

OPTIMIZATION STUDY OF GATE OPERATION RULE IN CIAWI DAM AS FLOOD CONTROL FUNCTION

Mahlil^[1], Teddy Wartono Sudinda^[2]

^[1] Student, Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia

^[2] Professor, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia
Email: mahlil.muhammad@gmail.com, teddy.sudinda@gmail.com

Received: 16 February 2022 / Accepted: 07 March 2022

DOI [10.28932/jts.v18i1.4517](https://doi.org/10.28932/jts.v18i1.4517)

How to cited this article:

Mahlil, Sudinda, T.W. (2022). Studi Optimasi Pola Operasi Pintu Bendungan Ciawi Sebagai Fungsi Pengendalian Banjir. Jurnal Teknik Sipil, 18(1), 118–139. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i1.4517>

ABSTRACT

The purpose of this research is to find out the effectiveness of operating gate on the design of flood routing and provide an alternative outlet operation gate for maximum flood reduction. The location of the research area is the Ciawi Dam watershed with an area of 88.50 km², a river length of ±16.70 km and an average river slope of 5.60%. This research data is based on climatological data, low discharge data, flood hydrograph, and dam and reservoir engineering data. In addition, there are supporting data to perform calculations and analyzes, such as flood discharge data, elevation curve – reservoir volume and layout of the dam and its complementary buildings, existing operating patterns, and regional socio-economic data studies. The method used is to calculate flood routing of the capital flow curve at the outlet operation gate. The simulation is carried out using a design flood hydrograph so that optimal flood reduction can be determined by the outlet operation gate. Based on the results of the maximum reduction in the design of the reservoir operation dam design without utilizing the conduit gate as a flood control function, the researchers optimized the door operation pattern to increase the flood reduction capacity (optimization) of the Ciawi Dam. The result of the calculation and analysis is that the flood return period (Q25 th) is able to reduce flooding by 54.64%; flood return period (Q50 yr.) is able to reduce flooding by 45.21%; flood return period (Q100 yr.) is able to reduce flooding by 38.06%; flood return period (Q500 yr.) is able to reduce flooding by 38.50%; and the flood return period (Q1000 yr.) was able to reduce flooding by 33.22%. So, it can be concluded that by utilizing the bottom outlet gate as a flood discharge regulation, the benefits obtained are 42.27% (at Q 25 yrs.) from the pattern of dam operation without gate regulation.

Keywords: Bottom Outlet Gate, Ciawi Dam, Optimization, Flood Reduction

STUDI OPTIMASI POLA OPERASI PINTU BENDUNGAN CIAWI SEBAGAI FUNGSI PENGENDALIAN BANJIR

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas pola operasi pintu terhadap penelusuran banjir desain serta memberikan alternatif pola operasi pintu *outlet* terhadap reduksi banjir secara maksimal. Lokasi wilayah penelitian adalah DAS Bendungan Ciawi dengan luas 88,50 km², panjang sungai ±16,70 km dan kemiringan rata-rata sungai 5,60%. Data penelitian ini berdasarkan data klimatologi, data debit rendah, hidrograf banjir, dan data teknik bendungan dan waduk. Selain itu terdapat data penunjang untuk melakukan perhitungan dan analisis, seperti data debit banjir, kurva elevasi – volume waduk dan tata letak bendungan serta bangunan pelengkapannya, pola operasi waduk eksisting, dan data sosial ekonomi daerah studi, Metode yang digunakan adalah melakukan perhitungan penelusuran banjir (*flood routing*) terhadap modal kurva aliran pada pintu outlet.

Simulasi waduk dilakukan menggunakan hidrograf banjir rancangan sehingga reduksi banjir optimal dapat ditentukan dengan pola operasi pintu outlet. Berdasarkan hasil reduksi maksimum dalam perencanaan desain bendungan operasi waduk tanpa memanfaatkan pintu *conduit* sebagai fungsi pengendali banjir, peneliti melakukan optimasi pola operasi pintu untuk meningkatkan kapasitas reduksi banjir (optimalisasi) pada Bendungan Ciawi. Hasilnya perhitungan dan analisisnya adalah kala ulang banjir ($Q_{25\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 54,64%; kala ulang banjir ($Q_{50\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 45,21%; kala ulang banjir ($Q_{100\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 38,06%; kala ulang banjir ($Q_{500\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 38,50%; dan kala ulang banjir ($Q_{1000\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 33,22%. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan memanfaatkan pintu *bottom outlet* sebagai regulasi debit banjir, manfaat yang didapat adalah 42,27% (pada $Q_{25\text{ th}}$) dari pola operasi bendungan tanpa regulasi pintu.

Kata kunci: Bendungan Ciawi, Optimasi, Penelusuran Banjir, Pintu Bottom Outlet

1. PENDAHULUAN

Sungai Ciliwung sebagai sungai yang bersumber di lereng utara Gunung Pangrango mengalir ke hilir melintasi area wilayah Bogor, Depok, dan DKI Jakarta. Sungai Ciliwung membentang sepanjang 100,80 km dengan lebar berkisar antara 30 m sampai 60 m dan bermuara di Pintu Air Manggarai. Secara umum penyebab utama banjir pada aliran Sungai Ciliwung, khususnya DKI Jakarta sebagai daerah terdampak paling besar adalah curah hujan di bagian tengah dan hulu menyebabkan terjadinya genangan dengan kapasitas aliran yang tidak mencukupi, curah hujan dengan skala besar dari hulu ke hilir menyebabkan genangan pada area hilir, dan banjir pada aliran sungai juga terjadi di Sub DAS Sungai Ciliwung dengan kapasitas aliran terbatas (PT Indra Karya, 2016).

Pembangunan Bendungan Ciawi sebagai Bendungan Kering (*Dry Dam*) merupakan perencanaan yang bertujuan untuk menanggulangi permasalahan banjir di kawasan DKI Jakarta (Haryono, 2021). Hal yang perlu diperhatikan dalam operasional bendungan yaitu sistem pola operasi pintu dimana dalam menentukan pola operasi pintu harus mendapatkan pola operasi yang paling efektif sehingga nantinya didapatkan reduksi banjir yang maksimal (Ionescu & Nistoran, 2019).

Oleh karena itu berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan didapat beberapa pokok rumusan masalah yaitu mampu atau tidaknya pola operasi pintu dalam mereduksi banjir di area hilir sungai secara optimum serta bagaimana optimalisasi pola operasi pintu sehingga didapat manfaat bendungan sebagai fungsi reduksi banjir secara maksimal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui efektivitas pola operasi pintu *outlet* terhadap reduksi banjir secara maksimal. Sedangkan penelitian ini memiliki kegunaan untuk memberikan sumbangan pemikiran pada instansi pengelolaan Bendungan Ciawi sebagai alternatif acuan pengelolaan bendungan pada masa operasionalnya nanti serta mendatang.

Pada analisis ini dilakukan beberapa batasan-batasan di antaranya:

1. Data perencanaan Bendungan diambil dari data perencanaan bendungan sebelumnya.
2. Efektivitas produksi banjir hanya di analisis sampai outlet bendungan.
3. Menggambarkan hidrograf banjir sebagai perbandingan pola operasi eksisting dengan pola operasi optimal.
4. Optimalisasi reduksi banjir hanya mempertimbangkan pola operasi pintu pada Bendungan Ciawi.

Berikut ini merupakan tabel yang memuat beberapa studi penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan.

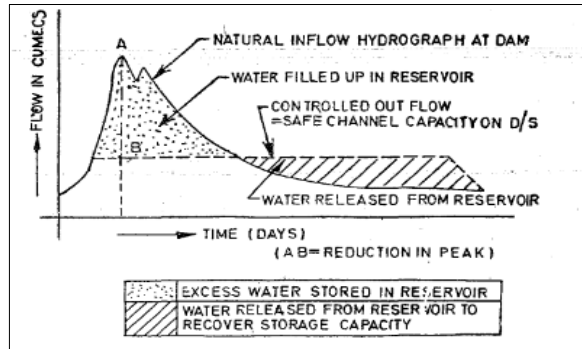
Tabel 1. Studi Penelitian Terdahulu Terkait Bendungan Ciawi Sebagai Pengendali Banjir DKI Jakarta

No	Nama Peneliti	Hasil Penelitian
1	Isma Fajar	Dengan dibangunnya Bendungan Kering Ciawi dapat mereduksi banjir Sungai Ciliwung Hulu, sehingga diharapkan dapat mereduksi banjir di wilayah DKI Jakarta.
2	Robby Yussac Tallar	Sungai yang berada di DAS Ciliwung, termasuk di dalamnya adalah wilayah Jakarta, sebagian besar sudah buruk daya dukung tata guna lahannya terhadap keberlanjutan sungai itu sendiri. Sehingga, diperlukan adanya usaha maksimal untuk menjaga keberlanjutan sungai yang daya dukungnya masih baik atau sedang dan mengintegrasikan perencanaan pengelolaan aliran air permukaan (sungai) dengan perencanaan tata guna dan tata ruang untuk keberlanjutan sungai
3	Nikodemus Leomitro, Robby Yussac Tallar	Pengaplikasian dari perlindungan dampak rendah suatu kawasan di dalam perencanaan pengembangan sautu lahan dan pelestarian sumberdaya air dapat meminimalisasi dampak negatif seperti kerusakan yang dapat terjadi di suatu Kawasan di dalam wilayah DAS. Pemanfaatan data karakteristik dari sautu DAS dapat digunakan untuk memitigasi bencana seperti banjir dan tanah longsor.
4	Dony Hermawan	Bendungan Ciawi Efektif sebagai pengendalian banjir dengan periode ulang 2, 5, 10, 25, 50, 100 (kapasitas desain) efektifitasnya : 18,85%-10,12% untuk modifikasi kapasitas 25,51%-14,40%.
5	Astrina Nur Inayah	Model HEC-GeoHMS dapat digunaka untuk memprediksi debit puncak aliran sungai DAS Ciliwung Hulu dengan R2 sebesar 0,69-0,97 dan NSE sebesar 0,46-0,88. Simulasi pembangunan Bendungan Ciawi dan Sukamahi efektif mengendalikan debit puncak (banjir) aliran sungai Ciliwung Hulu sebesar (77,76%).
4	Slamet Haryono	Bendungan Ciawi mampu mereduksi banjir puncak untuk periode ulang 25 tahun (Q25) sebesar 40,10%

2. TINJAUAN PUSTAKA

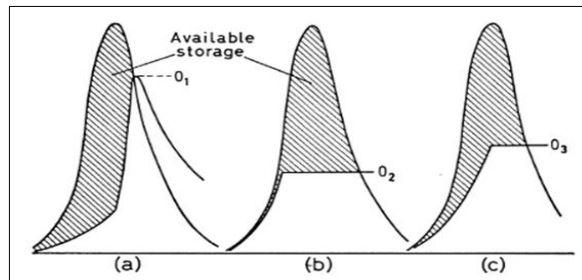
2.1 Konsep Pengendalian Banjir dengan Pembangunan

Pengendalian banjir dengan pembangunan atau tumpungan alami bertujuan untuk mereduksi debit banjir maksimum melalui tumpungan buatan maupun alami.

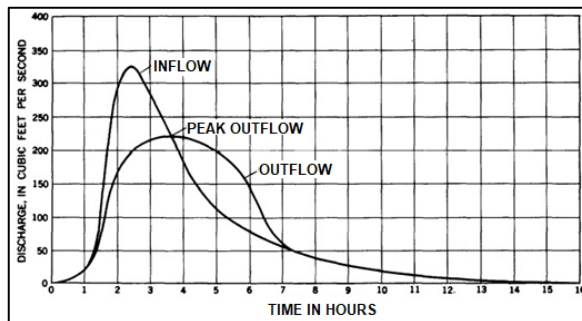


Gambar 1. Hidrograf Banjir Inflow dan Outflow pada Waduk dengan Outflow Melalui Pelimpah dengan Pintu (Garg, 1976)

Prinsip dasar analisis reduksi puncak banjir tersebut dapat dihitung dengan persamaan kontinuitas massa aliran dengan metode penelusuran banjir (*flood routing*) dalam bentuk sketsa reduksi puncak banjir berupa hidrograf *inflow* dan *outflow*.



Gambar 2. Efek dari Ukuran Konduit: (a) Konduit Berukuran Kecil, Tidak Terkontrol; (b) Konduit Berukuran Sangat Besar, Terkontrol; (c) Konduit Berukuran Besar, Terkontrol (Kuiper, 1965)



Gambar 3. Hidrograf Banjir Inflow dan Outflow pada Waduk dengan Outflow Melalui Terowongan dan Pelimpah Secara Simultan (Carter & Godfrey, 1960)

2.2 Penelusuran Banjir Melalui Terowongan atau Lubang Bawah *Orifice (Hollow Dam)*

Penelusuran banjir melalui terowongan atau lubang bawah *orifice* pada analisis pengendalian banjir dapat diaplikasikan pada perencanaan waduk kering atau bendungan kering (*dry dam*). Pada dasarnya, bendungan terus-menerus menyimpan air sungai di waduk untuk memasok air atau untuk pengisian ulang. Namun, bendungan kering, yang memiliki sistem pembuangan di dasar sungai dan yang menyimpan air hanya selama banjir, dan biasanya tidak terendam. Prinsip dasar perhitungan penelusuran banjir melalui terowongan (*flood routing*) adalah sebagai berikut:

$$I - O = \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

dimana :

$$I = \text{inflow (m}^3/\text{det)}$$

$$O = \text{outflow (m}^3/\text{det)}$$

$$\frac{ds}{dt} = \text{perubahan tampungan tiap periode waktu (m}^3/\text{det)}$$

$$\Delta S = \text{volume tampungan dihitung di atas inlet terowongan (m}^3\text{)}$$

Sedangkan untuk menghitung penelusuran banjir dapat dicari menggunakan persamaan di bawah ini.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} + \psi = \phi \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\Delta S}{\Delta t} - \frac{Q}{2} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\Delta S}{\Delta t} + \frac{Q}{2} \quad (4)$$

2.3 Hidrolika Melalui Terowongan *Conduit*

Faktor-faktor yang bergabung dalam perhitungan aliran alam di terowongan termasuk variabel seperti kemiringan, ukuran, bentuk, panjang, dan kekasaran permukaan dari terowongan serta bentuk dan tinggi pemasukan dan pengeluaran. 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:

$$Q = C_d \cdot A \cdot v \quad (5)$$

$$v = \sqrt{2g} \left[\frac{H + \sin \theta - \frac{D}{2}}{1 + K_e + \frac{n^2 L}{R^{4/3}}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$Q = A \cdot \sqrt{2g} \left[\frac{H+L \sin \theta - \frac{D}{2}}{1 + K_e + \frac{n^2 L}{R^{4/3}}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

dimana :

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

2.4 Kurva Kapasitas Tampungan Waduk (*Storage Curve*)

Kapasitas waduk (*resevoir*) bendungan *drydam* digunakan sebagai data untuk analisis penelusuran banjir, data diambil dari hasil pengukuran tahun 2021 dimana pengukuran ini sudah termasuk *borrow area* dan *quarry* terakhir sebelum bendungan beroperasi, metode perhitungan menggunakan metode matematis yaitu metode prismoidal.

$$V = \frac{D}{3} (A1 + \sqrt{A1 + A2} + A2) \quad (8)$$

dimana :

- V = volume tanah (m³)
- A = luas hasil potongan (m²)
- D = jarak/interval (m)

2.5 Hidrolika Pelimpah

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

(Kementerian PUPR BPSDM, Modul Perhitungan Hidrologi Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar, 2017). Persamaan hidrolika yang dapat digunakan untuk perencanaan dimensi bangunan pelimpah sebagai berikut:

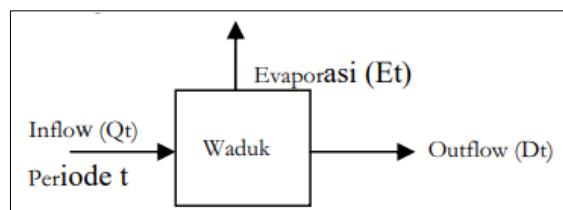
$$Q = C \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (9)$$

dimana :

- Q = debit banjir rencana (m³/det)
 C = koefisien limpahan
 L = lebar efektif pelimpah (m)
 H = Total tinggi tekanan air di atas mercu

2.6 Simulasi Waduk

Persamaan dasar pada operasi waduk adalah Aliran Masuk dikurangi Aliran Keluar adalah Perbedaan Tampungannya.



Gambar 4. Hidrograf Inflow-Outflow Bendungan Ciawi Kala Ulang Banjir Q100 th

Sehingga berdasarkan Gambar 4 didapat persamaan sebagai berikut:

$$S_{t+1} = S_t + I_t - (O_t + E_t + R_t) \quad (10)$$

dimana:

- S = tampungan
 I = debit *inflow* (m³/det)
 O = debit *outflow* (m³/det)
 E = evaporasi
 R = resapan
 t = langkah waktu

3. METODOLOGI

3.1 Deskripsi Lokasi Penelitian

Wilayah Sungai Ciliwung terletak di Provinsi Jawa Barat yang membentang dari selatan dengan hulu sungai berada pada lereng Gunung Pangrango (Elevasi +3019 m dpl) menuju ke arah utara wilayah Jawa Barat. Wilayah Sungai Ciliwung melewati beberapa

daerah di Jawa Barat yang mengalir dari Gunung Pangrango sebagai hulu kemudian melalui Bogor, Depok, dan Pintu Air Manggarai sebagai area hilirnya. Total panjang Sungai Ciliwung adalah 100,80 km dengan lebar berkisar antara 30,00 m hingga 60,00 m.

3.2 Data Teknis Bendungan dan Waduk

Data teknis Bendungan Ciawi berdasarkan manual operasi dan pemeliharaan bendungan disajikan pada poin-poin di bawah ini.

a. Data Teknis Bendungan

Tipe bendungan	= Bendungan urugan Zonal dengan inti miring.
Elevasi puncak	= + 551,00 mdpl
Elv. dasar pondasi	= + 496,00 mdpl
Tinggi bendungan	= 55,00 m
Lebar puncak	= 9,00 m
Kemiringan Lereng	= hulu 1:2,30 hilir 1:2,30 (berm 5 m)
Elv. ambang pelimpah	= + 546,75 mdpl

b. Data Teknis Waduk

Daerah aliran waduk	= 548.638,39 m ²
Debit banjir 100 tahun	= 340,42 m ³ /det
Debit banjir PMF	= 1.242,96 m ³ /det

3.3 Tahapan Penelitian

Untuk melakukan olah data diperlukan beberapa tahapan pada penelitian ini antara lain; perhitungan penelusuran banjir (*flood routing*) terhadap modal kurva aliran pada pintu *outlet*. Simulasi waduk menggunakan hidrograf banjir rancangan sehingga reduksi banjir optimal dapat ditentukan dengan pola operasi pintu *outlet*.

3.4 Pengumpulan Data

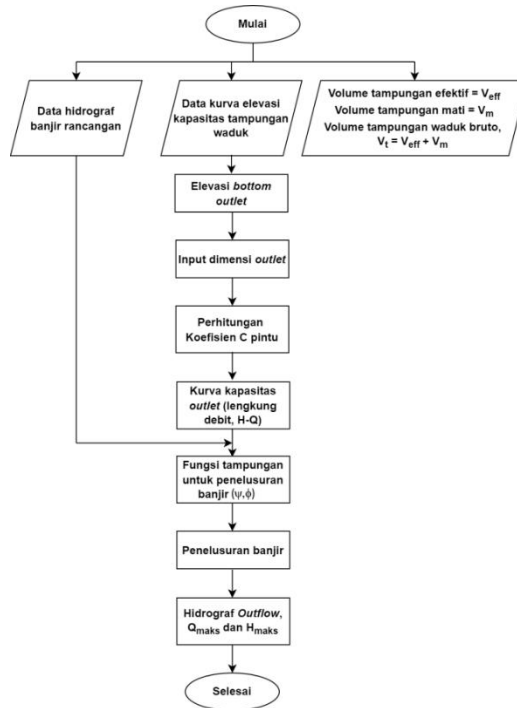
Dalam penelitian ini digunakan data-data penunjang yang diperlukan untuk melakukan perhitungan dan analisa. Data-data yang diperlukan dalam perhitungan dan analisa adalah sebagai berikut :

- Data debit banjir yang diperlukan adalah kala ulang banjir 25, 50, 100 tahun.
- Kurva elevasi – volume waduk (*storage area curve*) dan tata letak bendungan beserta bangunan pelengkapannya.

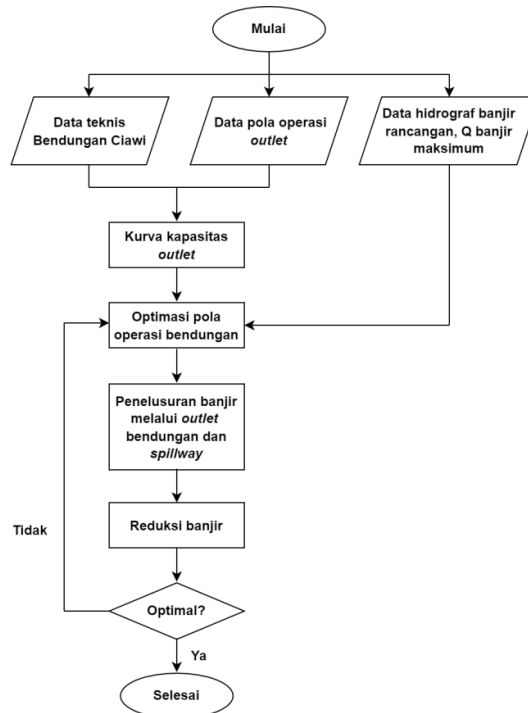
c. Pola operasi waduk eksisting.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Adapun urutan penyelesaian penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 5. Diagram Alir Konsep Penelusuran Banjir



Gambar 6. Diagram Alir Konsep Pintu Outlet Bendungan Ciawi

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

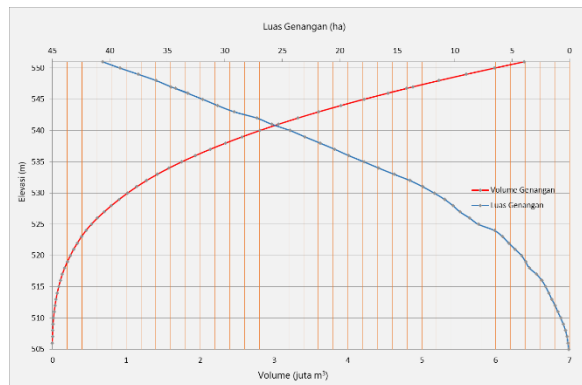
4.1 Umum

Konsep Bendungan Ciawi sebagai bendungan kering (*dry dam*) memiliki *outlet* berupa *conduit* berpintu dengan dimana luas dari *outlet* tersebut dibuat lebih kecil dari sungai eksisting sehingga dalam kondisi tertentu akan mereduksi air banjir. Analisa pada penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui hubungan antara debit yang masuk ke waduk kemudian dikeluarkan pada Bendungan Ciawi. Volume waduk yang mengalami perubahan dari desain awal, pola oprasi pintu yang dapat dikendalikan, dan elevasi top bendungan menjadi variabel utama dalam analisa optimalisasi.

Berdasarkan data perencanaan detail desain (2016) diketahui bahwa Bendungan Ciawi mampu mereduksi banjir sebesar 25% untuk kala ulang debit banjir 25 tahun dengan pola operasi pintu terbuka penuh (*fully open*). Data ini menjadi acuan dasar optimalisasi pintu *outlet* terhadap banjir kala ulang 25 tahun dan kala ulang lainnya. Debit dari hasil analisa hidrologi satuan sintesis Nakayasu digunakan sebagai analisa penelusuran banjir waduk menggunakan metode *Muskingum. Overtopping* pada puncak bendungan, Kurva Kapasitas Tampungan Waduk (*Storage Curve*).

4.2 Kurva Kapasitas Tampungan Waduk (*Storage Curve*)

Perhitungan kurva kapasitas pada Bendungan Ciawi menggunakan Metode Primodial karena tipikal kontur genangan Bendungan Ciawi yang cenderung tidak teratur pada potongan yang berdekatan. Sedangkan kapasitas waduk (*reservoir*) bendungan digunakan sebagai data analisa penelusuran banjir dimana data diambil dari hasil pengukuran kontur tahun 2021 termasuk pengukuran *borrow area* dan *quarry* terakhir sebelum bendungan beroperasi.



Ket : ——— = Volume genangan (juta m³)
————— = Luas genangan (ha)

Gambar 7. Diagram Alir Konsep Pintu *Outlet* Bendungan Ciawi

4.3 Kapasitas Debit

Terdapat dua jenis *outlet* pada Bendungan Ciawi 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*.

Data teknis pelimpah untuk kapasitas debit pelimpah:

- Elevasi pelimpah = + 546,75 mdpl
- Lebar pelimpah = 62,00 m
- Elv. puncak bendungan = 55,00 m
- Batas Elv. MAW maks = + 550,25 mdpl

Perhitungan debit rencana (Q), $Q = C, L, H^{3/2}$

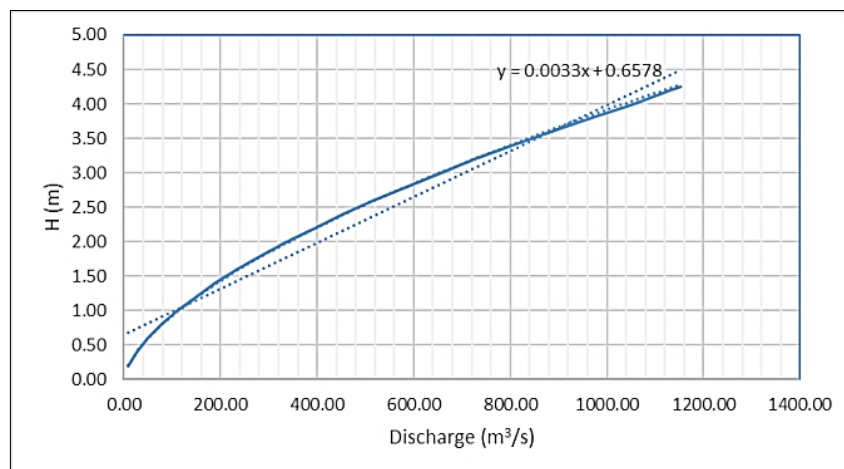
dimana,

- Lebar pelimpah (L) = 62,00 m
- Tinggi muka air (H) = 0,20 m
- Koefisien Iwasaki (C) = 1,64

Sehingga,

$$\begin{aligned} Q &= 1,64 \times 62,00 \times 0,20^{3/2} \\ &= 9,095 \text{ m}^3/\text{det} \approx 9,10 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

Didapat debit yang mengalir pada ketinggian air di atas pelimpah sebesar 20 cm adalah 9,10 m³/det.



Gambar 8. *Rating Curve* Pelimpah

Data teknis *conduit* kondisi **aliran beban (*free flow*)** untuk kapasitas *bottom outlet* (terbuka penuh) pada elv muka air 504,45 m dpl adalah sebagai berikut:

Elv. ambang <i>inlet conduit</i>	= + 504,20 mdpl
Elv. puncak pelimpah	= + 546,75 mdpl
Lebar <i>conduit</i> , B	= 4,20 m
Tinggi <i>conduit</i> , D	= 4,20 m
Tebal dinding <i>conduit</i> sisi samping	= 1,00 m
Tebal dinding <i>conduit</i> sisi tengah	= 1,00 m
Lebar saluran, b	= 4,20 m
Jumlah <i>conduit</i> yang dioperasikan	= 1,00 unit
<i>Slope</i> dasar saluran, S	= 0,01 \approx 1 : 100
Angka <i>Manning</i> , n	= 0,015
Percepatan gravitasi, g	= 9,81 m/s ²

Luasan saluran (A),

$$\begin{aligned} A &= h \times b \\ &= 0,25 \times 4,20 \\ &= 1,05 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Keliling basah saluran (P),

$$\begin{aligned} P &= b \times (2 \cdot h) \\ &= 4,20 \times (2 \cdot 0,25) \\ &= 4,70 \text{ m} \end{aligned}$$

Kecepatan aliran (v),

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{S} \\ &= \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{P}{A}\right)^{2/3} \cdot \sqrt{S} \\ &= \frac{1}{0,015} \cdot \left(\frac{4,70}{1,05}\right)^{2/3} \cdot \sqrt{0,010} \\ &= 2,45 \text{ m/det} \end{aligned}$$

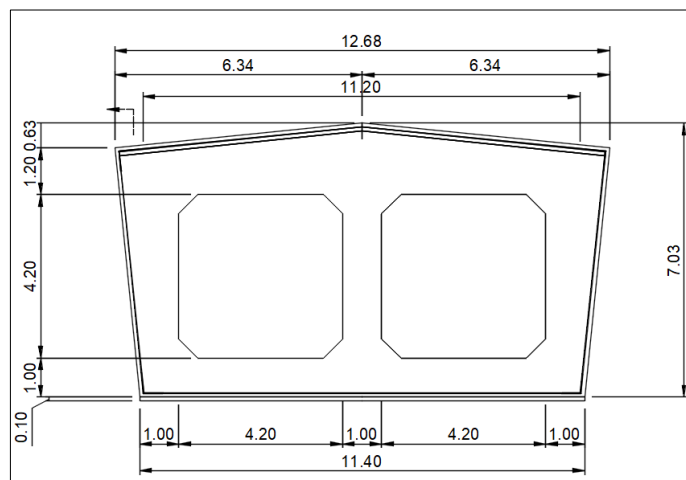
$$\begin{aligned} Q &= A \times v \\ &= 1,05 \times 2,45 \\ &= 2,58 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Fr &= \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{2,45}{\sqrt{9,81 \cdot 0,25}} \\ &= 1,57 \end{aligned}$$

Aliran super kritis maka,

$$A_c = hc \times b$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2}{3} \cdot h \times b \\
&= \frac{2}{3} \cdot 0,25 \times 4,20 \\
&= 0,70 \text{ m}^2 \\
vc &= \sqrt{g \cdot hc} \\
&= \sqrt{9,81 \cdot 0,17} \\
&= 1,28 \text{ m/s} \\
Qc &= 0,70 \times 1,28 \\
&= 0,90 \text{ m}^3/\text{det}
\end{aligned}$$



Gambar 9. Dimensi *Conduit Bottom Outlet* Bendungan Ciawi

Bilangan Froude $> 1,00$ diartikan bahwa perhitungan merupakan aliran superkritis, sehingga titik kontrol di hulu adalah aliran kritis, maka perhitungan hidrolika aliran terbuka menggunakan pendekatan aliran kritis di *inlet conduit*.

Data teknis *conduit* kondisi **aliran tekan** (*pressure flow*) untuk kapasitas *bottom outlet* (terbuka penuh) pada elv muka air 509,424 m dpl adalah sebagai berikut,

Lebar <i>conduit</i> , B	=	4,20 m
Tinggi <i>conduit</i> , D	=	4,20 m
Tebal dinding <i>conduit</i>	=	1,00 m
Lebar saluran, b	=	4,20 m
Panjang <i>conduit</i> , L	=	453,00 m
Jumlah <i>conduit</i> yang dioperasikan	=	1,00 unit
<i>Slope</i> dasar saluran, S	=	0,01 \approx 1 : 100
Angka <i>Manning</i> , n	=	0,015
K_e	=	0,50

$$K_b = 0,20$$

$$K_o = 1,00$$

$$\text{Percepatan gravitasi, } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Luasan saluran untuk 1 unit *conduit* (A),

$$A = H \times b \times 1,00 \text{ unit}$$

$$= (1,20 \cdot 4,20) \times 4,20 \times 1,00 \text{ unit}$$

$$= 17,64 \text{ m}^2$$

Keliling basah saluran (P),

$$P = \{2 \cdot (B + D)\} \times 1,00 \text{ unit}$$

$$= \{2 \cdot (4,20 + 4,20)\} \times 1,00 \text{ unit}$$

$$= 16,80 \text{ m}$$

Kecepatan aliran (v),

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

$$= \sqrt{2 \cdot 9,81} \times \left[\frac{5,04 + 453 \sin (0,01) - \frac{4,20}{2}}{1 + 0,50 + \frac{0,015 \cdot 453}{1,05^{4/3}}} \right]^{1/2}$$

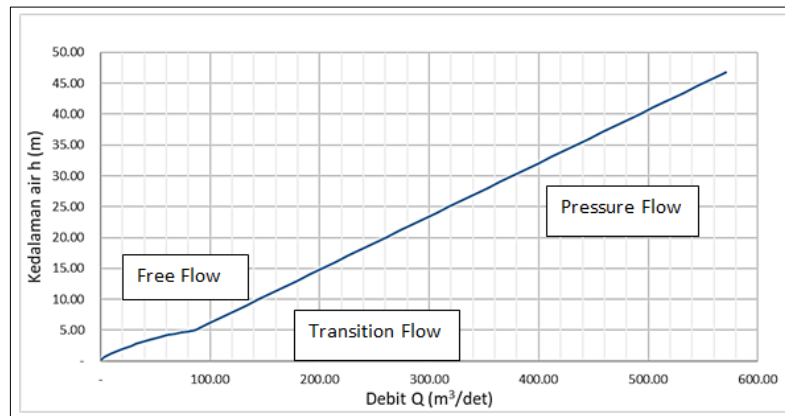
$$= 5,92 \text{ m/det}$$

Maka debit pada elevasi 509,24 m dpl (Q),

$$Q = A \times v$$

$$= 17,64 \times 5,92$$

$$= 83,51 \text{ m}^3/\text{det}$$



Gambar 10. Rating Curve Conduit Outlet Kondisi Aliran Bebas (*Free Flow*) dan Aliran Tekan (*Pressure Flow*)

Dengan melakukan optimalisasi, *outlet* bendungan dioptimalkan dengan memanfaatkan pintu *bottom outlet*, data yang digunakan adalah sebagai berikut :

Elv. ambang <i>conduit</i>	= + 504,20 mdpl
Elv. ambang pelimpah (<i>non-gated</i>)	= + 546,75 mdpl
Lebar pintu, b	= 4,20 m
Jumlah total pintu	= 2,00 unit
Jumlah <i>conduit</i> yang dioperasikan	= 1,00 unit

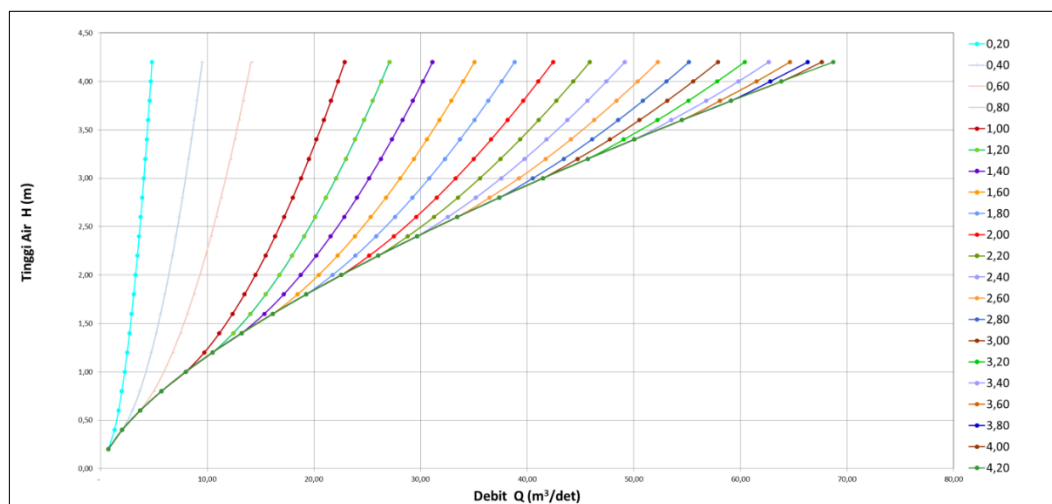
Mencari debit aliran berpintu/*gated overflow* (Q) untuk 1 unit pintu pada kedalaman air di atas ambang (H) sebesar 0,20 m dengan tinggi bukaan pintu sebesar 5% pada elevasi muka air 504,40 m dpl.

$$\begin{aligned}
 H &= 0,20 \text{ m} \\
 Q &= (C_2 \cdot b \cdot H^{3/2}) \times 1,00 \text{ unit} \\
 &= 1,90 \cdot 4,20 \cdot (0,20)^{3/2} \\
 &= 0,71 \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

Debit aliran berpintu/*gated overflow* (Q) untuk 1 unit pintu pada kedalaman air di atas ambang (H) sebesar 0,40 m dengan tinggi bukaan pintu sebesar 5%.

$$\begin{aligned}
 H &= 0,40 \text{ m} \\
 H_1 &= 0,20 \text{ m} \\
 Q &= C_1 \cdot (H^{3/2} - H_1^{3/2}) \\
 &= 1,89 \cdot (0,40^{3/2} - 0,20^{3/2}) \\
 &= 1,30 \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya perhitungan dilakukan sesuai dengan prosentase bukaan pintu dengan variasi kedalaman air di atas ambang



Gambar 11. Rating Curve Pintu Conduit Outlet

4.4 Analisa Penelusuran Banjir

4.4.1 Analisa Penelusuran Banjir Melalui Spillway

Penelusuran banjir pada bendungan kering diperlukan untuk mengetahui debit maksimum, tinggi muka air muka banjir maksimum dan data reduksi banjir maksimum pada bendungan sebelum terjadi *overtopping*.

Debit *inflow* maksimum = 330,72 m³/dt

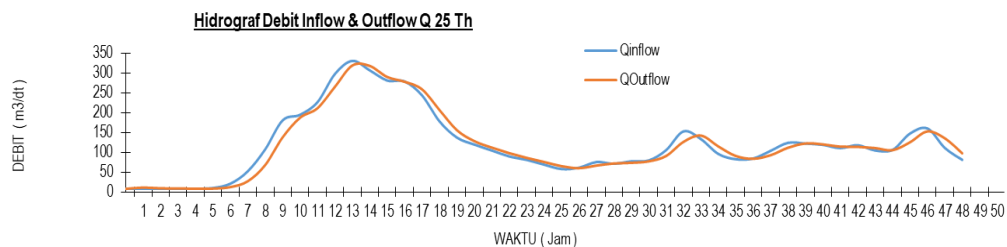
Debit *outflow* maksimum = 319,85 m³/dt

Elevasi muka air maksimum = 548,68 mdpl

Elevasi puncak bendungan = 551,00 mdpl

Tinggi jagaan sisa (Hf) = 2,32 m

Reduksi puncak banjir = 3,29 %



Gambar 12. Hidrograf *Inflow-Outflow* Bendungan Ciawi Kala Ulang Banjir Q₂₅th Melalui *Spillway*

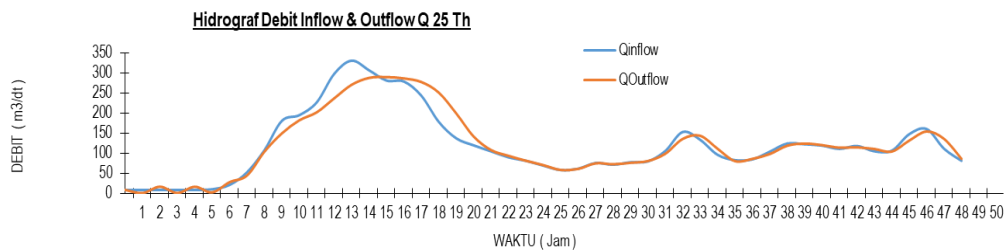
Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Penelusuran Banjir dengan Pola Operasi Eksisting Bendungan Ciawi

Parameter	Unit	Kala Ulang (tahun)				
		25	50	100	500	1000
Debit <i>Inflow</i> Maks	m ³ /det	330,72	365,00	403,60	487,82	524,10
Debit <i>Outflow</i> Maks	m ³ /det	319,85	353,94	392,24	475,29	511,06
Elev. Muka Air Maks	m dpl	548,68	548,81	548,94	549,22	549,33
Elev. Puncak Bendungan	m dpl	551,00	551,00	551,00	551,00	551,00
Tinggi jagaan sisa (Hf)	m	2,32	2,19	2,06	1,78	1,67
Reduksi puncak banjir sebelum Optimasi	%	3,30	3,00	2,80	2,60	2,50

Dari hasil penelusuran banjir jika menggunakan skenario pintu *bottom outlet* ditutup total (*fully closed*) maka air melimpas pada bangunan *emergency spillway*, dengan ketinggian muka banjir maksimum +549,33 m dpl dan sisa *free board* adalah 1,67 m pada banjir kala ulang 1000 tahun.

4.4.2 Analisa Penelusuran Banjir Melalui Conduit

Analisa ini dilakukan untuk mendapatkan nilai reduksi banjir dengan memanfaatkan 1 *conduit bottom outlet* di buka penuh (*fully opened*), nilai ini menggambarkan reduksi banjir sesuai dengan desain eksisting namun telah di-*update* dari segi perubahan tampungan waduk karena *cut and fill* daerah genangan.



Gambar 13. Hidrograf *Inflow-Outflow* Bendungan Ciawi Kala Ulang Banjir Q₂₅th Melalui Conduit

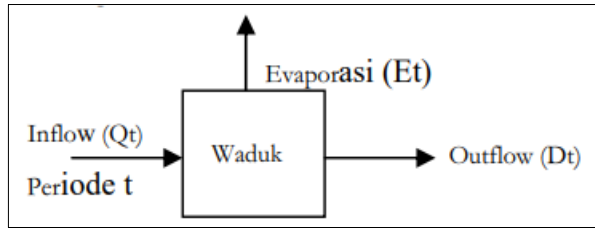
Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Penelusuran Banjir dengan Pola Operasi Eksisting Bendungan Ciawi

Parameter	Unit	Kala Ulang (tahun)				
		25	50	100	500	1000
Debit <i>Inflow</i> Maks	m ³ /dt.	330,72	365,00	403,60	487,82	524,10
Debit <i>Outflow</i> Maks	m ³ /dt.	289,81	313,65	339,40	391,34	412,24
Elev. Muka Air Maks	m dpl	527,69	529,82	532,13	536,77	538,64
Elev. Puncak Bendungan	m dpl	551,00	551,00	551,00	551,00	551,00
Tinggi jagaan sisa (Hf)	m	23,31	21,18	18,87	14,23	12,36
Reduksi puncak banjir sebelum Optimasi	%	12,37	14,07	15,91	19,78	21,34
Debit <i>Outflow</i> Maks Optimasi	m ³ /det.	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00

Dari hasil penelusuran banjir jika menggunakan skenario pintu *bottom outlet* terbuka total (*fully open*) diketahui reduksi muka air banjir mencapai 21,34% pada kala ulang banjir 25 tahun. Nilai tersebut kemudain dioptimasi dengan pengaturan pintu *bottom outlet*.

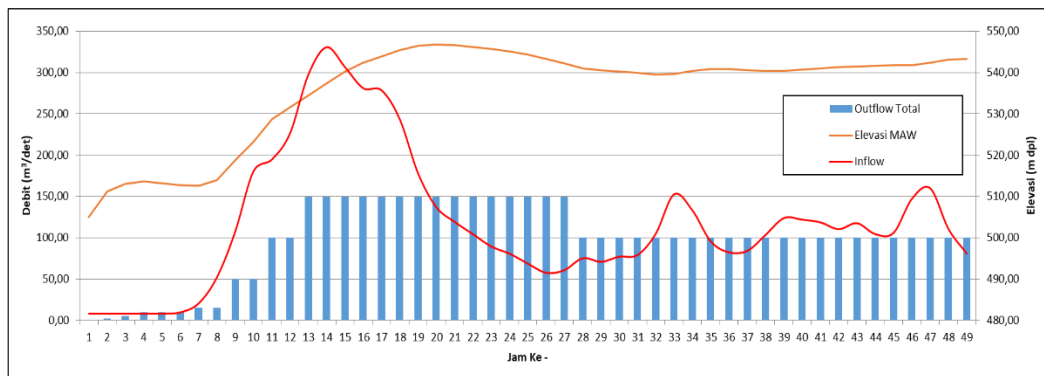
4.4.3 Simulasi Waduk

Untuk menentukan optamalisasi tingkat keandalan/kegagalan terhadap perilaku pengoperasian diperlukan simulasi operasi waduk, Simulasi menggunakan Persamaan dasar yaitu denga Aliran Masuk dikurangi Aliran Keluar.

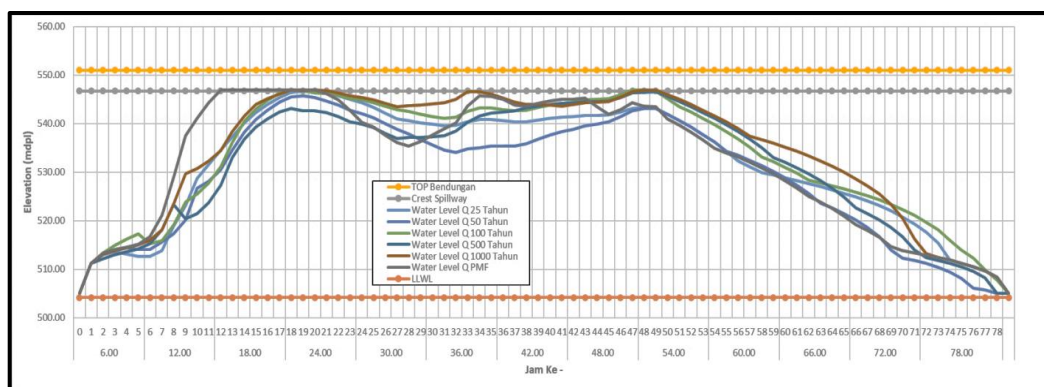


Gambar 14. Skema Pola Operasi Waduk

Maksimum reservoir level (<i>spillway crest</i>)	= 546,75 m dpl
Minimum reservoir level	= 260,00 m dpl
Eff. depth, (FSL - LWL)	= 42,55 m
Vol. tampungan maks.	= 4,88 juta m ³
Vol. tampungan min.	= 0,00 juta m ³
Vol. tampungan eff.	= 4,88 juta m
Evaporasi	= 4,00 mm/hari
Luas genangan	= 0,40 km ²



Gambar 15. Pola Operasi Waduk Terhadap Debit Banjir Q25 th



Gambar 16. Pola Operasi Waduk Terhadap Kala Ulang Banjir Q 25 th – QPMF

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan dengan mengoptimasi bukaan pintu *outlet* Bendungan Ciawi reduksi banjir 25 th yang bisa didapat adalah Q_{inflow} maksimum sebesar 330,72 m³/dt direduksi menjadi 150 m³/dt atau 54,64% naik 42.27% dari pola operasi eksisting.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pola Operasi Waduk Eksisting Terhadap Optimasi Pola Operasi

Parameter	Unit	Kala Ulang (tahun)				
		25	50	100	500	1000
Debit <i>Inflow</i> Maksimum	m ³ /dt.	330,72	365,00	403,60	487,82	524,10
Debit <i>Outflow</i> Maksimum	m ³ /dt.	289,81	313,65	339,40	391,34	412,24
Elev. Muka Air Maksimum	m dpl	527,69	529,82	532,13	536,77	538,64
Elev. Puncak Bendungan	m dpl	551,00	551,00	551,00	551,00	551,00
Tinggi jagaan sisa (Hf)	m.	23,31	21,18	18,87	14,23	12,36
Reduksi puncak banjir sebelum Optimasi	%	12,37	14,07	15,91	19,78	21,34
Debit <i>Outflow</i> Maks Optimasi	m ³ /det	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00
Reduksi puncak banjir Setelah Optimasi	%	54,64	45,21	38,06	38,50	33,22
Reduksi Kecepatan surut	%	77,00	78,00	87,00	51,00	86,00
Kecepatan surut sebelum optimasi	m/jam	5,18	5,33	5,26	6,23	5,79
Kecepatan surut setelah Optimasi	m/jam	3,44	2,75	2,80	3,26	4,28
Selisih kecepatan surut setelah Optimasi	m/jam	1,74	2,58	2,46	2,97	1,51
Kecepatan surut sebelum optimasi	m/jam	5,18	5,33	5,26	6,23	5,79

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Bendungan Ciawi sebagai bangunan pereduksi banjir dapat mengurangi debit puncak banjir di area Sungai Ciliwung. 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 *conduit* sebagai fungsi pengendali banjir, dengan kondisi eksisting tersebut didapat hasil reduksi maksimum sebagai berikut:

- Kala ulang banjir ($Q_{25\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 12,37%
- Kala ulang banjir ($Q_{50\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 14,07%.
- Kala ulang banjir ($Q_{100\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 15,91%.
- Kala ulang banjir ($Q_{500\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 19,78%.
- Kala ulang banjir ($Q_{1000\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 21,34%.

Dari hasil di atas kemudian dilakukan optimasi pola operasi pintu untuk meningkatkan kapasitas reduksi banjir (optimalisasi) pada Bendungan Ciawi sehingga diperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Kala ulang banjir ($Q_{25\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 54,64%.
- b. Kala ulang banjir ($Q_{50\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 45,21%.
- c. Kala ulang banjir ($Q_{100\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 38,06%.
- d. Kala ulang banjir ($Q_{500\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 38,50%.
- e. Kala ulang banjir ($Q_{1000\text{ th}}$) mampu mereduksi banjir sebesar 33,22%.

Sehingga berdasarkan hasil eksisting dan optimasi pintu dapat disimpulkan bahwa dengan memanfaatkan pintu *bottom outlet* sebagai regulasi debit banjir, manfaat yang didapat adalah 42,27% (pada $Q_{25\text{ th}}$) dari pola operasi bendungan tanpa regulasi pintu.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa saran terkait dengan pola optimasi pintu serta operasi bendungan, di antaranya :

1. Pintu *outlet* Bendungan Ciawi bertipe *slide gate* dengan penggerak motor dapat menimbulkan efek *vibrating* ketika pintu tidak dibuka penuh yang dapat menimbulkan efek berbahaya dengan model pola operasi pintu selama periode banjir (24-48 jam), maka diperlukan studi lanjut terkait permasalahan tersebut.
2. Penerapan pola operasi pintu akan meningkatkan resiko kegagalan bendungan apabila dilakukan secara manual akan berbahaya mengingat faktor kesalahan manusia (*human error*) sangat tinggi sehingga membutuhkan ketelitian dalam pengoperasian pintu, dibutuhkan perangkat otomasi berbasis komputer untuk membantu *system control*. Analisa lebih lanjut terkait dengan peristiwa *rapid drawdown* sebaiknya perlu dilakukan karena erat hubungannya terhadap stabilitas bendungan, sehingga didapat hasil kecepatan surut yang diizinkan pada Bendungan Ciawi.

DAFTAR PUSTAKA

- Berilgen, M. M. (2006). Investigation of stability of slopes under drawdown condition. *Science Direct Computers and Geotechnics* Vol. 34, 81-91.
- Carter, R. W., & Godfrey, R. G. (1960). *Storage and Flood Routing, Manual of Hydrology: Part 3 Food-Flow Technique*. Washington: United States Government Printing Office.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Chanel Hydraulics Interbational Student Edition*. Tokyo: McGrawHill Kogakusha Book Company, Inc.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2000). *Metode Perhitungan Kapasitas Tampungan pada Waduk*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Pd T-25-2004-A Pengoperasian Waduk Tunggal*. Jakarta: Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.
- Duncan, J., & Michael, W. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Garg, S. K. (1976). *Irrigation Engineering and Hydraulic Structure*. India: Khanna Publishers.
- Ionescu, C. S., & Nistoran, D. E. (2019). Influence of reservoir shape upon the choice of Hydraulic vs. Hydrologic reservoir routing method. *E3S Web of Conferences* 85(2):07001, 1-8.
- Japan Dam Engineering Center. (2021, October 21). Planning and designing a dry dam. Retrieved from Japan Dam Engineering Center:
http://www.jdec.or.jp/05english/02project_outline/03_recent_projects/07planning2.html#anchor_12
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 Tahun 2015 tentang Bendungan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kementerian PUPR BPSDM. (2017). *Modul Operasi Waduk Pelatihan Alokasi Air*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi.
- Kementerian PUPR BPSDM. (2017). *Modul Perhitungan Hidrologi Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi.
- Kementrian Negara Perencanaan Pembangunan Nasional, B. (2007). *Hasil Penilaian Kerusakan dan Kerugian Pascabencana Banjir Awal Februari 2007 di Wilayah Jabodetabek*. Jakarta: Kementerian Negara Perencanaan Pembangunan Nasional (BAPPENAS).
- Kreuze, J. F. (1978). *Reservoir Operations*. Delft, Netherland: International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering.
- Kuiper, E. (1965). *Water Resources Development Planning Engineering and Economics*. New York: Springer Science + Business Media LLC.
- Leomitro, N., & Tallar, R. Y. (2015). Kajian perangkat perlindungan dampak rendah suatu kawasan di dalam perencanaan pengembangan suatu lahan dan pelestarian sumberdaya air. *Jurnal Teknik Sipil, Volume 11 Nomor 2*, 108. doi:<https://doi.org/10.28932/jts.v11i2.1405>

- Morgenstren, N. (1963). Stability for Earth Slopes During Rapid Drawdown. *Geotechnique* Vol. 13 (2), 121-131.
- Novak, P., Moffat, A. I., & Nalluri, C. (2007). *Hydraulic Structures* 4th Ed. United Kingdom: UMIST University of Manchester.
- Przedwojski, B., Blazejewski, R., & Pilarczyk, K. W. (1995). *River Training Techniques: Fundamentals, Design and Applications*. Rotterdam: A. A. Balkema.
- PT Indra Karya. (2016). *Sertifikat Desain Bendungan Ciawi dan Bendungan Sukamahi (Lanjutan)*. Malang: PT Indra Karya.
- Purbo-Hadiwidjono, M. (1993). *Hidrologi Teknik*. Bandung: ITB.
- RSNI T-01-2002, (2001). *Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-3432-1994, (1994). *Tata Cara Penetapan Banjir Desain dan Kapasitas Pelimpah untuk Bendungan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 19-6459-2000, (2000). *Tata Cara Pengontrolan Sedimentasi pada Waduk*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1976). *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1987). *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Tallar, R. Y. (2008). Analisa Daya Dukung Tata Guna Lahan dalam Menunjang Keberlanjutan Sungai (Studi Kasus DAS Ciliwung). *Jurnal Teknik Sipil, Volume 4 No 1*, 59. doi:<https://doi.org/10.28932/jts.v4i1.1295>
- United States Dept. of The Interior, B. (1987). *Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication*: Washington.