

## PENGEMBANGAN MODEL OPTIMASI PEMANFAATAN AIR WADUK SERBAGUNA WONOGIRI PASKA PEMBANGUNAN *CLOSURE DIKE*

Yotam Adiel Haryanto<sup>1\*</sup>, Rachmad Jayadi<sup>2</sup>, dan Istiarto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada

<sup>2</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada

\*yotamharyanto@gmail.com

Pemasukan: 7 Juni 2021    Perbaikan: 25 Juni 2021    Diterima: 29 Juni 2021

### Intisari

Untuk mengatasi persoalan sedimentasi Waduk Serbaguna Wonogiri telah dibangun *closure dike* yang menyebabkan terbentuknya dua buah tampungan, yaitu *Main Reservoir* (MR) dan *Sediment Storage Reservoir* (SSR). Oleh karena itu potensi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri perlu dikaji ulang dengan mempertimbangkan kondisi terkini tampungan waduk. Penerapan usulan pedoman operasi waduk baru yang telah disiapkan dapat digunakan untuk evaluasi kinerja pemanfaatan air menggunakan pendekatan model optimasi. Pada makalah ini disampaikan hasil pengembangan awal model optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri berbasis simulasi neraca air dalam bentuk perangkat lunak menggunakan pemrograman Microsoft Visual Studio 2019. Pengaturan *release* waduk didasarkan pada pedoman operasi waduk sesuai rekomendasi Nippon Koei Co. Ltd. tahun 2016 menggunakan algoritma optimasi metode *Brute Force*. *Output* dari perangkat lunak selanjutnya dianalisis untuk evaluasi kinerja operasi waduk. Simulasi neraca air waduk dilakukan dengan variasi nilai *Control Water Level* (CWL), kondisi aliran *inflow*, yaitu tahun basah, normal dan kering, serta skenario *target release*. Hitungan model optimasi pengaturan *release* waduk menggunakan perangkat lunak yang dibuat dapat dilakukan secara cepat dengan hasil yang akurat. Hasil analisis menunjukkan bahwa *recovery* muka air MR berhasil tercapai jika digunakan CWL +136,30 m dan hanya pada kondisi *inflow* tahun basah. Tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada ketiga kondisi *inflow* tersebut berturut-turut sebesar 99,75%; 98,75%; 97,08% untuk CWL +135,80 m dan sebesar 99,83%; 98,75%; 94,58% untuk CWL 136,30 m.

Kata Kunci: Simulasi neraca air, optimasi, operasi waduk, *Control Water Level*

### Latar Belakang

Waduk Serbaguna Wonogiri berada di Wilayah Sungai Bengawan Solo. Waduk yang cukup besar ini difungsikan untuk pengendalian banjir, penyediaan air irigasi dan air baku, serta pembangkit tenaga listrik. Operasi Waduk Serbaguna Wonogiri didasarkan pada Keputusan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 229/KPTS/1986 tentang Pedoman Eksploitasi dan Pemeliharaan Bendungan Serbaguna Wonogiri yang kemudian direvisi Proyek Induk Pengembangan Wilayah Sungai Bengawan Solo pada Juli 1994 dengan CWL pada +135,30 m.

Sumber air Waduk Wonogiri berasal dari aliran Sungai Bengawan Solo bagian hulu yang membentuk sistem Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan luas total sebesar 1.343 km<sup>2</sup> yang terdiri dari 10 DAS, antara lain DAS Pondok, DAS Keduang, DAS Kepuh, DAS Wiroko, DAS Temon, DAS Solo Hulu, DAS Alang Ngungghahan, DAS Kedungguling, DAS Wuryantoro, dan DAS Durensewu. Peta sistem DAS di daerah tangkapan air Waduk Wonogiri dapat dilihat pada Gambar 1.

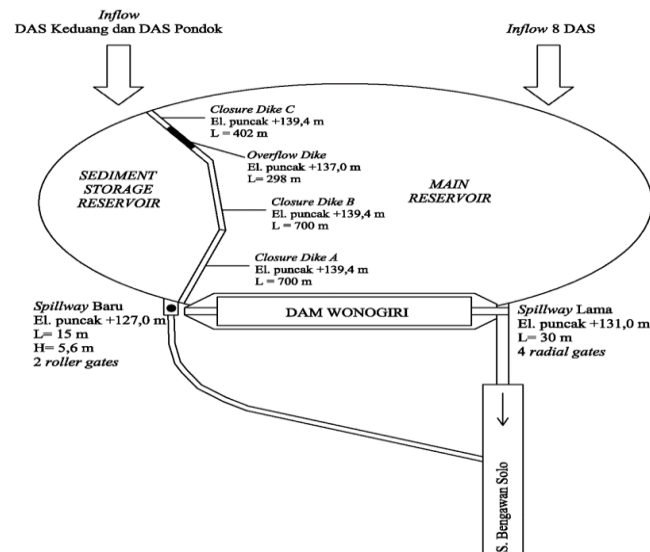


Gambar 1. Peta daerah tangkapan air Waduk Wonogiri (Pradipta, 2014)

Permasalahan sedimentasi yang cukup serius pada Waduk Wonogiri mengakibatkan berkurangnya volume tampungan efektif dan terganggunya *intake* waduk. Pada 2016, Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo bersama *Japan International Cooperation Agency* (JICA) melakukan kajian dan menghasilkan *Detailed Design of Structural Countermeasures for Sedimentation on Wonogiri Reservoir* yang mengusulkan pembangunan *closure dike* di dalam area Waduk Wonogiri untuk mengatasi permasalahan sedimentasi.

*Closure dike* merupakan tanggul penyekat yang berfungsi untuk melokalisir *inflow* waduk dari DAS Pondok dan DAS Keduang yang memberikan kontribusi angkutan sedimen terbesar pada waduk. Pembangunan *closure dike* ini menyebabkan terbentuknya dua buah tampungan, yaitu *Main Reservoir* (MR) untuk layanan kebutuhan air dan *Sediment Storage Reservoir* (SSR) untuk pengendalian sedimen.

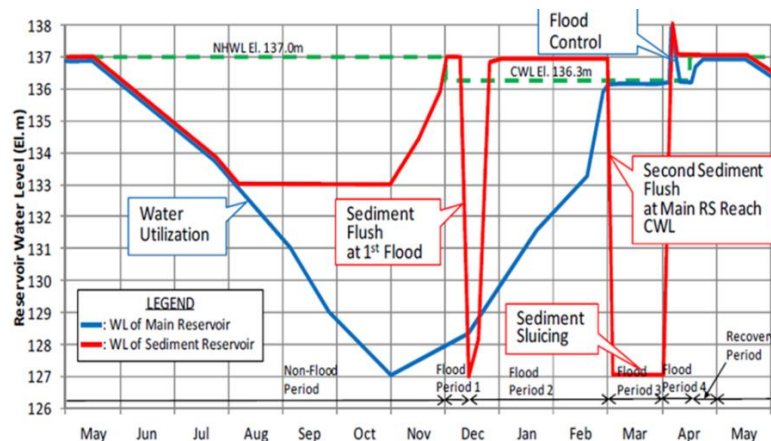
Pembangunan *closure dike* dilengkapi dengan bangunan pendukung lainnya seperti *overflow dike* untuk mengalirkan air yang meluap baik dari SSR maupun dari MR saat elevasi muka air melebihi elevasi puncak *overflow dike*, *connecting gated conduit* untuk mengalirkan air dari SSR pada saat elevasi muka air MR rendah, serta pintu pelimpah baru untuk mengatur pelepasan air dalam pengendalian banjir dan penggelontoran sedimen. Gambar 2 menyajikan sketsa kondisi Waduk Wonogiri terkini pasca pembangunan *closure dike*.



Gambar 2. Skema tampungan air Waduk Wonogiri kondisi terbaru (Pradipta, 2014)

Dengan terbentuknya dua buah tampungan dalam Waduk Wonogiri, maka perlu dilakukan kajian ilmiah untuk penyesuaian cara *release* air waduk sesuai dengan perkembangan kebutuhan air dan karakteristik tampungan terkini. Oleh karena itu diperlukan pemutakhiran pemodelan operasi waduk berbasis neraca air dengan mempertimbangkan adanya penambahan struktur baru dalam Waduk Wonogiri tersebut sehingga dapat merepresentasikan keadaan waduk yang sebenarnya dan dapat digunakan untuk mengoptimalkan fungsi Waduk Wonogiri.

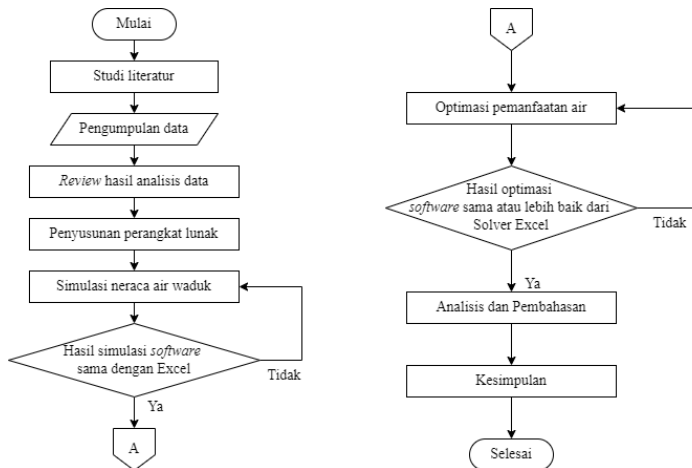
Pedoman operasi Waduk Serbaguna Wonogiri untuk pemenuhan kebutuhan air, pengendalian banjir, dan pengendalian sedimentasi pada kondisi terkini didasarkan atas kajian Nippon Koei Co. Ltd. (2016) selama periode satu tahun ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Usulan aturan operasi tahunan Waduk Wonogiri (Nippon Koei Co. Ltd., 2016)

## Metodologi Studi

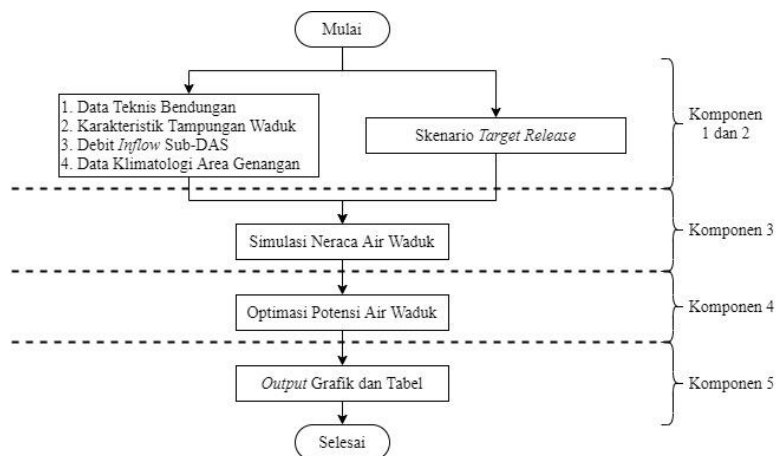
Prosedur penelitian dalam pengembangan model simulasi neraca air Waduk Serbaguna Wonogiri yang berbasis perangkat lunak secara umum dilaksanakan sesuai dengan tahapan seperti yang ditunjukkan oleh bagan alir pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan alir penelitian

## Penyusunan Struktur Perangkat Lunak

Struktur perangkat lunak yang dikembangkan terdiri dari berbagai komponen yang disusun melalui beberapa komponen yaitu: (1) *database*, (2) *input*, (3) simulasi, (4) optimasi, dan (5) *output*. Bagan alir pengoperasian perangkat lunak yang memuat komponen-komponen struktur perangkat lunak dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema komponen perangkat lunak

## Simulasi Neraca Air Waduk

Pemodelan simulasi neraca air waduk mengacu pada pedoman operasional tahunan Waduk Wonogiri yang direkomendasikan oleh Nippon Koei Co. Ltd. (2016).

### 1. Tampung awal

Kondisi awal elevasi muka air MR ( $El_{MR0}$ ) dan SSR ( $El_{SSR0}$ ) ditetapkan kemudian diubah menjadi volume tampungan awal MR ( $V_{MR0}$ ) dan SSR ( $V_{SSR0}$ ) menggunakan

karakteristik tampungan. Aliran *inflow* dari tiap DAS ditambah hujan dan dikurangi evaporasi yang terjadi di area genangan merupakan nilai *net-inflow* tampungan waduk ( $Q_{net-inflow}$ ). Setelah volume tampungan awal ditambah dengan *net-inflow* maka volume tampungan menjadi  $V_{MR1}$  dan  $V_{SSR1}$ .

$$V_{MR1} = V_{MR0} + Q_{net-inflow MR} \quad (1)$$

$$V_{SSR1} = V_{SSR0} + Q_{net-inflow SSR} \quad (2)$$

Tampungan  $V_{MR1}$  dan  $V_{SSR1}$  diterjemahkan kembali menjadi  $El_{MR1}$  dan  $El_{SSR1}$  menggunakan karakteristik tampungan. Nilai  $El_{MR1}$  dan  $El_{SSR1}$  dibatasi pada elevasi SHF setinggi +138,60 m mengikuti pedoman OP Waduk Wonogiri.

## 2. Aliran melalui *overflow dike*

Aliran pada *overflow dike* dapat terjadi apabila elevasi muka air tampungan melebihi elevasi *overflow dike* ( $El_{OD}$ ) setinggi +137,00 m. Aliran melalui *overflow dike* mengakibatkan berpindahnya volume sebesar  $V_{OF}$  dari tampungan yang lebih tinggi ke tampungan yang lebih rendah sedemikian sehingga pada tampungan yang lebih tinggi menjadi setinggi  $El_{OD}$ .

a. Jika  $El_{SSR1} < El_{OD}$  dan  $El_{MR1} < El_{OD}$ , maka tidak terjadi aliran *overflow*,  
 $V_{OF} = 0$  (3a)

b. Jika  $El_{MR1} > El_{OD}$  dan  $El_{MR1} > El_{SSR1}$ , maka terjadi aliran dari MR ke SSR,  
 $V_{OF} = -(V_{MR1} - V_{MR0D})$  (3b)

c. Jika  $El_{SSR1} > El_{OD}$  dan  $El_{SSR1} > El_{MR1}$ , maka terjadi aliran dari SSR ke MR,  
 $V_{OF} = V_{SSR1} - V_{SSR0D}$  (3c)

Adanya aliran yang melalui *overflow dike* dari MR ke SSR atau sebaliknya mengakibatkan bertambahnya volume di salah satu tampungan dan berkurangnya volume di tampungan lainnya. Kondisi tampungan setelah terjadinya *overflow* dapat dirumuskan sebagai berikut ini.

$$V_{MR2} = V_{MR1} + V_{OF} \quad (4)$$

$$V_{SSR2} = V_{SSR1} - V_{OF} \quad (5)$$

Tampungan  $V_{MR2}$  dan  $V_{SSR2}$  diterjemahkan kembali menjadi  $El_{MR2}$  dan  $El_{SSR2}$ , menggunakan karakteristik tampungan dengan dibatasi pada elevasi SHF setinggi +138,60 m mengikuti pedoman OP Waduk Wonogiri.

## 3. Aliran melalui *connecting gated conduit*

Aliran melalui *connecting gated conduit* diatur menggunakan pintu air dengan syarat aliran hanya terjadi dari SSR ke MR dan pada periode non-banjir (Mei-I hingga November-II). Syarat terjadinya aliran pada *connecting channel* jika  $El_{SSR2} > El_{CC}$  dan  $El_{SSR2} > El_{MR2}$ . Volume aliran melalui *connecting channel* dihitung sebagai volume air pada SSR di antara  $El_{CC}$  dan  $El_{MR2}$ .

$$V_{CF} = \begin{cases} V_{SSR2} - V_{SSR}^* & ; V_{SSR}^* > V_{SSR}^{**} \\ V_{SSR2} - V_{SSR}^{**} & ; V_{SSR}^* < V_{SSR}^{**} \end{cases} \quad (6)$$

dengan:

$V_{SSR}^*$  = volume SSR dengan elevasi muka air setinggi  $El_{MR2} = g(El_{MR2})$ ; dan

$V_{SSR}^{**}$  = volume SSR dengan elevasi muka air setinggi  $El_{CC} = g(El_{CC})$ .

Nilai  $V_{CF}$  harus dicek terlebih dahulu terhadap kapasitas maksimum *connecting channel* yang dapat dihitung dengan persamaan *submerged-orifice*.

$$K_{CC} = Q_{max} \times \Delta t = (C_d A \sqrt{2gH}) \times \Delta t \quad (7)$$

dengan:

$C_d$  = koefisien debit *orifice* = 0,6;

$A$  = luas tampang basah saluran = 4 m<sup>2</sup>;

$g$  = percepatan gravitasi = 9,81 m/s<sup>2</sup>;

$H$  = selisih muka air  $El_{SSR2}$  dan  $El_{MR2}$  (m); dan

$\Delta t$  = interval waktu hitungan (s).

Apabila volume aliran lebih besar dari kapasitas maksimum saluran maka volume yang melalui *connecting channel* digunakan sebesar kapasitas maksimum saluran. Volume tampungan pada MR dan SSR setelah adanya aliran melalui *connecting channel* dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_{MR3} = V_{MR2} + V_{CF} \quad (9)$$

$$V_{SSR3} = V_{SSR2} - V_{CF} \quad (10)$$

Pada periode banjir (Desember-I hingga Maret-II), aliran pada *connecting gated conduit* tidak diperkenankan terjadi ( $V_{CF} = 0$ ) dan pintu pelimpah baru diatur untuk melakukan *flushing* dan/atau *sluicing* pada tampungan SSR. *Flushing* pertama dilakukan pada periode banjir 1 (Desember-I), sedangkan *flushing* kedua dilakukan pada awal periode banjir 3 (saat TMA MR mencapai CWL) yang kemudian dilanjutkan dengan *sluicing*. Volume tampungan MR dan SSR adalah sebagai berikut ini.

$$V_{SSR3} = \begin{cases} g(127) & ; \text{jika terjadi } flushing/slucing \\ \text{Min}[g(NHWL); V_{SSR2}] & ; \text{jika tidak terjadi } flushing/slucing \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{MR3} = V_{MR2} \quad (12)$$

Tampungan  $V_{SSR3}$  kemudian diterjemahkan kembali menjadi  $El_{SSR3}$  yang merupakan elevasi muka air SSR pada akhir periode hitungan.

#### 4. Release air pada MR

Pengaturan *release* air waduk didasarkan pada nilai target *release*, potensi *release* dan kondisi tampungan air waduk dengan keterangan sebagai berikut ini.

- Potential release* (PR). Tampungan MR setelah adanya aliran *overflow dike* dan *connecting channel* ( $V_{MR3}$ ) diterjemahkan kembali menjadi  $El_{MR3}$ . *Potential release* merupakan volume tampungan MR yang berada di atas elevasi *minimum operation level* (MOL).

$$PR = \text{Max}[\frac{V_{MR3} - V_{MOL}}{\Delta t}; 0] \quad (13)$$

- Actual release* (AR). *Potential release* pada tampungan waduk digunakan untuk memenuhi kebutuhan air (*target release*). Ada kalanya debit *actual release* tidak sesuai dengan kebutuhannya karena PR lebih kecil daripada TR sehingga debit air yang dilepaskan hanya sebesar PR.

$$AR = \begin{cases} TR ; PR > TR \\ PR ; PR < TR \end{cases} \quad (14)$$

*Actual release* pada periode tertentu menunjukkan tingkat keandalan waduk dalam memenuhi suplai kebutuhan air, nilai ini dinyatakan sebagai tingkat pemenuhan kebutuhan air waduk.

$$Rb = \frac{AR}{TR} \times 100\% \quad (15)$$

- c. Limpasan melalui *spillway* eksisting dapat terjadi apabila elevasi muka air MR melebihi elevasi CWL pada periode banjir atau NHWL pada periode non-banjir.

$$OS = \begin{cases} V_{MR3} - AR - f(CWL) & ; \text{pada periode banjir} \\ V_{MR3} - AR - f(NHWL) & ; \text{pada periode non - banjir} \end{cases} \quad (16)$$

Debit *outflow* total yang dikeluarkan dari MR merupakan penjumlahan dari *actual release* (AR) dan limpasan melalui *spillway* eksisting (OS). Volume tampungan MR pada akhir periode hitungan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V_{MR4} = V_{MR3} - TO \quad (17)$$

Kemudian  $V_{MR4}$  dapat diterjemahkan menjadi  $El_{MR4}$  yang merupakan elevasi muka air MR pada akhir periode hitungan. Selanjutnya,  $El_{MR4}$  dapat digunakan menjadi  $El_{MR0}$  untuk perhitungan pada periode berikutnya.

### Optimasi Pemanfaatan Air

Optimasi pemanfaatan air dilakukan pada MR dengan fungsi tujuan untuk memaksimalkan tingkat keandalan waduk dengan memperhatikan batasan-batasan yang ada. Komponen variabel berupa  $AR(t)$  disederhanakan menjadi  $fk(t)$  yang merupakan rasio antara  $AR(t)$  dengan  $TR(t)$  untuk menyederhanakan algoritma optimasi. Secara ringkas rumusan optimasi dapat dituliskan sebagai berikut:

1. *Objective Function*:  $\text{Max} \left[ \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{AR(t)}{TR(t)} \right]$
2. *Variable* :  $fk(t)$
3. *Constraints* :
  - a.  $fk_{min} \leq fk(t) \leq 1,0$
  - b.  $AR(t) \leq PR(t)$
  - c.  $AR(t) \leq TR(t)$
  - d.  $ElMR(t) \geq MOL$
  - e.  $ElMR_{24} \approx ElMR_0$

Adapun algoritma optimasi pada perangkat lunak ini menggunakan metode *brute force* dengan melakukan iterasi terhadap setiap kemungkinan dari kombinasi nilai  $fk(t)$ . Penggunaan metode *brute force* menghasilkan jumlah kombinasi yang sangat besar sehingga membutuhkan proses yang lama dan kurang praktis. Oleh karena itu digunakan teknik heuristik untuk mengeliminasi beberapa kemungkinan solusi sehingga proses optimasi dapat berjalan lebih cepat dan efektif.

Teknik heuristik diterapkan dengan mengevaluasi pengaruh perubahan nilai  $fk(t)$  terhadap perubahan elevasi muka air MR pada akhir periode ( $ElMR_{24}$ ). *Trial*

terhadap nilai  $fk(t)$  menunjukkan bahwa hanya  $fk(t)$  tertentu yang memberikan dampak terhadap perubahan nilai  $ELMR_{24}$  yang selanjutnya disebut sebagai  $fk$  sensitive. Kemudian kombinasi nilai  $fk$  yang mungkin dapat disusun ulang sebagai berikut.

$$fk \text{ sensitive} \quad \rightarrow \quad fk_{min} \leq fk(t) \leq 1$$

$$fk \text{ non-sensitive} \quad \rightarrow \quad fk(t) = 1$$

## Hasil Studi dan Pembahasan

Penerapan model untuk menyimulasikan perangkat lunak dilakukan dengan menggunakan masukan data yang diperoleh dari PJT I (2021). Data *target release* didasarkan pada nilai rerata debit *release* aktual tengah bulanan dari pengolahan data operasional waduk tahun 2000-2020 seperti yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Debit *release* aktual rerata tengah bulanan

Tengah Bulan	Debit <i>Release</i> (m <sup>3</sup> /s)	Tengah Bulan	Debit <i>Release</i> (m <sup>3</sup> /s)
Jan-1	26,85	Jul-1	27,85
Jan-2	31,07	Jul-2	28,87
Feb-1	34,00	Agt-1	28,21
Feb-2	36,64	Agt-2	27,50
Mar-1	39,05	Sep-1	26,34
Mar-2	37,90	Sep-2	24,79
Apr-1	39,76	Okt-1	15,58
Apr-2	34,11	Okt-2	10,18
Mei-1	28,94	Nov-1	10,16
Mei-2	28,08	Nov-2	12,37
Jun-1	27,79	Des-1	19,58
Jun-2	29,59	Des-2	25,13

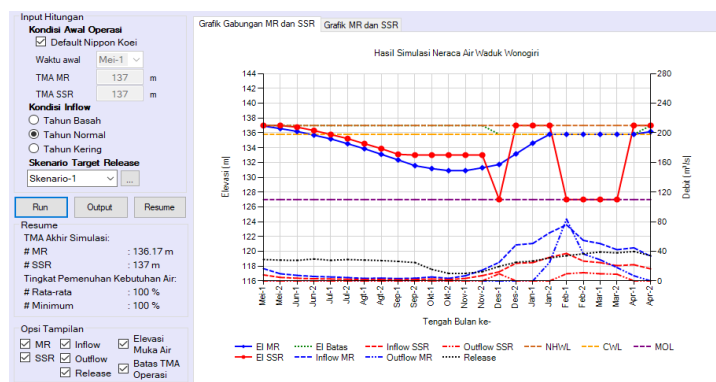
(Sumber: PJT I, 2021)

Data debit *release* tersebut selanjutnya digunakan menjadi data kebutuhan air irigasi (KAI) pada *target release* skenario-1 dengan tidak memperhitungkan kebutuhan air baku. Untuk *target release* skenario-2 dan skenario-3, kebutuhan air irigasi menggunakan data KAI yang sama dengan tambahan kebutuhan air baku berturut-turut sebesar 0,75 m<sup>3</sup>/s dan 1,45 m<sup>3</sup>/s.

Simulasi dan optimasi menggunakan variasi nilai CWL sebesar +135,80 m dan +136,30 m dengan nilai NHWL sebesar +137,00 m. Pengaturan kondisi awal menggunakan pengaturan *default* Nippon Koei Co. Ltd. dengan elevasi awal tampungan MR dan SSR sebesar +137,00 m.

Pada hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 tampak bahwa elevasi muka air MR pada akhir simulasi sebesar +136,17 m tidak dapat mencapai elevasi muka air awal sebesar +137,00 m. Sedangkan pada SSR, elevasi muka air pada akhir simulasi sudah berhasil mencapai elevasi muka air awal sebesar +137,00 m. Hal ini terjadi karena pada simulasi neraca air kebutuhan air akan tetap dipenuhi selama *potential release* waduk masih mencukupi dan tidak mempertimbangkan pemulihan (*recovery*) tampungan waduk pada akhir simulasi yang sedapat mungkin kembali ke elevasi muka air pada awal simulasi.

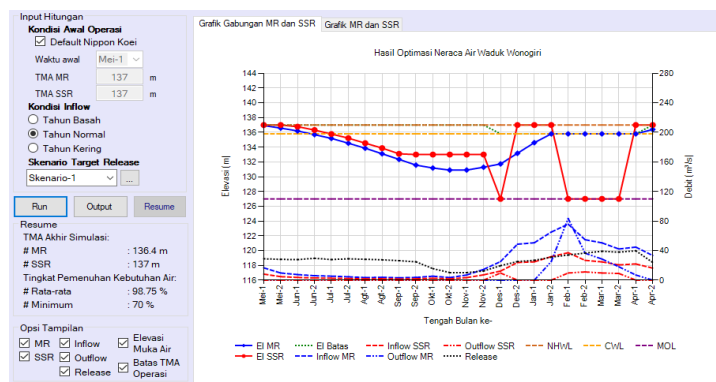




Gambar 6. Simulasi neraca air dengan CWL +135,80 m pada tahun normal untuk skenario-1 (Haryanto, 2021)

Permasalahan deviasi elevasi muka air MR pada awal dan akhir simulasi tersebut dapat diatasi melalui pengaturan *release* air dengan mempertimbangkan kondisi tampungan air waduk. Dalam hal ini, pada perangkat lunak dapat dipilih menu “Optimasi Pengaturan Air” untuk melakukan pengaturan *release* air waduk.

Pada penerapan model optimasi, *input* hitungan menggunakan *input* yang sama pada kasus simulasi neraca air sehingga perbedaan antara hasil simulasi dan optimasi dapat diperbandingkan. Pengaturan optimasi menggunakan nilai faktor  $k$  minimum sebesar 0,7 dan jumlah iterasi maksimum sebesar 2.000 kali.



Gambar 7. Optimasi pengaturan air dengan CWL +135,80 m pada tahun normal untuk skenario-1 (Haryanto, 2021)

Hasil optimasi pengaturan air seperti pada Gambar 7 menunjukkan bahwa pengaturan *release* air waduk memberikan kondisi tampungan akhir MR yang lebih baik daripada simulasi neraca air, meskipun belum dapat mencapai kondisi awal. Sebagai perbandingan antara hasil simulasi dan optimasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi dan optimasi air pada tahun normal dan CWL +135,80 m

Target Release	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air Rerata (%)		TMA MR Akhir (m)	
	Simulasi	Optimasi	Simulasi	Optimasi
Skenario-1	100	98,75	136,17	136,40
Skenario-2	100	98,79	136,16	136,38
Skenario-3	100	98,79	136,14	136,37

(sumber: Haryanto, 2021)

Nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada hasil optimasi menunjukkan hasil yang lebih rendah dari nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata hasil simulasi dikarenakan adanya pengaturan atau pengurangan *release* air waduk untuk dapat mencapai kondisi tampungan akhir yang mendekati kondisi tampungan awal. Rekapitulasi hasil optimasi pengaturan air waduk untuk ditunjukkan pada Tabel 3 untuk CWL +135,80 m dan 0 untuk CWL +136,00 m.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil optimasi air untuk CWL +135,80 m

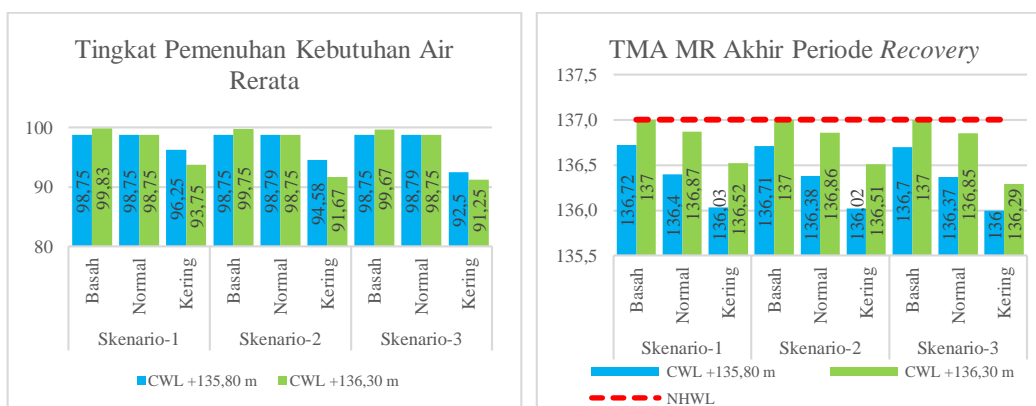
Target Release	Debit Inflow	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air (%)		TMA SSR (m)			TMA MR (m)		
		Rerata	Min.	Awal	Akhir	Min.	Awal	Akhir	Min.
Skenario-1	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,72	132,53
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,40	130,90
	Kering	96,25	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,03	129,56
Skenario-2	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,71	132,29
	Normal	98,79	71,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,38	130,51
	Kering	94,58	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,02	129,01
Skenario-3	Basah	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,70	132,05
	Normal	98,79	71,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,37	130,13
	Kering	92,50	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,00	128,44

(sumber: Haryanto, 2021)

Tabel 4. Rekapitulasi hasil optimasi air untuk CWL +136,30 m

Target Release	Debit Inflow	Tingkat Pemenuhan Kebutuhan Air (%)		TMA SSR (m)			TMA MR (m)		
		Rerata	Min.	Awal	Akhir	Min.	Awal	Akhir	Min.
Skenario-1	Basah	99,83	96,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,53
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,87	130,90
	Kering	93,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,52	129,56
Skenario-2	Basah	99,75	94,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,29
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,86	130,51
	Kering	91,67	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,51	129,01
Skenario-3	Basah	99,67	92,00	137,00	137,00	127,00	137,00	137,00	132,05
	Normal	98,75	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,85	130,13
	Kering	91,25	70,00	137,00	137,00	127,00	137,00	136,29	128,44

(sumber: Haryanto, 2021)

Gambar 8. Perbandingan tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata dan perbandingan TMA MR akhir periode *recovery* (Haryanto, 2021)

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada CWL +135,80 m lebih rendah dibanding pada CWL +136,30 m untuk *inflow* tahun basah. Pada tahun normal, nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata relatif sama untuk kedua variasi CWL. Sedangkan pada tahun kering, nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata pada CWL +135,80 m lebih tinggi dibandingkan pada CWL +136,30 m. Hal ini terjadi karena aturan operasi waduk pada akhir periode *recovery* yang mengharuskan muka air MR untuk mencapai NHWL.

Hasil perhitungan simulasi dan optimasi dengan variasi nilai CWL +135,80 m dan +136,30 m menunjukkan bahwa elevasi muka air MR pada akhir periode *recovery* sulit untuk mencapai NHWL. *Recovery* muka air akhir MR dapat terjadi hanya pada CWL +136,30 m dengan kondisi *inflow* tahun basah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Sedangkan pada tahun normal dan tahun kering, muka air akhir MR tidak dapat mencapai NHWL. Akan tetapi secara keseluruhan, CWL +136,30 m memberikan nilai elevasi muka air akhir MR yang lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m karena lebih mendekati nilai NHWL.

## Kesimpulan dan Saran

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Simulasi neraca air untuk optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri dapat dilakukan dengan cepat menggunakan perangkat lunak yang telah dibuat dengan hasil perhitungan yang akurat.
2. Dengan bantuan perangkat lunak dapat dilakukan optimasi pengaturan release waduk agar diperoleh pola fluktuasi muka air waduk yang baku, yaitu elevasi yang sama pada awal dan akhir periode tahun operasi dengan nilai tingkat pemenuhan kebutuhan air rerata waduk yang maksimum.
3. Optimasi pemanfaatan air Waduk Serbaguna Wonogiri pada CWL +136,30 m memberikan kinerja *recovery* muka air MR yang lebih baik dibandingkan dengan CWL +135,80 m.

### Saran

Pemodelan simulasi neraca air waduk ini perlu ditingkatkan ketelitiannya pada perhitungan limpasan air dari SSR ke MR atau sebaliknya untuk mencapai kondisi keseimbangan muka air pada kedua tampungan yang belum dilakukan secara simultan. Komponen optimasi perangkat lunak dapat dikembangkan menggunakan algoritma lain seperti *Non-linear Programming*, *Dynamic Programming*, untuk memberikan proses yang lebih cepat. Selain itu, *output* perangkat lunak dapat ditingkatkan untuk mendapatkan Pola Operasi Waduk (POW) maupun Rencana Tahunan Operasi Waduk (RTOW) sebagai sarana dalam pengambilan keputusan terhadap rencana operasional Waduk Serbaguna Wonogiri kedepan.

### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Perum Jasa Tirta I (PJT I) yang telah membantu dalam penyediaan data yang digunakan pada penelitian ini.

### Daftar Referensi

- Anggraheni, D., Jayadi, R. & Istiarto, 2017. Evaluasi Kinerja Pola Operasi Waduk (POW) Wonogiri 2014. *Jurnal Teknisia*, Vol XXII(1): 294-306.
- Devita, R. N. & Wibawa, A. P., 2020. Teknik-Teknik Optimasi Knapsack Problem. *Sains, Aplikasi, Komputasi dan Teknologi Informasi*, Vol II: 35-40.
- Haryanto, Y. A., 2021. Pengembangan Model Simulasi Neraca Air untuk Optimasi Pemanfaatan Potensi Air Waduk Serbaguna Wonogiri, *Tugas Akhir*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Nippon Koei Co. Ltd., 2016. *Study Report on Operation and Maintenance of Wonogiri Multipurpose Dam and Related Structure*, Jakarta: Ministry of Public Works and Housing, The Republic of Indonesia.
- PJT I, 2021. *Kajian Perubahan Control Water Level (CWL) Bendungan Wonogiri*, Surakarta: Perum Jasa Tirta I.
- Pradipta, A., 2014. Studi Pengaruh Pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri Terhadap Pola Operasi Waduk Periode Banjir, *Tesis*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- 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*, Vol VI: 108-115.
- Suharyanto, 1997. Analisis Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk. *Media Komunikasi Teknik*, Vol VIII: 51-57.
- Wijayanti, P., 2020. Pola Operasi Waduk Wonogiri Setelah Pembangunan Pintu Pelimpah Baru untuk Pengendalian Banjir dan Sedimen di Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu, *Tesis*. Yogyakarta: Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
- Zakwan, M., Muzzammil, M. & Alam, J., 2017. Developing Stage-Discharge Relations using Optimization Techniques. *Aquademia: Water, Environment and Technology*, Vol I(2): 1-8.