

EFEKTIVITAS PENGGELONTORAN SEDIMEN (*FLUSHING*) STUDI KASUS WADUK PB SOEDIRMAN

Bella Koes Paulina Cantik, Djoko Legono, dan Adam Pamudji Rahardjo

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Email: bellakoes97@ugm.ac.id, djokolegono@ugm.ac.id, rahardjo.adam@ugm.ac.id

Abstrak: Sedimentasi waduk menjadi salah satu masalah kompleks yang harus ditangani secara tepat. Banyak upaya pemeliharaan waduk yang dilakukan agar umur teknis waduk dapat bertahan sesuai perencanaan, salah satu diantaranya adalah pengeluaran sedimen dari dalam waduk dengan cara *flushing*. *Flushing* atau penggelontoran sedimen dalam jumlah yang masif menjadi salah satu solusi yang ditawarkan untuk mengurangi sedimen yang terlanjur mengendap guna mencapai efektivitas dan efisiensi pembuangan sedimen dari dalam waduk. Waduk Mrica merupakan salah satu waduk di Indonesia yang rutin melakukan *flushing* sebagai upaya pemeliharaan. *Flushing* Waduk Mrica melalui *drawdown culvert* (DDC) sudah dilakukan sejak tahun 1992 namun volume aktif waduk semakin menurun setiap tahunnya. Tujuan dari penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja *flushing* dengan menghitung nilai *flushing feasibility* dengan mendasarkan pada praktik atau pelaksanaan *flushing* Waduk Mrica selama ini serta berdasarkan kriteria dan rumus pendekatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai efektivitas tertinggi adalah pada tahun 2014 dengan nilai 0,059 untuk Metode Morris & Fan dan Metode Qian, dan 0,067 untuk Metode Lai & Shen. Sedangkan untuk Metode Ackers & Thompson menghasilkan nilai 0,858. Hasil perhitungan *feasibility study* menunjukkan bahwa *flushing* yang dilakukan Waduk Mrica pada tahun tertinjau belum dapat dikategorikan layak dikarenakan kriteria *Sediment Balance Ratio with Full Drawdown* tidak terpenuhi. Penelusuran waduk menunjukkan bahwa adanya konsistensi nilai *head loss coefficient* dengan *range* nilai 3,98 sampai dengan 4,14 pada penggelontoran sedimen di Waduk Mrica. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *flushing* dapat mencapai *feasible* dan efektif bila dilakukan pada saat *inflow* mulai naik, durasi melebihi 13 jam, dan debit *flushing* mencapai 280 m³/s.

Kata kunci: *flushing*, sedimentasi, waduk, durasi

PENDAHULUAN

Sedimentasi waduk menjadi salah satu masalah kompleks yang harus ditangani secara tepat. Adanya masalah sedimentasi berdampak pada umur teknis waduk yang berkurang hingga lebih dari 65% (Chen dan Tsai, 2017). Beberapa cara dilakukan untuk mengurangi adanya erosi di hulu, seperti penanaman kopi dan reboisasi. Selain mengurangi erosi di hulu, dilakukan pula cara untuk mengeluarkan sedimen terendap yang sudah terlanjur ada di waduk, seperti *dredging* dan *flushing*. Menurut *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River System* (Draft ICOLD Bulletin, 2009), permasalahan laju sedimentasi di waduk dan kebutuhan untuk menjaga keberlangsungan waduk (perawatan dan pengoperasian) merupakan dua hal yang harus ditekankan mengenai pentingnya sedimentasi pada waduk.

Salah satu waduk di Indonesia yang rutin melakukan *flushing* adalah Waduk PLTA PB Soedirman atau Waduk Mrica. PLTA Panglima

Besar Soedirman terletak di Kabupaten Banjarnegara Propinsi Jawa Tengah. Waduk tersebut merupakan waduk serbaguna dengan rencana umur waduk selama 50 tahun (Krisetyana, 2008). Waduk Panglima Besar Soedirman mulai digenangi pertama kali (*first impounding*) pada April 1988, dengan luas genangan 8.258.253 m² pada elevasi muka air waduk +231 m di atas muka air laut (PT. Indonesia Power, 2015).

Waduk Mrica merupakan waduk serbaguna dengan total luas DTA mencapai 956,91 km², meliputi Sungai Serayu, Sungai Merawu, dan Sungai Lumajang yang memiliki peran utama dalam menyumbang sedimen terbesar yang masuk ke Waduk Mrica. Rerata *inflow* untuk Waduk Mrica yaitu 95 m³/s, dengan curah hujan rerata 3.500 mm/tahun. Sedimentasi yang tinggi terjadi di Waduk Mrica mengingat erosi lahan yang cukup tinggi juga setiap tahunnya.

Sejak beroperasi dari tahun 1989 sampai dengan 2008, sedimentasi di Waduk Mrica mencapai sekitar 83.791.000 m³ dari 148.287.000 m³

(tampungan awal) atau sekitar 59,33% volume waduk sudah terisi dengan lumpur. Kondisi eksisting Waduk Mrica pada tahun 2015, menyatakan bahwa total sedimen yang masuk ke Waduk Mrica adalah 4.554.000 m³. Sedangkan pembuangan melalui *bottom outlet* (DDC) hanya sekitar 1.652.000 m³, maka dapat dikatakan bahwa perbandingan antara sedimen yang masuk dan yang keluar yaitu kurang lebih 3 berbanding1.

Permasalahan ini terjadi setiap tahunnya sejak awal beroperasi, yaitu kondisi masukan sedimen dan pengeluaran sedimen yang tidak seimbang mengakibatkan volume aktif waduk semakin sedikit. Padahal, Waduk Mrica menjadi salah satu waduk dengan DDC sejak awal pembangunan, sehingga sudah seharusnya permasalahan sedimentasi dapat diatasi dengan baik. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah pelaksanaan *flushing* dengan DDC di Waduk Mrica dapat dikategorikan *feasible* dan efektif melalui metode *feasibility* dan beberapa metode efektivitas *flushing* pada beberapa kejadian *flushing* yang tercatat sehingga evaluasi ini dapat dipakai sebagai acuan mengenai operasi penggelontoran sedimen dalam hal durasi pembukaan pintu DDC.

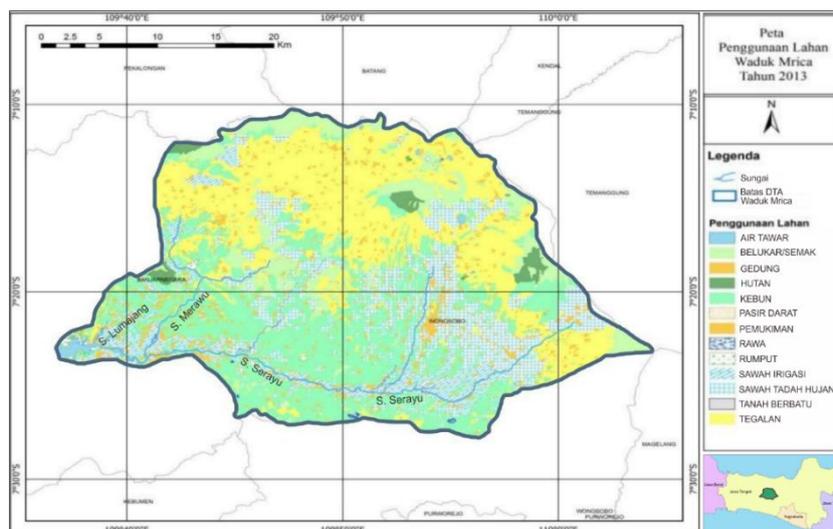
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Morfologi Sungai

Sungai utama yang paling berperan dalam menyumbangkan sedimen ke Waduk Mrica adalah Sungai Serayu dan Sungai Merawu, dimana dua sungai tersebut merupakan sungai yang daerah alirannya merupakan daerah gunung berapi (Gunung Sumbing, Gunung Sindoro, dan Pegunungan Dieng). Morfologi DAS Serayu mempunyai tebing yang terjal dan lembah yang curam. Vegetasi yang banyak dijumpai di sana adalah berupa tanaman ladang dan tanaman perdu. DAS Merawu juga mempunyai tebing-tebing batuan yang lunak dan mudah hancur, sehingga sangat mudah mengalami erosi, sama halnya seperti DAS Serayu.

Tataguna Lahan

Mayoritas lahan di daerah tangkapan air (DTA) Waduk Mrica digunakan untuk aktivitas pertanian seperti perkebunan, tanaman sayur mayur, palawija, dan tanaman pekarangan. Penanaman kentang dan ketela pohon sebagai hasil produk andalan daerah sekitar Waduk Mrica kurang memperlihatkan konservasi tanah dan air, sehingga memperbesar laju erosi yang terjadi di Waduk Mrica. Selain itu, masih banyak masyarakat yang bertani dengan sistem lahan kering pada lereng dengan kemiringan cukup curam sehingga laju erosi semakin bertambah. Peta tataguna lahan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Catchment Area dan Tataguna Lahan Waduk Mrica Tahun 2013

Data Teknis Waduk Mrica

Data teknis waduk beserta *drawdown culvert* (DDC) dapat dilihat pada Tabel 1.

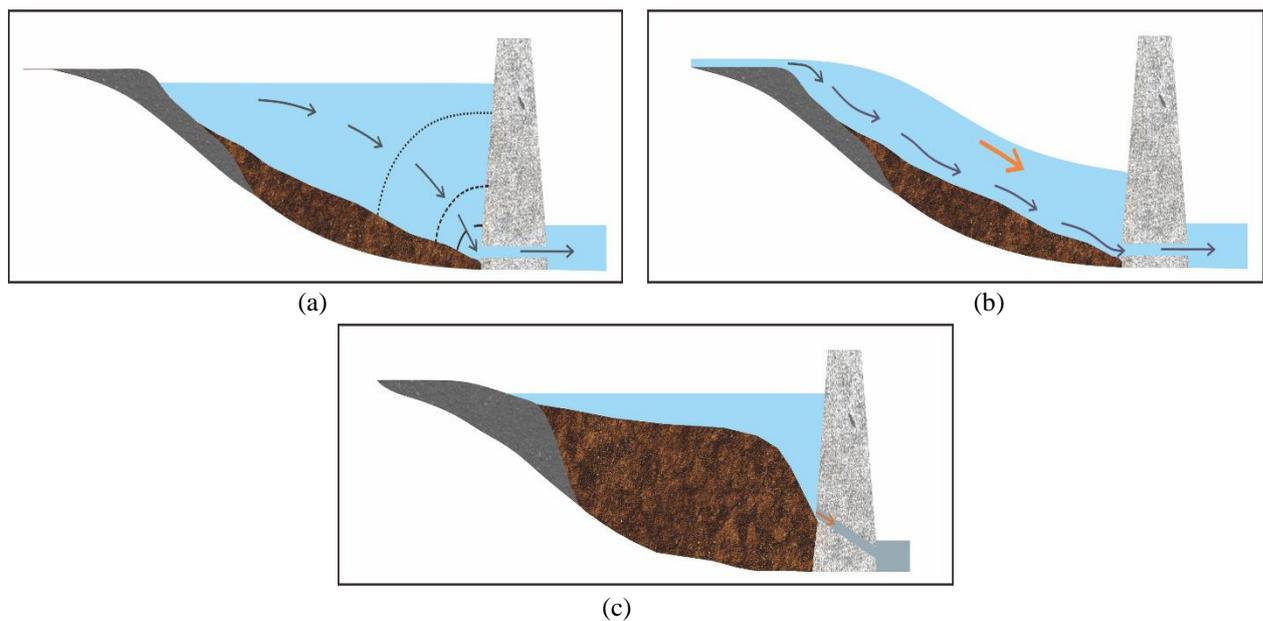
Tabel 1. Data teknis Waduk Mrica beserta DDC

No	Parameter Tinjauan	Identitas dan Data Teknis
1.	Nama Bendungan	Waduk PB Soedirman / Waduk Mrica
2.	Koordinat Lokasi	7°7' LS – 7°30'12" LS dan 106°47'28" BT – 110°3' BT
3.	Tipe Bendungan	<i>Rockfill dam</i> dengan inti kedap air dari tanah
4.	Panjang Bendungan	832 m
5.	Panjang Waduk	6,5 km
6.	Tinggi Bendungan	100 m
7.	El. Puncak Bendungan	+235 m
8.	El. Mercu Pelimpah	+231 m
9.	Luas Genangan	8,26 km ²
10.	Total Luas DTA	956,91 km ²
11.	Volume Tampung	148.287.000 m ³
12.	Volume <i>Dead Storage</i>	103.000.000 m ³
13.	Volume Aktif	45.000.000 m ³
14.	Rerata <i>Inflow</i>	95 m ³ /s
15.	Curah Hujan	3.500 mm/tahun
Data Teknis <i>Drawdown Culvert</i>		
14.	Debit Maksimum	280 m ³ /s
15.	Luas DDC	20 m ²
16.	El. Dasar <i>Intake</i>	+180 m
17.	El. Dasar Kolam Terjun	+131 m

Tipe *Flushing*

Banyak cara yang dapat digunakan untuk meminimalkan masuknya sedimen ke waduk, adanya intrusi dan endapan sedimen yang terjadi di dalam waduk tidak akan bisa dihindari

sepenuhnya. Sedimen masuk ke waduk baik dalam rupa *suspended load* maupun *bed load* (Scheuerlein, H, 1990). Tipe – tipe *flushing* atau penggelontoran sedimen dapat dibedakan menjadi tiga (3) tipe seperti berikut. (Fruchart, F dan Camenen, Benoit, 2012).



Gambar 2. Tipe *Flushing*: (a) *Pressure Flushing*; (b) *Drawdown Flushing*; (c) *No Flushing*

Penelitian ini bertumpu pada *feasibility study* dan efektivitas waduk dalam penggelontoran sedimen menggunakan *drawdown culvert* (DDC). Metode perhitungan untuk *flushing feasibility* yang digunakan adalah Metode Atkinson (1996), sedangkan untuk efektivitas *flushing* menggunakan beberapa metode efektivitas yang tersedia, yaitu Metode Ackers & Thompson, Qian, Lai & Shen, dan Morris & Fan.

Perhitungan Inflow

Perhitungan *inflow* dapat menggunakan persamaan konservasi massa. Persamaan konservasi massa dapat dihitung dengan Metode Puls menurut Schulz (1976).

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{O_1 + O_2}{2} \Delta t = \Delta S \quad (1)$$

dengan I = *inflow* (m^3/s), O = *outflow* (m^3/s), Δt = waktu, ΔS = perubahan tampungan (m^3)

Karakteristik tampungan Waduk Mrica dibutuhkan untuk mengetahui persamaan yang akan digunakan dalam perhitungan *inflow* yang akan dihitung. Persamaan yang didapat merupakan hubungan antara *storage* (tampungan) dan elevasi pada Waduk Mrica. Persamaan karakteristik Waduk Mrica tersebut

dapat dilihat pada Persamaan 2 berikut. (Legono, 2020).

$$S = 30,998 \times (E - 200)^{4,1298} \quad (2)$$

dengan S = tampungan (m^3) dan E = elevasi (m)

Flushing Feasibility

Flushing feasibility merupakan kriteria untuk mengevaluasi kinerja penggelontoran mulai dari intensitas sedimen hingga DDC itu sendiri. Sehingga dapat diartikan bahwa *flushing feasibility* merupakan nilai atau tolok ukur yang diberikan untuk menilai keberhasilan atau mengevaluasi kinerja penggelontoran melalui nilai yang ditentukan, sehingga nilai yang dihitung dapat menentukan apakah kinerja *flushing* tersebut bekerja secara optimal atau dapat dinilai *feasible*. Kriteria awal untuk menentukan *flushing feasibility* adalah menentukan nilai *Sediment Balance Ratio* (SBR) dan *Long Term Capacity Ratio* (LTCR). Jika nilai yang dihasilkan sangatlah mendekati batas nilai yang ditentukan, maka harus dilakukan perhitungan untuk kriteria lanjutan penentuan *flushing feasibility*, seperti *Drawdown Ratio* (DDR), nilai SBR baru yaitu *SBR with full drawdown* (SBR_d), *Flushing Width Ratio* (FWR), dan *Top Width Ratio* (TWR). Kriteria awal dan kriteria lanjutan beserta dengan syarat nilai yang harus dipenuhi disajikan pada Tabel 2

Tabel 2. *Flushing feasibility*

No	Kriteria awal	Persamaan	Keterangan	Syarat
1.	<i>Sediment Balance Ratio</i> (SBR)	$SBR = \frac{M_f}{M_{dep}}$ (3)	M_f =Massa sedimen digelontor (ton) M_{dep} =Massa sedimen terendap (ton)	> 1,0
2.	<i>Long Term Capacity Ratio</i> (LTCR)	$LTCR = \frac{A_f}{A_r}$ (4)	A_f =Luas area <i>cross section</i> (m^2) A_r =Luas area <i>cross section</i> awal (m^2)	> 0,5
No	Kriteria lanjutan	Persamaan	Keterangan	Syarat
1.	<i>Drawdown Ratio</i> (DDR)	$DDR = 1 - \frac{El_f - El_{min}}{El_{max} - El_{min}}$ (5)	El_f =Elevasi saat <i>flushing</i> (m) El_{max} =Elevasi TWL (m) El_{min} = Elevasi dasar waduk (m)	> 0,7
2.	<i>Sediment Balance Ratio with Full Drawdown</i> (SBR_d)	$SBR_d = \frac{M_f}{M_{dep}}$ (6)	M_f =Massa sedimen digelontor (ton) M_{dep} =Massa sedimen terendap (ton)	> 1,0
3.	<i>Flushing Width Ratio</i> (FWR)	$FWR = \frac{W_f}{W_{bot}}$ (7)	W_f =Lebar penggelontoran (m) W_{bot} =Lebar dasar waduk (m)	> 1,0
4.	<i>Top Width Ratio</i> (TWR)	$TWR = \frac{W_{td}}{W_t}$ (8)	W_{td} =Lebar <i>scoured valley</i> (m) W_t =Lebar waduk saat TWL (m)	$\geq 1,0$

Efektivitas *Flushing*

Efektivitas *flushing* dapat diartikan sebagai seberapa besar pengaruh dari pembukaan pintu *drawdown culvert* dalam mengeluarkan sedimen. Diketahui bahwa pembukaan *drawdown culvert* tidak hanya mengeluarkan

sedimen, tetapi juga mengeluarkan air dalam jumlah yang sangat besar. Sedimen yang terangkut keluar merupakan hasil dari adanya tekanan air yang besar dari dalam waduk sebagai akibat dari pembukaan pintu *drawdown culvert* (DDC). Metode terpakai dan persamaan yang dipakai dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Efektivitas *Flushing*

No	Metode	Persamaan	Keterangan
1.	Qian (1982)	$F_e = \frac{V_0}{V_d}$ dengan $V_d = \frac{V_0 C_0 - V_i C_i}{\rho}$	(9) V_0 =Vol. air keluar (m ³) V_d =Vol. sedimen keluar (m ³) C_0 =Konsentrasi sedimen keluar (kg/m ³) V_i =Vol. air masuk (m ³) C_i =Konsentrasi sedimen masuk (kg/m ³) ρ =Massa jenis sedimen (kg/m ³)
2.	Ackers & Thompson (1987)	$F_e = \frac{L_0}{L_1}$	(10) L_0 =Berat sedimen keluar (kg) L_1 =Berat sedimen masuk (kg)
3.	Lai & Shen (1996)	$F_e = \frac{V_{S0} - V_{Si}}{V_0}$	(11) V_{S0} =Vol. sedimen keluar (m ³) V_{Si} =Vol. sedimen masuk (m ³) V_0 =Vol. air keluar (m ³)
4.	Morris & Fan (1997)	$F_e = \frac{V_0 C_0 - V_i C_i}{\rho V_0}$	(12) V_0 =Vol. air keluar (m ³) C_0 =Konsentrasi sedimen keluar (kg/m ³) V_i =Vol. air masuk (m ³) C_i =Konsentrasi sedimen masuk (kg/m ³) ρ =Massa jenis sedimen (kg/m ³)

Tiga (3) dari empat (4) metode di atas, yaitu Metode Qian, Metode Lai & Shen, dan Metode Morris & Fan, memiliki kesamaan rumus secara umum, seperti pada tiga metode tersebut, perhitungan dilakukan dengan menggunakan data air dan sedimen yang masuk dan keluar, sedangkan untuk Metode Ackers & Thompson, air yang masuk dan keluar tidak diperhitungkan, hanya sedimen yang masuk dan keluar saja yang menjadi rumus dasarnya. Sehingga hasil yang nanti didapatkan dari tiga metode, yaitu Metode Qian, Metode Lai & Shen, dan Metode Morris & Fan, dapat dibandingkan satu sama lain.

Penelusuran Waduk (*Reservoir Routing*)

Penelusuran waduk dihitung dengan menggunakan rumus konservasi massa yang tertera pada Persamaan 1. *Inflow* yang digunakan merupakan hasil perhitungan sebelumnya, sedangkan untuk tampungan (S) digunakan karakteristik waduk pada Persamaan 2 (hubungan antara tampungan – elevasi). Sedangkan untuk *outflow* atau nilai Q (debit) untuk *bottom outlet* (DDC) dapat dilihat pada Persamaan 13.

$$Q = A \times \sqrt{2 \times g \times \frac{h}{1+k}} \quad (13)$$

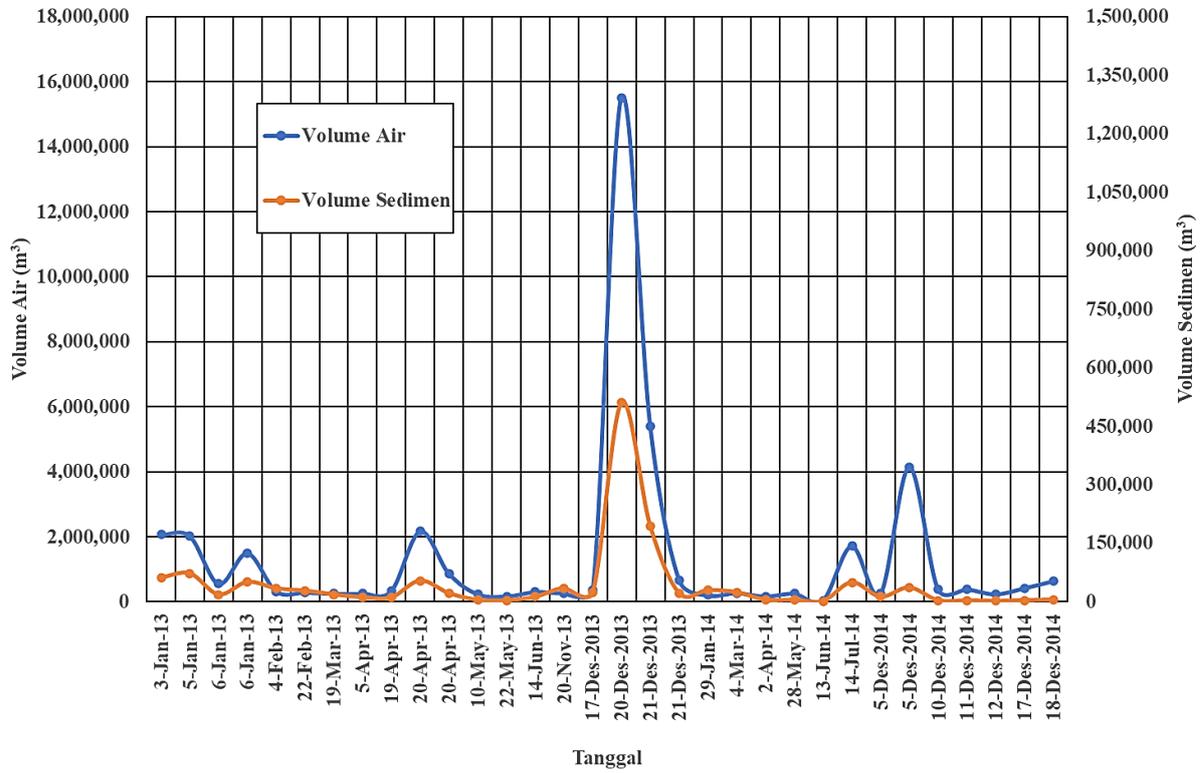
dengan A = luas DDC (m²), g = nilai gravitasi (m/s²), h = elevasi (m), k = *head loss coefficient*

METODE PENELITIAN

Pengumpulan Data Sekunder

Metodologi penelitian yang digunakan adalah metode penelitian kuantitatif deskriptif dengan menggunakan pendekatan Analisis Data Sekunder (ADS). Metode penelitian kuantitatif deskriptif dapat diartikan sebagai metode penelitian dengan hasil analisis berdasarkan analisis deskriptif pada data – data yang telah diolah dan dihitung. Pada penelitian ini, hanya dimanfaatkan data sekunder yang didapat. Sehingga metode penelitian yang digunakan tidak menggunakan studi eksperimental (studi yang mengandalkan hasil uji eksperimennya atau hasil uji laboratorium). Data-data sekunder yang didapat antara lain adalah seperti volume air dan sedimen yang masuk ke waduk dan juga volume air dan sedimen yang keluar melalui

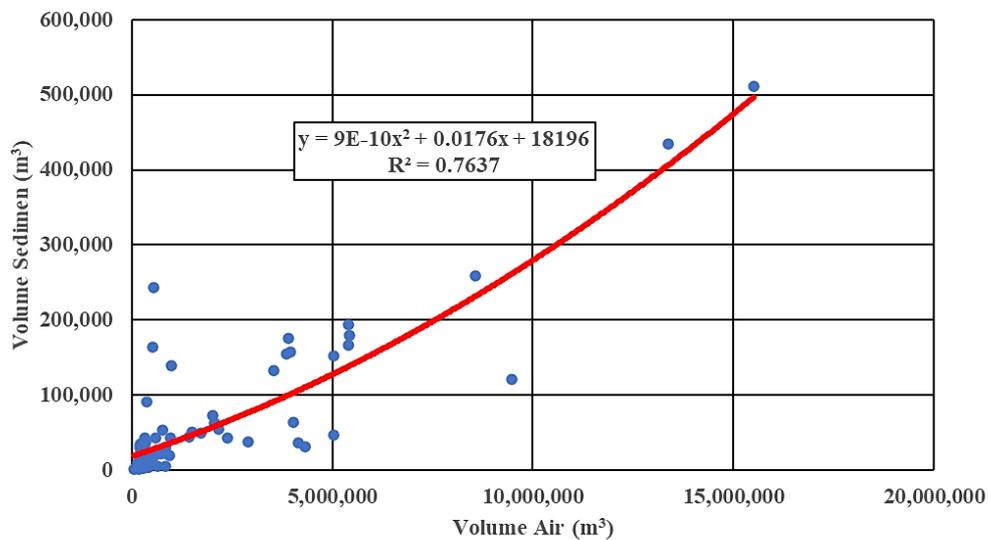
drawdown culvert (DDC). Contoh data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pembukaan *Bottom Outlet* (DDC) 2013/2014

Gambar 3 menunjukkan fluktuasi volume air dan volume sedimen yang keluar pada saat pembukaan pintu DDC pada tanggal tertentu, sedangkan untuk

melihat korelasi volume air dan volume sedimen pada pembukaan pintu DDC Waduk Mrica dapat dilihat pada Gambar 4.



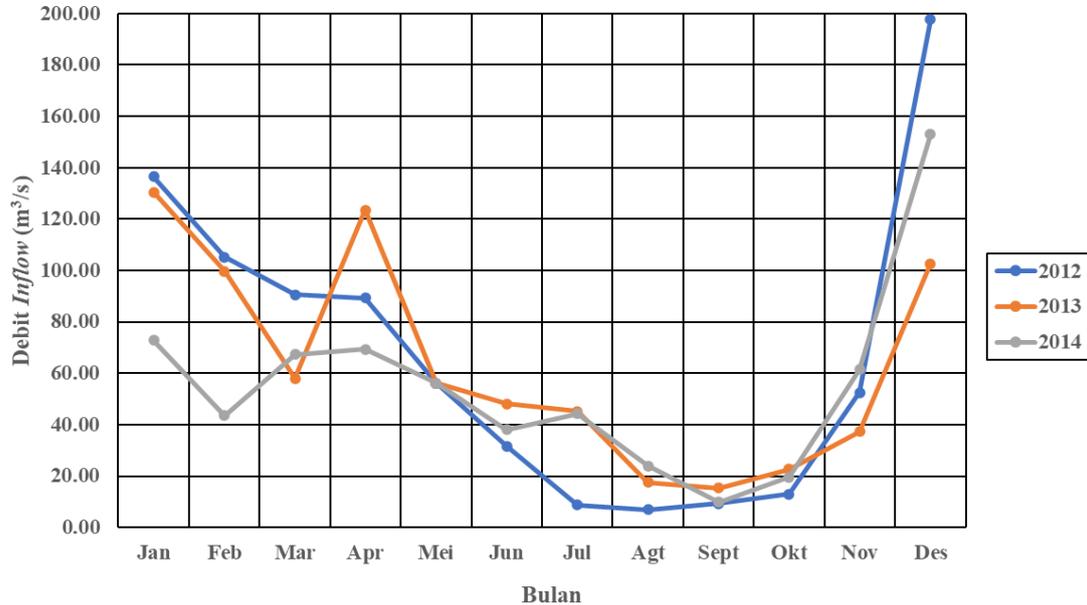
Gambar 4. Korelasi Volume Air dan Sedimen

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *Inflow* Rerata Harian

Inflow dihitung menggunakan data elevasi dan

outflow kemudian dimasukkan pada Persamaan 1 dan Persamaan 2. Hasil *inflow* pada tahun 2012, 2013, dan 2014 dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. *Inflow* Hitungan Waduk Mrica pada tahun 2012, 2013, dan 2014

Flushing Feasibility

Flushing feasibility dihitung menggunakan rumus-rumus persamaan dari Atkinson (1996). Penelitian ini berfokus pada tiga (3) tahun operasi penggelontoran (*flushing*) yaitu 2012, 2013, dan 2014. Data *inflow* yang dipakai

merupakan data *inflow* yang dihitung (Gambar 5), sedangkan untuk data sedimen digunakan data sekunder yang telah didapatkan. Contoh parameter yang digunakan pada perhitungan *flushing feasibility* dengan Atkinson (1996) dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter *Flushing Feasibility* Tahun 2012
Waduk Mrica 2012

<i>Capacity</i>	C_o (m ³)	50.000.000
<i>Reservoir length</i>	L (m)	6.500
<i>Elevation of top water level</i>	El _{max} (m)	231
<i>Minimum bed elevation</i>	El _{min} (m)	180
<i>Representative bottom width*</i>	W _{bot} (m)	197,72
<i>Representative side slope (original)*</i>	SS _{res}	1 V : 1,51 H
<i>Representative side slope for the deposits*</i>	SS _s	1 V : 3,19 H
<i>Mean annual inflow volume</i>	V _{in} (m ³)	2.103.636.132
<i>Mean annual sediment inflow</i>	M _{in} (tonnes)	5.592.519
<i>Representative discharge during flushing</i>	Q _f (m ³ /s)	279,26
<i>Duration of flushing</i>	T _f (days)	1,59
<i>Elevation at the dam during flushing</i>	El _f (m)	187

*W_{bot}, SS_{res}, dan SS_s diambil dari 12 *cross section* (potongan melintang) Waduk Mrica

Parameter pada Tabel 4 kemudian dimasukkan pada persamaan-persamaan untuk menghitung kriteria yang ditentukan pada perhitungan

flushing feasibility sesuai pada Tabel 2. Hasil nilai dari masing-masing kriteria untuk tiga (3) tahun penelitian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. *Flushing Feasibility*

Tahun	Kriteria	Syarat	Nilai
2012	<i>Sediment Balance Ratio</i> (SBR)	> 1,0	2,28
	<i>Long Term Capacity Ratio</i> (LTCR)	> 0,5	0,90
	<i>Drawdown Ratio</i> (DDR)	> 0,7	0,86
	<i>Sediment Balance Ratio with Full Drawdown</i> (SBR _d)	> 1,0	0,60
	<i>Flushing Width Ratio</i> (FWR)	> 1,0	1,08
	<i>Top Width Ratio</i> (TWR)	≥ 1,0	1,49
Tahun	Kriteria	Syarat	Nilai
2013	<i>Sediment Balance Ratio</i> (SBR)	> 1,0	2,42
	<i>Long Term Capacity Ratio</i> (LTCR)	> 0,5	0,90
	<i>Drawdown Ratio</i> (DDR)	> 0,7	0,86
	<i>Sediment Balance Ratio with Full Drawdown</i> (SBR _d)	> 1,0	0,64
	<i>Flushing Width Ratio</i> (FWR)	> 1,0	1,08
	<i>Top Width Ratio</i> (TWR)	≥ 1,0	1,49
Tahun	Kriteria	Syarat	Nilai
2014	<i>Sediment Balance Ratio</i> (SBR)	> 1,0	2,12
	<i>Long Term Capacity Ratio</i> (LTCR)	> 0,5	0,90
	<i>Drawdown Ratio</i> (DDR)	> 0,7	0,86
	<i>Sediment Balance Ratio with Full Drawdown</i> (SBR _d)	> 1,0	0,56
	<i>Flushing Width Ratio</i> (FWR)	> 1,0	1,08
	<i>Top Width Ratio</i> (TWR)	≥ 1,0	1,49

*Warna merah menandakan bahwa kriteria tersebut tidak terpenuhi.

Efektivitas *Flushing*

Perhitungan untuk efektivitas *flushing* diolah menggunakan Metode Morris & Fan, Qian, Lai & Shen, dan Ackers & Thompson. Pada dasarnya, metode yang digunakan untuk ketiga metode yaitu Metode Morris & Fan, Qian, dan Lai & Shen memiliki prinsip yang sama dalam perhitungan, yaitu perhitungan efektivitas penggelontorannya mempertimbangkan jumlah

air dan sedimen yang masuk dan keluar, dan memperhitungkan nilai sedimen terendap. Sedangkan untuk Metode Ackers & Thompson hanya mempertimbangkan nilai sedimen yang masuk dan keluar tanpa mempertimbangkan besarnya air yang masuk dan keluar. Hasil perhitungan metode efektivitas untuk Metode Morris & Fan, Metode Qian, dan Metode Lai & Shen dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Efektivitas *Flushing* Metode Morris & Fan, Qian, dan Lai & Shen

Tahun	Nilai Efektivitas Masing-masing Metode			Rerata per tahun
	Morris & Fan	Qian	Lai & Shen	
2012	0,032	0,031	0,032	0,0317
2013	0,040	0,040	0,036	0,0387
2014	0,059	0,059	0,067	0,0617

Metode Ackers & Thompson tidak bisa disandingkan dengan tiga (3) metode lainnya seperti pada Tabel 6, sehingga hasil perhitungan

Metode Ackers & Thompson dibedakan. Perhitungan untuk Metode Ackers & Thompson dapat dilihat pada Tabel 7.

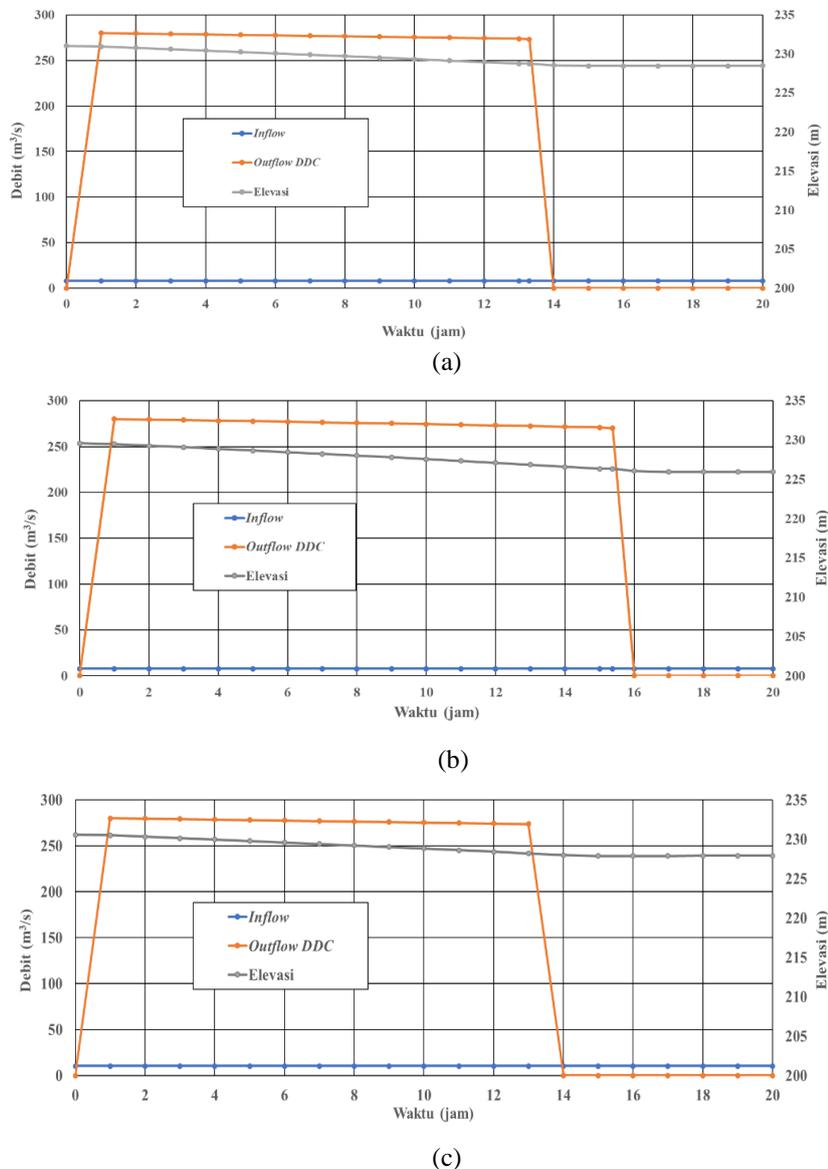
Tabel 7. Efektivitas *Flushing* Metode Ackers & Thompson

Tahun	L ₀	L _i	Fe
	(kg)	(kg)	
2012	1.938.891.501	4.147.057.848	0,3467
2013	1.609.301.576	3.410.609.377	0,4801
2014	2.234.078.565	2.603.928.317	0,8580

Tabel 7 memperlihatkan nilai efektivitas *flushing* untuk Metode Ackers & Thompson dimana hasil pada 2014 menunjukkan nilai tertinggi. Pada metode ini menekankan perbandingan antara sedimen yang masuk dan sedimen yang tergelontor saat *flushing*, sehingga semakin tinggi nilai Fe (mendekati 1,0), maka penggelontoran yang dilakukan dapat dikatakan baik. Nilai efektivitas *flushing* pada masing-masing metode sangat bergantung pada air dan sedimen yang masuk dan keluar, dimana air dan sedimen yang keluar dapat dipengaruhi oleh intensitas pembukaan pintu DDC yang dilakukan setiap tahunnya dan juga debit *outflow* pada DDC setiap tahunnya.

Reservoir Routing (Penelusuran Waduk)

Penelusuran waduk menggunakan data *inflow* hitungan sebelumnya, meskipun hasil *inflow* sebelumnya merupakan rerata harian, namun dikarenakan pembukaan pintu DDC untuk penggelontoran dilakukan dalam jam (satu kejadian *flushing*), sehingga data *inflow* tersebut diratakan untuk hari pada kejadian *flushing* tersebut. Sedangkan untuk *outflow* dari DDC digunakan Persamaan 13, dengan *trial* nilai k untuk mendapatkan nilai debit *outflow* DDC sesuai dengan debit maksimum dari DDC Waduk Mrica. Hasil penelusuran waduk dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil *Reservoir Routing* (Penelusuran Waduk): (a) $t = 13,3$ jam; (b) $t = 15,4$ jam; (c) $t = 13$ jam

Nilai *head loss coefficient* (k) untuk setiap kejadian *flushing* dapat bervariasi namun untuk tiga (3) tahun penggelontoran, nilai *head loss coefficient* (k) yang didapatkan berada di *range* 3,98 sampai dengan 4,14. Selisih nilai k untuk setiap kejadian *flushing* tidaklah banyak dan justru memiliki hasil yang sama untuk beberapa kejadian *flushing*. Nilai k disesuaikan dengan debit DDC agar tidak melebihi nilai maksimum $280 \text{ m}^3/\text{s}$.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Hasil analisis *flushing feasibility* dengan Metode Atkinson tahun 2012, 2013, dan 2014 tidak memenuhi syarat SBR_d , sehingga sedimen yang masuk dan keluar tidaklah seimbang. Hal ini menandakan bahwa penggelontoran yang dilakukan boros air dan tidak efisien dalam pengeluaran sedimen.
2. Nilai efektivitas *flushing* Waduk Mrica pada tahun yang ditinjau yaitu 2012, 2013, dan 2014 menunjukkan nilai efektivitas yang tidak jauh berbeda satu dengan yang lain pada Metode Morris & Fan, Qian, dan Lai & Shen. Perhitungan dengan Metode Ackers & Thompson tidak bisa disandingkan dengan ketiga metode lainnya, dikarenakan rumus perhitungan yang digunakan berbeda, yaitu perhitungan efektivitasnya hanya bergantung pada sedimen yang masuk dan sedimen yang keluar, dan perhitungan dilakukan untuk setiap tahunnya sehingga tidak spesifik menunjukkan per kejadian penggelontoran yang terjadi.
3. Nilai efektivitas tertinggi berada di tahun 2014 yaitu dengan nilai efektivitas 0,059 untuk Metode Morris & Fan, dan Metode Qian, 0,067 untuk Metode Lai & Shen, dan rerata pada tahun 2014 dari ketiga metode tersebut mencapai 0,062 (terbesar di antara tiga tahun). Hasil yang terbesar juga ditunjukkan pada Metode Ackers & Thompson dengan nilai 0,858 pada tahun yang sama.
4. Mengacu pada rumus persamaan Metode Ackers & Thompson, semakin besar perbandingan antara jumlah sedimen yang

masuk dan keluar (mendekati 1,0), maka dapat dikatakan semakin mendekati efektif, dikarenakan bila jumlah sedimen yang masuk dan keluar mencapai seimbang, maka penumpukan sedimen berlebih dapat dihindari.

5. Durasi dan debit *flushing* pada setiap kejadian penggelontoran berperan penting dalam efektivitas dan efisiensi *flushing*.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

- Atkinson, E. (1996). *The Feasibility of Flushing Sediment from Reservoirs*. Report OD 137, HR Wallingford
- Chen, Ching-Nuo & Tsai, Chih-Heng. (2017). "Estimating Sediment Flushing Efficiency of a Shaft Spillway Pipe and Bed Evolution in a Reservoir". *Journal of MDPI Water* 2017, 9(12), 924
- Fruchard, F. & Camenen, B. (2012). "Reservoir Sedimentation: Different type of flushing – friendly flushing example of genissiat dam flushing". *Journal of HAL ID*, 00761305
- ICOLD Committee on Reservoir Sedimentation. (2009). *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems*. Draft ICOLD Bulletin.
- Krisetyana, Hari. (2008). *Tingkat Efisiensi Penggelontoran Endapan Sedimen di Waduk PLTA PB. Sudirman*. Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang
- Legono, Djoko, Fahmi Hidayat, Dian Sisinggih, dan Pitojo Tri J. (2020). "Assessment on the Efficiency of Sediment *Flushing* Due to Different Timings (Case Study of Mrica Reservoir, Central Java, Indonesia)". *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 437 012010
- PT. Indonesia Power Unit Pembangkit Panglima Besar Soedirman. (2015). *Laporan Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk PLTA PB. Sudirman, Banjarnegara*
- Scheuerlein, H. (1990). "Removal of Sediment Deposits in Reservoirs by Means of *Flushing*". *IAHS Pub.*, No. 194
- Schulz, E.F. (1976). *Problems in Applied Hydrology*. Water Resources Publications Fort Collins Colorado, USA
- Utomo, P. (2017). "Mrica Reservoir Sedimentation: Current Situation and Future Necessary Management". *Journal of the Civil Engineering Forum*, 3(2), 95-100, <https://doi.org/10.22146/jcef.26640>