



# **Pola Operasi Waduk Wonogiri Setelah Pembangunan Pintu Pelimpah Baru Untuk Pengendalian Banjir**

**\*Paska Wijayanti, Istiarto, Rachmad Jayadi**

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

\*) [paskawijayanti@mail.ugm.ac.id](mailto:paskawijayanti@mail.ugm.ac.id)

Received: 14 Januari 2021 Revised: 1 Desember 2021 Accepted: 17 Desember 2021

## **Abstract**

*Wonogiri reservoir in upstream Bengawan Solo experienced sedimentation problems that endanger its operation. Much of sediments come from Keduang watershed. To overcome this problem, closure dike was constructed to localize the sediment from Keduang watershed. The dike divides the reservoir into main and sediment storage reservoirs, each has its spillway. This paper presents results of the study on Wonogiri Reservoir operation during flood period after dike construction. The study followed a two-step calculation. It updated the design flood by employing rainfall data frequency analysis and Collins unit hydrograph. Flood routing was subsequently done by applying level pool method. Two conditions were considered, namely existing condition whose initial water level was +135.3 meters and new condition whose initial water level was +136.3 meters. The study reveals an increase of the flood discharge to Wonogiri reservoir by 7.7% and 3.6% for the 60 year and 500 year floods, respectively, as compared to the previous study of Pradipta (2014). The study shows that Wonogiri reservoir is prone to overtopping under 500 year flood. It is recommended to lower the control water level of the new spillway.*

**Keywords:** *Closure dike, reservoir flood routing, flood control*

## **Abstrak**

*Waduk Wonogiri di Bengawan Solo hulu telah mengalami permasalahan sedimentasi yang mengganggu operasionalnya. Sebagian besar sedimen berasal dari DAS Keduang di sisi kanan (timur) waduk. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sebuah closure dike telah dibangun untuk melokalisasikan pasokan sedimen dari DAS Keduang. Closure dike membagi waduk menjadi waduk utama dan waduk tampungan sedimen, masing-masing memiliki pelimpah. Makalah ini menyajikan hasil kajian operasi Waduk Wonogiri dalam pengendalian banjir setelah pembangunan closure dike. Studi terdiri dari dua tahap. Tahap pertama adalah pemutakhiran banjir rancangan dengan menggunakan metode analisis frekuensi data hujan dan hidrograf satuan cara Collins. Tahap kedua adalah penelusuran banjir dengan menggunakan metode level pool routing. Penelusuran banjir dilakukan untuk dua kondisi, yaitu kondisi lama (elevasi muka air awal +135,3m) dan kondisi baru (elevasi muka air awal +136,3m). Pemutakhiran debit banjir menunjukkan adanya kenaikan debit banjir ke Waduk Wonogiri sebesar 7,7% dan 3,6%, masing-masing untuk debit banjir kala ulang 60 dan 500 tahun, dibandingkan dengan studi Pradipta (2014). Hasil kajian menunjukkan bahwa Waduk Wonogiri rentan terhadap overtopping saat banjir kala ulang 500 tahun. Untuk mengantisipasi risiko tersebut, maka elevasi muka air waduk untuk pembukaan-penuh pintu pelimpah baru disarankan untuk diturunkan agar muka air waduk maksimum tidak melebihi extra flood water level.*

**Kata kunci:** *Closure dike, penelusuran banjir waduk, pengendalian banjir*

## **Pendahuluan**

Salah satu upaya pengendalian banjir di wilayah sungai Bengawan Solo bagian hulu adalah pembangunan Waduk Wonogiri pada akhir 1976, dimana pada era tahun 90-an dan tahun 2000-an

mengalami permasalahan sedimentasi yang parah. Sumber sedimen terbesar adalah dari daerah aliran sungai (DAS) Keduang, yang merupakan DAS terbesar di antara sepuluh DAS di daerah tangkapan air (DTA) Wonogiri. DAS ini memiliki tingkat erosi 1.218.580 m<sup>3</sup>/tahun (Koei, 2007). Upaya untuk

mengatasi permasalahan sedimentasi Waduk Wonogiri adalah dengan membangun *closure dike* (tanggul penyekat) dan pelimpah baru yang telah selesai pada tahun 2020.

Pelimpah berfungsi sebagai pengamanan terhadap bahaya air banjir yang melimpas di atas bendungan (*overtopping*) dan agar debit hujan rancangan yang terjadi cepat mengalir sehingga debit air tidak sempat meluas. Karakteristik aliran yang melewati pelimpah tergantung bentuk dan sifat pelimpah itu sendiri (Saleh *et al.*, 2019). Setiap waduk dilengkapi dengan pelimpah untuk membuang kelebihan air, kapasitas maksimum pelimpah dirancang berdasar debit banjir rancangan dan dikontrol dengan PMF (Masrevaniah, 2010).

Pengambilan keputusan dalam pengaturan pintu pelimpah yang dilakukan secara cepat dan akurat akan mendukung kinerja operasi Waduk Wonogiri pada saat banjir. Selain itu, penerapannya dapat digunakan sebagai masukan dalam menentukan tindakan penanganan banjir, mitigasi bencana banjir, pembangunan sistem peringatan dini banjir, serta opsi penanganan banjir secara struktural (Renaningsih, 2017).

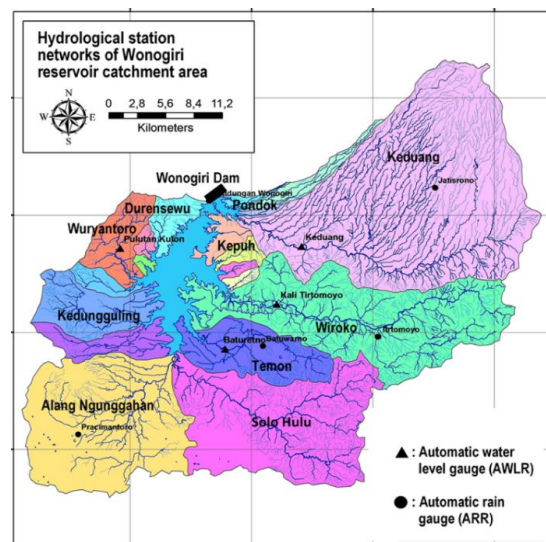
*Closure dike* memisahkan Waduk Wonogiri menjadi dua tampungan, yaitu *main reservoir* (MR) dan *sediment storage reservoir* (SSR), serta pembangunan pelimpah baru di *sediment storage reservoir*. Sedimen dari DAS Keduang ditahan di *sediment storage reservoir*. Sedimen ini digelontor melalui pelimpah baru. Keberadaan *closure dike* dan pelimpah baru mengubah pola operasi Waduk Wonogiri, khususnya pola operasi waduk pada saat banjir. Pradipta (2014) telah melakukan kajian pembaruan hidrograf banjir *inflow* Waduk Wonogiri. Pada kajian itu, hidrograf *inflow* ke Waduk Wonogiri diperoleh dari pengalih-ragaman hujan-aliran menggunakan data hujan sampai dengan 2009.

Rentang waktu satu dasawarsa antara 2009 sampai selesainya pembangunan *closure dike* dan pelimpah baru telah menyediakan data hujan yang memungkinkan pembaruan hidrograf *inflow* ke Waduk Wonogiri. Gambar 1 menunjukkan lokasi Waduk Wonogiri. Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Wonogiri memiliki luas 1.343 km<sup>2</sup> yang terdiri dari genangan waduk dan 10 DAS. Kesepuluh DAS Waduk Wonogiri adalah Pondok, Keduang, Kepuh, Wiroko, Temon, Solo Hulu, Alang Ngungghahan, Kedunguling, Wuryantoro, dan Durensewu (Oktavia, S. R., 2013), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Skema zona tampungan dan tata letak Waduk Wonogiri setelah pembangunan *closure dike* disajikan pada Gambar 3.



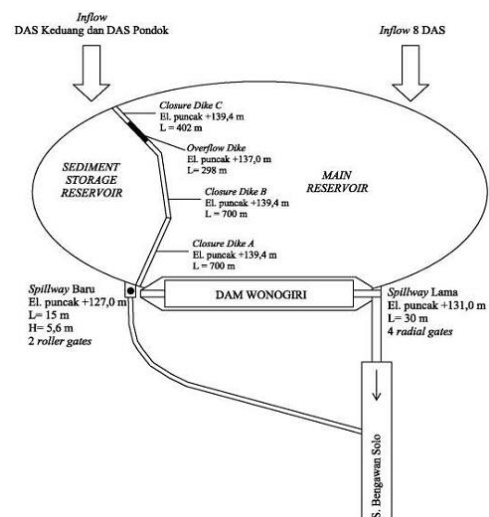
Sumber: Koei, 2007

Gambar 1. Kawasan genangan dan DTA Waduk Wonogiri



Sumber: Pradipta, 2014

Gambar 2. Peta DTA Waduk Wonogiri



Sumber: Koei, 2007

Gambar 3. Skema zona tampungan Waduk Wonogiri

Dalam kaitannya dengan studi tentang sumber daya air, hidrologi mempunyai peranan yang sangat penting. Salah satu faktor yang berperan adalah data hidrologi, sehingga dapat mengetahui besarnya debit rencana sebagai perencanaan bangunan air (Sitohang *et al.*, 2011). DAS memiliki komponen-komponen hidrologi yang kompleks. Proses hidrologi yang terjadi di suatu wilayah merupakan faktor penting dalam menentukan besarnya debit aliran (Putra, L. A., 2015).

Makalah ini memaparkan kaji ulang perubahan pola operasi Waduk Wonogiri untuk pengendalian banjir pada operasi pembukaan pintu *spillway* lama dan baru. Hidrograf *inflow* ke waduk hasil kajian terdahulu (Pradipta, 2014) diperbarui dengan menambahkan data hujan sampai dengan tahun 2019. Kajian menelaah pula opsi perubahan elevasi muka air waduk saat banjir (*control water level, CWL*). Sampai saat ini, CWL Waduk Wonogiri masih menjadi bahasan intensif dalam pengoperasian waduk menyongsong perubahan karakteristik waduk dengan adanya dua bagian waduk dan dua *spillway*.

## Metode

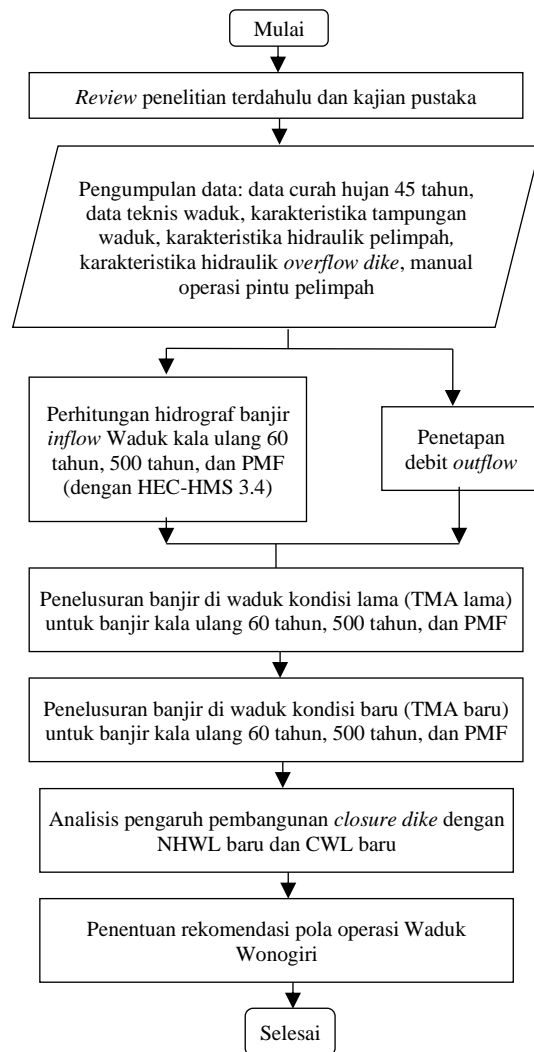
Data curah hujan yang digunakan yaitu data tahun 1975 s/d 2019, dan diperoleh dari Dinas PUPR Kabupaten Wonogiri. Data tata guna lahan diperoleh dari BBWS Bengawan Solo. Data teknis Waduk Wonogiri dan data monitoring operasional waduk diperoleh dari Perum Jasa Tirta I. Karakteristika tampungan waduk, karakteristik hidraulik pelimpah, karakteristik hidraulik *overflow dike* dan manual operasi pintu pelimpah diperoleh dari Koei (2007).

Prinsip dasar operasi waduk melalui pelimpah adalah pengaturan debit melalui pelimpah untuk mencegah *overtopping* bendungan dan genangan banjir di kawasan hilir waduk. Kinerja operasi waduk pada saat banjir bergantung kepada prediksi hidrograf *inflow* waduk dan pengaturan elevasi muka air waduk (Wijaya, 2015). Prediksi hidrograf *inflow* dilakukan dengan suatu sistem peramalan banjir (*flood forecasting system*) dan pengaturan elevasi muka air waduk dilakukan dengan pengaturan debit pelimpah. Di Waduk Wonogiri, sistem yang ada mampu memprediksi debit *inflow* (QI) beberapa jam ke depan. Pengaturan debit pelimpah (QO) dilakukan menurut pedoman di bawah ini (Koei, 1982). Prosedur kajian pola operasi Waduk Wonogiri untuk pengendalian banjir disajikan pada Gambar 4.

## Hidrograf banjir rancangan

Pemutakhiran perhitungan banjir rancangan menggunakan metode analisis frekuensi data hujan

dan hidrograf satuan cara *Collins*. Analisis frekuensi menggunakan kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan *Probable Maximum Precipitation* (PMP). Hidrograf satuan dengan cara *Collins* mensyaratkan pemilihan kasus berupa hidrograf tunggal, semata-mata agar proses hitungan lebih sederhana dan tidak memakan waktu. Hidrograf banjir rancangan didapat dari hasil analisis hidrograf satuan dan hujan rancangan pada masing-masing DAS untuk kala ulang 60 tahun, 500 tahun dan *Probable Maximum Flood* (PMF) dengan menggunakan perangkat lunak HEC-HMS 3.4. PMF digunakan untuk memastikan keamanan dan keandalan maksimum dalam desain bangunan hidrolis seperti bendungan. Nilai PMF dapat diperoleh melalui nilai PMP yaitu curah hujan maksimum yang mungkin terjadi pada suatu wilayah dalam waktu tertentu (Sibuea, 2018).



Gambar 4. Prosedur penelitian

## Penelusuran banjir di waduk

Penelusuran banjir merupakan teknik yang penting dan diperlukan untuk mendapatkan penyelesaian

pengendalian banjir. Sehingga penelusuran banjir dipandang sebagai prosedur yang dibutuhkan untuk menentukan hidrograf suatu titik di hilir dari hidrograf yang diketahui dari titik di hulu (Styawan, 2017). Penelusuran banjir di waduk digunakan untuk mengetahui pola *stage hydrograph*, serta untuk memperoleh *outflow hydrograph* melalui pelimpah Waduk Wonogiri.

### Perubahan elevasi muka air Waduk Wonogiri

Elevasi muka air Waduk Wonogiri diubah dengan mempertimbangkan penurunan kapasitas waduk dan perubahan pola operasi pengendalian banjir. Tabel 1 menyajikan perubahan elevasi muka air waduk dari kondisi lama sebelum *closure dike* ke kondisi baru setelah *closure dike* dibangun.

Tabel 1. Elevasi muka air untuk operasi waduk

Elevasi muka air waduk	Kondisi lama (m)	Kondisi baru (m)
TMA Rendah (LWL)	El.127,0	El.127,0
TMA Kontrol Banjir (CWL)	El.135,3	El.136,3
TMA Normal (NHWL)	El.136,0	El.137,0
TMA Banjir Besar (HFWL)	El.137,7	El.138,6
TMA Tambahan (SWL)	El.138,2	El.139,1
TMA Banjir Luar biasa (EFWL)	El.139,1	El.139,9

Sumber: Koei, 2016

Bukaan pintu pelimpah berfungsi untuk menjaga elevasi muka air agar tetap pada kondisi elevasi normal. Semakin tinggi kenaikan muka air, maka bukaan pintu dinaikkan sesuai dengan tinggi muka air, agar tidak terjadi *overtopping* (Roviqoh, 2018).

### Pola operasi waduk

Pada banjir kecil,  $Q_{\text{Imax}} < 400 \text{ m}^3/\text{s}$ , debit pelimpah dikendalikan supaya  $< 400 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan mengatur pintu pelimpah secara *partial opening* sampai banjir berakhir. Pada banjir standar,  $Q_{\text{Imax}} = 400 - 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , debit pelimpah dipertahankan sebesar  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan mengatur pintu pelimpah secara *partial opening* sampai banjir berakhir. Pada banjir luar biasa,  $Q_{\text{Imax}} > 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , debit pelimpah adalah kontinyu sebesar  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  pada saat awal banjir (*preceding release*) dan ketika elevasi muka air waduk mencapai El.138,2 m, maka semua pintu pelimpah dibuka penuh (*full opening*).

### Pengendalian banjir Waduk Wonogiri

Waduk mengubah pola *inflow-outflow* hidrograf. Fungsi waduk untuk pengendali banjir agar mendapatkan manfaat yang lebih besar harus dilengkapi dengan pintu pengendali banjir, sehingga penurunan debit banjir di hilir waduk akan lebih besar atau perubahan antara *inflow* dan *outflow* hidrograf yang besar. Pengendalian banjir

dengan waduk biasanya hanya dapat dilakukan pada bagian hulu dan dikaitkan dengan pengembangan sumber daya air (Syahputra, 2015).

Pada prinsipnya, pola operasi Waduk Wonogiri dalam pengendalian banjir adalah menahan debit *inflow* dan mengatur debit *outflow*. Jumlah debit *outflow* melalui pelimpah lama, pelimpah baru, dan *intake* tidak melebihi debit kritis  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  atau *bankfull capacity* (Koei, 2016). Perubahan tata guna lahan dan karakteristik hujan di DTA Waduk Wonogiri memungkinkan terjadi perubahan hidrograf banjir *inflow* rancangannya sehingga perlu meningkatkan kinerja pola operasi Waduk Wonogiri sebagai pengendali banjir (Arlensietami, 2011).

### Penelusuran banjir di Waduk Wonogiri

Terdapat data hujan harian dari 14 stasiun hujan dan tiga pos AWLR yang tersebar pada DTA Waduk Wonogiri. Respon DAS dalam proses alih ragam hujan sangat dipengaruhi parameter *Curve Number (CN)* dan *CNkomposit*. *CN* merupakan fungsi dari karakteristik DAS. Jika lahan terdiri dari beberapa tata guna lahan dan tipe tanah maka dihitung nilai *CNkomposit* yang diperoleh dari perhitungan penjumlahan nilai *CN* masing-masing penggunaan lahan berdasarkan jenis tanah dikalikan dengan luasnya dibagi luas total DAS. Pengolahan data hidrologi sebagai data *inflow* pada proses penelusuran banjir di waduk. Hidrograf satuan (HS) yang digunakan diambil dari penelitian Oktavia (2013) dengan sedikit pembaharuan yang terletak pada metoda perata-rata HS.

Analisis hujan DAS menggunakan metoda poligon Thiessen, berdasarkan ketersediaan data hujan harian pada 14 stasiun hujan yang tersebar pada DTA Waduk Wonogiri. Hujan rancangan harian untuk kala ulang 60 tahun, 500 tahun dan PMP dihitung menggunakan analisis frekuensi. Pola distribusi hujan acuan diperoleh dari penelitian Arlensietami (2011).

Berdasarkan hasil analisis HS dan hujan rancangan, maka dapat dihitung hidrograf banjir rancangan kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan PMF 10 DAS pada DTA Waduk Wonogiri dengan menggunakan HEC-HMS 3.4. Hidrograf banjir rancangan total untuk masing-masing kala ulang digunakan sebagai masukan pada penelusuran banjir di waduk.

Metode perhitungan yang digunakan dalam penelusuran banjir di waduk adalah metode *level pool routing*. Metode *level pool routing* adalah prosedur untuk menghitung hidrograf *outflow* waduk dengan permukaan air horisontal, dengan masukan berupa hidrograf *inflow* dan karakteristik

tampungan. Metode ini diperlukan untuk mengetahui jumlah debit maksimum yang mampu ditampung waduk dan mengetahui efektivitas waduk (Amalia *et al.*, 2015). Persamaan yang digunakan sebagai berikut (Chow *et al.*, 1988).

$$dS = I - O \quad (1)$$

$$T = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, j\Delta t, (j + 1)\Delta t \quad (2)$$

dengan  $\Delta t = \text{interval routing}$

Perubahan *inflow* (I) dan *outflow* (O) selama  $\Delta t$  dianggap linear, maka dapat ditulis perubahan tampungan (S) sebagai berikut.

$$S_{j+1} - S_j = \frac{I_j + I_{j+1}}{2} \Delta t - \frac{O_j + O_{j+1}}{2} \Delta t \quad (3)$$

dengan  $I_j, I_{j+1}$  = diketahui (hidrograf *inflow*),  $O_j, S_j$  = diperoleh berdasarkan hitungan pada  $\Delta t$  sebelumnya, dan  $O_{j+1}, S_{j+1}$  = besaran yang dicari.

Penelusuran banjir dilakukan untuk banjir kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan PMF. Terdapat 2 skenario penelusuran yaitu kondisi lama (kondisi setelah dibangun *closure dike* dengan CWL El.135,3 m dan EFWL El.139,1 m) dan kondisi baru (kondisi setelah dibangun *closure dike* dengan CWL El.136,3 m dan EFWL baru El.139,9 m). Pengaruh pelimpah baru dan *closure dike* terhadap pengendalian banjir yaitu berdasarkan perhitungan penelusuran banjir di waduk, sehingga dapat diketahui apakah dengan pola operasi tersebut kondisi Waduk Wonogiri masih dalam keadaan aman terhadap *overtopping* dengan cara mengecek elevasi muka air maksimum.

## Hasil dan Pembahasan

### Hidrograf banjir *inflow* Waduk Wonogiri

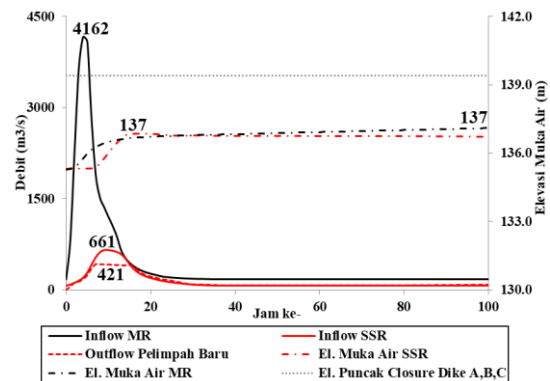
Data masukan penelusuran banjir adalah hidrograf banjir Waduk Wonogiri kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan PMF serta karakteristik tampungan Waduk Wonogiri. Pemilihan banjir kala ulang 60 tahun, 500 tahun, dan PMF mengikuti debit banjir rancangan yang dipakai dalam desain oleh Koei (1982). Perbandingan karakteristik hidrograf banjir penelitian Pradipta (2014) dan kajian ini disajikan pada Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan bahwa debit puncak banjir dalam kajian ini lebih tinggi daripada

penelitian Pradipta (2014). Waktu untuk mencapai debit puncak (*time to peak*) banjir kala ulang 60 tahun dalam kajian ini lebih cepat 20% dibandingkan hidrograf Pradipta (2014). Kajian ini mendapati volume banjir yang lebih tinggi daripada volume banjir hidrograf hasil penelitian terdahulu.

### Penelusuran banjir di waduk

Pada penelitian terdahulu, Pradipta (2014) melakukan simulasi penelusuran banjir di waduk dengan hidrograf *inflow* belum diperbarui dan elevasi awal muka air pada El.135,3 m (CWL lama). Hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 3.

Saat banjir kala ulang 60 tahun, elevasi muka air pada SSR dan MR masih di bawah elevasi puncak *closure dike* disajikan pada Gambar 5. Saat banjir telah selesai, muka air MR turun sampai batas *overflow dike* karena tidak ada *outflow* melalui pelimpah lama. Waduk Wonogiri aman terhadap risiko *overtopping closure dike* karena elevasi muka air waduk masih di bawah batas elevasi muka air kritis (El.139,1 m).

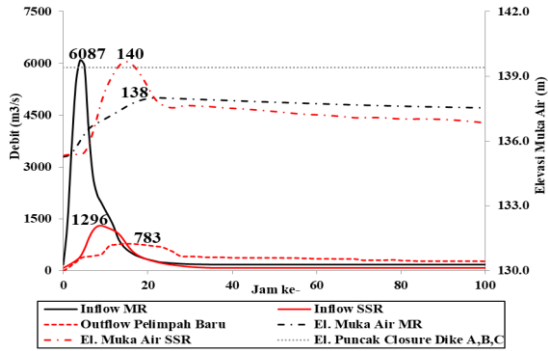


Gambar 5. Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 60 tahun

Saat banjir kala ulang 500 tahun, elevasi muka air maksimum SSR adalah El.138,1 m, masih di bawah *closure dike*. Elevasi muka air MR adalah El.139,7 m, 30 cm di atas *closure dike* disajikan pada Gambar 6. Elevasi muka air maksimum MR telah melampaui elevasi muka air kritis Waduk Wonogiri (El.139,1 m). Pada situasi seperti ini, *closure dike* terancam oleh *overtopping*.

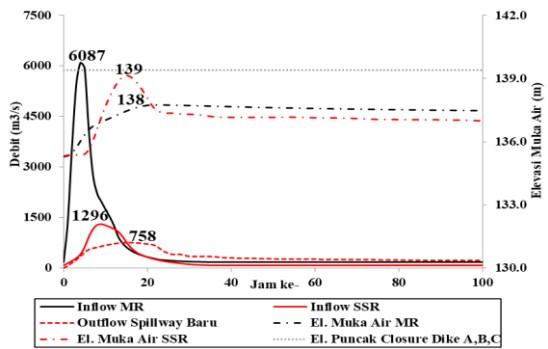
Tabel 2. Perbandingan karakteristik hidrograf banjir inflow

Kala ulang (tahun)	Debit puncak (m <sup>3</sup> /s)			Time to peak (jam)			Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		
	Pradipta (2014)	Wijayanti (2020)	%Δ	Pradipta (2014)	Wijayanti (2020)	%Δ	Pradipta (2014)	Wijayanti (2020)	%Δ
60	4.373	4.708	7,66	5	4	-20	153,95	160,78	4,44
500	6.541	6.780	3,65	5	5	0	229,89	236,01	2,66
PMF	9.707	9.721	0,15	5	5	0	352,38	353,98	0,45



**Gambar 6.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun

Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi pola operasi pelimpah. Pada pola eksisting, *full opening gate* dilakukan ketika elevasi muka air waduk mencapai El.138,2 m. Untuk mengatasi permasalahan pada banjir kala ulang 500 tahun, dilakukan sejumlah percobaan elevasi optimum *full opening gate*. Dari sejumlah percobaan, diperoleh *full opening gate* optimum pada elevasi El.135,6 m (Gambar 7). Elevasi muka air maksimum SSR adalah El.139,1 m dan elevasi muka air maksimum MR adalah El.137,8 m. Dengan demikian, *closure dike* terhindar dari *overtopping*.

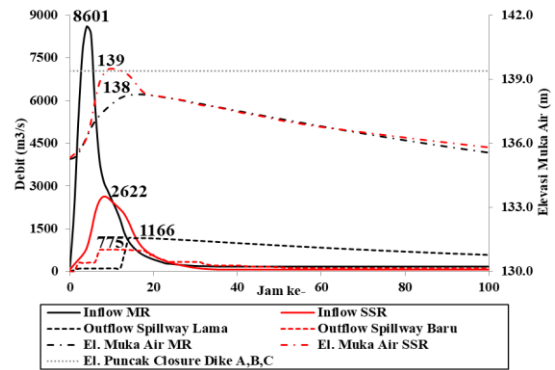


**Gambar 7.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun dengan pola operasi modifikasi

Dalam kajian ini, dilakukan telaah terhadap perubahan elevasi muka air waduk CWL. Telaah dilakukan untuk banjir kala ulang 60 dan 500 tahun. Penelusuran banjir pada kedua besaran debit banjir

tersebut dilakukan pada dua nilai CWL, yaitu El.135,3 m (CWL lama) dan El.136,3 m (CWL baru). Hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.

Saat PMF, elevasi muka air maksimum SSR adalah El.138,3 m (di bawah *closure dike*) dan elevasi muka air maksimum MR adalah El.139,5 m (10 cm di atas *closure dike*). Ini sejalan dengan *operating rule* yang disusun oleh Koei (2007) yang membolehkan *overtopping* di *closure dike* saat PMF disajikan pada Gambar 8.



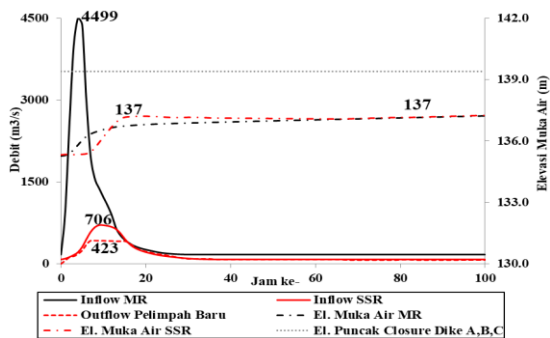
**Gambar 8.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir PMF

Saat banjir kala ulang 60 tahun dan CWL El.135,3 m, elevasi muka air MR adalah El.137,24 m dan elevasi muka air SSR adalah El.137,25 m. Elevasi muka air ini masih di bawah elevasi puncak *closure dike* El.139,4 m disajikan pada Gambar 9. Ketika banjir telah surut, muka air MR turun sampai batas *overflow dike* karena tidak ada *outflow* melalui pelimpah lama. Waduk Wonogiri aman terhadap risiko *overtopping* karena muka air waduk masih di bawah batas elevasi muka air kritis (El.139,1 m).

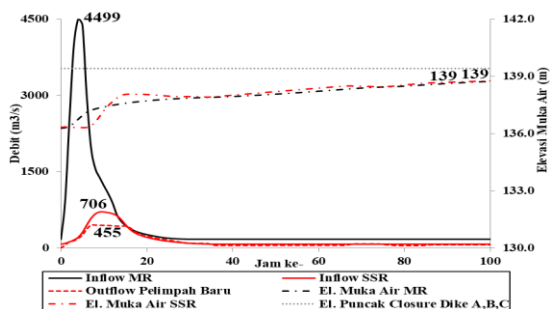
Saat banjir kala ulang 60 tahun dan CWL El.136,3 m, elevasi muka air MR adalah El.138,74 m dan elevasi muka air SSR adalah El.138,75 m. Kedua elevasi muka air ini sudah di atas elevasi puncak *closure dike* disajikan pada Gambar 10. Ketika banjir telah surut, terjadi *outflow* melalui pelimpah lama. Waduk Wonogiri aman terhadap risiko *overtopping* karena muka air waduk masih di bawah batas elevasi muka air kritis.

**Tabel 3.** Rekapitulasi hasil penelusuran banjir di waduk penelitian terdahulu (Pradipta, 2014)

Kala ulang (tahun)	Debit inflow maks. (m <sup>3</sup> /s)	Debit outflow maks. (m <sup>3</sup> /s)		Elevasi muka air maks. (m)	
		Pelimpah lama	Pelimpah baru	MR	SSR
60	4.373	-	421	El.137,1	El.136,9
500	6.541	-	783	El.138,0	El.139,7
PMF	9.707	1.166	775	El.138,3	El.139,5

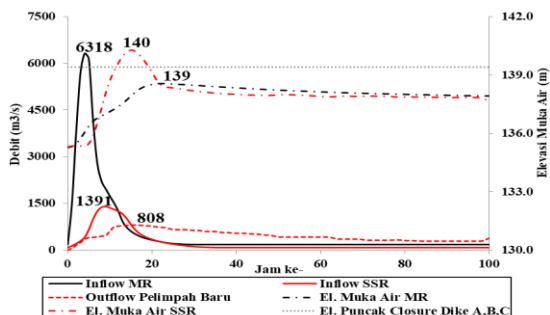


**Gambar 9.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 60 tahun kondisi lama



**Gambar 10.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 60 tahun kondisi baru

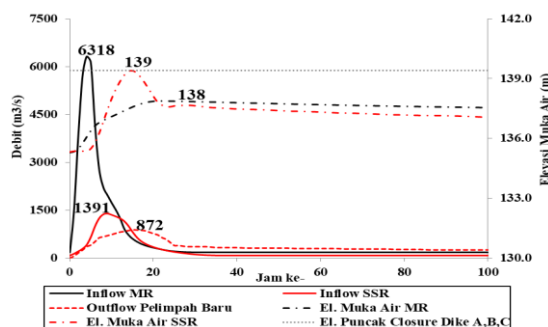
Saat banjir kala ulang 500 tahun dan CWL El.135,3 m, elevasi muka air MR adalah El.138,55 m (masih di bawah *closure dike*) dan elevasi muka air SSR adalah El.140,26 m (di atas *closure dike*). Elevasi muka air SSR telah melampaui batas elevasi muka air kritis El.139,1 m disajikan pada Gambar 11. Ini berisiko *overtopping*, sehingga perlu dilakukan modifikasi pola operasi pelimpah.



**Gambar 11.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun kondisi lama

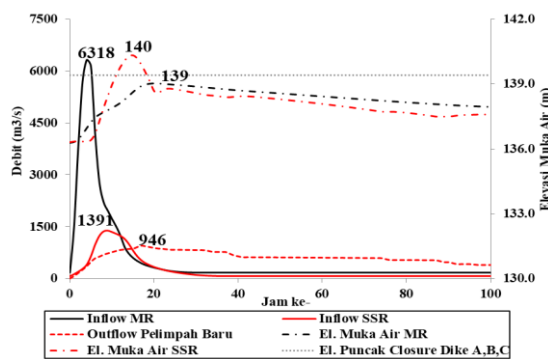
*Full opening gate* dilakukan ketika elevasi muka air waduk mencapai El.138,2 m. Untuk mengatasi permasalahan saat banjir kala ulang 500 tahun dengan CWL El.135,3 m, dilakukan percobaan untuk menentukan elevasi optimum *full opening gate*. Dari serangkaian percobaan, diperoleh *full opening gate* adalah pada saat elevasi muka air waduk El.136,3 m. Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa elevasi muka air maksimum MR adalah

El.137,9 m dan elevasi muka air maksimum SSR adalah El.139,4 m. Waduk Wonogiri aman terhadap *overtopping*.



**Gambar 12.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun kondisi lama dengan pola operasi modifikasi

Saat banjir kala ulang 500 tahun dan CWL El.136,3 m, elevasi muka air MR adalah El.139,08 m (di atas *closure dike*) dan elevasi muka air SSR adalah El.140,31 m (di atas *closure dike*). Elevasi muka air maksimum SSR telah melampaui batas elevasi muka air kritis El.139,9 m disajikan pada Gambar 13. Ini berisiko *overtopping*, sehingga perlu dilakukan modifikasi pola operasi waduk.

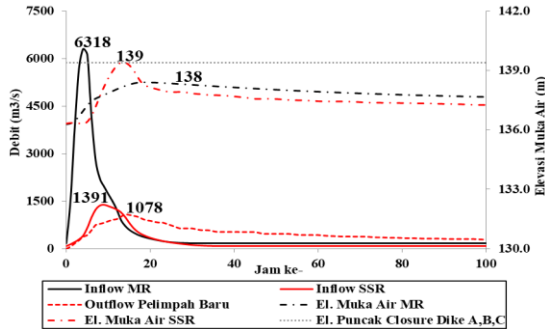


**Gambar 13.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun kondisi baru

*Full opening gate* dilakukan ketika elevasi muka air waduk mencapai El.139,1 m. Untuk mengatasi permasalahan saat banjir kala ulang 500 tahun dengan CWL El.136,3 m, dilakukan serangkaian percobaan untuk menentukan elevasi optimum *full opening gate*. Dari beberapa percobaan, diperoleh *full opening gate* optimum adalah pada elevasi muka air waduk El.137,2 m. Pada Gambar 14 tampak bahwa elevasi muka air maksimum MR adalah El.138,4 m dan elevasi muka air maksimum SSR adalah El.139,4 m. Waduk Wonogiri aman terhadap *overtopping*.

Tabel 4 menyajikan rangkuman hasil kajian perubahan CWL. Dari Tabel 4, tampak bahwa kenaikan CWL berakibat pada kenaikan debit *outflow* maksimum dan elevasi muka air

maksimum. Konsekuensi dari hal ini adalah kenaikan risiko bencana banjir di wilayah hilir Waduk Wonogiri. Elevasi muka air maksimum Waduk Wonogiri masih aman terhadap *overtopping closure dike* pada banjir kala ulang 60 tahun.



**Gambar 14.** Hasil penelusuran banjir di waduk untuk banjir kala ulang 500 tahun kondisi baru dengan pola operasi modifikasi

Namun, pada banjir kala ulang 500 tahun terdapat risiko *overtopping closure dike* karena elevasi muka air MR dan SSR sudah di atas elevasi puncak *closure dike* (El.139,4 m) dan elevasi muka air kritis (El.139,1 m untuk kondisi lama dan El.139,9 m untuk kondisi baru). Untuk mengantisipasi risiko tersebut, maka perlu modifikasi pola operasi Waduk

Wonogiri. Pola operasi yang disarankan adalah pengaturan ulang *full opening gate* pada pelimpah baru jika elevasi muka air SSR mencapai El.136,3 m untuk kondisi lama (CWL lama El.135,3 m) dan El.137,2 m untuk kondisi baru (CWL baru El. 136,3 m).

Tabel 5 dan 6 menyajikan perbandingan debit pelimpah dan elevasi muka air waduk menurut penelitian Pradipta (2014) dan kajian ini. Tabel 5 adalah untuk kondisi lama (CWL El. 135,3 m) dan Tabel 6 untuk kondisi baru (CWL El. 136,3 m). Kedua tabel menunjukkan adanya peningkatan debit *outflow* maksimum dan elevasi muka air maksimum pada kajian saat ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu (Pradipta, 2014). Ini menunjukkan pula adanya peningkatan risiko bencana banjir di wilayah hilir Waduk Wonogiri.

### Kesimpulan

Studi saat ini menunjukkan perubahan karakteristik hidrograf banjir *inflow* Waduk Wonogiri jika dibandingkan dengan studi Pradipta (2014). Perubahan banjir kala ulang 60 dan 500 tahun membawa konsekuensi terhadap elevasi muka air maksimum Waduk Wonogiri pada operasi pembukaan pintu *spillway* lama dan baru.

**Tabel 4.** Rekapitulasi hasil penelusuran banjir di waduk

Kala ulang (tahun)	Debit <i>inflow</i> maks. (m <sup>3</sup> /s)	Debit <i>outflow</i> maks. (m <sup>3</sup> /s)		Δ Debit <i>outflow</i> maks. (%)	Elevasi muka air maks. (m)				Δ El. muka air maks. (%)	
		Kondisi lama	Kondisi baru		Kondisi lama		Kondisi baru		MR	SSR
					MR	SSR	MR	SSR		
60	4.708	423	455	7,57	+137,24	+137,25	+138,74	+138,75	1,82	1,83
500	6.780	808	882	9,16	+138,55	+140,26	+139,08	+140,31	0,38	0,04

**Tabel 5.** Perbandingan hasil penelusuran banjir di waduk berdasarkan kondisi lama

Kala ulang (tahun)	Debit <i>outflow</i> maks. (m <sup>3</sup> /s)				Δ Debit <i>outflow</i> maks. (%)	Elevasi muka air maks. (m)				Δ El. muka air maks. (m)	
	Pradipta (2014)		Wijayanti (2020)			Pradipta (2014)		Wijayanti (2020)		MR	SSR
	Pelimpah lama	Pelimpah baru	Pelimpah lama	Pelimpah baru		MR	SSR	MR	SSR		
60	-	421	-	423	0,48	+137,1	+136,9	+137,24	+137,26	0,14	0,36
500	-	783	-	808	3,19	+138,0	+139,7	+138,55	+140,26	0,55	0,56
PMF	1.166	775	-	-	-	+138,3	+139,5	-	-	-	-

**Tabel 6.** Perbandingan hasil penelusuran banjir di waduk berdasarkan kondisi baru

Kala ulang (tahun)	Debit <i>outflow</i> maks. (m <sup>3</sup> /s)				Δ Debit <i>outflow</i> maks. (%)	Elevasi muka air maks. (m)				Δ El. muka air maks. (m)	
	Pradipta (2014)		Wijayanti (2020)			Pradipta (2014)		Wijayanti (2020)		MR	SSR
	Pelimpah lama	Pelimpah baru	Pelimpah lama	Pelimpah baru		MR	SSR	MR	SSR		
60	-	421	-	455	8,08	+137,1	+136,9	+138,74	+138,75	2,64	2,86
500	-	783	-	882	12,64	+138,0	+139,7	+139,08	+140,31	1,08	0,61
PMF	1.166	775	-	-	-	+138,3	+139,5	-	-	-	-



Studi kali ini menunjukkan bahwa Waduk Wonogiri berisiko *overtopping* ketika banjir 500-tahun datang. Oleh karena itu, CWL EL. +136,3 m tidak disarankan untuk diterapkan. Studi lebih lanjut terhadap CWL Waduk Wonogiri masih diperlukan dengan memperhatikan perubahan berbagai variabel pengaruh, antara lain debit banjir, operasi pintu *spillway* baru di SSR dan operasi pintu *spillway* lama di MR, dan kapasitas alur Bengawan Solo di hilir waduk.

## Daftar Pustaka

Amalia, A., & Wesli, W. (2021). Penelusuran banjir menggunakan metode level pool routing pada Waduk Kota Lhokseumawe. *Teras Jurnal*, 5(1).

Arlensietami, L. (2011). Kaji Ulang Operasi Pintu Spillway Waduk Wonogiri untuk Pengendalian Banjir di Wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu. *Tesis*. Magister Pengelolaan Bencana Alam Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Chow, V. T. (1988). *Applied Hydrology*. Mc, Graw-Hill Book Company. New York.

Masrevaniah, A. (2012). Penelusuran Banjir Waduk dengan Hydrograf Seri. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 1(1), 23-26.

Koei, N. (1982). *Manual for Operation and Maintenance for Wonogiri Multipurpose Dam Project*. Japan.

Koei, N. (2007). Laporan Akhir Studi Penanganan Sedimentasi di Waduk Bendungan Serbaguna Wonogiri. Indonesia.

Koei, N. (2016). Countermeasures for Sedimentation on Wonogiri Reservoir under Lower Solo River Improvement Project Phase-2 (JICA Loan No. IP-522) Study Report on Operation and Maintenance of Wonogiri Multipurpose DAM and Related Structures. The Republic of Indonesia.

Oktavia, S. R. (2013). Pengembangan Model Hidrologi untuk Estimasi Hidrograf Inflow Waduk Wonogiri. *Tesis*. Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Pradipta, A. G. (2014). Studi Pengaruh pembangunan Closure Dike Waduk Wonogiri terhadap Pola Operasi Waduk Periode Banjir. *Tesis*. Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Putra, L. A. (2015). Analisis efektivitas Waduk Ciawi menggunakan model SWAT sebagai upaya pengendalian banjir DAS Ciliwung. *Skripsi*. Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Renaningsih, S. (2017). Pengembangan perangkat lunak untuk simulasi penelusuran banjir wilayah Sungai Bengawan Solo Hulu. *Tesis*. Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Roviqoh, A. (2018). Simulasi bukaan pintu bendungan wlingi raya blitar untuk pengendalian banjir. *Tugas Akhir*. Program Studi S1 Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember, Jember.

Saleh, S. S., Musa, R., & As'ad, H. (2019). Kajian karakteristik aliran terhadap bangunan pelimpah pada saluran terbuka. *Teknik Hidro*, 12(2), 40-52.

Sibuea, P. R. A. (2018). Estimasi Probable maximum Precipitation (PMP) dan Probable Maximum Flood (PMF) dengan Menggunakan Model GSSHA (Studi Kasus Daerah Kajian DAS Citarum). *Tugas Akhir*. Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Sihotang, R., Hazmi, M., & Rahmawati, D. (2011). Analisis banjir rancangan dengan metode hss nakayasu pada bendungan gintung. *Proceeding PESAT (Psikologi, Ekonomi, Sastra, Arsitektur & Sipil)*, 4.

Styawan, A. P. (2017). Studi Kejadian dan Potensi Banjir Bandang oleh Keruntuhan DAM Alam di Nasiri. *Tesis*. Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Syahputra, I. (2015). Kajian hidrologi dan analisa kapasitas tampang Sungai Krueng Langsa berbasis HEC-HMS dan HEC-RAS. *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, 1(1), 15-28.

Wijaya, A. P. (2015). Pembuatan Perangkat Lunak untuk Mendukung Pengendalian Banjir DAS Bengawan Solo Hulu. *Tesis*. Program Studi Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.