

OPTIMASI PENGATURAN *RELEASE* WADUK WONOGIRI BERBASIS NERACA AIR SIMULTAN PADA DUA TAMPUNGAN WADUK TERPADU

Jennifer Dharmawangsa, Rachmad Jayadi*, dan Kurniawan Putra Santoso

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

*rjayadi@ugm.ac.id

Pemasukan: 12 Desember 2022 Perbaikan: 24 Januari 2023 Diterima: 24 Januari 2023

Intisari

Laju sedimentasi yang cukup tinggi di Waduk Wonogiri menyebabkan berkurangnya kapasitas tampungan efektif waduk dan gangguan operasional di pintu *intake* sehingga mempengaruhi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, telah dibangun *closure dike* yang memisahkan tampungan waduk untuk penyimpanan sedimen (*sediment storage reservoir*) dan tampungan utama (*main reservoir*), serta pintu *spillway* baru untuk pengelontoran sedimen. Oleh karena itu diperlukan kajian ilmiah dalam rangka penyesuaian pedoman operasi waduk. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan simulasi neraca air berdasarkan aturan operasi waduk yang direkomendasikan oleh Nippon Koei Co. Ltd. (2016) dengan dua opsi *control water level* (CWL), dua opsi periode *recovery*, dan tiga skenario kebutuhan air. Optimasi terhadap pengaturan *release* air waduk menggunakan fitur Solver pada Microsoft Excel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas Waduk Wonogiri dalam memenuhi kebutuhan air untuk kondisi *inflow* aliran tahun kering, normal dan basah cukup baik, dengan capaian lebih dari 93%. Secara umum, *recovery* muka air waduk untuk opsi CWL +136,30 m lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m. Hasil kajian ini dapat digunakan untuk pemutakhiran pedoman operasi Waduk Wonogiri yang lebih optimal sesuai dengan kondisi terkini dari tampungan waduk dan tujuan pengendalian sedimentasi agar umur manfaat waduk dapat dimaksimalkan.

Kata Kunci: sedimentasi waduk, operasi waduk, neraca air simultan, *control water level*, pemenuhan kebutuhan air.

Latar Belakang

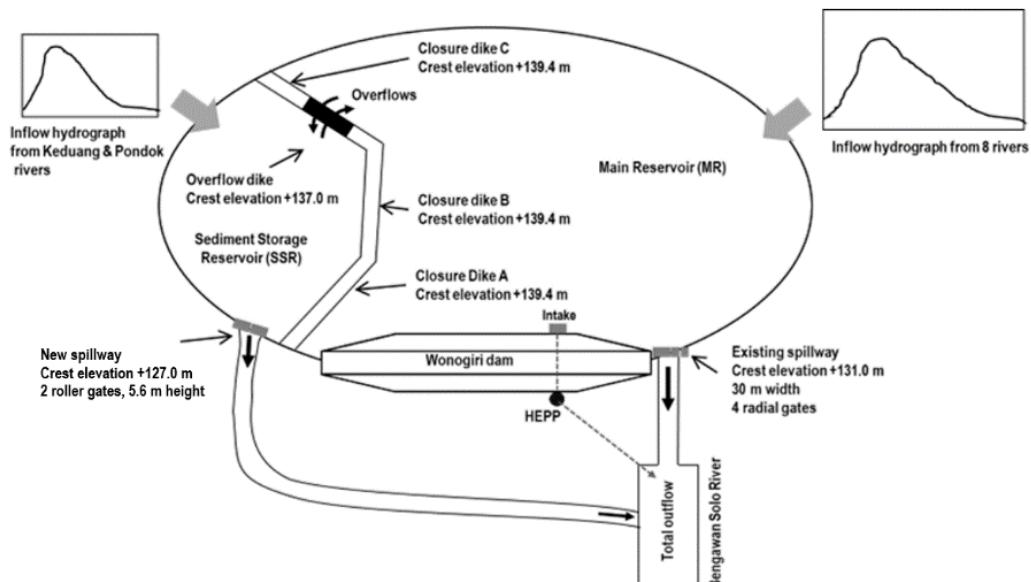
Waduk Wonogiri merupakan waduk serbaguna yang terletak di aliran utama Sungai Bengawan Solo hulu. Waduk Wonogiri mulai beroperasi secara penuh dalam memenuhi kebutuhan air irigasi di wilayah hilir serta pengendalian banjir setelah penyelesaian Proyek Irigasi Wonogiri pada tahun 1986. Aturan pengoperasian waduk dituangkan ke dalam Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 229/KPTS/1986 tentang Pedoman Eksplorasi dan Pemeliharaan Bendungan Serbaguna Wonogiri.

Waduk Wonogiri memiliki Daerah Tangkapan Air (DTA) seluas 1.343 km² yang terdiri dari sepuluh Daerah Aliran Sungai (DAS), yakni DAS Pondok, Keduang,

Kepuh, Wiroko, Temon, Solo Hulu, Alang Ngunggahan, Kedungguling, Wuryantoro, dan DAS Durensewu. Salah satu di antaranya, yakni DAS Keduang, merupakan pemasok *inflow* sedimen terbesar yang menyebabkan permasalahan sedimentasi di tumpungan Waduk Wonogiri. Aliran sedimen dari DAS Keduang disebabkan oleh perubahan tata guna lahan di hulu Sungai Keduang (Samosir dkk., 2015). Endapan sedimen menyebabkan berkurangnya kapasitas tumpungan waduk (USBR, 1987). Pengurangan kapasitas tumpungan efektif waduk mempengaruhi kinerja waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Tanpa adanya tindakan lanjut, Waduk Wonogiri diperkirakan akan kehilangan 62% dari total volume tumpungan efektifnya pada tahun 2105 (Nippon Koei Co. Ltd., 2007).

Wulandari dkk. (2014) melakukan penelitian tentang model optimasi aturan operasi untuk meminimalkan sedimen yang mengendap di tumpungan Waduk Wonogiri. Model optimasi yang digunakan adalah Colorado State University Dynamic Programming (CSUDP). Pada penelitian ini, perhitungan *reservoir routing* untuk mencapai aturan operasi waduk yang optimal belum mempertimbangkan kemungkinan terjadinya *overflow* dari MR ke SSR, karena kedua tumpungan waduk tersebut diasumsikan sebagai sistem dua tumpungan seri.

Berdasarkan rekomendasi dari hasil studi kelayakan yang dilakukan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Republik Indonesia bersama Japan International Cooperation Agency (JICA) pada tahun 2007, maka dibangun *closure dike* yang memisahkan *sediment storage reservoir* (SSR) dari *main reservoir* (MR). Dengan demikian, endapan sedimen yang berasal dari DAS Keduang dan DAS Pondok dapat dilokalisir pada SSR dan dapat digelontorkan secara terpisah melalui pintu *spillway* baru. *Inflow* dari delapan DAS yang lain akan ditampung pada MR untuk pemenuhan kebutuhan air dan PLTA. Sketsa kondisi Waduk Wonogiri terkini setelah pembangunan *closure dike* dan *spillway* baru pada SSR dapat dilihat pada Gambar 1 (Jayadi dkk., 2021).



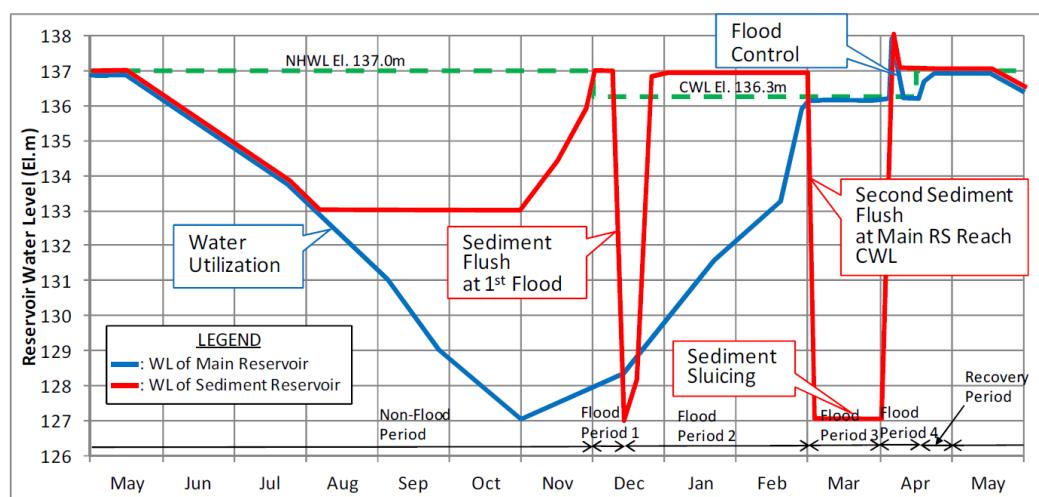
(Sumber: Jayadi dkk., 2021)

Gambar 1. Sketsa pengelolaan Waduk Wonogiri terkini

Seiring dengan perubahan pada kondisi tampungan waduk, maka perlu dilakukan pembaharuan terhadap ketentuan operasi waduk mengenai aturan *release* dari Waduk Wonogiri. Pembaharuan ketentuan operasi waduk melalui kajian ilmiah diharapkan mampu menghasilkan kinerja operasi waduk yang optimal dalam memenuhi kebutuhan air baku dan irigasi di wilayah hilir waduk.

Metodologi Studi

Pemodelan neraca air waduk simultan didasarkan kondisi tampungan Waduk Wonogiri setelah pembangunan *closure dike*. Data karakteristik tampungan diperoleh melalui survei batimetri yang dilakukan oleh Perum Jasa Tirta I (PJT I) pada tahun 2020. Pengaturan operasi kedua tampungan menggunakan aturan operasi waduk selama satu tahun yang disajikan pada Gambar 2 (Nippon Koei Co. Ltd., 2016).



(Sumber: Nippon Koei Co. Ltd., 2016)

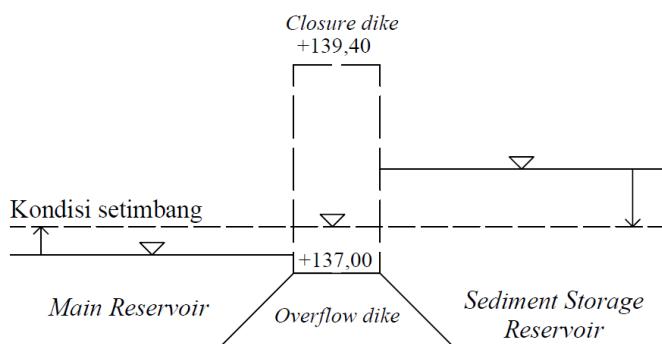
Gambar 2. Aturan operasi SSR dan MR Waduk Wonogiri selama satu tahun

Berdasarkan aturan operasi waduk di atas, satu tahun operasi waduk dibagi menjadi enam periode, meliputi periode non-banjir (1 Mei–30 November), periode banjir 1 s.d. 4 (1 Desember–15 April), dan periode *recovery* (16–30 April). Penggelontoran sedimen (*sediment flushing*) pertama pada SSR dilaksanakan pada tengah bulan Desember pertama (Des-1). Penggelontoran sedimen kedua dilaksanakan apabila elevasi muka air MR mampu mencapai CWL +136,30 m dan dilanjutkan dengan *sluicing* hingga akhir bulan Maret. Selanjutnya, PJT I bekerja sama dengan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada mengkaji dampak perubahan CWL di Waduk Wonogiri pada tahun 2020. Kajian ini meliputi simulasi neraca air serta penelusuran banjir pada dua opsi CWL, yakni +135,80 m dan +136,30 m, dengan dua variasi periode *recovery* (16–30 April dan 1–30 April). Penelitian ini selanjutnya dikembangkan berdasarkan rekomendasi dari kedua kajian tersebut.

Dalam proses pemodelan neraca air simultan pada kedua tampungan, yaitu SSR dan MR, perlu dilakukan analisis terhadap ketersediaan air dan kebutuhan air. Ketersediaan air Waduk Wonogiri dipengaruhi oleh besaran hujan yang jatuh di

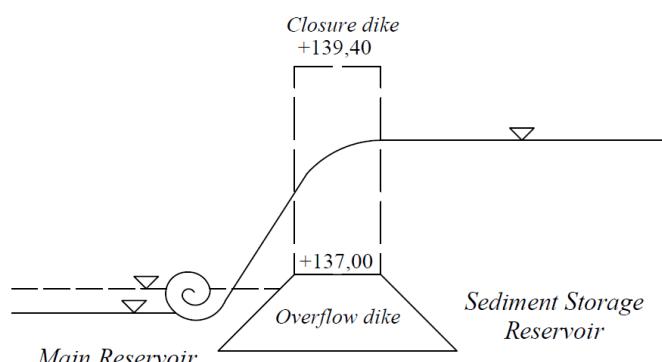
permukaan waduk, laju evaporasi, serta *inflow* dari sepuluh sub-DAS di DTA Waduk Wonogiri. Data hujan, laju evaporasi, dan debit *inflow* tengah bulanan untuk kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering diperoleh dari PJT I (2020). Kebutuhan air waduk merupakan jumlah air yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan air baku dan irigasi. Data kebutuhan air Waduk Wonogiri diperoleh dari olahan data debit *release* aktual waduk dari tahun 2000 hingga tahun 2020. Peningkatan kebutuhan air baku diadaptasi dengan tiga skenario kebutuhan air, dengan peningkatan pada skenario 2 dan 3 berturut-turut sebesar $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$ dan $1,45 \text{ m}^3/\text{s}$. Besaran peningkatan kebutuhan air tersebut diperoleh dari hasil analisis data operasional waduk selama lima tahun terakhir (PJT I, 2020).

Pembangunan *closure dike* menyebabkan tampungan Waduk Wonogiri terbagi menjadi dua. Struktur lain yang dibangun meliputi *overflow dike*, *connecting gated conduit*, dan *spillway* baru. Keberadaan *overflow dike* memungkinkan perpindahan air antara SSR dan MR. Apabila terjadi *inflow* yang menyebabkan jumlah volume air kedua tampungan melebihi volume tampungan gabungan MR dan SSR pada elevasi +137,00 m, maka kondisi muka air pada kedua tampungan akan mencapai kesetimbangan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi kondisi muka air setimbang pada kedua tampungan

Di sisi lain, apabila jumlah volume air kedua tampungan tidak melebihi volume tampungan gabungan pada elevasi +137,00 m, namun elevasi muka air salah satu tampungan melebihi elevasi puncak *overflow dike*, maka terjadi aliran limpasan satu arah dari SSR menuju MR atau sebaliknya seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi kondisi aliran limpasan dari SSR menuju MR

Pintu *connecting gated conduit* yang dibuka selama periode non-banjir memungkinkan aliran dari SSR menuju MR. Volume air yang mengalir dari SSR merupakan volume tampungan SSR dari elevasi dasar saluran penghubung (+133,00 m) hingga elevasi puncak *overflow dike*. Pada kondisi muka air setimbang, tidak ada aliran air dari SSR menuju MR. Debit aliran maksimum yang mengalir melalui *connecting gated conduit* dihitung menggunakan rumus debit aliran pada *outlet* persegi panjang yang terendam (*submerged rectangular orifice*) sebagai berikut (USBR, 1997).

$$Q_{CC_{max}} = C_d A \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

dengan keterangan:

- $Q_{CC_{max}}$: debit aliran maksimum (m^3/s),
- C_d : koefisien debit,
- A : luas penampang saluran (m^2),
- g : percepatan gravitasi bumi (m/s^2),
- Δh : selisih elevasi muka air antara SSR dan MR (m).

Pendekatan terhadap perubahan tampungan air pada SSR dan MR didasarkan pada perubahan volumetrik tampungan. Dengan demikian, sesuai dengan kondisi tampungan saat ini, neraca air pada tampungan MR dapat dinyatakan dengan Persamaan (2).

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = Q_{in} + \frac{(P-E)10^3 A}{\Delta t} \pm Q_{overflow} + Q_{CC} - Q_{out} \quad (2)$$

dengan keterangan:

- ΔS : perubahan volume tampungan air waduk pada interval waktu Δt (m^3),
- Δt : interval waktu hitungan (s),
- Q_{in} : debit *inflow* dari sub-DAS (m^3/s),
- P : hujan yang jatuh di atas genangan tampungan (mm),
- E : evaporasi pada permukaan genangan tampungan (mm),
- A : luas genangan tampungan (km^2),
- $Q_{overflow}$: debit limpasan melalui *overflow dike* (m^3/s),
- Q_{CC} : debit aliran melalui *connecting gated conduit* (m^3/s),
- Q_{out} : debit *outflow* dari tampungan (m^3/s).

Jumlah *release* dari Waduk Wonogiri meliputi air yang dilepaskan dari MR untuk pemenuhan kebutuhan air (*actual release/AR*), dari SSR untuk tujuan pengelontoran sedimen serta kelebihan air yang dilepaskan melalui pengaturan pintu *spillway* lama dan *spillway* baru. Aturan operasi untuk *release* waduk ini mengikuti ketentuan seperti pada Gambar 2.

Optimasi yang dilakukan terhadap pengaturan *release* air waduk merupakan pemutakhiran hasil studi terdahulu oleh PJT I (2020) dan Haryanto (2021). Persentase layanan waduk merupakan representasi kemampuan waduk dalam memenuhi kebutuhan air. Dalam upaya memperoleh persentase layanan waduk yang paling optimal, maka dilakukan optimasi terhadap jumlah air yang dilepaskan melalui *intake* MR (AR) menggunakan fitur *add-in* Solver pada Microsoft Excel.

Rumusan model optimasi pengaturan *release* dari MR ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rumusan optimasi release Waduk Wonogiri

Parameter	Keterangan
Objective function	$\text{Max} \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{V_{out}(t)}{TR(t)} \right] = \text{Max} \left[\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{AR(t) + SP_{MR}(t) + R_{out_{SSR}}(t)}{TR(t)} \right]$
Variables	AR(t)
Constraints	$AR(t) \leq PR(t)$ $AR(t) \leq TR(t)$ $AR(t) \geq 0,7TR(t)$ $El_{MR}(t) \geq El_{MOL}$ $El_{MR}(24) \approx El_{NHWL}$

dengan keterangan:

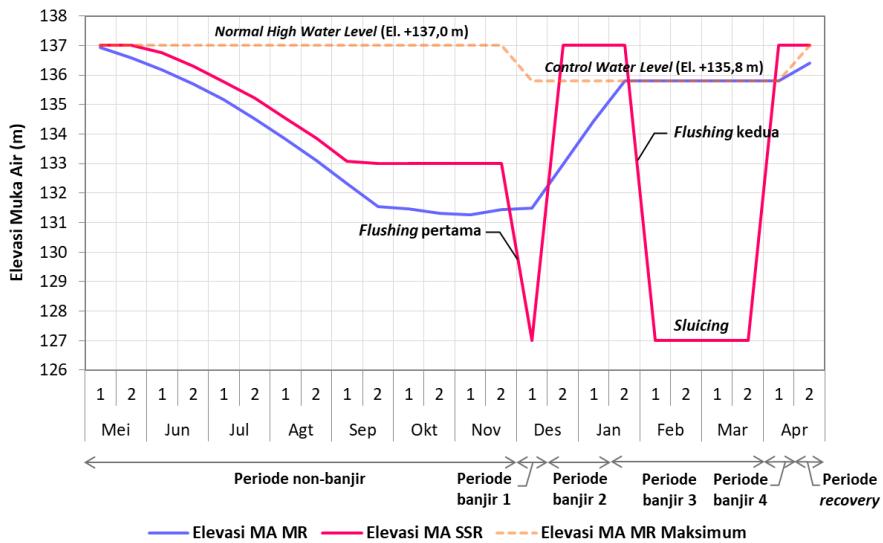
- AR(t) : debit *release* melalui *intake* di MR pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- SP_{MR}(t) : debit *release* melalui *spillway* lama pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- $R_{out_{SSR}}(t)$: debit *release* melalui *spillway* baru pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- PR(t) : potensi *release* dari MR pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- TR(t) : target *release* untuk pemenuhan kebutuhan air pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- 0,7TR(t) : target *release* minimum untuk pemenuhan kebutuhan air pada periode tengah bulan ke-t (m^3/s),
- El_{MR}(t) : elevasi muka air MR pada periode tengah bulan ke-t (m),
- El_{MOL} : elevasi muka air batas operasi minimum pada MR (m),
- El_{NHWL} : elevasi muka air pada batas operasi NHWL (m).

Metode penyelesaian GRG *Nonlinear* digunakan untuk menyelesaikan masalah non-linier yang halus (*smooth nonlinear*). Metode tersebut didasarkan pada metode Karush-Kuhn-Tucker (KKT), yakni pengujian terhadap turunan pertama dari fungsi tujuan. Apabila fungsi tujuan atau *constraints* berupa non-konveks, seringkali hasil optimasi yang dihasilkan masih berupa solusi optimum lokal. Dengan demikian, metode optimasi GRG *Nonlinear* menggunakan *multistart* digunakan untuk memperoleh solusi optimum global melalui proses iterasi terhadap sejumlah nilai awal yang menghasilkan himpunan solusi optimum lokal. Solusi terbaik dari himpunan tersebut kemudian dipilih sebagai solusi optimum global (Frontline Systems Inc., 2022).

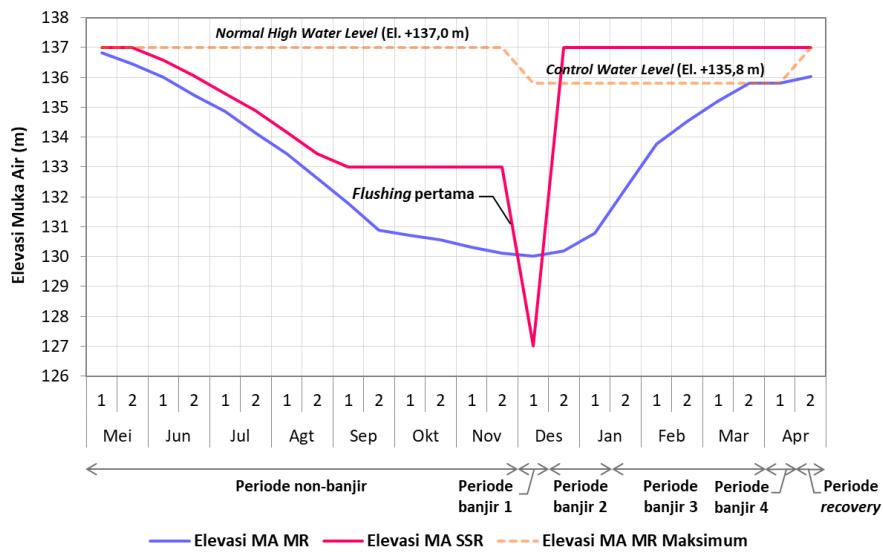
Hasil Studi dan Pembahasan

Pelaksanaan simulasi neraca air simultan dan optimasi pengaturan *release* waduk dilakukan dengan dua opsi CWL dan tiga skenario kebutuhan air pada kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan fluktuasi elevasi muka air SSR dan MR untuk *inflow* tahun normal dan tahun kering

pada opsi CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 16–30 April untuk kebutuhan air skenario 1.



Gambar 5. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun normal dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +135,80 m



Gambar 6. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun kering dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +135,80 m

Berdasarkan hasil simulasi dan optimasi pengaturan *release* waduk, *sediment flushing* dapat dilakukan dua kali pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal. Pada kondisi *inflow* tahun kering, *sediment flushing* hanya dapat dilakukan sekali pada tengah bulan Desember pertama akibat elevasi muka air MR tidak mampu mencapai CWL selama periode banjir kedua. Tabel 2 dan Tabel 3 menyajikan perbandingan hasil penelitian ini dengan dengan penelitian terdahulu oleh PJT I (2020).

Tabel 2. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 16–30 April

Target Release	Periode	Percentase Layanan (%)			El. Muka Air MR Akhir (m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	ΔNHWL	Optimasi	ΔNHWL
Skenario 1	Basah	97,50	98,86	1,36	136,72	-0,28	136,70	-0,30
	Normal	97,50	98,75	1,25	136,40	-0,60	136,40	-0,60
	Kering	91,33	98,75	7,42	136,00	-1,00	136,03	-0,97
Skenario 2	Basah	97,50	98,82	1,32	136,71	-0,29	136,70	-0,31
	Normal	97,50	98,76	1,26	136,38	-0,62	136,38	-0,62
	Kering	95,26	97,24	1,98	136,00	-1,00	136,02	-0,98
Skenario 3	Basah	97,50	98,82	1,32	136,70	-0,30	136,69	-0,31
	Normal	97,50	98,77	1,27	136,37	-0,63	136,37	-0,63
	Kering	93,37	95,61	2,24	136,00	-1,00	136,00	-1,00

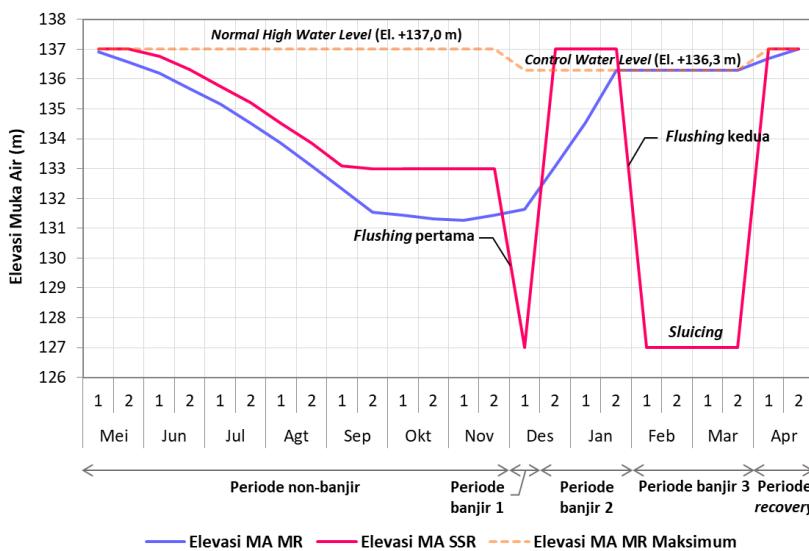
Optimasi terhadap pengaturan *release* waduk dengan periode *recovery* 16 April–30 April menunjukkan peningkatan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air sebesar 1,25–7,42%. Selanjutnya, optimasi terhadap pengaturan *release* waduk dengan periode *recovery* 1 April–30 April memberikan peningkatan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air sebesar 0,12–2,50%.

Tabel 3. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +135,80 m dengan periode *recovery* 1–30 April

Target Release	Periode	Percentase Layanan (%)			El. Muka Air MR Akhir (m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	ΔNHWL	Optimasi	ΔNHWL
Skenario 1	Basah	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,73	0,23	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	97,50	97,62	0,12	136,21	-0,79	136,32	-0,68
Skenario 2	Basah	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,64	0,14	137,00	0,00	136,99	-0,01
	Kering	95,52	95,91	0,40	136,25	-0,75	136,30	-0,70
Skenario 3	Basah	97,50	99,93	2,43	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	97,66	0,16	137,00	0,00	136,97	-0,03
	Kering	93,62	94,15	0,54	136,25	-0,75	136,29	-0,71

Berdasarkan hasil seperti pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa kajian yang dilakukan oleh PJT I (2020) memberikan hasil yang lebih baik dari segi *recovery* muka air waduk, dengan capaian *full recovery* pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal. Di sisi lain, optimasi pada penelitian ini memberikan perbaikan terhadap *recovery* muka air tampungan MR pada kondisi *inflow* tahun kering, dengan peningkatan elevasi muka air sebesar 0,04–0,11 m. Berdasarkan kedua hasil simulasi dan optimasi di atas, dapat dilihat bahwa *recovery* muka air waduk pada simulasi neraca air dengan periode *recovery* 1–30 April menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan dengan simulasi dengan periode *recovery* 16–30 April, yakni sebesar 0,28–0,61 m. Contoh grafik fluktuasi elevasi muka air tampungan waduk untuk kondisi *inflow* tahun normal dengan CWL +136,30 m untuk

kebutuhan air skenario 1 dengan periode *recovery* 1–30 April dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Fluktuasi elevasi muka air tampungan untuk *inflow* tahun normal dengan kebutuhan air skenario 1 pada CWL +136,30 m

Sama halnya dengan hasil simulasi dan optimasi pada opsi CWL +135,80 m, *sediment flushing* hanya dapat dilakukan sebanyak satu kali pada kondisi *inflow* tahun kering. Rekapitulasi perbandingan hasil optimasi pemenuhan kebutuhan air pada studi ini terhadap kajian terdahulu oleh PJT I (2020) untuk semua kondisi *inflow* disajikan pada Tabel 4.

Tabel 5 menunjukkan peningkatan terhadap persentase layanan waduk pada kondisi *inflow* tahun normal dan kering. Selain itu, terjadi peningkatan yang cukup signifikan terhadap *recovery* muka air waduk pada kondisi *inflow* tahun kering, dengan kisaran peningkatan sebesar 0,14–0,32 m.

Tabel 4. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +136,30 m dengan periode *recovery* 16–30 April

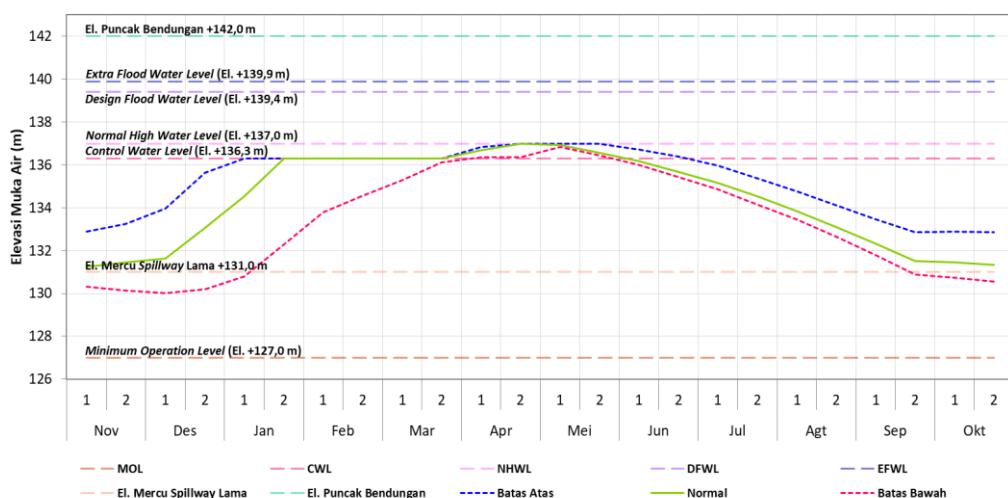
Target Release	Periode	Percentase Layanan (%)			El. Muka Air MR Akhir (m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)		Optimasi	
					Δ _{NHWL}	Optimasi	Δ _{NHWL}	Optimasi
Skenario 1	Basah	99,85	99,83	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,85	1,35	136,87	-0,13	136,85	-0,15
	Kering	97,50	97,62	0,12	136,21	-0,79	136,35	-0,65
Skenario 2	Basah	99,77	99,75	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,85	1,35	136,86	-0,14	136,84	-0,16
	Kering	95,30	95,76	0,46	136,00	-1,00	136,35	-0,65
Skenario 3	Basah	99,69	99,67	-0,02	137,00	0,00	137,00	0,00
	Normal	97,50	98,84	1,34	136,85	-0,15	136,83	-0,17
	Kering	93,37	93,99	0,62	136,00	-1,00	136,32	-0,68

Tabel 5. Perbandingan hasil optimasi dengan hasil kajian oleh PJT I untuk CWL +136,30 m dengan periode *recovery* 1–30 April

Target Release	Periode	Percentase Layanan (%)			El. Muka Air MR Akhir (m)			
		PJT I (2020)	Optimasi	%Δ	PJT I (2020)	ΔNHWL	Optimasi	ΔNHWL
		Basah	99,85	100	0,15	137,00	0,00	137,00
Skenario 1	Normal	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	97,50	97,61	0,11	136,21	-0,79	136,36	-0,64
	Basah	99,77	100	0,23	137,00	0,00	137,00	0,00
Skenario 2	Normal	97,50	100	2,50	137,00	0,00	137,00	0,03
	Kering	84,48	95,76	11,28	136,46	-0,54	136,35	-0,65
	Basah	99,69	100	0,31	137,00	0,00	137,00	0,00
Skenario 3	Normal	97,50	99,95	2,45	137,00	0,00	137,00	0,00
	Kering	92,80	93,86	1,06	136,40	-0,60	136,35	-0,65

Hasil penelitian ini memberikan peningkatan yang cukup signifikan terhadap persentase layanan pemenuhan kebutuhan air terhadap semua skenario kebutuhan air, dengan kisaran sebesar 0,15–11,28%. Pada kondisi *inflow* tahun basah, Waduk Wonogiri mampu melayani 100% dari kebutuhan air untuk semua skenario kebutuhan air. Capaian *recovery* muka air waduk hasil kajian PJT I (2020) memberikan hasil yang lebih baik untuk kebutuhan air skenario 2 dan 3 pada kondisi *inflow* tahun kering. Hasil penelitian ini memberikan peningkatan *recovery* muka air waduk sebesar 0,15 m untuk kebutuhan air skenario 1 pada kondisi *inflow* tahun kering. Perpanjangan periode *recovery* menghasilkan peningkatan capaian *recovery* muka air waduk, dengan elevasi muka air MR yang mampu mencapai *full recovery* untuk kondisi *inflow* tahun basah dan normal.

Selanjutnya dapat disusun Pola Operasi Waduk (POW) untuk tiga skenario kebutuhan air dengan periode *recovery* muka air waduk 1–30 April. Gambar 8 menampilkan contoh *rule curve* MR untuk kebutuhan air skenario 1 dengan CWL +136,30 m.



Gambar 8. *Rule curve* MR selama satu tahun untuk skenario kebutuhan air 1 dengan CWL +136,30 m

Rule curve sebagai bagian dari POW menyajikan kurva batas operasi elevasi muka air waduk atas, normal, dan bawah yang masing-masing diperoleh dari hasil simulasi dan optimasi pada kondisi *inflow* tahun basah, normal, dan kering. Peninjauan POW dilakukan setiap lima tahun sekali atau menyesuaikan dengan perubahan fungsi atau perkembangan kondisi tampungan waduk (Kementerian PUPR, 2017).

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Hasil simulasi neraca air simultan dan pemutakhiran algoritma optimasi pengaturan *release* Waduk Wonogiri memberikan peningkatan terhadap hasil kajian terdahulu yang dilakukan oleh PJT I (2020). Persentase layanan pemenuhan kebutuhan air pada semua skenario kebutuhan air pada opsi CWL +135,80 m dan 136,30 m mengalami peningkatan sebesar 0,11–11,28%, dengan kisaran capaian pemenuhan kebutuhan air sebesar 93,86–100%. Peningkatan terhadap *recovery* muka air waduk berkisar antara 0,04 m hingga 0,32 m. Pada opsi CWL +136,30 m, tampungan MR dapat mencapai *full recovery* pada kondisi *inflow* tahun basah dan normal, sedangkan pada opsi CWL +135,80 m capaian tersebut hanya dapat diperoleh pada kondisi *inflow* tahun basah. Selain itu, perpanjangan periode *recovery* dari 16–30 April menjadi 1–30 April memberikan peningkatan terhadap capaian *recovery* muka air waduk.

Saran

Penelitian yang dilakukan belum mencakup pengaruh perubahan batas CWL terhadap fungsi waduk sebagai pengendali banjir, yang dihitung dengan simulasi *reservoir routing* secara hidraulik dengan interval waktu yang pendek setidaknya jam-jaman. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian lebih lanjut menggunakan model penelusuran banjir di waduk secara hidraulika untuk keperluan pemutakhiran aturan operasi Waduk Wonogiri pada periode banjir.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM dan Perum Jasa Tirta I atas seluruh dukungan dan bantuan yang diberikan, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan lancar sesuai dengan target capaian yang ditetapkan.

Daftar Referensi

- Frontline Systems Inc., 2022. *Frontline Solvers*. <https://www.solver.com/> [diakses pada tanggal 28 Juli 2022]
- Haryanto, Y. A., Jayadi, R., Istiarto, 2022. Pengembangan Model Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Serbaguna Wonogiri Paska Pembangunan Closure Dike. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, Vol II(1): 1-12. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v2i1.25> [diakses pada tanggal 7 Oktober 2022]

- Jayadi, R., Istiarto, Pratiwi, E. P. A., dan Windianita, K., 2021. *Development of A Two-storage Reservoir Operation Rules for Flood Control, Case Study of Wonogiri Multipurpose Reservoir, Central Java, Indonesia*, disajikan pada *The 9th AUN/SEED-Net Regional Conference on Natural Disaster*, 15-16 Desember 2021, Johor Bahru, Malaysia. <https://doi.org/10.26226/m.61a82ed54a84e7b4701d8bb6>
- Kementerian PUPR, 2017. *Modul Operasi Waduk*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, Bandung.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2007. *Studi Penanganan Sedimentasi Waduk Serbaguna Wonogiri Republik Indonesia*, Japan International Cooperation Agency, Tokyo.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2016. *Study Report on Operation and Maintenance of Wonogiri Multipurpose Dam and Related Structure*, Ministry of Public Works and Housing, The Republic of Indonesia, Jakarta.
- PJT I, 2020. *Kajian Perubahan Control Water Level (CWL) Bendungan Wonogiri*, Perum Jasa Tirta I, Surakarta.
- Pradipta, A. G., 2014. *Studi Pengaruh Pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri terhadap Pola Operasi Waduk Periode Banjir*, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Samosir, C. S., Soetopo, W., Yuliani, E., 2015. Optimasi Pola Operasi Waduk Untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri). *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, Vol VI: 108-115.
- USBR, 1987. *Design of Small Dams*, Water Resources Technical Publication, Washington.
- USBR, 1997. *Water Measurement Manual. 3rd Edition*. <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/> [diakses pada tanggal 10 September 2022].
- Wulandari, D. A., Legono, D., Suseno, D., 2014. *Reservoir Operation to Minimize Sedimentation*. *International Journal of Science and Engineering*, Vol V(2): 61-65. <https://doi.org/10.12777/ijse.6.1.16-23> [diakses pada tanggal 8 Oktober 2022]