



Pengoperasian Pintu Pembilas Terhadap Efisiensi Penggelontoran Sedimen: Studi Kasus Bendung Alale

***Very Dermawan, Evi Nur Cahya, Muhammad Nurjati Hidayat, Nur Sholawatini**

Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

**)*peryderma@ub.ac.id

Received: 14 Desember 2023 Revised: 4 September 2024 Accepted: 12 September 2024

Abstract

This study discuss about hydraulic physical model tests of Alale weir to ensure hydraulic flow behaviour of design flood, condition on downstream of weir, and sediment flushing. In this study, observation were made on a physical hydraulic model in the laboratory with a scale of 1 : 50. Flushing tests were carried out to determine effectivity of the flushing, condition of sedimentation or scouring that occurred at downstream. Alale Weir has 3 flushing gate on the right side of the weir. Flushing is carried out using discharge Q_{25yr} with a flowing duration of 1 hour. Flushing gate has considered quite effective in flushing sediment from upstream of weir. The sediment carried is almost 50% in all flushing scenarios. 6th flushing scenario (gate 1 and 2 were closed and gate 3 was fully opened) has the highest efficiency, 53.81%.

Keywords: *Weirs, physical model, flushing, sediment, flushing gate*

Abstrak

Penelitian ini membahas pengujian model fisik hidrolis Bendung Alale untuk mengamati perilaku hidrolis aliran banjir rencana, kondisi hilir bendungan, dan penggelontoran sedimen. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan model fisik hidrolis di laboratorium dengan skala 1 : 50. Uji pembilasan dilakukan untuk mengetahui efektivitas pembilasan, kondisi sedimentasi atau gerusan yang terjadi setelahnya. Bendung Alale mempunyai 3 pintu pembilasan di sebelah kanan bendung. Pembilasan dilakukan dengan menggunakan debit Q_{25th} dengan durasi pengaliran 1 jam. Pintu pembilas cukup efektif untuk membilas sedimen dari hulu bendung. Sedimen yang terbawa hampir 50% pada semua skenario buka tutup pintu pembilas. Skenario pembilasan 6 (pintu 1 dan 2 tertutup dan pintu 3 terbuka penuh) mempunyai efisiensi tertinggi yaitu 53,81%.

Kata Kunci: *Bendung, model fisik, penggelontoran, sedimen, pintu pembilas*

Pendahuluan

Bencana banjir yang disebabkan oleh urbanisasi yang pesat dan adanya cuaca ekstrim telah menyebabkan banyak korban jiwa dan terus menyebabkan kerugian ekonomi yang besar setiap tahunnya (Adane & Abate, 2022; Wang *et al.*, 2022). Sampai saat ini masalah banjir masih perlu penanganan khusus dari berbagai pihak, baik dari pemerintah maupun dari masyarakat. Banjir bukan masalah yang ringan. Banjir dapat terjadi akibat naiknya permukaan air karena terjadinya curah hujan diatas normal, perubahan suhu, serta tanggul yang tidak mampu menampung datangnya debit banjir di sungai (Shareef & Abdulrazzaq, 2021).

Penetapan batas wilayah banjir, variasi kejadian

erosi – sedimen dan perubahan vegetasi tepi sungai seringkali diabaikan (Cislaghi & Bischetti, 2022). Banjir yang terjadi pada struktur bangunan air perlu mendapatkan perhatian yang penting dikarenakan kemungkinan adanya dampak yang besar pada daya rusaknya, dan juga diperparah apabila aliran mengandung massa sedimen (aliran debris). Sebagai upaya pengendalian dan untuk mengurangi kemungkinan aliran yang terbawa melalui bendung adalah aliran debris, maka perlu dilakukan penggelontoran sedimen secara berkala melalui pintu pembilas. Bendung Alale yang berada di Gorontalo merupakan bendung yang telah dibangun sejak lama yang dimanfaatkan untuk penyediaan air irigasi. Bendung Alale yang dibangun melintang sungai, juga mengalami kejadian banjir yang akhirnya juga memberikan dampak limpasan pada

daerah pemukiman di sekitarnya.

Berdasarkan data yang tercatat, Bendung Alale yang memiliki elevasi puncak sekitar +34.00 m dan deckzerg setinggi +37.00 m, pada tanggal 11 Juni 2020, 3 Juli 2020 dan 25 Juli 2020 mengalami banjir besar yang sampai menyebabkan *overtopping* pada puncak deckzerg bendung. Diperkirakan tinggi muka air banjir hingga elevasi +37.15 m. Banjir yang terjadi pada tanggal 11 Juni 2020 ini memiliki kondisi muka air yang sempat melimpas di atas dinding penahan Bendung Alale. Kemudian terjadi banjir yang lebih besar yang kedua dalam kurun waktu 1 bulan atau tepatnya pada tanggal 3 Juli 2020 dengan kondisi air melimpas cukup tinggi di atas tanggul banjir Bendung Alale. Dengan kondisi bendung yang mengalami kerusakan di beberapa titik, kondisi alur sungai yang dinamis, kondisi aliran sungai dan banjir yang relatif besar, maka pihak terkait (dalam hal ini Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Sumber Daya Air, Balai Wilayah Sungai Sulawesi II Gorontalo) melakukan kajian perencanaan dan rehabilitasi bendung untuk pengendalian kondisi hidrolika aliran dan sedimentasi.

Kondisi teknis Bendung Alale belum diketahui secara akurat dan pasti, mengingat data eksisting perencanaan bendung, sistem operasi dan pemeliharaan bendung tidak terdokumentasi rapi dan baik. Faktor lainnya adalah kondisi aliran sungai yang relatif besar dan deras, mengakibatkan adanya kesulitan besar pada proses pengukuran, dan pengamatan langsung di lapangan. Dugaan yang muncul dari hasil pengamatan antara lain: kapasitas bendung dan sungai yang berkurang karena adanya endapan sedimen, perubahan morfologi dan alur sungai, serta fungsi pintu pembilas yang belum efektif.

Perencanaan Bendung Alale yang baru (prototipe) dilakukan dengan memperhatikan adanya perubahan kondisi banjir rencana, kondisi sekitar bendung yang mulai padat pemukiman, dan kondisi hilir bendung yang terdapat struktur bangunan jembatan yang perlu tetap terlindungi struktur kaki jembatannya. Dalam studi uji model fisik hidrolik yang dilakukan di laboratorium, dilakukan pengamatan dan kajian kondisi hidrolika aliran, dan kemampuan pintu pembilas dalam melakukan *flushing* sedimen di hulu bendung. Pada penelitian ini, uji dan pembahasan difokuskan pada efektifitas penggelontoran sedimen dari hulu bendung untuk memastikan fungsi pintu pembilas. Dengan kondisi yang spesifik dan unik dari setiap lokasi, bangunan air, dan lingkungan sekitarnya, maka uji model fisik hidrolik sangat perlu dilakukan. Uji model fisik hidrolika di laboratorium terhadap rencana bendung

(*prototipe*) ini akan mampu memberikan gambaran kondisi hidrolika aliran pada setiap debit banjir rancangan (kedalaman, kecepatan, dan arah aliran), perilaku transportasi sedimen, alterasi dasar sungai, dan efisiensi pembilasan sedimen apabila bendung ini dibangun nanti di lapangan. Kekurangan dan kelemahan sifat-sifat hidroliknya akan bisa segera diketahui dan bisa segera dilaksanakan alternatif perbaikan yang optimal. Dengan demikian, bangunan bendung atau bangunan air lainnya akan bisa dibangun di lapangan dengan kepastian hasil fenomena hidrolika aliran terbaik.

Banyak artikel dan jurnal yang membahas mengenai permasalahan endapan sedimen maupun gerusan di sungai maupun saluran. Lingkup pembahasannya tidak jauh dari bagaimana cara menanggulangi kedua permasalahan tersebut, yang jika dibiarkan di masa yang akan datang bisa menimbulkan masalah-masalah lain, seperti banjir, longsor, atau kerusakan bangunan-bangunan air. Penanggulangan yang biasanya dilakukan adalah dengan penggolontoran dan pengerukan (Healy *et al.*, 2015).

Penanggulangan penggelontoran tentu harus mempertimbangkan faktor besar debit yang dialirkan, durasi penggelontoran dan pengoperasian pintu pembilas. Seperti yang tersampaikan dari penelitian Zulfan *et al.* (2022), pembilasan hidrolik adalah salah satu metode yang paling populer untuk mengendalikan sedimentasi dalam sistem saluran pembuangan. Sejumlah penelitian telah dilakukan untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi pembilasan hidrolik pada saluran yang secara umum dapat diklasifikasikan menjadi empat komponen utama, yaitu: karakteristik saluran, karakteristik sedimen, karakteristik alat pembilas dan faktor lingkungan.

Namu *et al.* (2017) mengungkapkan efek penggelontoran yang dilakukan terus menerus terhadap efisiensi pembuangan sedimen di pengendapan pada proyek irigasi skala kecil, menunjukkan bahwa bak pengendapan dengan pembuangan sedimen terus menerus memiliki efisiensi pembuangan sedimen yang lebih tinggi, yaitu 65,5% berbanding 24,4% dengan yang tidak memiliki komponen pembilasan. Pada percobaan yang telah dilakukan oleh Bong *et al.* (2017), menyimpulkan bahwa durasi penggelontoran yang singkat lebih efisien dalam hal total sedimen yang dikeluarkan dari saluran dibandingkan dengan durasi lama. Dalam kaitannya dengan rata-rata kemajuan lapisan sedimen, durasi penggelontoran yang lebih lama akan mendorong lapisan depan sedimen lebih jauh dibandingkan dengan durasi pendek. Esmaeili *et al.* (2021) menyatakan bahwa apabila rata-rata debit aliran bebas meningkat

kurang lebih 75%, maka akan berkontribusi terhadap perubahan proses morfologi yang dominan dari pengendapan menjadi erosi pada tampungan yang diteliti, yang merupakan proses berharga untuk melakukan pembilasan dengan cara yang lebih efisien. Panthi *et al.* (2022) meneliti secara eksperimental mengenai pengaruh operasi penggelontoran sedimen dibandingkan banjir alami pada kelangsungan hidup Salmon Chinook. Percobaan mereka menyimpulkan bahwa penggelontoran tampungan dengan bukaan pintu 80% adalah yang disarankan, tidak hanya mempertimbangkan efisiensi operasi dalam hal pelepasan sedimen dan durasi, akan tetapi juga karena operasi penggelontoran ini memiliki dampak paling kecil.

Nematzadeh, *et al.* (2022) menyimpulkan hasil percobaan numeriknya pada perubahan beban dasar pada cekungan penggelontoran sedimen bahwa peningkatan fenomena pemblokiran mempunyai pengaruh positif dan nyata terhadap efisiensi penggelontoran sedimen hidrolis. Selain itu, peningkatan jumlah pemblokiran akan meningkatkan dimensi pembilasan sedimen.

Pengalaman dan pengamatan tentang *flushing* dan pengerukan dalam skala besar di bendungan, juga sangat perlu dilakukan. Salah satunya misalnya, pengamatan mengenai Waduk Sutami yang dilakukan Sisinggih *et al.* (2023) menyatakan bahwa salah satu alternatif yang lebih baik untuk mengevakuasi sedimen adalah membuang material hasil kerukan secara langsung ke hilir, dikarenakan tidak adanya *flushing* outlet dan terbatasnya tempat pembuangan sedimen material hasil kerukan. Tidak ada dampak yang signifikan terhadap perubahan dasar sungai di bagian hilir bendungan. Material lumpur tersebut dialirkan dan diendapkan di Bendungan Wlingi dan dapat dibilas secara berkala untuk menghindari terjadinya endapan yang berlebih.

Analisis dan kajian tentang efektifitas pembilasan banyak dilakukan, baik dengan uji model fisik, maupun juga dengan model matematik/numerik. Hasil pengaruh pengoperasian pintu air terhadap pembilasan sedimen bendung Bekasi menggunakan model numerik 1D oleh Zulfan *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pengoperasian pintu air memberikan dampak yang signifikan terhadap perubahan dasar sungai. Penelitian mereka menunjukkan bahwa keberadaan bukaan pintu merupakan parameter penting yang secara signifikan mempengaruhi hasil. Ketika semua pintu ditutup, air hanya dapat mengalir melalui puncak bendung, menyebabkan permukaan air naik secara signifikan di bagian hulu bendung. Hal ini mengakibatkan meluapnya air di atas bantaran

sungai sehingga dapat menyebabkan banjir di wilayah sekitarnya.

Sebuah studi eksperimental yang dilakukan Feng *et al.* (2023) menyimpulkan bahwa semakin rendah elevasi dasar pintu pembilasan, semakin tinggi efisiensi pembuangannya. Efisiensi gelombang pembilasan dalam membersihkan endapan sedimen menurun seiring dengan bertambahnya ketebalan dasar sedangkan semakin panjang lapisan sedimen maka semakin besar pula durasi pembilasan.

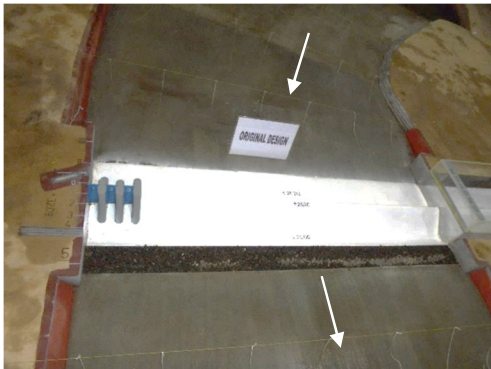
Sejumlah referensi penelitian terdahulu yang disebutkan di atas, memberikan penjelasan bahwa penggelontoran sedimen sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti besarnya debit, bukaan pintu pembilas dan durasi penggelontoran. Informasi pemodelan mengenai karakteristik banjir dan jalur aliran yang akurat sangatlah penting untuk pengelolaan air hujan, pemodelan hidrologi, analisis data hidrologi dan penilaian kerentanan (Liwanag *et al.*, 2018). Diperlukan lebih banyak uji laboratorium dan studi prototipe sebagai cara untuk mengeksplorasi efisiensi penggelontoran dengan mempertimbangkan semua aspek, baik keamanan maupun keekonomisan. Seperti yang disampaikan Gregor (2023) dalam penelitiannya, hilangnya tampungan akibat sedimentasi merupakan tantangan yang penting bagi pemanfaatan sumber daya air secara berkelanjutan. Penggelontoran sedimen berpotensi efisien dan harus dirancang secara hati-hati. Pemodelan numerik dan fisik pada akhirnya akan dapat berkontribusi pada penyempurnaan desain bangunan air.

Metode

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Hidrolika Terapan, Departemen Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Model fisik hidrolis dibangun dengan mengacu pada bangunan Bendung Alale dengan skala tidak distorsi, 1:50. Bendung dengan lebar 76 m dilengkapi 3 pintu pembilas, peredam energi, dan perlindungan dasar di hilir kolam olak. Di hilir bendung terdapat jembatan yang perlu dijaga kondisi sedimentasi, gerusan di daerah kaki jembatan kanan dan tengah.

Fasilitas laboratorium yang digunakan adalah Ruang terbuka dengan lebar 6 m dan panjang 20 m, digunakan untuk pengujian model fisik bendung. Model fisik hidrolis Bendung Alale dan bangunan pelengkapannya dibuat dengan skala 1:50 ditunjukkan oleh Gambar 1, dan digunakan pompa air untuk menyuplai aliran air ke model. Tampungan air untuk menyuplai air ke model dilengkapi dengan bak kontrol air dan alat ukur debit tipe Rechbox sehingga dapat dipastikan bahwa debit alirannya konstan. Level meter (point gauge) dipasang untuk

mengukur ketinggian aliran air, sedang tabung pitot untuk mengukur kecepatan aliran, bak ukur dan waterpass untuk mengukur ketinggian muka air. Debit aliran banjir, untuk pengujian kondisi hidrolika aliran pada beberapa debit banjir rancangan, yaitu Q_{2th} , Q_{5th} , Q_{10th} , Q_{25th} , Q_{50th} dan Q_{100th} .



(a) Pelimpah Bendung Alale dan 3 buah pintu pembilas



(b) Alur sungai dan jembatan di hilir bendung

Gambar 1. Model fisik hidrolis Bendung Alale

Pengujian yang dilakukan di laboratorium meliputi beberapa pemeriksaan, yaitu kondisi aliran di semua bagian (hulu bendung, ambang bendung, kolam olak, sungai di hilir bendung), pembilasan, penggelontoran, dan pola gerusan. Pembahasan pada kajian ini difokuskan pada kemampuan *flushing* bendung dan uji pembilasan sedimen oleh pintu pembilas. Sebelum pengujian dilakukan, dilakukan kalibrasi terlebih dahulu terhadap debit dari alat ukur debit Rechbox. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan elevasi tinggi muka air di atas bendung dan sungai hilir pada tiap debit banjir rancangan. Kalibrasi dilakukan guna mendapatkan hasil model yang sesuai dengan kondisi prototipe. Proses pembilasan (*flushing*) pada pengujian model Bendung Alale ini dilaksanakan dengan dua kondisi sedimen, yaitu sedimen dasar (bed load) dan sedimen melayang (suspended load). Pengujian

dilakukan dengan skenario sebagai berikut:

Skenario 1 (flushing 1). Sebelum model dialiri, sedimen diendapkan terlebih dahulu di hulu bendung sebanyak 10 kg (kondisi kering). Kemudian model dialiri secara perlahan mulai dari debit Q_{2th} sampai mencapai debit Q_{25th} , dengan kondisi semua pintu pembilas ditutup. Setelah dialiri selama 1 jam kemudian aliran di hentikan. Sedimen yang tertahan dibagian hulu bendung dikeringkan untuk mengetahui jumlah yang tertahan. Sedimen dengan jumlah berat tertentu tersebut dilakukan dengan maksud untuk bisa memberikan gambaran kedalaman endapan sedimen di hulu bendung dengan ketebalan tertentu. Bila terjadi aliran air banjir tertentu yang mengalir pada sistem bendung dengan endapan bed load di hulu bendung, maka akan dapat diketahui sejauhmana pengaruh dan kemampuan banjir tersebut untuk *flushing* sedimen. *Flushing* yang terjadi, dalam hal ini adalah *flushing* melalui limpasan air melewati ambang puncak bendung.

Skenario 2 sampai 8. Dialirkan debit banjir Q_{25th} dan setelah mencapai keadaan konstan dimulai menabur sedimen (kondisi kering) di hulu bendung selama 1 jam dengan berat total sedimen adalah 1 kg. Sedimen ditabur setiap menit dengan berat 16,667 gram. Setelah 1 jam sedimen ditabur, aliran air dimatikan. Sedimen yang tertahan di hulu bendung pelimpah dikeringkan. Skenario perlakuan bukaan pintu pembilas disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Uji *flushing*

Skenario <i>flushing</i>	Kondisi pintu pembilas		
	1	2	3
1	tutup	tutup	tutup
2	buka	buka	buka
3	tutup	buka	buka
4	buka	tutup	buka
5	buka	buka	tutup
6	tutup	tutup	buka
7	tutup	buka	tutup
8	buka	tutup	tutup

Pengukuran tinggi muka air dan kecepatan dilakukan pada titik-titik yang telah ditentukan dibagian hulu bendung, bendung utama, peredam energi dan sungai hilir. Beberapa rumus empiris yang digunakan pada bendung sebagai berikut (KP-04, 2013 dan Chow, 1989):

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g b H_1^{1.5}} \quad (1)$$

$$H_d = H_e - \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (3)$$

$$A = B \cdot y \quad (4)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (5)$$

$$P = B + (2 \cdot y) \quad (6)$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{\frac{g \cdot y}{\alpha}}} \quad (7)$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (8)$$

Rumus-rumus ini digunakan untuk perhitungan tinggi muka air yang melimpas diatas puncak bendung, sekaligus sebagai bahan kalibrasi alat ukur debit Rechbox yang dipasang pada tandon hulu. Kedalaman air hasil hitungan teoritis dan hasil pengamatan harus mendekati dengan tingkat kesalahan relatif (KR) < 10%.,

Hasil dan Pembahasan

Pemeriksaan kondisi aliran dilakukan pada 6 debit, yaitu Q_{2th} , Q_{5th} , Q_{10th} , Q_{25th} , Q_{50th} dan Q_{100th} . Debit tersebut merupakan debit prototipe (debit desain Bendung Alale). Sebelum dilakukan pengujian dan pengukuran, kalibrasi harus dilakukan. Kalibrasi dilakukan pada semua debit pengaliran Q_{2th} sampai Q_{100th} baik di atas mercu bendung maupun sungai hilir. Kontrol elevasi muka air di sungai hilir (tail water level) dilakukan dengan pembendungan menggunakan trashrack di model (Gambar 2), yang bertujuan untuk mendapatkan elevasi yang sama atau hampir sama dengan kondisi prototipe. Titik pantau pada model fisik dilakukan pada titik sebelum jembatan.



Gambar 2. Pembendungan menggunakan trashrack untuk pengkondisian muka air hilir

Debit banjir yang melalui Bendung Alale saat banjir besar adalah $Q_{25th} = 1.062,61 \text{ m}^3/\text{detik}$. Dengan kondisi banjir dan genangan di lapangan terjadi di sekitar pintu pembilas bendung (Gambar 3), maka di laboratorium dilakukan kalibrasi ganda pada kondisi debit pengaliran Q_{25th} , untuk menyakinkan bahwa kondisi uji model fisik hidrolis sudah serupa dengan kondisi yang terjadi di lapangan. Hasilnya menunjukkan bahwa kondisi banjir dan genangan

yang terjadi di model sudah sesuai, karena dijumpai luapan yang serupa, terjadi di dinding bagian pintu pembilas (Gambar 4).



Gambar 3. Kondisi luapan dan sampah di bagian pintu pembilas



Gambar 4. Kondisi luapan pintu pembilas model fisik hidrolis di labortarium

Mengacu pada penetapan skala dan data hasil pengamatan dengan tingkat kesalahan yang hanya sampai 1,14% untuk tinggi muka air di atas bendung (Tabel 2) dan 0,31% untuk tinggi muka air di sungai hilir (Tabel 3), terlihat bahwa hasil model secara keseluruhan telah memenuhi persyaratan. Sehingga dengan skala 1 : 50 hasil model tidak menunjukkan adanya efek skala, dengan pengertian bahwa fenomena hidrolis hasil model akan menyerupai pada prototipe. Setelah kalibrasi dilakukan dan memenuhi syarat, pengamatan dan pengujian dapat dilanjutkan. Pertama, pengamatan dan pengukuran pada kondisi hidroliknya, baik mengenai pengukuran tinggi muka air, kecepatan dan tekanan pada bangunan bendung. Kemudian dilanjutkan pada pengujian pembilasan.

Pemilihan sampel sedimen dilakukan sebelum pengujian pembilasan. Sesuai dengan hasil dari pengujian sampel sedimen Bendung Alale di lokasi, dengan menggunakan d_{50} sebesar 0,3 mm, maka pada pengujian di model ditetapkan menggunakan *coal dust* (debu batubara). Material ini dipilih dengan pertimbangan teknis model, bahwa hasil transport sedimen dan alterasi dasar sungai yang paling sesuai dengan kondisi dan sifat gradasi sedimen di lapangan.

Tabel 2. Tingkat kesalahan relatif model tes untuk tinggi muka air diatas bendung

Kala ulang	Debit	H _{Prototype}	H _{Model}	Kesalahan relatif (KR)
Tahun	(m ³ /dt)	(m)	(m)	(%)
2	309,46	1,51	1,50	0,93
5	546,03	2,18	2,20	1,14
10	745,57	2,65	2,65	0,08
25	1.062,61	3,31	3,28	1,01
50	1.360,13	3,86	3,90	1,03
100	1.734,89	4,49	4,48	0,43

Tabel 3. Tingkat kesalahan model pada elevasi tinggi muka air di sungai hilir bendung

Kala ulang	Debit	Elevasi _{Prototype}	Elevasi model	Kesalahan relatif (KR)
Tahun	(m ³ /dt)	(m)	(m)	(%)
2	309,46	28,82	28,75	0,24
5	546,03	29,54	29,45	0,31
10	745,57	30,18	30,10	0,27
25	1.062,61	30,79	30,73	0,21
50	1.360,13	31,22	31,18	0,14
100	1.734,89	31,75	31,78	0,08

Debu batubara adalah partikel mikro padat (halus) yang dihasilkan selama proses penambangan dan eksplorasi batubara, yang terbentuk dari penghancuran, pengeboran, peledakan dan pengangkutan (Du, 2018). Penggunaan *coal dust* dikarenakan diameter butiran yang dibutuhkan sesuai dengan skala model 1:50, yaitu sebesar 0,01 sampai 0,02 mm. Pemodelan transportasi sedimen di sungai memperhitungkan ukuran kepadatan kerikil untuk memperkirakan mobilitas partikel, namun secara formal tidak mempertimbangkan bentuk partikel (Cassel *et al.*, 2021). Sampel sedimen yang digunakan yaitu campuran coal dust tersebut dan pasir, dengan perbandingan 1:1.

Pengamatan *Flushing 1* adalah untuk mengetahui efektifitas pembilasan untuk sedimen muatan dasar (*bed load*). Seperti yang disebutkan pada sub bab metode, sedimen diendapkan terlebih dahulu di hulu bendung sebanyak 10 kg dan disebar dengan ketebalan merata pada bagian hulu bendung (Gambar 5). Kemudian model dialiri secara perlahan mulai dari debit Q_{2th} sampai mencapai debit Q_{25th} , dengan kondisi semua pintu pembilas ditutup. Penggunaan debit Q_{2th} sampai Q_{25th} dimaksudkan karena debit tersebut adalah debit yang sering terjadi. Pergerakan sedimen dasar akan terus terjadi selama pengaliran debit (Gambar 6) dan akan berhenti sampai aliran dihentikan. Pada pengujian *flushing 1* terjadi perubahan bentuk dasar dari sedimen yang diendapkan dan kuantitas sedimen yang tertahan di hulu bendung pelimpah. Kondisi bentuk dasar tidak merata, endapan di bagian apron hulu kanan sebagian besar terjadi di bagian kanan, untuk daerah apron hulu kiri, terjadi endapan yang mengarah ke apron hulu dan di bagian kiri sungai (Gambar 7). Karena aliran air sungai yang melewati bendung dengan debit banjir

tertentu, maka akan menyebabkan pergerakan sedimen dasar dan terjadi pengangkutan sedimen oleh aliran ke arah hilir bendung dengan jumlah dan volume tertentu (Gambar 8).

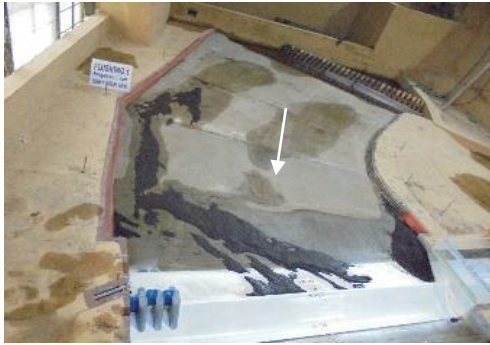


Gambar 5. Pengkondisian ketebalan sedimen dasar (*bed load*) di hulu bendung



Gambar 6. Perubahan endapan sedimen hulu dengan durasi pengaliran debit selama 1 jam

Sedimen yang tertahan di hulu bendung dijemur (Gambar 9) sampai kering untuk mengetahui presentase efisiensi pembilasannya. Didapatkan berat sedimen yang tertahan adalah 5115 gram (5,115 kg), sehingga efisiensi pembilasannya adalah 48,85%.



Gambar 7. Perubahan kuantitas dan bentuk endapan sedimen dasar sungai



Gambar 8. Sedimen yang terangkut dan tertahan di bagian hilir bendung



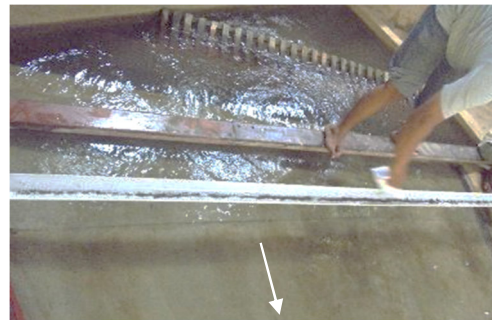
Gambar 9. Penjemuran sedimen yang tertahan

Pada pola pengujian *flushing* 2 – 8, tahap yang dilakukan ada perbedaan dari pengujian *flushing* 1. Seperti yang tersampaikan pada sub bab metode, sedimen tidak diendapkan melainkan ditabur (Gambar 10), pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas pembilasan untuk sedimen muatan layang (suspended load). Selama 1 jam pengaliran, debit yang dialirkan hanya debit Q_{25th} , tidak ada kenaikan/perubahan debit.

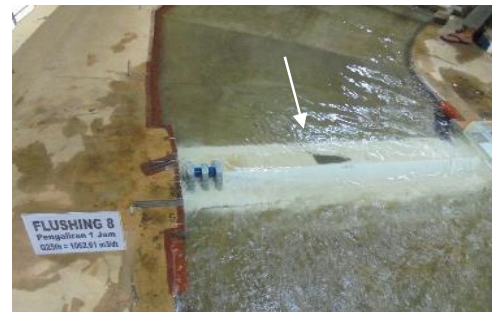
Pola endapan yang terjadi pada *flushing* 2 sampai *flushing* 8 terlihat sama. Sedimen yang ditabur dan mengendap di hulu bendung pelimpah, berada di apron bagian kiri dan dibagian kanan apron (seperti ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12).

Proses berikutnya sama seperti pada *flushing* 1, yaitu penjemuran sedimen yang mengendap.

Pembilasan dengan kondisi pengaliran debit Q_{25th} cukup baik, dikarenakan hasil efisiensi pembilasan hampir 50% pada semua variasi pembilasan. *Flushing* 6 (Pintu 1 dan 2 di tutup, Pintu 3 di buka) memiliki efisiensi pembilasan yang paling baik, dengan efisiensi 53,81%.



Gambar 10. Penaburan sedimen setiap menit selama 1 jam



Gambar 11. Kondisi pintu pembilas pada *flushing* 8



Gambar 12. Endapan sedimen di hulu bendung

Dari *running* model dengan berbagai kondisi dan skenario bukaan pintu pembilas, maka telah tergambar unjuk kerja *flushing* sedimen yang terjadi pada bendung, baik pada saat pintu pembilas tertutup, maupun kondisi terjadi transport sedimen di sungai dengan kondisi pintu pembilas terbuka dan kombinasi buka tutup pintu pembilas.

Tabel 4. Efektifitas variasi pembilasan

<i>Flushing</i>	Berat yang tertahan (gram)	Efisiensi (%)
1	5.11,50	48,85
2	576,80	42,32
3	551,30	44,87
4	474,80	52,52
5	497,00	50,30
6	461,90	53,81
7	578,00	42,20
8	497,00	50,30

Sistem operasi pintu pembilas bisa dirumuskan dari hasil pengujian ini. Sistem operasi pintu pembilas terbaiklah yang sebaiknya dilakukan di lapangan. Namun tentu saja, kondisi ini akan sangat tergantung dengan kondisi di lapangan, terutama pada saat terjadi banjir. Mengingat saat banjir, aliran banyak mengandung sampah kayu dan sampah lainnya, yang bisa jadi akan menyumbat pintu pembilas, sehingga sistem buka tutup pintu untuk memberikan pembilasan terbaik, dapat dilakukan kombinasi. Pembilasan terendah adalah pada skenario *flushing* 7 (pintu 1 tutup, pintu 2 buka, pintu 3 tutup) dengan hasil efisiensi 42,20%. Hal ini terjadi karena aliran banjir arahnya terkonsentrasi tegak lurus bendung. Efektivitas variasi pembilasan ditunjukkan pada Tabel 4.

Alur sungai hulu yang agak berbelok ke arah kiri, serta hambatan pilar kiri kanan pada pintu tengah, menyebabkan kemampuan pintu untuk pembilasan menjadi menurun. Pembilasan material sedimen terbaik adalah pada skenario *flushing* 6 (pintu 1 dan 2 tutup, pintu 3 buka). Pintu 3 yang terletak dekat dengan ambang bendung utama, menerima aliran yang lebih merata dan konsentrasi arah aliran yang hampir tegak lurus lubang pintu. Alur sungai hulu yang berbelok ke kiri tentu saja mempengaruhi alur, arah, dan kecepatan di belokan luar sungai (hulu pintu pembilas) serta aliran tegak lurus bendung. Pengamatan dan hasil uji model fisik ini memberikan gambaran yang aktual dan jelas bagaimana kondisi hidrolika aliran dan pembilasan sedimen pada bendung rencana (prototipe) bila dibangun nanti di lapangan.

Kesimpulan

Dari studi yang memfokuskan pada pengujian pembilasan ini didapatkan beberapa kesimpulan: Penggunaan skala model tidak distorsi 1 : 50, kalibrasi alat ukur: debit, muka air, kecepatan, dan tekanan untuk model fisik bendung ini, mampu memberikan akurasi hasil pengujian yang sangat baik, keandalan > 98%, yang artinya efek skala bisa sangat dikendalikan. Kalibrasi model menghasilkan akurasi yang sangat baik,

menunjukkan kesesuaian dengan kondisi prototipe. Pengamatan dan kalibrasi ganda pada debit pengaliran Q_{25th} menunjukkan kondisi luapan yang sama seperti pada banjir yang terjadi pada bulan Juni – Juli 2020 di Bendung Alale.

Sampel sedimen yang digunakan dalam proses uji *flushing* harus mampu memberikan gambaran aktual transport dan alterasi dasar sungai yang terjadi. Penggunaan campuran coal dust (debu batubara) dan pasir, dengan perbandingan 1 : 1 saat pengujian, memberikan hasil yang baik dan menunjukkan adanya variasi efisiensi pembilasan berdasarkan skenario buka tutup pintu pembilas dan jenis material sedimennya. Pengujian pada sedimen muatan dasar (bed load) sebanyak 10kg yang disebar merata di dasar sungai sebagai endapan sedimen di hulu bendung, dengan menggunakan debit pengaliran Q_{2th} sampai Q_{25th} cukup efektif dalam pembilasan, karena 48,85% sedimen terbilas. Pada pengujian *Flushing* 1 ini dipertimbangkan adanya variasi berat sedimen yang diendapkan dan adanya variasi bukaan pintu.

Flushing 2 – 8 memiliki kesamaan pola endapan di hulu bendung. Sedimen yang ditabur dan mengendap di hulu bendung pelimpah, apron bagian kiri dan kanan apron. Pembilasan menggunakan debit pengaliran Q_{25th} efektif dalam penggelontoran sedimen. Sedimen yang terangkut/terbawa hampir 50% pada semua variasi pembilasan. *Flushing* 6 (Pintu 1 dan 2 di tutup, Pintu 3 di buka) memiliki efisiensi yang paling tinggi, yaitu 53,81%. Masih memungkinkan dilakukan studi lanjutan untuk mengetahui efektifitas pintu, dengan variasi bukaan pintu, rasio bukaan dengan lebar pintu, dan semakin banyak variasi bukaan pintu, semakin detail nilai efektifitas pintu pembilas yang didapat dalam suatu studi.

Ucapan Terimakasih

Tim Peneliti mengucapkan terimakasih atas bantuan dan kerjasama dari Fakultas Teknik Universitas Brawijaya melalui BPPM FTUB, Laboratorium Hidrolika Terapan Departemen Teknik Pengairan, Balai Wilayah Sungai Sulawesi II Gorontalo, dan PT Globetek Glory Konsultan.

Daftar Pustaka

- Adane, A., & Abate, B. (2022). River Modeling for Flood Inundation Map Predictions using 2D – HECRAS Hydraulic Modeling with Integration of GIS. *UTM ASEAN Engineering Journal*, 12(1).
- Bong, C. H. J., Lau, T. L., & Ghani, A. A. (2017). Duration of Hydraulic Flushing and Its Effect on Sediment Bed Movement. *37th IAHR World*

Congress, pp. 4079 – 4087.

Cassel, M., Lave, J., Recking, A., Malavoi, J. R., & Piegay, H. (2021). Bed load Transport in Rivers, Size Matters but so does Shape. *PubMed Central Scientific Reports*, 12 : 6817.

Chow, T. V. (1989). *Open Channel Hydraulics*. Tokyo, Japan: McGraw-Hill.

Cislaghi, A., & Bischetti, G. B. (2022). Best Practice in Post – Flood Surveys: The Study Case of Pioverna Torrent. *Journal of Agricultural Engineering*, 53(2).

Du, Yinglian. (2018). A Brief Talk on Coal Dust Suppression. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170.

Esmaeili, T., Sumi, T., Kantoush, S. A., Kubota, Y., Haun, S., & Ruther, N. (2021). Numerical Study of Discharge Adjustment Effects on Reservoir Morphodynamics and Flushing Efficiency: An Outlook for the Unazaki Reservoir, Japan. *water*, 13, 1624.
doi: 10.3990/w13121624.

Feng, H., Du, S., & Zhu, D. Z. (2023). Numerical Study of Effects of Flushing Gate Height and Sediment Bed Properties on Cleaning Efficiency in A Simplified Self-Cleaning Device. *Water Science and Technology*, 88, (3).
doi: 10.2166/wst.2023.245.

Gregor Petkovsek. (2023). Monitoring and Modelling of Sediment Flushing: A Review,” *Scientific Research Communication*, 3(1).
doi: 10.52460/src.

Healy, K. M., Cox, A. L., Hanes, D. M., & Chambers, L. G. (2015). *State of the Practice of Sediment Management in Reservoirs: Minimizing Sedimentation and Removing Deposits*. Advisory Committee on Water Information.

Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Direktorat Irigasi dan Rawa. (2013). *Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan KP-04*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal

Sumber Daya Air Direktorat Irigasi dan Rawa.

Liwanag, F., Mostrales, D. S., Ignacio, M. T. T., & Orejudos, J. N. (2018). Flood Modeling using GIS and PCSWMM. *Engineering Journal*, 22(3).

Namu, P. N., Raude, J. M., & Mutua, B. M. (2017). Effect of Continuous Flushing on the Sediment Removal Efficiency in Settling Basins of Small Scale Irrigation Projects; A Case Study of Kiriku-Kiende Irrigation Project, Embu County, Kenya. *International Journal of Hydrology*, 1, (2).
doi: 10.15406/ijh.2017.01.00009.

Nematzadeh R., Barani, G. A., & Kermani, E. F. (2022). Numerical Investigation of Bed-Load Changes on Sediment Flushing Cavity. *Journal of Hydraulic Structures*, 8(4),
doi: 10.22055/jhs.

Panthi, M., Lee, A. A., Dahal, S., Omer, A., Franca, M. J., & Crosato, A. (2022). *Effect of Sediment Flushing Operations Versus Natural Floods on Chinook Salmon Survival*. nature scientific reports, doi: 1038/s41598-022-19294-2.

Shareef, M. E., & Abdulrazzaq, D. G. (2021). River Flood Modelling for Flooding Risk Mitigation in Iraq. *Civil Engineering Journal*, 7(10).

Sisinggih, D., Wahyuni, S., Juwono, P. T., & Hidayat, F. (2023). Discharging Sediment Downstream: The Opportunities and Challenges of Sediment Management in Sutami Reservoir, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(2).

Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., Fang, X., & Huang, W. (2022). *A Review of the Flood Management: from Flood Control to Flood Resilience*. PubMed Central Heliyon, doi: 10.1016/j. heliyon.

Zulfan, J., Ginting, B. Leong, G. T. & Bong, C. H. J. (2022). Factors Affecting the Efficiency of Hydraulic Flushing in Sewer System for Sedimentation Control: A Review. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 15(2).
doi: 10.22094/joie.