ekosistem di Daerah Istimewa Yogyakarta. Namun, aktivitas vulkanik Gunung Merapi tahun 2010 yang menghasilkan banjir lahar telah meningkatkan suplai sedimen secara signifikan, diikuti dengan aktivitas penambangan galian C yang tidak terkendali. Akumulasi kondisi tersebut mempercepat degradasi morfologi sungai, memicu penurunan dasar sungai hingga 5 meter dalam kurun waktu 20 tahun. Dampak serius dari kondisi ini terlihat pada kerusakan *Groundsill* Srandakan pada Januari 2025, yang berpotensi mengancam stabilitas jembatan, bendung, serta infrastruktur sungai lainnya. Studi ini bertujuan merancang penanganan darurat *Groundsill* Srandakan melalui pendekatan model numerik dan metode analitis. Pemodelan numerik dua dimensi menggunakan perangkat lunak HEC-RAS diterapkan untuk menganalisis karakteristik aliran, sedangkan kebutuhan material timbunan ditentukan melalui metode Shields dan Izbash. Hasil analisis menunjukkan kecepatan aliran pada lokasi *groundsill* mencapai 7 m/s, sehingga dibutuhkan timbunan batu *boulder* dengan berat minimal 2,2 ton per unit agar stabil terhadap tipe aliran. Rekomendasi desain timbunan ini menekankan efektivitas konstruksi sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem sungai. Penanganan darurat *Groundsill* Srandakan diharapkan tidak hanya melindungi infrastruktur vital, tetapi juga mendukung konservasi sumber daya air melalui upaya pengendalian degradasi dasar sungai serta pemeliharaan ekosistem perairan.

Kata kunci : HEC-RAS 2 Dimensi, penanganan darurat, transpor sedimen

Latar Belakang

Sungai Progo adalah sungai yang sumber airnya berasal dari Gunung Sindoro. Sungai sepanjang 140 km ini memiliki hulu di Desa Jumprit dan bermuara di Samudera Hindia melalui Magelang dan Daerah Istimewa Yogyakarta. (Brahmasta et al., 2013). Sungai Progo memiliki daerah tangkapan air (DTA) seluas 2.438,33 km² (Uzaer et al., 2022). Pada Oktober 2010, terjadi letusan Gunung Merapi yang memicu terjadinya banjir lahar di Sungai Progo. Peristiwa tersebut berdampak pada peningkatan suplai sedimen, yang melebihi kondisi keseimbangan alami sungai tersebut (Harsanto, 2015). Berdasarkan penelitian, morfologi sungai mengalami

perubahan dinamis pada tahun-tahun setelah terjadinya banjir lahar tersebut (Adhitama et al., 2024). Penambangan galian C di sepanjang sungai memperparah kondisi dasar sungai dan mempercepat degradasi lingkungan.

Berbagai infrastruktur seperti jembatan dan jembatan rel kereta api turut melintasi sungai Progo. Salah satu infrastruktur melintang Sungai Progo adalah *Groundsill* Srandakan. *Groundsill* Srandakan dibangun pada tahun 2005-2006 dengan tujuan mempertahankan elevasi dasar Sungai Progo guna mengamankan infrastruktur hulu, seperti Jembatan Srandakan II, Bendung Sapon, dan Bendung Kamijoro. Pada 25 Januari 2025, terjadi keruntuhan pada *groundsill* yang disebabkan oleh gerusan di bagian hilir yang terjadi akibat penambangan galian C yang tidak terkendali, sehingga elevasi dasar sungai mengalami penurunan sekitar 5 meter dalam kurun waktu 20 tahun. Kondisi ini kemudian memicu penurunan dasar sungai di bagian hulu, yang dapat dilihat dari runtuhnya Jembatan Srandakan I serta tersingkapnya pondasi Jembatan Srandakan II.

Untuk memitigasi bencana banjir di *Groundsill* Srandakan secara cepat dan efisien, perlu dilakukan perencanaan darurat yang efektif sehingga analisis teknis perlu dilakukan, khususnya pemodelan hidraulik dan analisis transport sedimen. Pemodelan hidraulik dapat dipahami sebagai uji model fisik maupun uji model numerik. Pemodelan numerik mencakup empat langkah utama: konstruksi model matematis yang sesuai dengan masalah fisik melalui asumsi-asumsi yang tepat; pengembangan model numerik yang sesuai; perolehan hasil melalui implementasi model tersebut; serta interpretasi hasil dengan bantuan tabel, grafik, diagram, dan animasi. Langkah terakhir adalah merekomendasikan solusi yang sesuai (Anees dkk., 2016).

Kerusakan pada *Groundsill* Srandakan menimbulkan urgensi penanganan darurat karena berpotensi mengancam keselamatan publik serta fungsi strategis infrastruktur sungai. Upaya penanganan darurat *Groundsill* Srandakan tidak hanya ditujukan untuk menjaga stabilitas struktur dan infrastruktur strategis, tetapi juga merupakan bagian dari konservasi sumber daya air. Studi membuktikan bahwa pemeliharaan dalam keberlanjutan ekosistem sungai berperan penting dalam menjaga fungsi ekosistem sungai (Tormos et al., 2014).

Studi ini bertujuan merancang penanganan darurat *Groundsill* Srandakan melalui model numerik dan metode analitis. Pemodelan numerik 2D dipilih dengan pertimbangan bahwa pemodelan banjir dengan 2D dapat memetakan genangan banjir pada dataran banjir (*floodplain*) ketika kapasitas saluran terlampaui. Pemodelan 2D juga dapat membantu untuk mengestimasi area yang rentan tergenang berdasarkan data DEM (*Digital Elevation Model*). Pemodelan 2D lebih baik dalam menggambarkan dinamika banjir dan dapat menghindari keterbatasan yang timbul dari representasi relief yang tidak akurat pada pemodelan 1D.

Akan tetapi, pemodelan 2D juga memiliki beberapa keterbatasan diantaranya adalah model 2D memerlukan data yang banyak dan dengan akurasi yang tinggi, sehingga komputasi yang dijalankan akan memerlukan waktu yang lama. Hal ini menyebabkan pemodelan 2D tidak cocok untuk prakiraan banjir kondisi nyata (*real time flood forecasting*).

Dalam studi ini, pemodelan numerik dua dimensi dengan perangkat lunak HEC-RAS digunakan untuk mengkaji karakteristik kecepatan aliran, sedangkan spesifikasi material timbunan ditentukan melalui metode analitis Shields dan Izbash. Analisis turut mempertimbangkan aspek lingkungan dan kemudahan implementasi di lapangan agar konstruksi dapat berjalan efektif serta efisien, dengan menempatkan keamanan struktur dan ekosistem sekitar sebagai prioritas utama. Selain itu, studi ini diharapkan mendukung upaya konservasi sumber daya air melalui pengendalian degradasi dasar sungai guna menjaga keberlanjutan ekosistem perairan.

Metodologi Studi

Lokasi Studi

Lokasi studi ini dilakukan di *Groundsill* Srandakan, Yogyakarta yang dapat dilihat pada Gambar 1. Batas daerah yang dianalisis ditunjukkan oleh kotak merah.



Gambar 1. Peta Lokasi *Groundsill* Srandakan, Yogyakarta (Sumber: *Google Earth*, 2026)

Data Studi

Untuk mendukung analisis hidraulika, diperlukan data primer dan sekunder yang diperoleh melalui studi literatur maupun disediakan oleh instansi terkait. Data studi ditunjukkan pada Tabel 1, sedangkan data debit ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Data Studi

No	Nama Data	Asal Data	Keterangan	Fungsi
1	Topografi LiDAR	Balai Teknik Sungai, 2025	Primer	<i>Geometric Data</i>
2	Topografi Bathimetri	BBWS Serayu Opak, 2025	Sekunder	<i>Geometric Data</i>
3	Debit Banjir Kala Ulang 2, 5, 10, 25, 50, 100 tahun	BBWS Serayu Opak, 2025	Sekunder	<i>Boundary Condition</i>
4	Data Teknis <i>Groundsill</i>	BBWS Serayu Opak, 2025	Sekunder	<i>Geometric Data</i>
5	Gambar Desain <i>Groundsill</i>	BBWS Serayu Opak, 2025	Sekunder	<i>Geometric Data</i>

Tabel 2. Data Debit Kala Ulang banjir

No	Kala Ulang Q (Tahun)	Peluang (%)	Debit (m ³ /s)	H Air Mercu (m)	Elevasi (m)
1	2,00	50	981,82	1,51	12,14
2	5,00	20	1.407,67	1,85	12,48
3	10,00	10	1.746,95	2,09	12,72
4	25,00	4	2.247,89	2,41	13,04
5	50,00	2	2.677,72	2,64	13,27
6	100,00	1	3.160,70	2,72	13,35

Analisis Numerik 2 Dimensi

Untuk mengetahui kecepatan aliran di tubuh *groundsill*, maka dilakukan pemodelan numerik 2 dimensi menggunakan perangkat lunak HEC-RAS. Pemodelan numerik dipilih karena dapat menghemat waktu, tenaga, dan biaya dibandingkan dengan pemodelan hidrolis fisik.

HEC-RAS, atau *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*, adalah sebuah *software* yang dikembangkan oleh *U.S. Army Corps of Engineers* untuk melakukan simulasi aliran sungai (Brunner, 2024). *User* dapat memilih antara model dengan dimensionalitas berbeda (1D, 2D, dll.), skema numerik (volume hingga, perbedaan hingga, dll.), representasi *mesh* (terstruktur, tidak terstruktur, dll.) dan persamaan (Gelombang Kinematika, Gelombang Difusi, Muskingum, dll.), tergantung pada bidang studi atau tujuan simulasi (Ongdas et al., 2020).

Terdapat beberapa perbedaan pada persamaan yang digunakan dalam pemodelan numerik 1D dan 2D. HEC-RAS 1D menggunakan teknik iterasi Newton-Raphson untuk menyelesaikan persamaan Saint Venant satu dimensi yang dirumuskan untuk merepresentasikan aliran di saluran maupun dataran banjir, dengan mempertimbangkan persamaan kontinuitas dan momentum (Dhungel et al., 2019). Persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial((1 - \phi)Q)}{\partial x_f} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{\phi^2 Q^2}{A_c}\right)}{\partial x_c} + \frac{\partial\left(\frac{(1 - \phi^2)Q^2}{A_f}\right)}{\partial x_f} = -gA_c\left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc}\right) - gA_f\left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff}\right) \quad (2)$$

Di mana g adalah percepatan gravitasi, t adalah waktu, x_c adalah jarak longitudinal sepanjang saluran utama, x_f adalah jarak pada penampang dataran banjir, z adalah elevasi muka air, A_c adalah luas penampang saluran, A_f adalah luas penampang dataran banjir, Q adalah debit total, S_{fc} adalah kemiringan akibat gesekan saluran, S_{ff} adalah kemiringan akibat gesekan dataran banjir, serta ϕ adalah porsi aliran saluran utama dari debit total.

HEC-RAS 2D didasarkan pada persamaan Navier–Stokes 3D yang dirata-ratakan secara vertikal, yang diturunkan menjadi persamaan Saint Venant 2D standar untuk kontinuitas dan momentum (Dhungel et al., 2019). Persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \quad (5)$$

Di mana g adalah percepatan gravitasi, h adalah kedalaman air, t adalah waktu, x adalah sumbu memanjang, y adalah sumbu melintang, u dan v adalah kecepatan aliran yang dirata-ratakan terhadap kedalaman pada arah x dan y , T_{xx} , T_{xy} , dan T_{yy} merupakan tegangan turbulen rata-rata kedalaman, D_{xx} , D_{xy} , dan D_{yy} adalah komponen dispersi akibat perataan kedalaman, τ_{bx} dan τ_{by} adalah tegangan geser dasar, ρ adalah massa jenis air, serta z adalah elevasi muka air (elevasi dasar + h).

Rumus Shields

Penentuan jenis material timbunan dilakukan melalui analisis transpor sedimen dengan prinsip dasar pergerakan awal butiran, yang dalam studi ini dibalik (*back analysis*) untuk memperoleh diameter butiran yang tidak bergerak, menggunakan pendekatan rumus Shields dan Izbash.

Penelitian mengenai pergerakan awal sedimen pertama kali dikembangkan secara sistematis oleh Shields (1936) melalui diagram yang kini dikenal luas sebagai diagram Shields. Diagram tersebut bersifat independen terhadap densitas butiran maupun sifat-sifat fluida (Woldegiorgis et al., 2018). Diagram Shields ditunjukkan pada Gambar 3.

Pergerakan material tanah (berbutir lepas) terjadi ketika tekanan geser yang diberikan oleh air pada tanah lebih besar daripada resistansi yang diberikan oleh tanah. Rasio tanpa dimensi ini (parameter Shields) dirumuskan sebagai berikut.

$$\psi_c = \frac{\text{load}}{\text{strength}} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_w)gD} \quad (1)$$

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

τ_c : tegangan geser kritis

ρ_s : berat jenis sedimen

ρ_w : berat jenis air

g : percepatan gravitasi

D : diameter sedimen

Tegangan geser yang terjadi pada dasar aliran dalam kondisi aliran seragam normal sepanjang lereng dirumuskan sebagai berikut.

$$\tau = \rho_w g h i \quad (2)$$

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

h : kedalaman aliran

i : kemiringan lereng (*slope*)

Perlu diperhatikan bahwa τ merupakan tegangan geser yang dihasilkan oleh aliran itu sendiri, sehingga merupakan karakteristik dari aliran tersebut, sedangkan τ_c merupakan tegangan geser kritis yang diperlukan untuk memicu pergerakan butiran, yang menjadi sifat khas dari butiran tersebut. Sehingga dengan kata lain, butiran akan bergerak ketika tegangan geser lebih besar daripada tegangan geser kritis ($\tau > \tau_c$)

Namun, karena parameter Shields dan bilangan Reynolds geser sama-sama melibatkan ukuran butiran dan kecepatan geser, metode ini mengandalkan grafik implisit yang sering kali sulit untuk diinterpretasikan secara langsung (Woldegiorgis et al., 2018). Pendekatan Shields mengasumsikan aliran yang seragam dan stabil dengan turbulensi yang timbul secara alami akibat kekasaran dasar, tanpa adanya sumber turbulensi tambahan seperti arus yang dihasilkan oleh baling-baling. Namun, pada kondisi dasar yang kasar di perairan dangkal serta adanya tingkat turbulensi yang tidak biasa, penggunaan rumus Izbash lebih dianjurkan (Laborie, 2007).

Rumus Izbash

Rumus Izbash merupakan suatu persamaan matematis yang digunakan untuk menghitung kestabilan batu pelindung (*armour stone*) pada lingkungan dengan aliran air. Dalam analisis kestabilan material granular terhadap arus, rumus Shields dan rumus Izbash merupakan dua metode yang umum digunakan. Rumus Shields lebih tepat diterapkan pada material berbutir halus seperti pasir dan kerikil, sedangkan rumus Izbash didesain khusus untuk material dengan ukuran batu yang lebih besar. Rumus ini dikembangkan oleh Sergei Vladimirovich Izbash dan secara umum dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{u_c}{\sqrt{\Delta g D}} = 1,7 \quad (3)$$

atau secara alternatif,

$$\Delta D = 0,7 \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

u_c : kecepatan aliran pada permukaan batu

Δ : kerapatan relatif batu yang dihitung sebagai $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$, dimana ρ_s adalah kerapatan batu dan ρ_w adalah kerapatan air

g : percepatan gravitasi

D : diameter sedimen

Koefisien 1,7 merupakan konstanta eksperimental yang diperoleh dari pengujian Izbash, yang merepresentasikan pengaruh gesekan, inersia, dan turbulensi aliran. Oleh karena itu, penggunaan konstanta ini hanya berlaku pada kondisi turbulensi yang dominan disebabkan oleh kekasaran material konstruksi dalam media air. Apabila kondisi tersebut tidak terpenuhi, diperlukan penyesuaian terhadap nilai koefisien tersebut (Izbash, 1935).

Skenario Pemodelan

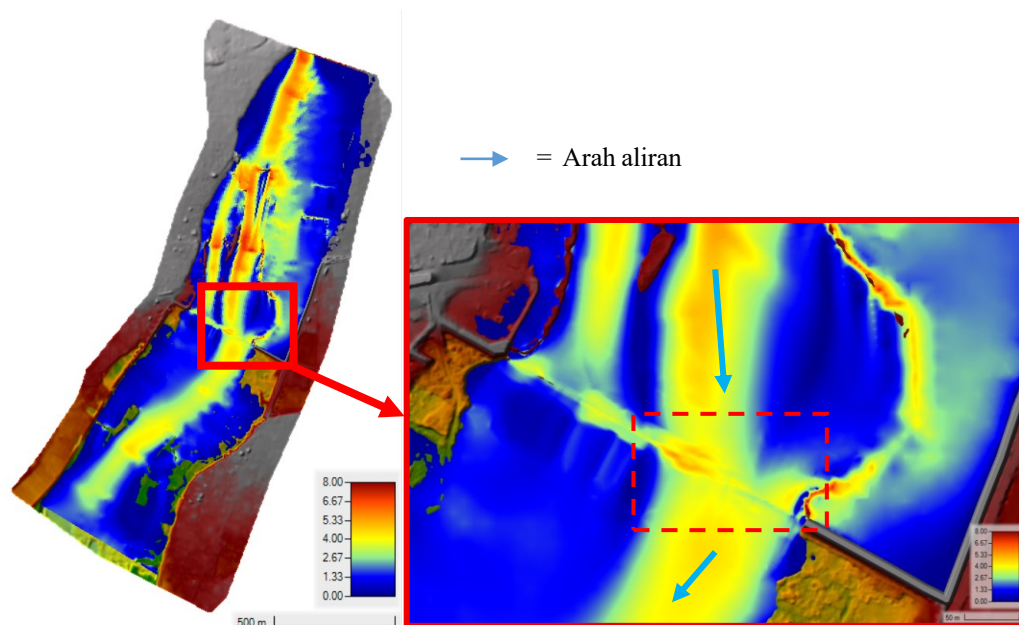
Analisis dalam studi ini menggunakan debit kala ulang 10 tahun (Q_{10}) sebagai batas hulu dan elevasi muka air surut sebagai batas hilir (Tabel 3). Skenario pemodelan bertujuan memperoleh kecepatan aliran maksimum pada as *groundsill* untuk mendesain material timbunan darurat. Pemilihan dimensi material perbaikan didasarkan pada *boulder*, blok beton, atau material sejenis yang stabil terhadap aliran.

Tabel 3. Data Debit Kala Ulang banjir

Seri	Batas Hulu	Geometri	Batas Hilir	Hasil Simulasi
1	Q_{10} (1.746,95 m ³ /s)	Eksisting	TMA = 1,2 m (Surut)	Kecepatan Aliran

Hasil Studi dan Pembahasan

Analisis dilakukan menggunakan data geometri DTM hasil pengukuran LiDAR dengan debit kala ulang 10 tahun sebagai *input*. Hasil pemodelan menunjukkan kecepatan aliran pada as *groundsill* mencapai 7 m/s, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Sebagai langkah penanganan darurat, direncanakan penggunaan timbunan batu *boulder* dengan parameter desain sebagaimana ditunjukkan pada 0. Kemiringan sungai (*slope*) yang digunakan dalam perhitungan ditentukan dari perbedaan tinggi muka air antara hulu dan hilir *groundsill*, sehingga diperoleh nilai cukup curam sebesar 0,01. Kondisi ini menimbulkan gaya aliran yang signifikan, sehingga material timbunan yang digunakan harus didesain mampu menahan tekanan aliran akibat kemiringan tersebut.



Gambar 2. Hasil Analisis Pemodelan 2D

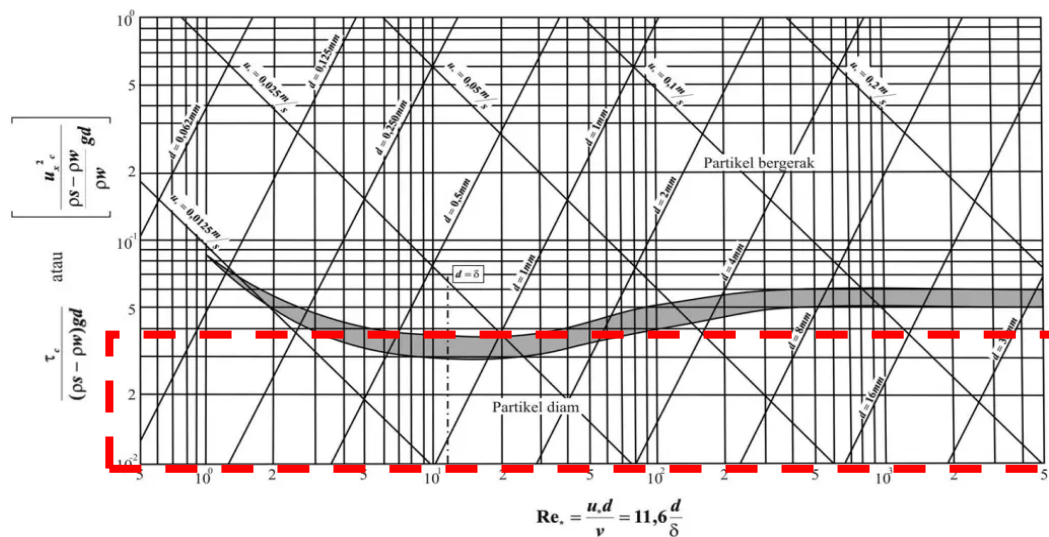
Stabilitas material *revetment* terhadap pengaruh aliran dapat ditentukan melalui dua pendekatan, yang pemilihannya bergantung pada jenis pembebanan yang bekerja: 1) kecepatan aliran berupa aliran horizontal sejajar tanggul, dan 2) debit aliran berupa aliran menurun pada lereng yang lebih curam dari 1:10, termasuk kondisi

limpasan tanpa gelombang dengan asumsi lereng bagian dalam berada dalam kondisi stabil (Pilarczyk, 2003). Oleh karena itu, dalam analisis ini penentuan parameter kecepatan aliran menjadi hal yang penting karena berpengaruh langsung terhadap perhitungan stabilitas dan desain timbunan.

Tabel 4. Parameter Desain Material Timbunan

No	Parameter	Simbol	Besaran	Satuan
1	Tinggi Muka Air	h	5	m
2	Kemiringan Sungai	i	0,01	-
3	Berat Jenis Batuan	ρ_s	2480	kg/m ³
4	Berat Jenis Air	ρ_w	1000	kg/m ³
5	Percepatan Gravitasi	g	9,81	m/s ²
6	Kecepatan Aliran Maks.	u	7	m/s

Berdasarkan data pada 0, dilakukan perhitungan diameter material timbunan *boulder* menggunakan metode Shields dan Izbash. Pada perhitungan dengan metode Shields, digunakan grafik pada Gambar 3 dengan asumsi nilai koefisien Shields kritis (τ_c) sebesar 0,03 yang merepresentasikan kondisi partikel dalam keadaan diam hingga *incipient motion* (gerak awal). Pilarczyk (2003) merekomendasikan nilai koefisien Shields kritis sekitar 0,035 untuk desain stabilitas riprap. Dalam analisis ini, nilai $\tau_c = 0,03$ dipilih karena masih berada dalam rentang nilai yang direkomendasikan tersebut dan berada pada zona partikel diam hingga awal gerak, yang lebih sesuai dengan karakteristik timbunan *boulder* yang memiliki efek *interlocking* dan kekasaran permukaan (*roughness*) tinggi. Pemilihan nilai ini dimaksudkan untuk memastikan berat dan diameter *boulder* yang direncanakan memiliki stabilitas yang memadai terhadap gaya aliran yang bekerja.



Gambar 3. Diagram Shields Modifikasi (Sumber: Woldegiorgis dkk., 2018)

Selanjutnya substitusi ke dalam persamaan Shields, sehingga:

$$\tau_c = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w)gD}$$

atau secara alternatif,

$$D = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w)\tau_c g}$$

dengan,

$$\tau = \rho_w g h i$$

$$\tau = 1000 \times 9,81 \times 5 \times 0,01 = 490,5 \text{ Pa}$$

sehingga,

$$D = \frac{490,5}{(2480 - 1000) \times 0,03 \times 9,81} = 1,126 \approx 1,1 \text{ m}$$

Selanjutnya, volume dan berat material *boulder* dihitung sebagai berikut.

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{1,1}{2}\right)^3 = 0,75 \text{ m}^3$$

$$W = V \times \rho_s = 0,75 \times 2480 = 1853,811 \text{ kg} = 1,85 \text{ ton}$$

Hasil perhitungan dengan metode Shields menunjukkan bahwa berat minimum *boulder* yang dibutuhkan adalah sebesar 1,85 ton per buah dengan berat jenis 2.480 kg/m³. Selanjutnya, perhitungan dilanjutkan menggunakan persamaan Izbash, dengan kerapatan relatif batu (Δ) ditentukan sebagai berikut.

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} = \frac{2480 - 1000}{1000} = 1,48$$

Dengan asumsi diameter *boulder* sebesar 1,2 m, nilai tersebut kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan Izbash sehingga diperoleh kecepatan aliran kritis sebagai berikut.

$$\frac{u_c}{\sqrt{\Delta g D}} = 1,7$$

$$\frac{u_c}{\sqrt{(1,48)(9,81)(1,2)}} = 1,7$$

$$u_c \approx 7,096 \text{ m/s}$$

Karena nilai $u_c > u$, maka material *boulder* dinyatakan stabil terhadap pengaruh aliran. Selanjutnya, dilakukan perhitungan volume dan berat material *boulder* sebagai berikut.

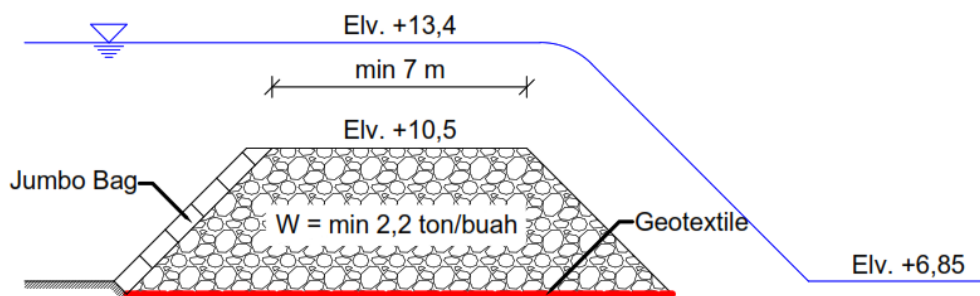
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{1,2}{2}\right)^3 = 0,88 \text{ m}^3$$

$$W = V \times \rho_s = 0,88 \times 2480 = 2182,4 \approx 2200 \text{ kg} = 2,2 \text{ ton}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa berat minimum *boulder* yang diperlukan adalah sebesar 2,2 ton/buah dengan berat jenis 2.480 kg/m^3 . Dari kedua metode perhitungan diameter dan berat material timbunan, digunakan nilai maksimum yang diperoleh dari metode Izbash sebagai dasar perencanaan. Selanjutnya desain timbunan ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Upaya penanganan darurat ini juga diharapkan mendukung upaya konservasi sumber daya air melalui pengendalian degradasi dasar sungai guna menjaga keberlanjutan ekosistem perairan.



Gambar 4. Tampak Atas Desain Timbunan *Boulder*



Gambar 5. Cross Section Desain Timbunan *Boulder*

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis hidraulika menggunakan data geometri DTM dari pengukuran LiDAR dengan debit kala ulang 10 tahun, diperoleh kecepatan aliran pada as *groundsill* sebesar 7 m/s. Untuk penanganan darurat, direncanakan penggunaan timbunan batu *boulder* sebagai material utama. Perhitungan stabilitas material dilakukan dengan metode Shields dan Izbash untuk menentukan dimensi

serta berat *boulder* yang dapat menahan aliran. Dari perhitungan metode Shields, diperoleh diameter material sekitar 1,1 m dengan berat minimum 1,85 ton per buah.

Selanjutnya, hasil perhitungan dengan metode Izbash menunjukkan kebutuhan diameter batu 1,2 m dengan berat minimum 2,2 ton per buah. Karena nilai hasil metode Izbash lebih tinggi, maka hasil tersebut dipilih sebagai acuan desain timbunan *boulder*. Dengan demikian, material *boulder* berukuran minimum 2,2 ton per unit dinyatakan mampu menahan aliran pada kecepatan maksimum 7 m/s di lokasi *groundsill*. Desain ini diharapkan dapat menjadi solusi penanganan darurat yang efektif sekaligus menjaga stabilitas struktur *groundsill* dan infrastruktur sungai di sekitarnya, serta mengendalikan degradasi dasar sungai.

Saran

Dari hasil analisis, diperlukan studi lanjutan antara lain:

1. Kajian pengukuran topografi yang lebih detail dengan kondisi terkini.
2. Kajian hidrologi dengan periode pengamatan lebih panjang dan kalibrasi hasil pengukuran.
3. Kajian hidraulika dengan berbagai skenario kala ulang (misalnya Q_{25} , Q_{50} , Q_{100}) untuk menguji efektivitas desain terhadap kondisi ekstrem.
4. Kajian geoteknik untuk memastikan daya dukung tanah terhadap beban timbunan *boulder*.
5. Kajian model hidraulik fisik agar perilaku aliran dan interaksi struktur dapat dianalisis lebih detail.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak dan instansi yang telah mendukung terwujudnya studi ini, terutama kepada Ibu Ir. Hj. Novia Rosalita, Sp-1, selaku Kepala Balai Teknik Sungai, dan pegawai di lingkungan Balai Teknik Sungai, atas kerjasama dan bantuannya selama pengerjaan studi ini.

Daftar Referensi

- Adhitama, A. P., Jatmiko, R. H., Mei, E. T. W., & Sartohadi, J. (2024). Dynamics of Morphology Changes in Progo River Due to Lahar Transport from Merapi Volcano. *Indonesian Journal of Geography*, 56(2), 158–168. <https://doi.org/10.22146/ijg.81788>.
- Anees, M. T., Abdullah, K., Nawawi, M. N. M., Ab Rahman, N. N. N., Piah, A. R. M., Zakaria, N. A., Syakir, M. I., & Mohd. Omar, A. K. (2016). Numerical modeling techniques for flood analysis. Dalam *Journal of African Earth Sciences* (Vol. 124, hlm. 478–486). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.001>.
- Brahmasta, B., Lintang, I., Sri, J. A., Wahyuni, E., & Kurniani, D. (2013). Perencanaan Bendung Progo Jumo, Sungai Progo Kabupaten Temanggung. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 2(1), 101–110.
- Dhungel, S., Barber, M. E., & Mahler, R. L. (2019). Comparison of one- And two-dimensional flood modeling in urban environments. *International Journal of*

- Sustainable Development and Planning*, 14(4), 356–366. <https://doi.org/10.2495/SDP-V14-N4-356-366>.
- Harsanto, P. (2015). River Morphology Modeling at the Downstream of Progo River Post Eruption 2010 of Mount Merapi. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.021>.
- Izbash, S. (1935). *Construction of dams by dumping stones into flowing water*.
- Laborie, V. (2007). *The rock manual : the use of rock in hydraulic engineering*. CIRIA.
- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of hec-ras (2d) for flood hazard maps generation for yesil (ishim) river in kazakhstan. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12102672>.
- Pilarczyk, K. W. (2003). *Design Of Revetments*.
- Tormos, T., Van Looy, K., Kosuth, P., Villeneuve, B., & Souchon, Y. (2014). *Earth Observation of Ecosystem Services* (D. Alcaraz-Segura, C. M. Di Bella, & J. V. Straschnoy, Ed.; hlm. 201–227). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15628>.
- Uzaer, M., D, S. L. W., & Isdiyana. (2022). Study of Progo River Morphology and Sedimentation of Intake Kamijoro Weir Bantul Regency, Special District of Yogyakarta The Fourth International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment. *The Fourth International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment*, 303–315.
- Woldegiorgis, B. T., Van Griensven, A., & Bauwens, W. (2018). Explicit incipient motion of cohesive and non-cohesive sediments using simple hydraulics. Dalam *Depositional Record* (Vol. 4, Nomor 1, hlm. 78–89). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/dep2.39>.