

KAJIAN KAPASITAS PELIMPAH DAN TEROWONGAN KONDUIT BENDUNGAN SAWANGAN DALAM MEREDUKSI DEBIT PUNCAK BANJIR

Agus Aris Wibowo

Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

aa.wibowo87@gmail.com

Sri Sangkawati

Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

srisangkawati@gmail.com

Hari Nugroho

Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

harinugroho66@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menetapkan banjir desain dan kapasitas bangunan pelimpah serta untuk mengetahui efektivitas bangunan keluaran waduk (pelimpah dan Konduit) terhadap reduksi banjir secara maksimal. Lokasi wilayah penelitian adalah rencana pembangunan Bendungan Sawangan Kota Manado. Metode yang digunakan adalah melakukan perhitungan penelusuran banjir (flood routing) terhadap keluaran waduk (outlet) melalui pelimpah dan terowongan konduit (bottom outlet). Penelusuran banjir dilakukan dengan menggunakan hidrograf inflow banjir rancangan PMF Probable Maximum Flood (PMF) sehingga reduksi banjir maksimal dapat ditentukan pada rencana pola operasinya bila konduit dilengkapi dengan pintu. Optimalisasi reduksi debit puncak banjir dilakukan dengan skenario pelimpah tanpa konduit dan skenario pelimpah dengan konduit. Parameter yang dipergunakan adalah dengan menggunakan parameter lebar pelimpah, tinggi/elevasi pelimpah dan dimensi konduit, sedangkan ukuran/kontrol skenario optimalisasi adalah tinggi sisa jagaan banjir di pelimpah, rasio kapasitas pelimpah dan reduksi debit puncak banjir inflow-outflow Bendungan Sawangan. Hasilnya kajian dan analisis adalah perbandingan optimalisasi skenario 1 pelimpah tanpa konduit dan skenario 3 pelimpah dengan konduit diperoleh hasil reduksi debit puncak banjir PMF cukup signifikan yaitu skenario 1 reduksinya sebesar 19,0 % dan skenario 2 sebesar 36,6 %. Konfigurasi yang diperoleh adalah elevasi puncak pelimpah pada elevasi +35,0 m, lebar pelimpah 20,0 m, dan 2 buah konduit diameter 5,0 m terbuka penuh (open fully). Reduksi debit puncak banjir PMF dihasilkan dari inflow sebesar 1260,8 m³/det menjadi outflow sebesar 798,98 m³/det atau sebesar 36,6 % dengan tinggi jagaan sisa 1,79 m dan rasio kapasitas pelimpah 63,4 %.

Kata kunci: Bendungan, Kapasitas pelimpah, Reduksi banjir

Abstract

This study aims to determine the design flood and spillway capacity and to determine the effectiveness of reservoir outlet structures (spillways and conduits) for maximum flood reduction. The location of the research area is the construction plan of Sawangan Dam, Manado City. The method used is to calculate flood routing to the reservoir output (outlet) through spillway and conduit tunnel (bottom outlet). Flood routing is carried out using the PMF Probable Maximum Flood (PMF) design flood inflow hydrograph so that maximum flood reduction can be determined in the operation pattern plan if the conduit is equipped with a door. Optimisation of flood peak discharge reduction was carried out with a spillway scenario without a conduit and a spillway scenario with a conduit. The parameters used are spillway width, spillway height/elevation and conduit dimensions, while the measures/controls of the optimisation scenario are the residual flood height at the spillway, the ratio of spillway capacity and the reduction of peak flood discharge of Sawangan Dam inflow-outflow. The result of the study and analysis is the comparison of the optimisation of scenario 1 spillway

*without conduit and scenario 3 spillway with conduit, the reduction of PMF peak flood discharge is quite significant, namely scenario 1 reduction by 19.0% and scenario 2 by 36.6%. The configuration obtained is the spillway peak elevation at +35.0 m, the spillway width is 20.0 m, and 2 conduits with a diameter of 5.0 m are fully open. Reduction of PMF flood peak discharge is generated from inflow of 1260.8 m³/det to outflow of 798.98 m³/det or by 36.6% with a residual guard height of 1.79 m and a spillway capacity ratio of 63.4%.
Keywords: Dam, Spillway capacity, Flood reduction*



© Author(s) 2024

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu fenomena hidrometeorologis yang sering terjadi di sebagian wilayah Indonesia pada musim hujan. Dengan karakteristik hujan yang terjadi untuk durasi lama, atau terjadi hujan durasi singkat tetapi dengan intensitas tinggi (lebat), maka hal ini dapat mengakibatkan terjadinya banjir.¹ Banjir yang terjadi di daerah perkotaan (permukiman padat) akan menjadi suatu masalah yang perlu mendapat perhatian dan diupayakan solusi pemecahannya.² Salah satu langkah yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi dan mengatasi terjadinya banjir akibat meluapnya air sungai adalah upaya struktur dengan membuat bangunan pengendali banjir di bagian hulu DAS sebagai penampung sementara aliran banjir ke arah hilir DAS.

Kota Manado yang merupakan kota di daerah pesisir dan identik dengan Kota Jakarta hampir siap tahun menjadi kota langganan banjir. Kejadian banjir pada musim hujan ini tentunya akan menyebabkan beberapa ruas jalan dan rumah penduduk pada wilayah sempadan akan tergenang air, dan hal ini tentu saja mengganggu lalu lintas, kerugian materi, penyakit dan dampak lainnya yang juga merugikan. Wilayah Kota Manado dialiri oleh sungai Tondano dengan panjang 39,9 km dimana bagian hilirnya sepanjang ± 7 km melewati Kota Manado bersama anak sungainya yakni sungai Tikala dengan panjang 23,6 km Sungai-sungai ini sangat potensial menyebabkan banjir di Kota Manado. Pada bulan Maret Tahun 2020 banjir kembali melanda Kota Manado, dimana banjir pada waktu itu merendam 7 ke tujuh kelurahan di Kecamatan Tuminting, Kota Manado, yaitu yakni Kelurahan Mahawu, Sumompo, Tuminting, Karangria, Kampung Islam, Tumumpa I, dan Tumumpa II.

Dalam rangka mengantisipasi dan upaya penanggulangan kejadian banjir di Kota Manado secara terintegrasi, Balai Wilayah Sungai Sulawesi 1 Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat telah melakukan upaya-upaya, antara lain studi komprehensif pengendalian banjir Kota Manado pada tahun 2011 oleh JICA. Salah satu

¹ Chay Asdak, *Hidrologi dan Pengelolaan DAS* (Yogyakarta: University Press, Gadjah Mada, 2005).

² Santosh G. Kumar, *Irrigation engineering and Hydraulic Structures* (New Delhi: Khana Publisher, 2001).

rekomendasi studi tersebut pada Sub DAS Tikala diperlukan pembangunan bendungan untuk mereduksi banjir di Kota Manado.

Berdasarkan hal di atas maka Bendungan Sawangan di hulu Kota Manado direncanakan sebagai bendungan kering (dry dam) sebagai pengendali banjir dan diharapkan dapat mereduksi volume banjir yang mengalir ke kota Manado. Bendungan terletak di bagian hulu Sungai Tikala yang secara administrasi berada di Desa Sawangan - Kec. Tombulu, Kabupaten Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara.

Maksud dari penelitian ini adalah mengkaji kemampuan fungsi Bendungan Sawangan sebagai waduk pengendali banjir dalam mereduksi debit puncak banjir Sungai Tikala. Sedangkan tujuannya adalah menetapkan banjir desain dan kapasitas bangunan pelimpah serta untuk mengetahui efektivitas bangunan keluaran waduk (pelimpah dan konduit) terhadap reduksi banjir secara maksimal. Penelitian ini diharapkan dapat memiliki kegunaan untuk memberikan pertimbangan dalam menyusun secara rinci pola operasi waduk sawangan pada saat terjadi banjir.

Terkait dengan kajian bendungan kering, Isma Fajar dkk., melakukan kajian bendungan kering dalam penelitiannya “Studi Optimasi Pola Operasi Pintu Bendungan Ciawi Sebagai Fungsi Pengendalian Banjir”. Bendungan Ciawi di Kabupaten Bogor adalah salah satu bendungan kering (dry dam) yang telah dibangun Kementerian PUPR tahun 2017-2023. Bendungan Ciawi sebagai bangunan pereduksi banjir dapat mengurangi debit puncak banjir di area Sungai Ciliwung yang mengalir ke wilayah DKI Jakarta. Upaya untuk mengoptimalkan manfaat bendungan sebagai pengendali banjir adalah dari fungsi tampungan dan pola operasi bendungan, dalam perencanaan desain bendungan ini operasi waduk tanpa memanfaatkan pintu konduit sebagai fungsi pengendali banjir serta mampu mereduksi banjir dengan Periode Ulang 25 tahun sebesar 54,64%.³

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian studi kasus untuk perencanaan bendungan Kering (*dry dam*) di Sungai Tikala.

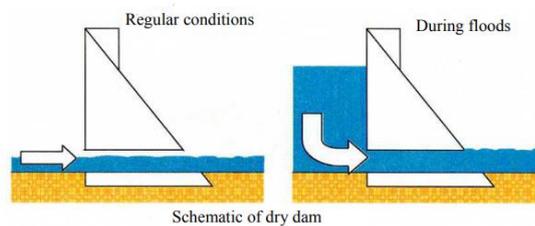
Data teknis

Nama sungai	: Sungai Tikala
Luas DAS	: 76,4 km ²
Tipe bendungan	: Bendungan urugan
Tinggi bendungan maks	: 35,0 m
Elevasi puncak bendungan	: + 40,0 m

³ Isma Fajar dan Teddy W. Sudinda, *Studi Optimasi Pola Operasi Pintu Bendungan Ciawi Sebagai Fungsi Pengendalian Banjir* (Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia, 2022).

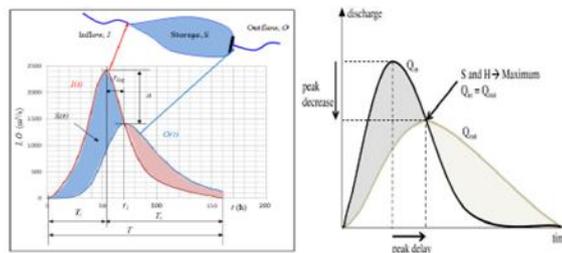
Elevasi Dasar sungai : + 12,5 m
Curah Hujan PMP : 604,4 mm
Debit Banjir PMF (*Inflow*) : 1260,8 m³/det

Bendungan kering (*dry dam*) adalah bangunan bendung yang dibangun dengan satu tujuan untuk mengontrol banjir. Umumnya tidak direncanakan dengan pintu air, dan ditujukan untuk mengalirkan air dengan bebas selama kondisi normal melalui saluran bawahnya pada Gambar 1.⁴ Bendungan penahan banjir ini dapat direncanakan dengan memasang pintu pengatur atau tanpa pintu pengatur pada bottom outlet (saluran keluar bawah). Pintu pengatur yang dipasang pada saluran keluar bawah menyesuaikan dengan operasi pengendalian banjir.⁵



Gambar 1. Skematik Bendungan Kering (*dry dam*).⁶

Pengendalian banjir dengan pembangunan waduk atau tampungan alami (retarding basin atau bozem) bertujuan untuk menurunkan debit puncak banjir atau mereduksi debit banjir maksimum melalui tampungan yang dibuat secara buatan atau alami.⁷



Gambar 2. Hidrograf Inflow dan Outflow Penelusuran Banjir pada Waduk Melalui Fasilitas Outlet.⁸

⁴ Tetsuya Sumi, "Designing and Operating of Flood Retention 'Dry' Dams in Japan and USA," *Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Kyoto University Katsura 4* (2008).

⁵ E. Kuiper, *Water Resources Development Planning Engineering and Economics* (New York: Springer Science, 1965).

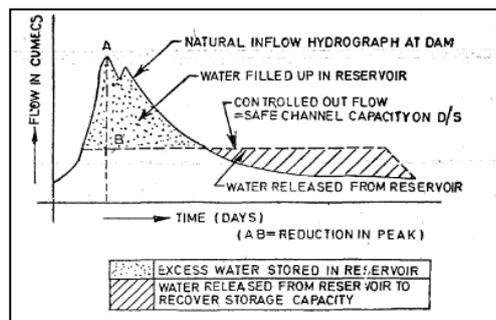
⁶ Sumi, "Designing and Operating of Flood Retention 'Dry' Dams in Japan and USA."

⁷ Cristina Sorana Ionescu dan Daniela Elena Gogoase Nistoran, "Influence of Reservoir Shape upon the Choice of Hydraulic vs. Hydrologic Reservoir Routing Method," *E3S Web of Conferences* 85 (2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198507001>.

⁸ Ionescu dan Nistoran.

Bendungan Masudagawa direncanakan dengan dua saluran pengeluaran bawah (bottom outlet) tanpa pintu dan bangunan pelimpah (*spillway*). Untuk peredam energi, direncanakan kolam penenang (stilling basin) tipe conventional hydraulic jump dengan ambang ujung dirancang di mana dua celah dipasang untuk membilas sedimen sendiri dari tempat kolam penenang (stilling basin). Sedimen aliran masuk dapat mengalir secara alami melalui saluran bottom outlet namun direncanakan pula dengan kapasitas tampungan mati (*dead capacity*) sebesar 250.000 m³. Saluran keluar bawah dan beberapa bagian stilling basin dilindungi dengan pelat baja tahan karat terhadap kerusakan abrasi.

Prinsip dasar analisis reduksi puncak banjir tersebut dapat dihitung dengan persamaan kontinuitas massa aliran (*mass storage equation*) dengan metode penelusuran banjir (*flood routing*) dalam bentuk sketsa reduksi puncak banjir berupa hidrograf inflow dan outflow pada Gambar 3.⁹ Untuk Hidrograf Banjir Inflow dan Outflow pada Waduk dengan Outflow Melalui Terowongan dan Pelimpah Secara Simultan dapat dilihat pada Gambar 4.¹⁰

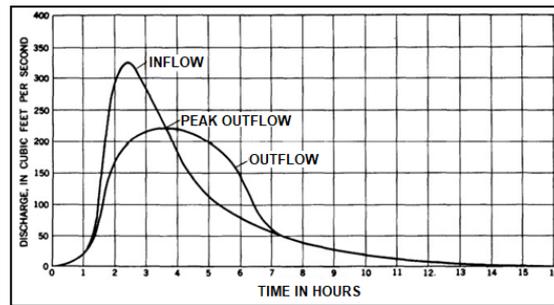


Gambar 3. Hidrograf Banjir Inflow dan Outflow pada Waduk dengan Outflow Melalui Pelimpah dengan Pintu.¹¹

⁹ S. K. Garg, *Irrigation Engineering and Hydraulic Structure* (India: Khanna Publishers, 1976).

¹⁰ Richard G. Godfrey Carter, *Storage and Flood Routing* (Storage and Flood Routing, Geological Survey (U.S.). Publisher, U.S. Government Printing Office, Original from, the University of California, 1960).

¹¹ Garg, *Irrigation Engineering and Hydraulic Structure*.



Gambar 4. Hidrograf Banjir Inflow dan Outflow pada Waduk dengan Outflow Melalui Terowongan dan Pelimpah Secara Simultan.¹²

Penelusuran banjir Melalui Terowongan Konduit

Penelusuran banjir melalui terowongan atau lubang bawah orifice pada analisis pengendalian banjir dapat diaplikasikan pada perencanaan waduk kering atau bendungan kering (*dry dam*).¹³

Pada dasarnya, bendungan terus-menerus menyimpan air sungai di waduk untuk memasok air atau untuk pengisian ulang.¹⁴ Namun, bendungan kering, yang memiliki sistem pembuangan di dasar sungai dan yang menyimpan air hanya selama banjir, dan biasanya tidak terendam.¹⁵ Prinsip dasar perhitungan penelusuran banjir melalui terowongan (*flood routing*) adalah sebagai berikut:

$$I - O = (ds / dt) \quad (1)$$

dengan:

I = debit yang masuk pada waduk (m³ / dt)

Q = debit yang keluar pada waduk (m³ / dt)

(ds/dt) = perubahan tampungan tiap periode waktu (m³/det)

ΔS = volume tampungan dihitung di atas inlet terowongan (m³)

Hidrolika Melalui Terowongan Konduit

Faktor-faktor yang bergabung dalam perhitungan aliran alam di terowongan termasuk variabel seperti kemiringan, ukuran, bentuk, panjang, dan kekasaran permukaan dari terowongan

¹² Carter, *Storage and Flood Routing*.

¹³ Neil Grigg, *Water Resources Management: Principles, Regulations, and Cases* (McGraw-Hill, 1996).

¹⁴ Hideo Oshikawa, Tomohiko Imamura, dan Toshimitsu Komatsu, "Study on the Flood Control Ability of a Dry Dam Used as a Flood Retarding Basin in a River," *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 67, no. 4 (14 Maret 2012), https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.I_667.

¹⁵ F. Lempérière, "The role of dams in the XXI century Achieving a sustainable development target" 13 (25 Mei 2006), <https://doi.org/10.1201/b16818-165>.

serta bentuk dan tinggi pemasukan dan pengeluaran.¹⁶ Pengaruh gabungan dari faktor-faktor ini akan menentukan karakteristik debit yang mengalir di terowongan. Hal ini berkaitan dengan hubungan *head-discharge*.

Persamaan kapasitas aliran tekan adalah:

$$Q = C_d \cdot A \cdot v \quad (2)$$

$$v = \sqrt{2g} \left[\frac{H + \sin \theta - \frac{D}{2}}{1 + K_e + \frac{n^2 L}{R^{4/3}}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$Q = A \cdot \sqrt{2g} \left[\frac{H + L \sin \theta - \frac{D}{2}}{1 + K_e + \frac{n^2 L}{R^{4/3}}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Dimana:

- Q = debit (m³/det)
- V = kecepatan aliran (m/det)
- A = luas penampang (m²)
- C_d = koefisien debit = 0,80
- g = 9,81 m/det²
- H = tinggi m.a di depan inlet konduit (m)
- L = panjang konduit (m)
- D = diameter konduit (m)
- n = angka Manning (n beton = 0,012-0,020)
- R = radius hidrolis (m)
- K_e = total koefisien kehilangan energi
- K_e = K_i + K_b + K₀
- K_i = koefisien kehilangan energi pada inlet = 0,50
- K_b = koefisien kehilangan energi pada belokan
- K₀ = koefisien kehilangan energi pada outlet = 1,00

Hidrolika Pelimpah

Salah satu komponen terpenting dari bendungan adalah pelimpah, berfungsi sebagai pembuang limpasan dari air waduk yang tidak tertampung (*overflow*). Direncanakan untuk

¹⁶ M. R. Najafi dkk., "Numerical Modeling of Flow Condition in a Bottom Outlet," dalam *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering*, ed. oleh Changkuan Zhang dan Hongwu Tang (Berlin, Heidelberg: Springer, 2009), https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0_313.

memperbesar debit air yang akan melintasi bangunan pelimpah.¹⁷ Persamaan hidrolika yang dapat digunakan untuk perencanaan dimensi bangunan pelimpah sebagai berikut:

$$Q = C.B.H^{3/2} \quad (5)$$

dengan:

- Q = debit banjir rencana (m³/det)
 C = koefisien debit bangunan pelimpah (1,7–2,2 m^{1/2}/dt),
 B = lebar bangunan ambang pelimpah (m),
 H = tinggi energi di atas ambang bangunan pelimpah (m).

Penentuan Debit Banjir Rencana dan Kapasitas Pelimpah

Besarnya debit banjir rencana pada bendungan baru dan kapasitas pelimpahnya mengacu pada SNI No. 3432 Tahun. 2020, “Tatacara Penetapan Banjir Desain dan Kapasitas Pelimpah untuk Bendungan”. Beberapa pertimbangan teknis yang diperlukan antara lain:

- Tipe dan ukuran bendungan.
- Tingkat konsekuensi besar atau tingkat konsekuensi kecil, berdasarkan penentuan kelas bahaya akibat keruntuhan bendungan yang ditentukan berdasarkan jarak lokasi dan jumlah penduduk terkena risiko (PenRis).

Besarnya banjir desain pada bendungan baru ditentukan berdasarkan Tabel 1. Kapasitas pelimpah total pada bendungan besar tipe urukan ditentukan yaitu minimum 35% dari banjir desain. Sedangkan untuk bendungan kecil tipe urukan tidak ada batas minimum. Kapasitas pelimpah total bendungan tipe beton adalah sama untuk semua ukuran bendungan dan tinggi bendungan ditentukan sebesar 1,25 x Q₁₀₀. Tubuh bendungan tipe beton dapat terlimpasi dengan ketinggian tertentu dan lama banjir tertentu, sepanjang tidak menggerusi tumpuan bendungan.

Tabel 1 Matriks Kelas Bahaya Berdasarkan Jumlah Penduduk dan Jarak Yang Terkena Risiko Keruntuhan Bendungan

Penduduk Terkena Risiko (PenRis) Jumlah Orang Kumulatif	Kelas Bahaya (Jarak dari bendungan, km)				
	0-5	0-10	0-20	0-30	0->30
0	1	1	1	1	1
1-100	3	3	2	2	2
101-1000	4	4	4	3	3
>1000	4	4	4	4	4

Keterangan:

Kelas bahaya rendah = 1

¹⁷ Lily Montarcih Limantara, *Rekayasa Hidrologi*, Edisi Revisi (Penerbit Andi Offset, 2018).

Kelas bahaya sedang = 2
 Kelas bahaya tinggi = 3
 Kelas bahaya sangat tinggi = 4

Tabel 2 Debit Banjir Desain Bendungan Baru

Tipe Bendungan	Ukuran Bendungan	Tinggi Bendungan (meter)	Bendungan Baru	
			Tingkat konsekuensi besar Banjir Desain (inflow)	Tingkat konsekuensi kecil Banjir Desain (inflow)
Bendungan Urukan	Kecil	$h < 5$ m	Q_{100}	Q_{100}
		$5 \leq h < 10$ m	Q_{1000} atau $0,5BMBJ^*$	Q_{500}
		$10 \leq h < 15$ m	Q_{1000} atau $0,5BMBJ^*$	Q_{500}
	Besar	$15 \leq h < 40$ m	BMBJ	$0,5BMBJ^*$
		$40 \leq h < 80$ m	BMBJ	$0,75BMBJ^*$
Bendungan Beton		$h \geq 80$ m	BMBJ	BMBJ
			Q_{1000}	Q_{1000}

Keterangan:

1. Q_{1000} atau $0,5BMBJ$: dipilih nilai yang terbesar ($0,5$ BMBJ bukan diartikan sebagai $\frac{1}{2}$ dari nilai BMBJ)*
2. Kapasitas pelimpah (outflow) jenis ukuran bendungan urukan kecil tidak ada batas minimal
3. Kapasitas pelimpah (outflow) untuk jenis ukuran bendungan besar ditetapkan minimal 35% dari Banjir desai (inflow)
4. Q_{100} : Debit puncak banjir dengan periode ulang 100 tahun
5. Q_{500} : Debit puncak banjir dengan periode ulang 500 tahun
6. Q_{1000} : Debit puncak banjir dengan periode ulang 1000 tahun
7. Kapasitas pelimpah (outflow) Tipe Bendungan Beton adalah 1,25 dari Q_{100}
8. h : tinggi bendungan

Skenario Optimalisasi

Dalam penelusuran banjir yang menjadi variabel terpenting adalah debit inflow dan outflow. Saat debit banjir (inflow) masuk ke dalam tampungan waduk sampai kapasitas tampungan sementara yaitu sampai elevasi banjir di atas ambang. Elevasi banjir di atas pelimpah akan semakin naik sampai elevasi maksimum di atas ambang pelimpah. Kemudian elevasi muka air banjir akan turun sampai debit inflow sama dengan debit outflow.¹⁸ Tampungan waduk di sini berfungsi untuk mereduksi banjir. Hidrograf *outflow* akan tergantung pada ukuran waduk dan besarnya kapasitas banjir yang tersedia.

¹⁸ Roslan Zainal Abidin, Mohd Sofiyan Sulaiman, dan Naimah Yusoff, "Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia," *International Soil and Water Conservation Research* 5, no. 1 (1 Maret 2017), <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.002>.

Konsep Bendungan Sawangan sebagai bendungan kering (*dry dam*) memiliki outlet berupa konduit dengan dimana luas dari outlet tersebut dibuat lebih kecil dari sungai eksisting sehingga dalam kondisi tertentu akan mereduksi air banjir. Bendungan sawangan akan memiliki dua jenis outlet pada yaitu melalui *bottom outlet* dan pelimpah. *Bottom outlet* memberikan fungsi “*bottle neck*” pada debit banjir namun berfungsi sebagai saluran alami pada saat debit rendah, sedangkan pelimpah digunakan sebagai fungsi darurat apabila debit banjir tidak mampu ditampung pada waduk bendungan untuk menghindari *overtopping*.

Simulasi kapasitas banjir bangunan pelimpah dengan parameter lebar dan elevasi pelimpah dilakukan dengan tujuan mendapatkan lebar dan elevasi pelimpah yang optimal dalam kontribusinya mereduksi banjir.¹⁹ Kapasitas debit banjir *outflow* keseluruhan dilakukan optimalisasi dengan simulasi adanya *bottom outlet* yang berupa konduit dan kapasitas debit banjir pelimpah untuk meningkatkan efektivitas reduksi banjir dengan menentukan kapasitas konduitanya.

Optimalisasi pelimpah dan terowongan konduit (*bottom outlet*) waduk untuk mendapatkan reduksi puncak banjir maksimum akan dilakukan dengan beberapa skenario konfigurasi (**Tabel 3**) dan dengan tinggi bendungan yang sudah ditetapkan sebagai berikut:

- a. Optimalisasi bangunan pelimpah tanpa konduit dengan melakukan optimalisasi elevasi puncak pelimpah dan lebar pelimpah, sehingga akan didapatkan elevasi puncak pelimpah dan lebar pelimpah paling optimal dalam mereduksi debit puncak banjir rencana (PMF).
- b. Optimalisasi bangunan pelimpah dengan konduit dengan melakukan optimalisasi jumlah dan ukuran konduit sehingga akan diperoleh jumlah dan ukuran konduit yang paling optimal dalam mereduksi debit puncak banjir.

Tabel 3. Skenario optimalisasi dan konfigurasi Debit banjir Desain Pelimpah dan Konduit

No	Parameter	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
1	Hidrograf Debit Banjir Inflow			
1a	PMF	■	■	■
1b	Debit Banjir Desain (T2, T5, T10, T25, T50, T100)			
2	Lebar Pelimpah			
2a	Lebar Pelimpah (20m, 30m, 40m)	■		
2b	Lebar Pelimpah hasil optimalisasi skenario 1'		■	■
3	Elevasi Puncak Pelimpah			
3a	Elevasi Puncak Pelimpah (E1. + 20, + 25, + 30, +32, +35)	■		
3b	Elevasi Puncak Pelimpah hasil optimalisasi skenario 1'		■	

¹⁹ F. Lempérière, J.P. Vigny, dan L. Deroo, “Most dams deserve two spillways,” *Hydropower & Dams* 25, no. 6 (2018).

No	Parameter	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3
3c	Elevasi Puncak Pelimpah hasil optimalisasi skenario 2+ (5,0m)			■
4	Bottom Outlet Conduit			
4a	Diameter Conduit 2x (3,0 m, 3,5 m, 4,0 m, 4,5 m, 5,0 m)			■
4b	Diameter Conduit hasil optimalisasi skenario 3			
4c	Diameter Conduit ditetapkan 2 x 5,0 m		■	
5	Operasi Conduit			
5a	2 Conduit terbuka (<i>open fully</i>)		■	■
5b	Conduit 1 terbuka (1 conduit pintu)			
6	Hasil Optimasi	Lebar dan elevasi puncak pelimpah, tinggi sisa jagaan banjir pelimpah, rasio kapasitas pelimpah dan reduksi puncak banjir	Tinggi sisa jagaan banjir pelimpah, rasio kapasitas pelimpah dan reduksi puncak banjir	Diameter conduit, tinggi sisa jagaan banjir pelimpah, raso kapasitas pelimpah dan reduksi puncak banjir

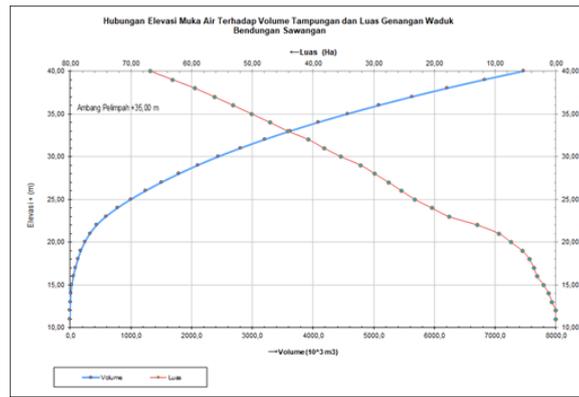
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Debit Banjir Rencana

Dengan mengacu pada pada SNI 3432 Th. 2020_”Tata cara Penetapan Banjir Desain dan Kapasitas Pelimpah untuk Bendungan”, maka Bendungan Sawangan yang direncanakan merupakan bendungan baru tipe urugan dengan tinggi 35,0 maka dapat dikatakan merupakan bendungan besar ($15 \text{ meter} \leq \text{tinggi} < 40 \text{ meter}$). Selain itu dikarenakan daerah hilirnya merupakan daerah perkotaan dengan jarak $\pm 5 \text{ km}$ maka tingkat konsekuensi genangan banjir nya juga termasuk tingkat konsekuensi besar. Untuk itu Banjir Desain (*Inflow*) untuk melakukan optimalisasi bangunan pelimpah dipergunakan banjir desain PMF.

Kurva Kapasitas Tampungan Waduk

Berdasarkan hasil survey Topografi di daerah genangan Waduk Sawangan maka didapatkan hubungan antara elevasi, luas dan volume waduk Sawangan seperti disajikan pada Gambar 4. di bawah ini.

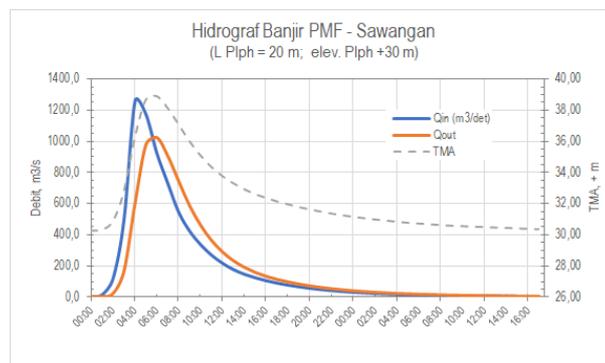


Gambar 5. Kurva Kapasitas Tampungan Waduk Sawangan

Skenario 1 Optimalisasi Pelimpah Tanpa Konduit

Untuk optimalisasi fungsi bendungan Sawangan sebagai *dry dam*, analisis penelusuran banjir skenario 1 ini dilakukan dengan hidrograf debit banjir PMF dan dengan skenario mengubah-ubah (*trial and error*) konfigurasi lebar pelimpah dan elevasi puncak pelimpah tanpa adanya bangunan *oulet konduit* di dasarnya bendungan. Dengan tinggi bendungan ditetapkan pada elevasi +40 m atau tinggi 35 m maka lebar pelimpah yang digunakan untuk coba-coba optimalisasi awal adalah 20 m, 30 m dan 40 m. Sedangkan Elevasi puncak pelimpah di coba-coba dengan elevasi + 20 m, + 25 m, + 30 m, +32 m dan + 35 m.

Penelusuran banjir yang dilakukan, maka dapat diketahui hasilnya bahwa hampir di semua elevasi pelimpah yang > + 30 m akan terjadi *overtopping* meletati puncak bendungan. Sehingga dalam kaitannya dengan reduksi puncak banjir maka yang paling optimal diperoleh hasil pelimpah akan ditempatkan pada elveasi +30 m dengan lebar pelimpah 20 m. Reduksi puncak banjir yang diperoleh sebesar 19,0 %. Ratio kapasitas pelimpah diperoleh sebesar 81,0 % dengan tinggi sisa jagaan 1,06 m.



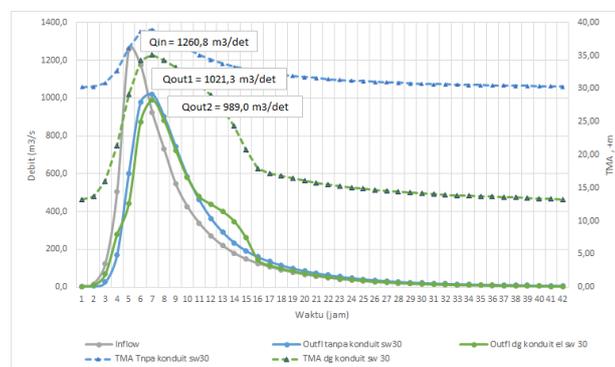
Gambar 6. Hidrograf Banjir PMF HSS Nakayasu dengan Lebar pelimpah 20 m pada elevasi +30 m (tanpa Konduit)

Dari hasil optimalisasi skenario ini maka dapat disimpulkan bahwa lebar pelimpah sudah cukup optimal namun reduksi puncak banjirnya masih belum diperoleh besaran yang cukup signifikan. Hal ini dapat terjadi karena volume banjir hanya mengandalkan kapasitas pelimpah dan kondisi muka air waduk pada kondisi muka air normal (MAN), sehingga perlu dilakukan optimalisasi lagi apabila inflow banjir dilakukan pada saat waduk kondisi kosong (kering) dan inflow dialirkan melalui *bottom outlet* berupa terowongan konduit (Skenario 3).

Skenario 2 Optimalisasi Pelimpah Skenario 1 Dengan Diameter Konduit Skenario 3 (Cheking)

Guna meningkatkan reduksi puncak banjirnya dari 19,0 % pada skenario 1 khususnya pada tinggi jagaan di bangunan pelimpah terhadap elevasi puncak bendungan maka untuk selanjutnya akan dilakukan optimalisasi pengecekan ulang (Skenario 2) dengan menambahkan bangunan outlet berupa konduit. Konduit berdasarkan hasil optimalisasi skenario 3 sebanyak 2 buah dengan diameter 5,0 m. Hasil yang diperoleh pada Tabel 4.31. ternyata dengan adanya tambahan konduit dapat meningkatkan reduksi puncak banjirnya sebesar 21,6 % dengan ratio kapasitas pelimpah sebesar 0,78.

Optimalisasi skenario 2 ini dapat dihasilkan bahwa sisa tinggi jagaan masih sebesar 4,92 m. Dengan tinggi jagaan sisa ini maka disimpulkan tinggi elevasi pelimpah masih bisa dioptimalkan dengan melakukan optimalisasi selanjutnya.



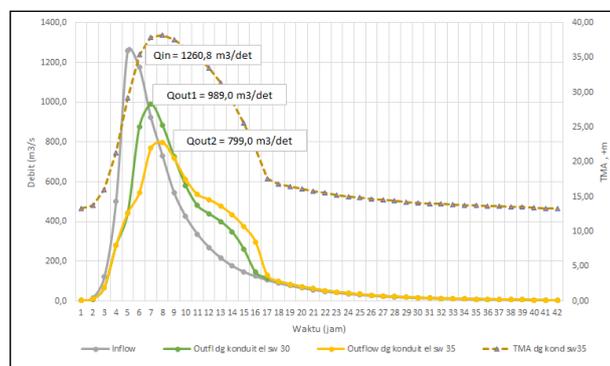
Gambar 7. Perbandingan Hidrograf Banjir PMF Lebar pelimpah 20 m pada elevasi pelimpah +30 m tanpa Konduit dan dengan Konduit (2 buah, Dimater 5 m)

Skenario 3 Optimalisasi Pelimpah Dengan Konduit

Dari hasil penelusuran banjir yang dilakukan pada Tabel 4.32. diperoleh hasil paling optimal pada Elevasi + 30 m dengan lebar pelimpah 20,0 m, dengan reduksi puncak banjir sebesar 19,0 % bangunan pelimpah tanpa konduit dan meningkat sebesar 21,6 % apabila ditambahkan dengan 2 buah konduit berdiameter 5,0 m. Untuk selanjutnya akan ditambahkan tahap optimalisasi

lagi reduksi puncak banjirnya dengan menambahkan bangunan outlet berupa konduit. Optimalisasi reduksi puncak banjir PMF pada kapasitas pelimpah dengan tinggi bendungan yang sudah ditetapkan sebelumnya pada elevasi + 40 m, selanjutnya dilakukan pula dengan menetapkan elevasi puncak pelimpah pada Elevasi + 35 m karena tinggi jagaan sisa masih tersedia sebesar 4,92 m. Jumlah Konduit dipertimbangan dengan lebar dasar Sungai maka ditentukan dengan sebanyak 2 buah. Dimensi konduit akan di coba-coba dengan diameter bervariasi dari 3,0 m hingga 5,0 m.

Dari hasil penelusuran banjir maka dapat diketahui bahwa reduksi puncak banjir paling optimal diperoleh sebesar **36,6 %** atau meningkat sebesar 15 %. Konfigurasi yang diperoleh adalah lebar pelimpah 20 m, elevasi puncak pelimpah pada +35,0 dan tinggi jagaan sisa 1,79 m atau pada elevasi +38,21 m dan rasio kapasitas pelimpah sebesar 63,4 %.



Gambar 8. Perbandingan Hidrograf Banjir PMF Lebar pelimpah 20 m pada elevasi Pelimpah +30 m dan + 35,0 dengan Konduit (2 buah, Dimater 5 m).

KESIMPULAN

Dari kajian optimalisasi di atas maka dapat disimpulkan bahwa perbandingan optimalisasi skenario 1 pelimpah tanpa konduit dan skenario 3 pelimpah dengan konduit diperoleh hasil reduksi debit puncak banjir PMF cukup signifikan yaitu skenario 1 reduksinya sebesar 19,0 % dan skenario 2 sebesar 36,6 %. Hasil optimalisasi 3 (tiga) skenario pelimpah dan *bottom outlet* berupa konduit dengan debit inflow PMF maka konfigurasi skenario 3 adalah paling efektif guna mereduksi debit puncak banjir dengan konfigurasi elevasi puncak pelimpah pada elevasi +35,0 m, lebar pelimpah 20,0 m, dan 2 buah konduit diameter 5,0 m terbuka penuh (*open fully*). Konfigurasi skenario 3 dengan pelimpah dan konduit sebagai pengeluaran waduk maka dapat mereduksi debit puncak banjir PMF dari 1260,8 m³/det menjadi 798,98 m³/det atau sebesar 36,6 % dengan tinggi jagaan sisa 1,79 m dan rasio kapasitas pelimpah menjadi 63,4 %.

SARAN DAN REKOMENDASI

Dari hasil kajian hasil optimalisasi dan efektifitas reduksi debit puncak banjir pada penelitian ini dapat menjadi kajian lebih lanjut dalam melakukan analisis pola optimalisasi pintu dan operasinya Bendungan Sawangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Roslan Zainal, Mohd Sofiyon Sulaiman, dan Naimah Yusoff. "Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia." *International Soil and Water Conservation Research* 5, no. 1 (1 Maret 2017). <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.002>.
- Asdak, Chay. *Hidrologi dan Pengelolaan DAS*. Yogyakarta: University Press, Gadjah Mada, 2005.
- Carter, Richard G. Godfrey. *Storage and Flood Routing*. Storage and Flood Routing, Geological Survey (U.S.). Publisher, U.S. Government Printing Office, Original from, the University of California, 1960.
- Fajar, Isma, dan Teddy W. Sudinda. *Studi Optimasi Pola Operasi Pintu Bendungan Ciawi Sebagai Fungsi Pengendalian Banjir*. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia, 2022.
- Garg, S. K. *Irrigation Engineering and Hydraulic Structure*. India: Khanna Publishers, 1976.
- Grigg, Neil. *Water Resources Management: Principles, Regulations, and Cases*. McGraw-Hill, 1996.
- Ionescu, Cristina Sorana, dan Daniela Elena Gogoase Nistoran. "Influence of Reservoir Shape upon the Choice of Hydraulic vs. Hydrologic Reservoir Routing Method." *E3S Web of Conferences* 85 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198507001>.
- Kuiper, E. *Water Resources Development Planning Engineering and Economics*. New York: Springer Science, 1965.
- Kumar, Santosh G. *Irrigation engineering and Hydraulic Structures*. New Delhi: Khana Publisher, 2001.
- Lempérière, F. "The role of dams in the XXI century Achieving a sustainable development target" 13 (25 Mei 2006). <https://doi.org/10.1201/b16818-165>.
- Lempérière, F., J.P. Vigny, dan L. Deroo. "Most dams deserve two spillways." *Hydropower & Dams* 25, no. 6 (2018).
- Limantara, Lily Montarcih. *Rekayasa Hidrologi*. Edisi Revisi. Penerbit Andi Offset, 2018.
- Najafi, M. R., R. Roshan, A. R. Zarrati, dan M. R. Kavianpour. "Numerical Modeling of Flow Condition in a Bottom Outlet." Dalam *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering*, disunting oleh Changkuan Zhang dan Hongwu Tang. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0_313.
- Oshikawa, Hideo, Tomohiko Imamura, dan Toshimitsu Komatsu. "Study on the Flood Control Ability of a Dry Dam Used as a Flood Retarding Basin in a River." *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)* 67, no. 4 (14 Maret 2012). https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.I_667.
- Sumi, Tetsuya. "Designing and Operating of Flood Retention 'Dry' Dams in Japan and USA." *Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Kyoto University Katsura* 4 (2008).