

PENELUSURAN WADUK MRICA UNTUK ANALISIS PERUBAHAN UNJUK KERJA FUNGSI DAN EFISIENSI PENGGELONTORAN SEDIMEN

Shakti Rahadiansyah¹, Vicky Ariyanti¹, Muhamad Sulaiman²,
Adhy Kurniawan², dan Djoko Legono^{3*}

¹Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak, Kementerian Pekerjaan Umum

²Departemen Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada

³Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

*djokolegono@ugm.ac.id

Pemasukan: 14 November 2025

Perbaikan: 31 Desember 2025

Diterima: 31 Desember 2025

Intisari

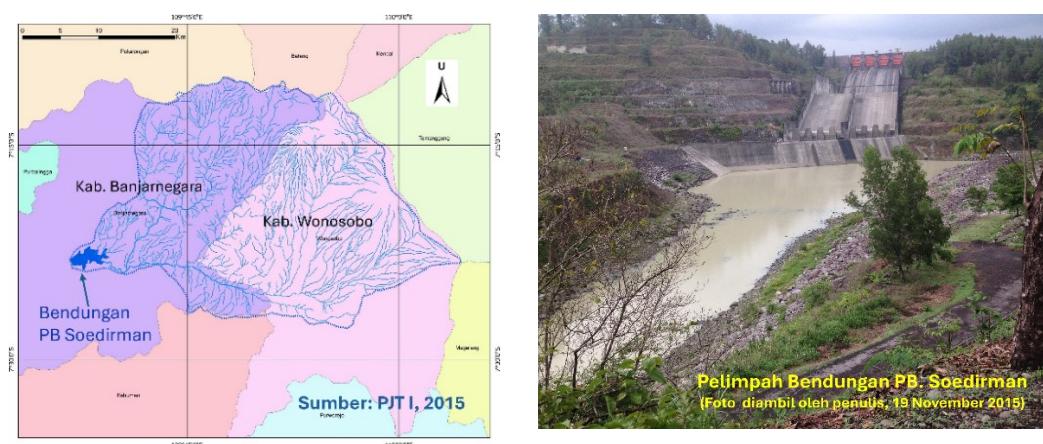
Waduk Mrica, juga dikenal sebagai Bendungan Panglima Besar Soedirman, merupakan bendungan yang dibangun pada tahun 1982 dengan berbagai fungsi atau kegunaan, antara lain penyediaan listrik, irigasi, serta pengendalian banjir. Persoalan utama yang dihadapi selama lebih dari satu decade terakhir adalah adanya sedimentasi waduk yang sangat aktif yang dirasakan menyebabkan penurunan fungsi waduk tersebut dalam memenuhi berbagai kegunaan seperti yang direncanakan semula. Pengelolaan sedimentasi waduk telah ditempuh dengan berbagai cara, baik pengendalian erosi permukaan di daerah tangkapan, pencegahan hasil erosi yang akan masuk ke sistem sungai, serta pengeluaran sedimen dari waduk. Naskah ini menyajikan hasil evaluasi efisiensi dan dampak yang ditimbulkan akibat pengeluaran sedimen dari Waduk Mrica dengan cara penggelontoran (*flushing*). Kegiatan penyelenggaraan penggelontoran sedimen Waduk Mrica perlu dievaluasi seberapa jauh tingkat efisiensinya serta dampak negatif di perairan di sebelah hilir bendungan penyelenggaraan penggelontoran sedimen Waduk Mrica selama ini dilaksanakan. Program *RESROUT2* (*Reservoir Routing Versi 2*) merupakan program penelusuran untuk imbangkan aliran air (dan sedimen) yang dibangun khusus untuk mendukung analisis pengaruh perubahan karakteristika tumpungan Waduk Mrica (dengan suatu pola aliran masuk waduk tertentu) terhadap pola aliran keluar. Aliran keluar waduk dimungkinkan dengan pengaturan-pengaturan bangunan keluaran, antara lain pelimpah bendungan, intake enaga, intake irigasi, serta intake *DDC* atau *Bottom Outlet*. Hasil penelusuran dengan 10 (sepuluh) skenario menunjukkan bahwa sedimentasi Waduk Mrica telah mengakibatkan perubahan nilai parameter hidraulik. Volume aliran yang keluar melalui *Drawdown Culvert* atau *Bottom Outlet* dan efisiensi penggelontoran selama 5 jam adalah berturut-turut 4,354 juta m³ dan 0,167, sedangkan untuk penggelontoran selama 3 jam adalah berturut-turut 2,476 juta m³ dan 0,221. Peningkatan tingkat efisiensi penggelontoran sedimen Waduk Mrica tetap perlu diupayakan seiring dengan upaya pengurangan dampak negatifnya.

Kata Kunci: Sedimentasi waduk, penggelontoran (*flushing*), penelusuran, efisiensi.

Latar Belakang

Selama periode 2014-2024 telah dibangun sejumlah 53 bendungan di Indonesia yang diharapkan dapat memenuhi berbagai kebutuhan, antara lain untuk penyediaan listrik, penyediaan air irigasi, penyediaan air baku, serta pengendalian banjir. Saat ini jumlah bendungan di Indonesia telah mencapai 292 bendungan, (Laksono, 2024). Bendungan memiliki peran penting dalam penyediaan air untuk irigasi, pengendalian banjir, dan juga dapat berfungsi sebagai pembangkit listrik tenaga air. Bendungan Panglima Besar Soedirman (PB Soedirman) dibangun pada tahun 1982 dan mulai dioperasikan pada tahun 1988 diresmikan oleh Presiden Soeharto pada tanggal 23 Maret 1989). Bendungan PB. Soedirman dibangun untuk fungsi utama penyediaan listrik dengan kapasitas terpasang sebesar 185,5 MW serta produksi tahunan 564.000 MWh. Selain itu, waduk ini juga dimanfaatkan sebagai sumber air bersih dan prasarana perikanan darat oleh masyarakat sekitar. Fungsi waduk yang lain adalah untuk penyediaan air untuk mengairi sawah seluas \pm 5.001 Ha. Secara administratif, Bendungan PB. Soedirman dan area genangan Waduk Mrica terletak di Kabupaten Banjarnegara, sedangkan Daerah Tangkapan Air (DTA) terletak di dua kabupaten, yaitu Kabupaten Banjarnegara dan Kabupaten Wonosobo, Propinsi Jawa Barat (lihat Gambar 1). Daerah irigasi mencakup lahan pertanian di sepanjang Sungai Serayu dengan layanan pada Daeerah irigasi Serayu (20.795 Ha), mulai dari lokasi Bendungan PB. Sudirman sampai dengan kawasan sekitar muara Sungai Serayu di Samudera Indonesia. Data teknis Bendungan PB Soedirman disajikan pada Tabel 1.

Permasalahan sedimentasi Waduk Mrica mulai dirasakan sejak tahun 2000 yaitu sejak semakin intensifnya kegiatan pemanfaatan lahan di kawasan hulu DTA Waduk Mrica. Kegiatan tersebut telah mengakibatkan meningkatnya laju erosi permukaan dari sebesar 4 mm/tahun pada kondisi prediksi pada saat perencanaan sampai 14 mm/tahun pada tahun 2015 (PT. Jasa Tirta I, 2015). Selama kurun waktu 1988 s/d 2015 tidak terlihat adanya alih fungsi lahan yang secara signifikan mengkontribusi peningkatan laju erosi lahan (Utomo, 2017).



a. Lokasi bendungan, waduk, dan DTA

b. Bendungan PB. Soedirman

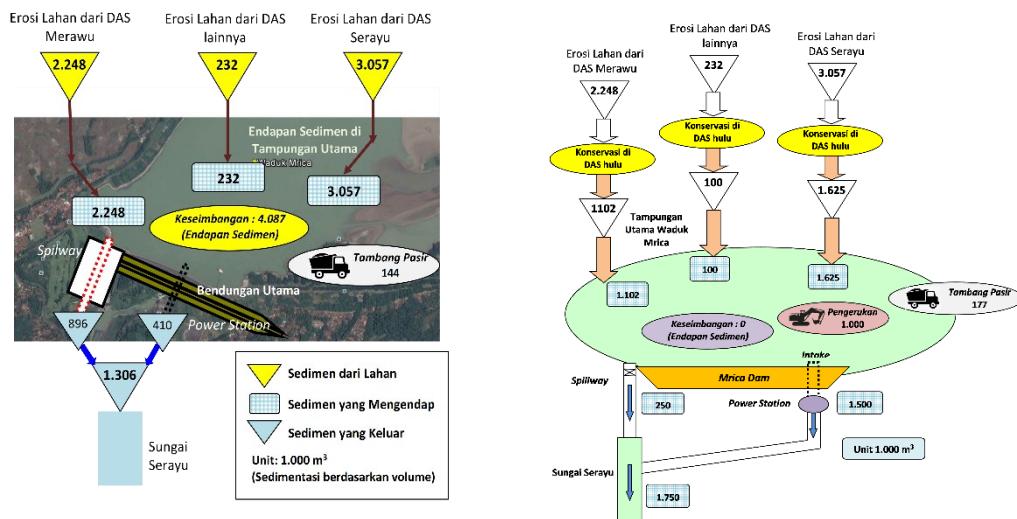
Gambar 1. Lokasi dan foto Bendungan PB. Soedirman

Tabel 1. Data Teknis Bendungan PB Soedirman

No.	Parameter Tinjauan	Deskripsi
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.	Tinggi Bendungan	100 m
7.	El. Puncak Bendungan	+235 m
8.	El. Mercu Pelimpah	+231 m
9.	Lebar Mercu Pelimpah	57 m
9.	Luas Genangan	8,26 km ²
10.	Total Luas DTA	956,91 km ²
11.	Volume Tampungan	148.287.000 m ³ (pada +231m)
12.	Volume <i>Dead Storage</i>	10.000.000 m ³ (pada +182m)
13.	Volume Aktif	42.000.000 m ³
14.	Rerata <i>Inflow</i>	95 m ³ /s
15.	Curah Hujan	3.500 mm/tahun
<i>INTAKE IRIGASI:</i>		
16.	Lebar x Tinggi	3.0 m x 5.0 m
17.	Elevasi Dasar	+220.8 m
<i>DRAW DOWN CULVERT (DDC):</i>		
18.	Debit Maksimum	280 m ³ /s (pada +231m)
19.	Luas <i>DDC</i>	20 m ²
20.	El. Dasar <i>Intake</i>	+180 m
21.	El. Dasar Kolam Terjunan	+131 m

(Indonesia Power, 2014)

Terjadinya peningkatan besarnya erosi lahan mungkin lebih disebabkan adanya peningkatan teknologi budidaya tanaman pertanian, utamanya budidaya tanaman kentang. Peningkatan jumlah erosi lahan kurang diimbangi dengan upaya pencegahan hasil erosi masuk ke sistem alir dan kemudian masuk ke waduk. Produksi erosi lahan yang terlanjur masuk ke waduk dan kemudian mengendap di waduk akan mempercepat pengurangan volume tampungan waduk, yang pada taraf tertentu akan mengurangi fungsi waduk. Pengelolaan sedimentasi yang mengendap di waduk merupakan hal yang seharusnya dihindari karena dinilai mahal (*cost effective*) yang sering tidak efisien. Tindakan pengeluaran sedimen dari waduk, disarankan untuk dilakukan setelah upaya pengendalian jumlah erosi di lahan serta pencegahan sedimen masuk ke waduk dilakukan secara maksimal (Shahmirzadi et al., (2015) dan Wang et al., (2020). Pengurangan laju erosi lahan di DTA Waduk Mrica seperti perencanaan di *Roadmap* 2015 (Gambar 2) direncanakan dalam beberapa bentuk kegiatan (penghijauan kembali, pembangunan dam penahan sedimen, pembangunan teras bangku, serta pengaturan budidaya tanaman pangan dll). Upaya menjaga keseimbangan sedimentasi menunjukkan masih perlunya kegiatan pengeluaran sedimen yang terlanjur mengendap di waduk dengan baik dengan cara pengeringan maupun pengelontoran (*flushing*).

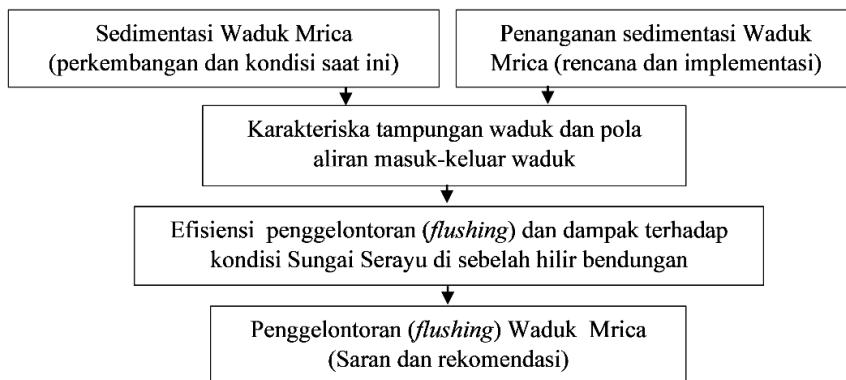


Gambar 2. Imbalance and sediment management of Waduk Mrica (PT. Jasa Tirta I, 2015)

Kendala utama dalam kegiatan pengeluaran sedimen dari waduk ini adalah kebutuhan tempat pembuangan yang tidak mengganggu dampak lingkungan di sekitarnya, baik di luar badan air sungai maupun di perairan sungai di sebelah hilir bendungan (Utomo, 2017). Kendala yang lain adalah pertimbangan efisiensi penggelontoran, di mana untuk mengeluarkan sedimen di sekitar pintu pengambilan diperlukan sejumlah air yang sering tidak sepadan dengan jumlah sedimen yang dapat dikeluarkan dari waduk. Namun demikian, kegiatan penggelontoran tetap harus dilakukan agar pengeluaran air ke turbin pembangkit tetap dapat dilaksanakan dengan aman tanpa gangguan dan energi listrik yang diperoleh tetap tinggi. Naskah ini menganalisis efisiensi kegiatan penggelontoran Waduk Mrica yang mempertimbangkan kondisi hidrograf aliran masuk, kondisi tampungan waduk, serta kondisi perairan di sebelah hilir bendungan. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah tersedianya model penelusuran waduk yang dapat membantu penetapan strategi penggelontoran sedimen Waduk Mrica.

Metodologi Pendekatan

Metode pendekatan yang digunakan untuk analisis dalam naskah ini dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu analisis efisiensi penggelontoran, analisis imbalan aliran air (dan sedimen) masuk dan keluar dari Waduk Mrica, serta analisis kondisi Sungai Serayu di sebelah hilir Bendungan PB. Soedirman. Berbagai data pelaksanaan penggelontoran akan digunakan sebagai dasar analisis dan hasilnya akan dievaluasi dan digunakan untuk menetapkan nilai efisiensi serta kondisi perairan di sebelah hilir bendungan. Suatu pembahasan dilakukan terhadap hasil evaluasi yang kemudian disertai dengan penyampaian saran dan rekomendasi yang diharapkan bermanfaat untuk digunakan sebagai dasar kegiatan penggelontoran selanjutnya. Bagan alir dari pelaksanaan analisis sesuai dengan metode pendekatan yang disebutkan di atas disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bagan alir metodologi pendekatan

a. Karakterisika tampungan waduk dan pola aliran masuk.

Karakteristika tampungan waduk umumnya dinyatakan dalam hubungan antara elevasi muka air waduk dengan volume pada kondisi elevasi yang ditinjau. Dengan adanya sedimentasi maka volume waduk pada elevasi yang sama akan lebih kecil daripada tidak ada sedimentasi. Secara matematis, karakteristika tampungan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut (lihat Persamaan 1).

$$V = a \times (E - E_{ds})^b \quad (1)$$

dengan:

V = volume tampungan (m^3)

E = elevasi (m)

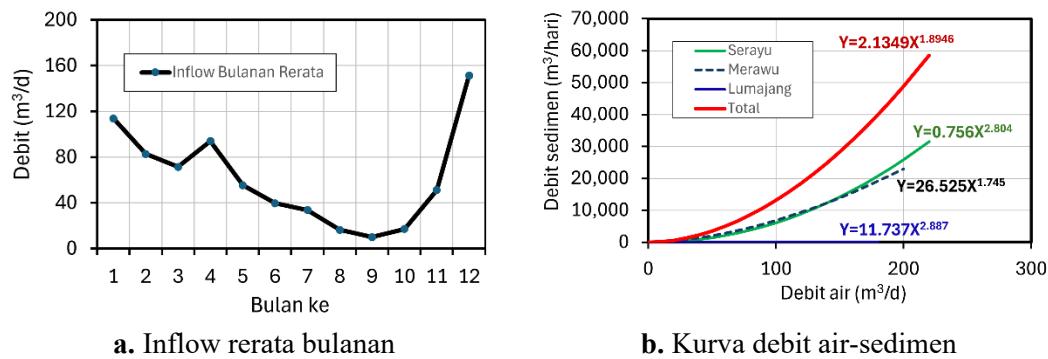
E_{ds} = elevasi *dead storage* (m)

a dan b adalah konsanta

Selanjutnya Persamaan 1 akan digunakan sebagai dasar untuk menunjukkan secara kuantitatif adanya perubahan karakteristika tampungan waduk, baik yang disebabkan oleh terjadinya sedimentasi ataupun oleh adanya kegiatan pengeluaran sedimen dari waduk.

b. Pola aliran (air dan sedimen) masuk dan keluar waduk

Air (dan sedimen) yang masuk ke Waduk Mrica berasal dari 3 (tiga) Sub Daerah Aliran Sungai (Su-DAS), yaitu Sub-DAS Serayu, Sub-DAS Merawu, dan Sub-DAS Lumajang, dengan luas DAS berturut-turut $678,31 \text{ km}^2$, $218,60 \text{ km}^2$, dan $8,00 \text{ km}^2$. Kontribusi sedimen yang masuk ke waduk dari masing-masing sungai tersebut saling tidak sama, baik secara alami (distribusi dan intensitas hujan), ataupun secara kegiatan yang ada di masing-masing Sub-DAS. Gambar 3.a menunjukkan pola aliran (air dan sedimen) yang masuk ke Waduk Mrica rerata bulanan dari pengamatan yang dilakukan pada tahun 2012, 2013 dan 2014, sedangkan Gambar 3.b adalah kurva debit-sedimen yang menunjukkan besaran sedimen yang masuk ke waduk.



Gambar 3. Inflow rerata bulanan dan kurva debit air-sedimen

Aliran keluar waduk dapat berlangsung melalui beberapa mekanisme, yaitu melalui pelimpah bendungan, pengambilan langsung, ataupun pengeluaran melalui bangunan pengeluaran untuk pelayanan pemanfaatan (energi listrik dan atau irigasi), maupun bangunan pengeluaran bawah (*bottom outlet*). Imbalan aliran masuk dan keluar waduk dinyatakan secara persamaan matematis seperti berikut (lihat Persamaan 2).

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

dengan:

I = aliran masuk ke waduk atau *inflow* (m³/s)

O = aliran ke luar dari waduk atau *outflow* (m³/s)

Δt = deskripsi waktu (jam atau hari)

S = volume tumpungan (m³)

c. Penggelontoran Sedimen (*Sediment Flushing*)

Penggelontoran sedimen atau *sediment flushing* pada suatu waduk adalah salah satu cara pengeluaran sedimen yang mengendap di sekitar bangunan pengambilan air waduk (Annandale et al., 2016). Cara ini hanya dapat dilakukan apabila bangunan bendungan di fasilitasi dengan bangunan pengeluaran bawah atau *bottom outlet*. Pengeluaran sedimen ini selalu disertai dengan pengeluaran air dari waduk, sehingga tingkat keberhasilan pengeluaran sedimen selalu dikaitkan dengan jumlah air yang dikeluarkan dari waduk serta jumlah sedimen yang berhasil dikeluarkan oleh sejumlah air tersebut (Chen et al., 2017). Sedimen yang dikeluarkan dengan cara penggelontoran ini umumnya berupa sedimen suspensi dan berukuran halus (lumpur atau *silt*). Pelaksanaan penggelontoran atau *flushing* sedimen umumnya dimulai pada kondisi elevasi muka air waduk tinggi, dengan mekanisme yang dibedakan menjadi tiga, yaitu *drawdown flushing*, *pressure flushing*, dan *turbidity current venting* (Lai et al., 2024 dan Fruchart et., 2012).

Drawdown flushing dilakukan dengan menurunkan elevasi muka air waduk, sebagian atau seluruhnya, kemudian melepaskan air keluar dari waduk. Efektivitas *drawdown flushing* bergantung pada berbagai faktor, antara lain geometri reservoir, ketinggian air, dan karakteristik bangunan pengeluaran bawah.

Pressure flushing merupakan proses pengeluaran sedimen dari waduk dengan cara membuka bangunan pengeluaran bawah sambil menjaga elevasi muka air waduk berada pada suatu ketinggian tertentu. Metode ini efektif untuk menghilangkan sedimen di dekat bangunan pengeluaran bawah. Proses penggelontoran menciptakan lubang gerusan lokal (*scour cone*) di dekat bangunan pengeluaran bawah.

Turbidity current venting atau *sluicing* merupakan pengeluaran sedimen waduk pada saat aliran masuk waduk relatif besar, keruh, serta membawa banyak material tersuspensi. Metode ini melibatkan proses pengeluaran air dan sedimen melalui bangunan pengeluaran bawah. Metode ini membantu menghilangkan sedimen halus sebelum terakumulasi dan terkonsolidasi di dasar waduk.

d. Efisiensi Penggelontoran (*Flushing*) Sedimen.

Efisiensi penggelontoran atau *flushing* digunakan untuk menyatakan tingkat keberhasilan *flushing*. Pada Tabel 2 disajikan beberapa rumus atau metoda yang digunakan untuk menyatakan efisiensi *flushing* merupakan ukuran keberhasilan pelaksanaan *flushing*. Hampir semua rumus perhitungan efisiensi selalu memperhitungkan kondisi sebelum dan sesudah pelaksanaan *flushing*, terutama volume air yang masuk dan keluar waduk serta volume sedimen yang masuk dan keluar waduk (lihat Persamaan 3, 4, dan 5). Beberapa penelitian sebelumnya menyatakan bahwa nilai efisiensi di atas 0,10 masih dipandang efisien (Morris & Fan, 1997, dan Shahmirzadi et al., 2015).

Tabel 2. *Flushing Efficiency (F_e)*

No.	Metode	Persamaan	Keterangan	Satuan
1.	Qian (1982)	$F_e = \frac{V_0}{V_d} \quad (3)$ dengan $V_d = \frac{V_0 C_0 - V_i C_i}{\rho}$	V_0 =vol. air keluar V_d =vol. sedimen keluar C_0 =muatan sedimen keluar V_i =vol. air masuk C_i =muatan sedimen masuk ρ =massa jenis sedimen	(m ³) (m ³) (kg/m ³) (m ³) (kg/m ³) (kg/m ³)
2.	Lai & Shen (1996)	$F_e = \frac{V_{so} - V_{si}}{V_0} \quad (4)$	V_{so} =vol. sedimen keluar V_{si} =vol. sedimen masuk V_0 =vol. air keluar	(m ³) (m ³) (m ³)
3.	Morris & Fan (1997)	$F_e = \frac{V_0 C_0 - V_i C_i}{\rho V_0} \quad (5)$	V_0 =vol. air keluar C_0 =muatan sedimen keluar V_i =vol. air masuk C_i =muatan sedimen masuk ρ =Massa jenis sedimen	(m ³) (kg/m ³) (m ³) (kg/m ³) (kg/m ³)

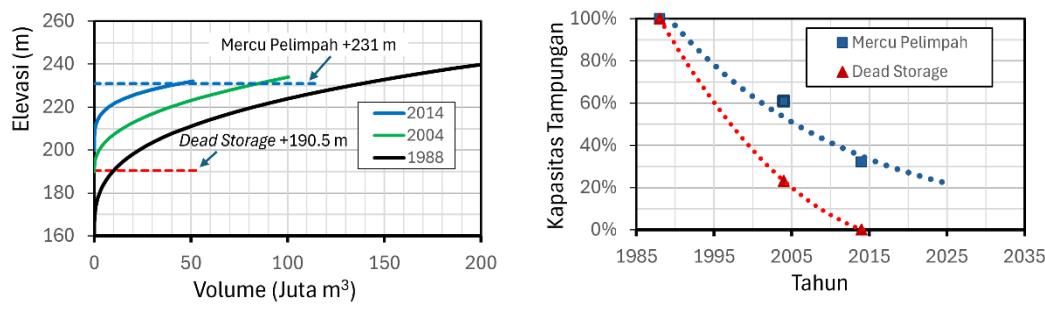
Hasil Studi dan Pembahasan

Perkembangan sedimentasi Waduk Mrica telah mengakibatkan karakteristika tampungan waduk berubah. Perubahan karakteristik tampungan secara kuantitatif ditunjukkan dengan perubahan konstanta Persamaan 1 seperti ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 4.

Tabel 3. Perubahan karakteristik tampungan Waduk Mrica

No.	Saat evaluasi	Konstanta a	Konstanta b	E_{ds}
1.	Tahun 1988	243,62	3,1091	160
2.	Tahun 2004	12.472	2,3869	190,72
3.	Tahun 2014	30,998	4,1298	200

Parameter E_{ds} sesungguhnya merupakan elevasi dasar waduk terrendah, di mana pada kondisi awal (setelah bendungan dibangun pada tahun 1988) adalah berada pada +160m. Pesatnya laju sedimentasi telah menyebabkan elevasi dasar terrendah waduk mengalami kenaikan dari +190,72m pada tahun 2004 dan +200m pada tahun 2014. Kenaikan elevasi dasar waduk terrendah adalah sebesar 1,92m/tahun selama 16 tahun pertama dan 0,938m/tahun pada 10 tahun berikutnya atau rerata sebesar 1,429m/tahun sepanjang 26 tahun sejak dibangunnya Bendungan PB Soedirman. Kenaikan elevasi dasar waduk ini juga terjadi diseluruh bagian dasar waduk sehingga waduk mengalami pengurangan kapasitas atau volume tampungan, baik pada tampungan mati (*dead storage*) ataupun tampungan penuh (*full storage*). Kondisi semacam ini akan menyebabkan fungsi waduk untuk tujuan pembangkitan energi listrik, irigasi, dll menjadi berkurang. Karakteristik tampungan waduk pada kondisi tahun 1988, 2004 dan 2014 ditunjukkan pada Gambar 4.a. Kapasitas tampungan penuh pada kondisi setelah pembangunan (pada elevasi +231m) adalah sebesar 139,823 juta m³. Kapasitas tersebut selanjutnya berkurang menjadi 88,552 juta m³ dan 44.705 juta m³ berturut-turut pada tahun 2004 dan 2014. Sedangkan kapasitas tampungan mati pada kondisi setelah pembangunan (pada elevasi +206m) adalah sebesar 36,008 juta m³, kemudian berkurang menjadi 8,362 juta m³ dan 0.051 m³ berturut-turut pada tahun 2004 dan 2014. Persentase penurunan kapasitas tampungan penuh (elevasi mercu pelimpah) dan tampungan mati (elevasi *dead storage*) ditunjukkan pada Gambar 4.b.



a. Perubahan karakteristik tampungan

b. Penurunan kapasitas

Gambar 4. Perubahan karakteristik tampungan dan penurunan kapasitas

Penelusuran waduk dilakukan dengan pengembangan program simulasi yang merupakan penyelesaian Persamaan (2) dengan berbagai skenario. Program *RESROUT2 (Reservoir Routing Versi 2)* merupakan program penelusuran untukimbangan aliran air (dan sedimen) yang dibangun khusus untuk mendukung analisis pengaruh perubahan karakteristika tampungan Waduk Mrica (dengan suatu pola aliran masuk waduk tertentu) terhadap pola aliran keluar. Aliran keluar waduk dimungkinkan dengan pengaturan-pengaturan bangunan keluaran, antara lain pelimpah bendungan, intake enaga, intake irigasi, serta intake *DDC* atau *Bottom Outlet*. Tergantung pada tujuan analisis, skenario simulasi dikembangkan dengan variasi data masukan dan geometri bangunan keluaran. Karakterisika tampungan dibedakan menurut dua kondisi, yaitu kondisi tahun 1988 (kondisi saat sesudah Bendungan PB Soedirman) dibangun serta kondisi 2014. Pola aliran masuk adalah hidrograf aliran masuk (*inflow hydrograph*) yang dibedakan menurut hidrograf aliran puncak (*high flow*) dan hidrograf aliran rendah (*low flow*). Hidrograf aliran masuk untuk aliran puncak adalah (berturut-turut) jam-jaman dan harian. Lama waktu penelusuran untuk aliran puncak adalah fleksibel, maksimum 150 jam, sedangkan lama waktu penelusuran aliran rendah adalah 365 hari. Analisis lanjut penerapan Program *RESROUT2* untuk analisis Waduk Mrica dilakukan dengan menggunakan koefisien deskrit waktu sebesar 0.1, artinya program dijalankan dengan deskrit waktu 0.1 jam dan 0.1 hari, berturut-turut untuk simulasi aliran puncak dan simulasi aliran rendah (lihat Tabel 4). Pada Tabel 4 tersebut disajikan skenario simulasi penelusuran waduk Mrica yang dibedakan menjadi Skenario 1 s/d 10. Kesepuluh skenario penelusuran tersebut dibedakan menurut dua karakteristika tampungan dan lima tipe sistem perancangan. Sistem perancangan dimaksud merupakan struktur data hidraulik untuk masukan penelusuran, antara lain hidrograf aliran masuk, lama waktu penelusuran, awal penelusuran, serta pengaturan operasional pintu pengeluaran (lihat Tabel 5).

Tabel 4. Skenario dan data penelusuran Waduk Mrica dengan *RESROUT2*

Skenario	Data							
	Karakterisika Tampungan		Sistem Perancangan					
	1988	2014	Tipe A	Tipe B	Tipe C	Tipe D	Tipe E	
Skenario 1	✓	○	✓	○	○	○	○	○
Skenario 2	✓	○	○	✓	○	○	○	○
Skenario 3	✓	○	○	○	✓	○	○	○
Skenario 4	✓	○	○	○	○	✓	○	○
Skenario 5	✓	○	○	○	○	○	○	✓
Skenario 6	○	✓	✓	○	○	○	○	○
Skenario 7	○	✓	○	✓	○	○	○	○
Skenario 8	○	✓	○	○	✓	○	○	○
Skenario 9	○	✓	○	○	○	✓	○	○
Skenario 10	○	✓	○	○	○	○	○	✓

Catatan: ✓ data digunakan
○ data tidak digunakan

Tabel 5. Deskripsi dan Tipe Sistem Perancangan

Deskripsi	Tipe				
	Tipe A	Tipe B	Tipe C	Tipe D	Tipe E
1. Hidrograf Aliran Masuk:					
a. <i>PMF (Probable Max.Flood)</i>	✓	✓	○	○	○
b. <i>HF-03</i> dan <i>HF-05</i>	○	○	✓	○	○
c. <i>QAVI214H</i> (harian setahun)	○	○	○	✓	✓
2. Lama Waktu Penelusuran:					
a. 3 jam dan 5 jam	○	○	✓	○	○
b. 100 jam	✓	✓	○	○	○
c. 365 hari	○	○	○	✓	✓
3. Elevasi Awal Penelusuran:					
a. +160m	✓	○	○	✓	○
b. +230m	○	✓	✓	○	✓
4. Operasional Pengeluaran:					
a. Semua <i>intake</i> ditutup	✓	○	○	○	○
b. <i>Intake</i> tenaga dibuka	○	○	○	✓	✓
c. <i>Intake</i> irigasi dibuka	○	○	○	✓	○
d. <i>Intake DDC-BO</i> dibuka	○	✓	✓	○	○

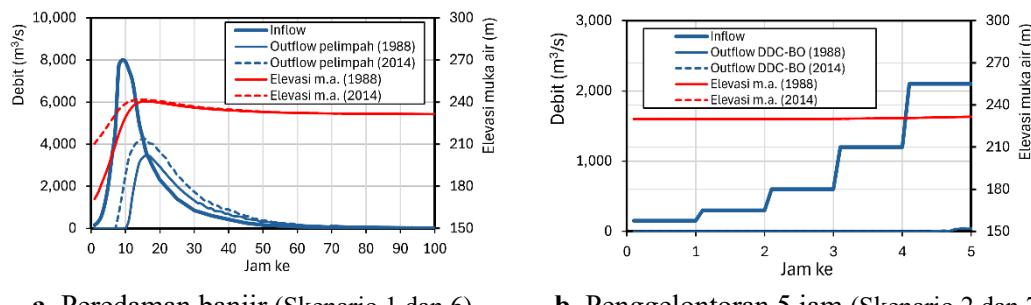
Catatan: ✓ data digunakan

○ data tidak digunakan

Pengoperasian bangunan pengeluaran bawah *DDC* atau *Bottom Outlet* sesungguhnya ditujukan untuk menjaga agar semua bangunan pengeluaran (*intake* irigasi, tenaga, dan *bottom outlet*) tetap berfungsi untuk mengeluarkan air dari waduk. Unjuk kerja fungsi dan efisiensi pengelontoran waduk pada kondisi 1988 dan 2014 dilakukan dengan memperbandingkan parameter-parameter hidraulik pada skenario yang bersesuaian (lihat Tabel 6 dan Gambar 5). Perubahan nilai parameter hidraulik akibat sedimentasi Waduk Mrica dapat bersifat kenaikan dan penurunan nilai parameter antara tahun 1988 dan 2014.

Tabel 6. Nilai parameter hidraulik pada berbagai skenario penelusuran waduk

Parameter Hidraulik	Karakteristika 1988		Karakteristika 2014	
	Skenario	Nilai	Skenario	Nilai
1. Debit puncak (m^3/s)	Skenario 1	3.467	Skenario 6	4.269
2. Efisiensi peredaman (%)	Skenario 1	56,66	Skenario 6	46,64
3. Volume air tertampung (100 jam-juta m^3)	Skenario 1	318,54	Skenario 6	128,49
4. Volume air irigasi (365 hari-juta m^3)	Skenario 4	475,145	Skenario 9	545,844
5. Energi diperoleh (365 hari-GWH)	Skenario 5	884	Skenario 10	952
6. Volume air lewat <i>DDC-BO</i> (5 jam-juta m^3)	Skenario 2	4,354	Skenario 7	4,355
		Fe=0.167		Fe=0.167
7. Volume air lewat <i>DDC-BO</i> (3 jam-juta m^3)	Skenario 3	2,476	Skenario 8	2,476
		Fe=0.221		Fe=0.221



a. Peredaman banjir (Skenario 1 dan 6) b. Penggelontoran 5 jam (Skenario 2 dan 7)

Gambar 5. Peredaman banjir dan penggelontoran sedimen 5 jam

Penelusuran waduk dengan RESROUT2 menghasilkan nilai perubahan efisiensi peredaman banjir dan efisiensi penggelontoran sedimen. Efisiensi peredaman terkait dengan penurunan debit puncak banjir, sedangkan efisiensi Penggelontoran terkait dengan jumlah sedimen yang berhasil dikeluarkan dari kegiatan penggelontoran (*flushing*). Pembandingan hasil penelusuran pada Skenario 1 dan 6 menunjukkan adanya kenaikan nilai debit puncak dari $3.467 \text{ m}^3/\text{s}$ menjadi $4.269 \text{ m}^3/\text{s}$ atau penurunan efisiensi peredaman banjir dari 56,66% menjadi 46,64% (Gambar 5.a). Hasil penelusuran waduk pada Skenario 5 dan 10 menunjukkan bahwa perolehan energi yang meningkat bahwa perolehan energi setahun mengalami kenaikan dari 844 GWH pada tahun 1988 menjadi 952 GWH pada tahun 2014. Hal yang sama juga dijumpai pada pembandingan hasil penelusuran antara Skenario 2 dan 7 (lihat Gambar 5.b), serta antara Skenario 3 dan 8, yang menunjukkan bahwa volume air melalui DDC-BO dan efisiensi penggelontoran yang dihitung dengan Persamaan (4) pada kondisi tahun 1988 adalah sama dengan kondisi tahun 2014. Volume aliran yang keluar melalui DDC-BO untuk dan efisiensi penggelontoran selama 5 jam adalah berturut-turut $4,354 \text{ juta m}^3$ dan $0,167$, sedangkan untuk penggelontoran 3 jam adalah berturut-turut $2,476 \text{ juta m}^3$ dan $0,221$. Di negara lain, efisiensi penggelontoran berkisar antara $0.10 \text{ s/d } 0.20$ (Wang, 2020). Secara internasional tidak ada kriteria atau batasan efisiensi. Pada umumnya secara ekonomi tidak ditinjau, karena kegiatan penggelontoran ditujukan untuk menjaga agar bangunan keluaran bawah (DDC) tetap berfungsi dan tidak ada penyumbatan, sehingga tetap dilaksanakan.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Unjuk kerja Program *RESROUT2* yang disiapkan secara khusus untuk analisisimbangan aliran air (dan sedimen yang masuk dan keluar waduk). Kepraktisan dari Program *RESROUT2* terletak pada bahasa pemrograman (*Turbo Basic*) yang digunakan, dimana masih menggunakan sistem operasi DOS. Analisis dengan beberapa skenario yang dilakukan menunjukkan bahwa sedimentasi yang terjadi sampai dengan tahun 2014 menunjukkan bahwa sedimentasi yang terjadi sedikit berpengaruh terhadap efisiensi peredaman (*dumping efficiency*) banjir. Sedangkan dari segi perolehan energi dan efisiensi penggelontoran, pengaruh sedimentasi relatif tidak signifikan. Model penelusuran belum membahas hasil observasi aktual,

karena model memerlukan observasi aktual terintegrasi antara waktu pelaksanaan penggelontoran, kondisi muka air waduk, serta jumlah air (dan sedimen) yang keluar dari waduk.

Saran

Pengurangan sedimentasi dengan cara mengeluarkan sedimen dari waduk merupakan upaya terakhir yang perlu dilakukan setelah upaya pengurangan produksi hasil erosi lahan tidak lagi efektif. Dalam kasus Waduk Mrica, upaya pengeluaran sedimen dilakukan dalam bentuk pengerukan dan penggelontoran (*flushing*). Walaupun efisiensi penggelontoran (*flushing*) umumnya sangat kecil, kegiatan penggelontoran harus tetap dilakukan untuk menjaga aliran yang menuju ke rumah tenaga tetap berfungsi secara maksimal sesuai dengan perancangan fungsi waduk pada saat dibangun. Simulasi hidraulik dalam upaya peningkatan efisiensi (dengan pengaturan waktu dan durasi penggelontoran) tetap harus dilakukan, dengan memperhatikan pola aliran masuk ke waduk serta kondisi perairan di sebelah hilir waduk. Skenario-skenario yang dikembangkan dalam model penelusuran ini belum sepenuhnya memperhatikan praktek operasional penggelontoran yang dilakukan sejauh ini, terutama dalam strategi penentuan waktu, lama, pengamatan dan pencatatan kegiatan penggelontoran. Kasus penghentian penggelontoran berbasis jumlah sedimen yang dikeluarkan (dihentikan apabila aliran sudah jernih) perlu menjadi pertimbangan dalam menentukan korelasi antara jumlah air dan jumlah sedimen yang dikeluarkan selama kegiatan *flushing*. Pencatatan simultan saat kegiatan penggelontoran sebaiknya termasuk pengamatan elevasi muka air waduk, agar dapat dipastikan, apakah kegiatan penggelontoran yang dilakukan termasuk dalam proses *drawdown flushing* atau *pressure flushing*, serta proses manakah yang dinilai lebih efisien. Untuk itu pengembangan sistem pemantauan aliran (air dan sedimen) masuk dan keluar waduk sangat penting untuk dilakukan. Adapun indikator penting untuk tolok ukur pengaruh penggelontoran terhadap kualitas lingkungan di perairan sungai di sebelah hilir bendungan adalah sifat toksik dari sedimen, misalnya kualitas (kimia) sedimen, kekeruhan (*turbidity*), *total suspended solid* (TSS), dll. Sedangkan erosi dasar sungai tidak dijadikan fokus perhatian karena umumnya yang terjadi Adalah kenaikan elevasi dasar sungai, dan tidak signifikan. Model RESROUT2 sangat bermanfaat untuk menetapkan strategi operasional waduk serta kaitannya dengan sedimentasi dan pengaruhnya terhadap pengelolaan air (dan sedimen) secara berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan PT. Jasa Tirta I atas ijin dan informasi yang diberikan kepada penulis untuk pelaksanaan penelitian ini, kepada PT Indonesia Power atas berbagai data untuk keperluan analisis penelitian ini, serta kepada kolega peneliti keairan di Laboratorium Hidrulika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada atas diskusi-diskusi dalam upaya pengelolaan waduk yang berwawasan berkelanjutan.

Daftar Referensi

- Annandale, G.W., Morris, G.L., Karki, P. (2016). Extending the Life of Reservoirs. International Bank for Reconstruction and Development. <http://dx.doi.org/10.1596/978-1-4648-0838-8>
- Cantik, B.K.P, Legono, D., Rahardjo, A.P. (2020). Efektifitas Penggelontoran Sedimen (*Flushing*) Studi Kasus Waduk PB Soedirman. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(1): 14-23. <https://doi.org/10.24002/jts.v16i1.4213>
- Chen, C.N., Tsai, C.H. (2017). Estimating Sediment Flushing Efficiency of a Shaft Spillway Pipe and Bed Evolution in a Reservoir. *Water*. 9 (924). <https://doi.org/10.3390/w9120924>
- Fruchart, F., Camenen, B. (2012). Reservoir sedimentation: different type of flushing - friendly flushing example of genissiat dam flushing. ICOLD International Symposium on Dams for a Changing World, June 2012, Kyoto, Japan. 6 p. hal-00761305.
- Lai, Y.G., Huang J.H., Greimann B.P. (2024). Hydraulic Flushing of Sediment in Reservoirs: Best Practices of Numerical Modeling. *Fluids*. 9(38). <https://doi.org/10.3390/fluids9020038>
- Laksono, M.Y. (2024). Indonesia Punya 292 Bendungan, Jokowi: Masih Sangat Kurang Sekali. Diakses 13 Agustus 2025 dari https://www.kompas.com/properti/read/2024/02/23/153000721/indonesia-punya-292-bendungan-jokowi--masih-sangat-kurang-sekali#google_vignette.
- Legono, D., Hidayat, F., Sisinggih, D., Tri Juwono, P., 2020, “Assessment on the Efficiency of Sediment Flushing due to Different Timings (a case study of Mrica Reservoir, Central Java, Indonesia)”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 437:012010, DOI: 10.1088/1755-1315/437/1/012010
- Morris, G. L., & Fan, J. (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: Mc Graw Hill.
- PT. Jasa Tirta I. (2015). *Laporan Roadmap Pengelolaan Sedimentasi Waduk Panglima Besar Soedirman, Wadaslintang, Sempor di Wilayah Sungai Serayu Bogowoto*. Lembaga Kerjasama Fakultas Teknik (LKFT), Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- PT. Indonesia Power. (2014). Laporan Pelaksanaan Penyelidikan Sedimentasi Waduk PLTA PB. Sudirman, Banjarnegara (2004-2014). Unit Pembangkit Panglima Besar Soedirman
- Shahmirzadi, E.M., Sumi, T., Dehghani, A. A., Mozaedi, A. (2015). Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages. *Water and Geoscience*.

Utomo, P. (2017). Mrica Reservoir Sedimentation: Current Situation and Future Necessary Management. *Journal of the Civil Engineering Forum*. Vol. 3 No. 2 (May 2017), p.p. 95-100, <https://doi.org/10.22146/jcef.26640>

Wang, H.W., Tsai, B.S., Hwang, C., Chen, G.W., Kuo, W.C. (2020). Efficiency of the Drawdown Flushing and Partition Desilting of a Reservoir in Taiwan. *Water*. 12 (8); <https://doi.org/10.3390/w12082166>