



PENENTUAN POLA OPERASI PINTU PELIMPAH DALAM RANGKA PENGENDALIAN BANJIR BENDUNGAN DELINGAN, JAWA TENGAH

STUDY OF SPILLWAY GATE OPERATION AS REGARD TO THE FLOOD CONTROL OF DELINGAN DAM, CENTRAL JAVA

Ariberto Jonathan¹⁾, Doddi Yudianto²⁾, S. Sanjaya^{3*)}

^{1,2,3)} Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung, Indonesia,

*Correspondence E-mail: sanjaya.stephen@unpar.ac.id

Diterima: 09 Juli 2021; Direvisi: 16 Agustus 2021; Disetujui: 17 September 2021

ABSTRACT

A spillway is one of many important components of a dam, which is operated to prevent the dam from overtopping. Spillway with gate structures requires to have a good operation pattern by considering a minimum critical height and outflow discharge to prevent any flooding events in the downstream part of the spillway channel. The case study in this research is the Delingan Dam which has two ogee spillways, four main sluice gates and four additional sluice gates. Located in Karanganyar District, West Java, Delingan Dam is considered as a vast infrastructure which is potentially threatening if the spillway's operation is not optimal. This study aims to analyze the spillway gate operations' pattern of Delingan Dam in order to control the flooding event. The methodology used in this study is flood routing by utilizing several scenarios in order to obtain the optimal simulation results. Five scenarios that were simulated on the designated flood discharge have various combinations on the number of gates and their opening, as well as the time in which the operation started. The results show that the operation only using ogee spillway still meets the criteria for minimum critical height and maximum allowable discharge for return period of 25, 50, and 100 year. As the discharge with 1000 year return period, half of PMF, and PMF, the recommended operation is, foremost, to occupy the main gate in which results in the peak outflow discharge of 23.65 m³/s, 62.4 m³/s, and 140.9 m³/s, with the minimum critical height of 1.45 m, 1.41 m, and 1.35 m, respectively. However, this operation is not adequate for the half of PMF, and the PMF discharge, since the capacity in the spillway channel is estimated about 24.7 m³/s.

Keywords: spillway, flood control, spillway gate operation, the delingan dam

ABSTRAK

Bangunan pelimpah merupakan salah satu bangunan pelengkap penting yang berfungsi menjaga bendungan terhadap kegagalan overtopping. Bangunan pelimpah yang dilengkapi dengan pintu membutuhkan pola operasi yang baik dengan mempertimbangkan tinggi jagaan minimum, dan debit outflow agar tidak terjadi banjir di hilir pelimpah. Bendungan yang dikaji dalam studi ini adalah Bendungan Delingan yang memiliki 2 pelimpah bebas, 4 pintu pelimpah utama, dan 4 pintu pelimpah tambahan. Bendungan yang terletak di Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah ini tergolong dalam bendungan besar yang berpotensi menyebabkan bahaya apabila tidak memiliki pola operasi pelimpah yang optimal. Studi ini bertujuan untuk meneliti pola operasi pintu pelimpah Bendungan Delingan dalam rangka pengendalian banjir. Penelitian ini menggunakan penelusuran banjir dengan berbagai skenario untuk mendapatkan hasil simulasi dengan tinggi jagaan minimum terbaik dan debit outflow terkecil. Ada lima skenario percobaan yang disimulasikan terhadap debit outflow rencana dengan berbagai variasi jumlah pintu, urutan pintu pelimpah, dan waktu pembukaan pintu. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa, simulasi dengan pelimpah bebas memenuhi syarat tinggi jagaan dan debit maksimum untuk Q₂₅, Q₅₀, dan Q₁₀₀. Sedangkan untuk Q₁₀₀₀, Q_{0.5-PMF}, dan Q_{PMF}, pola operasi yang direkomendasikan adalah pembukaan pintu utama terlebih dahulu yang menghasilkan debit puncak outflow sebesar 23,65 m³/s; 62,4 m³/s; dan 140,9 m³/s dengan hasil tinggi jagaan sebesar 1,45 m; 1,41 m; dan 1,35 m, secara berturut-turut. Akan tetapi pola operasi ini tidak memenuhi persyaratan kapasitas debit saluran pada bagian hilir untuk debit rencana Q_{0.5-PMF}, dan Q_{PMF}, karena debit kapasitas saluran pelimpah diperkirakan sebesar 24,7 m³/s.

Kata Kunci: bangunan pelimpah, pengendalian banjir, pola operasi pintu air, keamanan bendungan, Bendungan Delingan

PENDAHULUAN

Bendungan didefinisikan sebagai bangunan yang berupa urugan tanah, urugan batu, beton, dan/atau pasangan batu yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, juga untuk menahan dan menampung limbah tambang (*tailing*), atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 Tentang Bendungan, 2010). Beberapa fungsi dari bendungan antara lain pengairan irigasi, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), pengendali banjir, sarana rekreasi, perikanan, dan lain-lain (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Umumnya, bendungan terdiri atas berbagai bangunan pelengkap seperti bangunan pelimpah, bangunan pengambilan, tubuh bendungan, bangunan pengeluaran, dan bangunan pembilas.

Bangunan pelimpah berfungsi untuk menjaga kapasitas air di dalam waduk dengan melimpahkan kelebihan air yang dapat membahayakan bendungan (*overtopping*) (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017). Bangunan pelimpah menjadi salah satu komponen penting dalam menjaga pilar keamanan bendungan. Pada Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2010 pasal 138, keamanan bendungan ditujukan untuk melindungi bendungan dari kegagalan bendungan dan melindungi jiwa, harta, dan prasarana umum yang berada di wilayah yang terpengaruh oleh potensi bahaya akibat kegagalan bendungan. Volume air yang melampaui kapasitas bendungan dapat menyebabkan keruntuhan tubuh bendungan (*overtopping*) dan banjir pada bagian hilir bendungan (Samekto dan Azdan, 2016).

Bangunan pelimpah dapat dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan bentuknya. Secara umum, bangunan pelimpah pada bendungan di Indonesia bendungan bertipe pelimpah bebas (Departemen Pekerjaan Umum, 1995). Pada bangunan pelimpah yang lebih kompleks, seperti pelimpah berpintu yang mewakili 30% dari seluruh bendungan besar di dunia (*ICOLD CIGB World Register of Dams*, 2017), pedoman operasi pintu diperlukan untuk melimpahkan kelebihan air dari waduk secara optimal. Polapengoperasian pintu pelimpah yang optimal akan mengatur bangunan pelimpah melimpahkan air, sehingga bendungan tidak mengalami *overtopping* tanpa mengakibatkan banjir pada bagian hilir. Pola operasi pintu tersebut mengatur jumlah dan tinggi bukaan pintu pada saat elevasi muka air tertentu, sehingga debit banjir yang dialirkan dari pintu pelimpah dapat diatur dan tidak melebihi kapasitas saluran di hilir bendungan. Dengan demikian, pola operasi pintu yang baik dapat didefinisikan sebagai pola yang

memperhitungkan debit *outflow* terhadap kapasitas bendungan dan juga kapasitas saluran di hilir. Selain itu, bendungan dengan tambahan pintu pada pelimpah terbukti memiliki kemampuan mengurangi debit banjir dibandingkan dengan bendungan sejenis tanpa pintu atau pelimpah tetap (Sordo-Ward et al., 2013, 2016).

Bendungan yang dikaji dalam studi ini adalah Bendungan Delingan yang berlokasi di Desa Delingan, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. Bendungan ini merupakan bagian dari wilayah Sungai Bengawan Solo. Bendungan yang memiliki fungsi utama untuk irigasi ini memiliki elemen bangunan yang cukup unik, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Bangunan pelimpah pada Bendungan Delingan termasuk dalam kategori pelimpah yang cukup kompleks, dengan 2 jenis pelimpah. Pelimpah bendungan ini terdiri dari dua (2) buah pelimpah bebas tipe ogee, empat (4) buah pintu pelimpah utama, dan empat (4) buah pintu pelimpah tambahan (lihat **Gambar 2**) (PT. Dehas Inframedia Karsa, 2017). Penentuan pola operasi pintu yang optimal tentu akan menjadi lebih rumit karena jumlah pintu yang banyak, terutama pada kondisi banjir. Selain itu, Bendungan Delingan yang tergolong bendungan tua ini (dibangun pada tahun 1920-1923), juga belum memiliki pedoman pola operasi pintu pelimpah yang dikategorikan terhadap banjir dengan berbagai periode ulang.

Bendungan Delingan yang termasuk pada klasifikasi bendungan besar ini, berpotensi menyebabkan bahaya apabila tidak memiliki tata cara operasi pintu pelimpah yang optimal. Bendungan Delingan. Studi ini bertujuan untuk menentukan pola operasi pintu pelimpah terhadap kapasitas tampungan dan kapasitas saluran Bendungan Delingan dengan pemodelan operasi bangunan pelimpah dalam rangka pengendalian banjir. Percobaan pemodelan operasi pintu ini akan diuji terhadap berbagai periode ulang untuk mengetahui pola operasi pintu paling optimal guna menunjang pilar keamanan bendungan.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan pada studi ini adalah penelusuran banjir waduk dengan sejumlah skenario bukaan pintu pelimpah, di mana pemodelan dilakukan dengan memanfaatkan piranti lunak *Hydrology Engineering Center – Hydrologic Modelling System* (HEC-HMS). Pemodelan pada piranti lunak ini menggunakan konsep tampungan linear sederhana (*linear reservoir*) dengan memperhatikan hubungan antara tampungan, *inflow* dan *outflow*. Laju perubahan volume tampungan terhadap *inflow* dan *outflow*

dalam sebuah waduk atau reservoir dapat dituliskan secara matematik sebagai berikut (Fenton, 1992) :

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t,S)$$

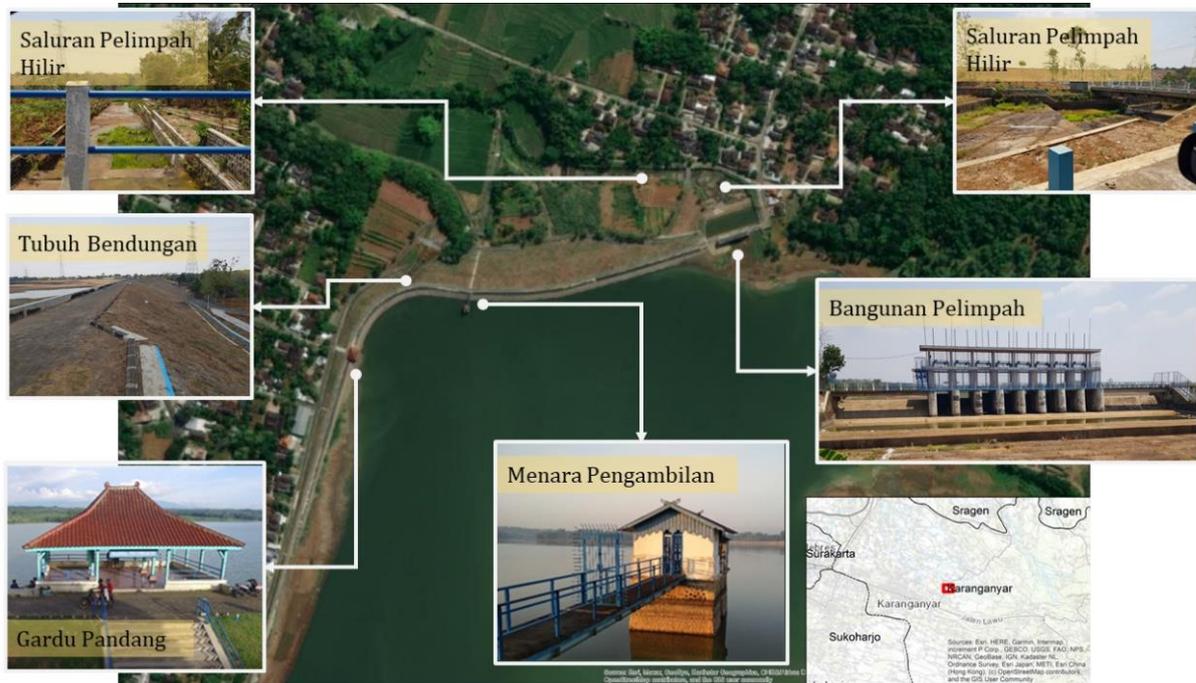
di mana:

S : volume tampungan (m³)

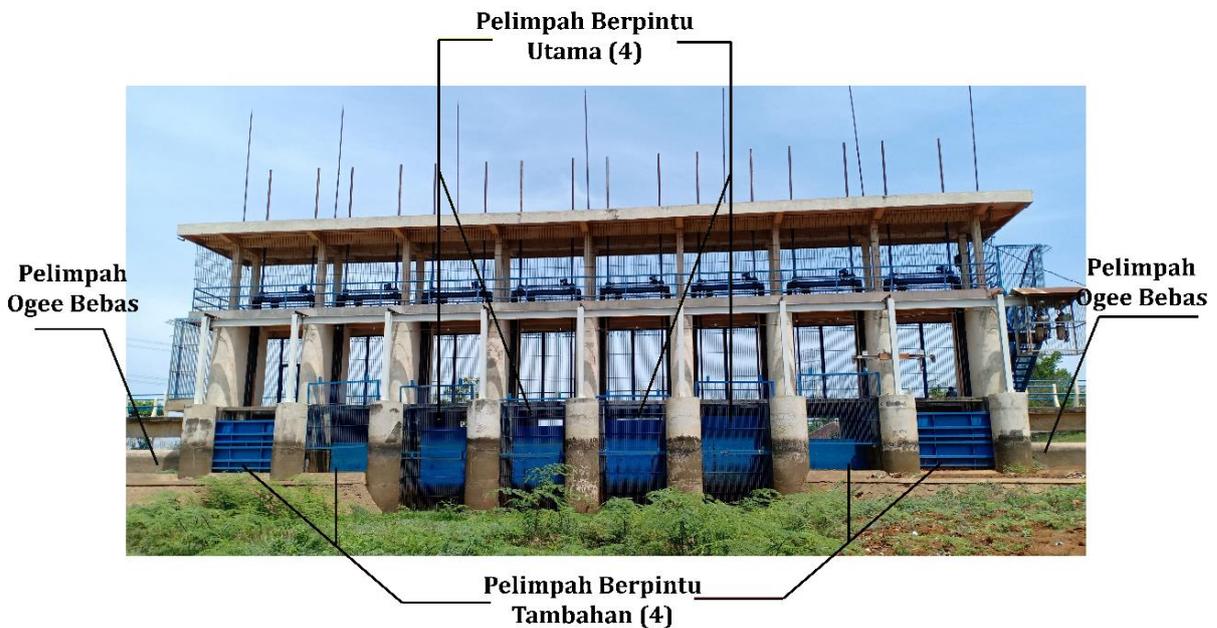
I(t) : debit *inflow* pada selang waktu tertentu (m³/s)

O(t,S) : fungsi debit *outflow* hasil dari tampungan terhadap waktu (m³/s)

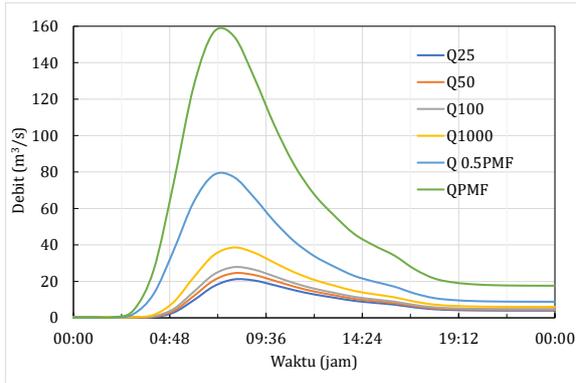
Inflow yang digunakan dalam perhitungan DTA pada sisi hilir dari waduk yang digambarkan pada **Gambar 3**.



Gambar 1 Skematisasi bangunan pada Bendungan Delingan

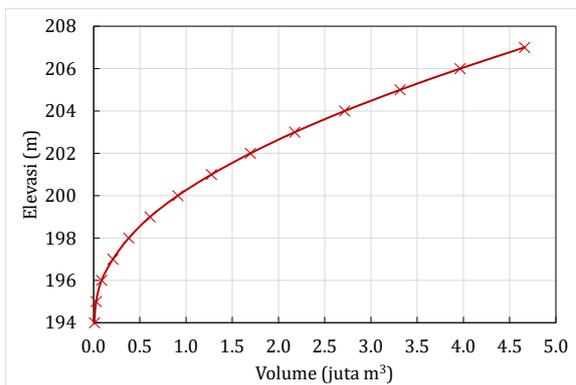


Gambar 2 Bangunan Pelimpah pada Bendungan Delingan



Gambar 3 Debit inflow hasil perhitungan daerah tangkapan air pada bagian hilir waduk

Selain itu, hubungan volume terhadap elevasi waduk diperoleh dari hasil pengukuran lapangan, yang tersaji pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Hubungan elevasi dan volume tampungan waduk hasil pengukuran

Besaran nilai *outflow*, kemudian, diterjemahkan sesuai dengan bangunan pelimpah yang digunakan pada tiap-tiap skenario. Dua persamaan debit pelimpah yang digunakan adalah persamaan untuk pelimpah ogee dan persamaan untuk pintu sorong; koefisien debit (*C_d*) terkalibrasi sebesar 2,1 untuk pelimpah bebas dan 1,8 untuk pintu sorong. Persamaan debit *outflow* untuk pelimpah ogee adalah:

$$Q = BC_d H^{\frac{3}{2}}$$

Sedangkan, persamaan debit *outflow* untuk pintu sorong adalah:

$$Q = C_d w B \sqrt{2gH}$$

di mana:

- Q* : debit *outflow* (m³/s)
- B* : lebar dasar pelimpah (m)
- C_d* : koefisien koreksi debit
- H* : tinggi energi pada hilir pelimpah (m)
- w* : tinggi bukaan pintu (m)
- g* : percepatan gravitasi (m/s²)

Seluruh skenario pola operasi pintu diuji pada berbagai periode ulang dengan mempertimbangkan dua syarat batas, yaitu terpenuhinya tinggi jagaan minimum dan kapasitas debit pada saluran pelimpah di hilir bendungan. Selain pengujian terhadap data historis dalam rangka menjaga keamanan bendungan, pengujian bendungan kini juga memerlukan ketahanan terhadap iklim seperti skema perubahan iklim dalam pola pengoperasian pintu pelimpah (Ferdowsi et al., 2020).

Berdasarkan SNI 2015, tinggi jagaan dapat didefinisikan sebagai tinggi minimal yang harus disediakan dari puncak bendungan hingga elevasi muka air banjir rencana (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Setidaknya ada lima faktor yang digunakan sebagai pertimbangan saat melakukan perencanaan tinggi jagaan untuk mengakomodir variasi muka air di waduk (Badan Standardisasi Nasional, 2015; Komisi Keamanan Bendungan, 2003). Oleh karena itu, tinggi jagaan minimum yang disyaratkan untuk *Q₁₀₀₀* adalah 1,50 m atau pada elevasi +205,36 m, sedangkan untuk *Q_{PMF}* adalah 1,25 m atau pada elevasi +205,61 m. Pada syarat batas kedua atau kapasitas debit saluran pelimpah di hilir bendungan, batas nilai debit maksimum yang digunakan adalah 24,7 m³/s.

Skenario pola operasi dibagi menjadi lima (5) bagian. Skenario pertama adalah kondisi semua pintu pelimpah tertutup atau hanya menggunakan pelimpah ambang bebas, skenario kedua membuka pintu tambahan, skenario ketiga adalah skenario dengan pintu tambahan dan pintu utama dibuka, skenario keempat membuka pintu utama terlebih dahulu, dan skenario kelima menguji pintu utama dengan besar bukaan secara bertahap. Rekapitulasi singkat mengenai skenario pemodelan pintu pelimpah disajikan secara pada **Tabel 1**. Seluruh skenario akan dikerjakan secara berurutan dan akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian berikut.

Tabel 1 Ringkasan skenario pemodelan

Skenario	Pintu yang dioperasikan	
	Utama	Tambahan
1	-	-
2	2.1	0
	2.2	4 (1 m)
3	3.1	1 (2 m)
	3.2	2 (2 m)
4	4.1	1 (1 m)
	4.2	1 (2 m)
	4.3	4 (2 m)
5	5.1 dan 5.2	2 (bertahap)
	5.3	4 (bertahap)

Skenario 1 (Semua Pintu Pelimpah Tertutup)

Skenario 1 memodelkan pola operasi tanpa menggunakan pintu pelimpah, sehingga pelimpah bebas menjadi satu-satunya pengaliran air dari bendungan. Skenario ini menjadi langkah awal untuk mengetahui debit periode ulang yang dapat dialirkan lewat pelimpah bebas saja. Skenario ini diuji pada debit banjir dengan berbagai periode ulang. Debit rencana yang sudah memenuhi syarat untuk tinggi jagaan minimum tidak akan dimodelkan pada skenario berikutnya, karena tidak berpotensi menyebabkan *overtopping*. Dengan kata lain, debit rencana tersebut tidak membutuhkan operasi pintu.

Skenario 2 (Pembukaan Pintu Tambahan)

Skenario 2 mensimulasikan debit rencana yang belum memenuhi syarat tinggi jagaan minimum atau kapasitas debit saluran pelimpah di bagian hilir pada Skenario 1. Skenario 2 terdiri atas dua jenis operasi, yaitu Skenario 2.1 dan Skenario 2.2.

Skenario 2.1 adalah kondisi dengan bukaan dua (2) buah pintu tambahan dengan tinggi bukaan maksimum, yaitu 1 m. Jika pembukaan dua pintu tambahan tidak dapat menurunkan elevasi muka air pada waduk, maka simulasi pembukaan pintu tambahan sebanyak empat buah dengan tinggi bukaan pintu 1 meter akan dilakukan atau disebut sebagai Skenario 2.2. Sebagai syarat batas, jumlah pembukaan pintu yang dapat dibuka secara bersamaan adalah dua buah pintu atau lebih. Syarat ini dibuat dengan mempertimbangkan kondisi lapangan, saat pintu pelimpah harus dibuka secara bersamaan, oleh karena keterbatasan pemodelan pintu secara otomatis pada HEC-RAS (Scharffenberg et al., 2018). Simulasi dengan jumlah pintu lebih dari dua maka pintu akan dibuka dengan asumsi jeda waktu 5 menit.

Penentuan waktu awal pintu dioperasikan menjadi faktor penting dalam menjaga tinggi jagaan tetap tercapai. Apabila pembukaan pintu terlambat, kondisi ini dapat menyebabkan *overtopping*. Agar lebih intuitif, pembukaan pintu ditinjau berdasarkan tinggi muka air di atas mercu (pelimpah bebas) dengan kelipatan variasi tinggi muka air sebesar 5 cm sampai dengan 55 cm. Penentuan ini disimulasikan untuk debit rencana pada periode ulang terkecil yang tidak memenuhi kriteria pada Skenario 1.

Selain waktu mulai operasi pintu, waktu penutupan pintu juga perlu ditentukan untuk mendapatkan kapasitas tampungan yang maksimal di bendungan sehingga debit *outflow* dapat teredam secara maksimal. Simulasi tersebut dilakukan pada ketinggian muka air yang bervariasi juga.

Penutupan pintu dilakukan saat debit sudah mencapai debit kapasitas saluran, sehingga besar debit air menurun secara drastis. Penutupan pintu yang terlambat dapat mengakibatkan kurangnya kapasitas air pada waduk dan debit air melewati kapasitas debit di saluran.

Setelah didapatkan pembukaan dan penutupan pintu yang efektif untuk debit rencana dengan periode ulang terkecil yang tidak lolos pada Skenario 1, pola operasi serupa juga digunakan untuk debit rencana periode ulang selanjutnya. Hasil simulasi antara elevasi muka air terhadap waktu dapat digunakan sebagai indikator penentu kecepatan kenaikan elevasi, dengan memperhatikan kemiringan dari kurva tersebut. Indikator tersebut dapat digunakan untuk estimasi periode ulang banjir yang mungkin terjadi di lapangan. Waktu yang diukur adalah waktu kenaikan muka air saat pintu dibuka sampai pintu ditutup.

Apabila hasil simulasi debit *outflow* tidak memenuhi syarat tinggi jagaan dan kapasitas debit saluran, maka debit rencana tersebut dimodelkan lebih lanjut pada Skenario 3.

Skenario 3 (Pembukaan Pintu Utama dan Pintu Tambahan)

Skenario 3 merupakan skenario dengan pemodelan lanjutan dari Skenario 2. Skenario 3 membuka pintu utama satu persatu dengan tinggi bukaan 2 meter. Oleh karena itu, pengaturan pembukaan pintu utama akan mengikuti keperluan kontrol debit dan muka air seperti yang telah dijelaskan pada Skenario 2.

Skenario 4 (Pembukaan Pintu Utama)

Skenario 4 adalah pemodelan yang mirip dengan Skenario 2, dengan perbedaan pembukaan awal pintu Skenario 4 adalah pintu utama. Skenario 4 bertujuan untuk mengetahui kapasitas pintu utama yang memenuhi syarat tinggi jagaan minimum dan kapasitas debit saluran. Tinggi pembukaan pintu utama akan dimulai dengan besaran 1 m dan bertahap dengan menyesuaikan tinggi muka air di waduk. Jumlah pintu yang dibuka akan disesuaikan untuk memenuhi syarat tinggi jagaan minimum, sehingga penamaan skenario akan dilakukan setelah hasil didapatkan dengan nama Skenario 4.1, Skenario 4.2 dan seterusnya.

Skenario 5 (Pembukaan Pintu Utama Secara Bertahap)

Skenario 5 juga akan memodelkan pembukaan pintu utama untuk debit rencana yang tidak lolos pada Skenario 1, dengan bukaan pintu secara bertahap. Simulasi diawali dengan pembukaan

pintu utama dengan besar bukaan 25 cm untuk setiap pintu. Jumlah bukaan pintu utama dipertimbangkan dari hasil iterasi pada Skenario 4. Pertama, pintu akan dibuka pada tinggi muka air 10 cm di atas ambang, kemudian tinggi bukaan pintu akan diperbesar 25 cm jika muka air terus naik hingga 10 cm berikutnya. Skenario ini bertujuan untuk mengamati perbedaan debit *outflow* hasil dari bukaan pintusecara bertahap dengan bukaan pintu secara maksimum.

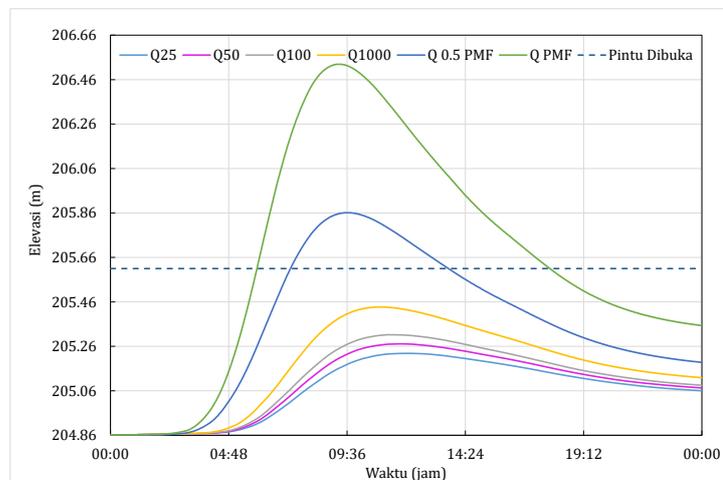
HASIL DAN PEMBAHASAN

Skenario 1

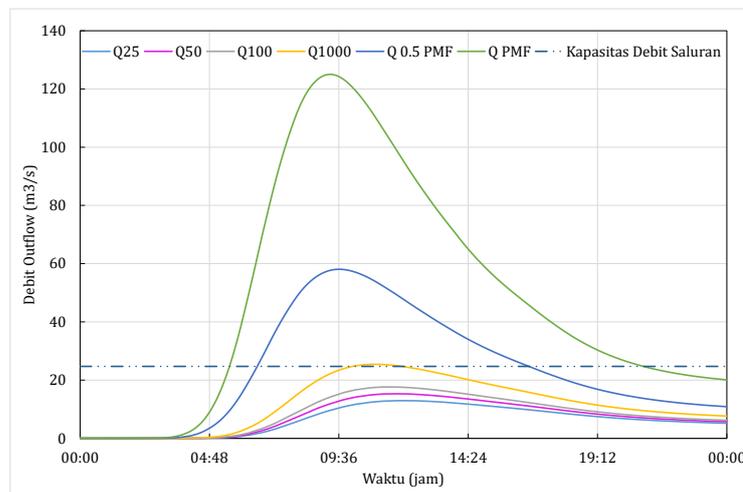
Gambar 5 dan **Gambar 6** menunjukkan hasil simulasi Skenario 1 untuk hubungan elevasi tampungan terhadap waktu dan hubungan debit *outflow* terhadap waktu, secara berurutan. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian metodologi tentang syarat batas elevasi dan kapasitas debit saluran pelimpah, hasil dari simulasi menunjukkan

bahwa debit rencana yang tidak memenuhi syarat batas tersebut adalah debit rencana dengan periode ulang 1000 (Q_{1000}) tahun, 0,5 PMF ($Q_{0,5-PMF}$) dan PMF (Q_{PMF}). Pada **Gambar 5**, elevasi maksimum muka air hasil simulasi Q_{1000} lebih tinggi daripada tinggi jagaan yang disyaratkan, sedangkan nilai elevasi maksimum muka air untuk $Q_{0,5-PMF}$ dan Q_{PMF} juga lebih tinggi dari tinggi jagaan minimal yang disyaratkan. Selain itu, nilai debit *outflow* pada ketiga debit rencana tersebut juga melebihi dari kapasitas saluran pelimpah pada bagian di hilir ($24,7 \text{ m}^3/\text{s}$), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Hasil ini juga menyimpulkan bahwa simulasi dengan operasi pintu dibutuhkan untuk menurunkan debit *outflow*serta tetap menjaga tinggi jagaan untuk Q_{1000} , $Q_{0,5-PMF}$ dan Q_{PMF} .Ketiga debit rencana tersebut akan dievaluasi untuk skenario dengan operasi pintu, pada skenario-skenario berikutnya.



Gambar 5 Elevasi muka air hasil simulasi Skenario 1



Gambar 6 Hidrograf *Outflow* hasil simulasi Skenario

Skenario 2.1

Pemodelan Skenario 2.1 diawali dengan mengevaluasi Q_{1000} , serta menentukan waktu pembukaan dan penutupan pintu berdasarkan tinggi muka air di atas ambang. Penentuan bukaan pintu saat tinggi air di atas bertujuan untuk menjaga kapasitas volume air di dalam waduk untuk keperluan irigasi. Sesuai dengan penjelasan pada metodologi Skenario 2.1, hasil iterasi tinggi muka air yang paling ideal untuk pintu mulai dioperasikan adalah saat tinggi muka air mencapai 10 cm di atas ambang. Hasil ini memberikan nilai elevasi dan debit yang paling ideal untuk dikontrol pada Q_{1000} . Tinggi muka air di atas ambang yang lebih besar dari 10 cm menyebabkan debit *outflow* lebih sulit untuk dikontrol, sedangkan nilai yang lebih kecil dari 10 cm sulit untuk dideteksi di lapangan. Dengan bukaan ini juga, elevasi muka air pada tampungan waduk tidak mengalami penurunan yang signifikan atau hanya sebesar 3 cm (dibandingkan saat pintu belum beroperasi), sehingga fungsi peredam banjir dapat tetap terjadi.

Sedangkan waktu untuk penutupan pintu juga diiterasi sampai debit *outflow* dapat ditekan serendah mungkin, tanpa menyebabkan *overtopping* pada tubuh bendungan. Hasil menunjukkan bahwa penutupan dua buah pintu pelimpah tambahan setelah muka air mencapai 20 cm di atas ambang memberikan nilai debit *outflow* maksimum yang paling rendah. Hasil simulasi operasi pintu dengan skenario 2.1 untuk Q_{1000} disajikan pada **Gambar 7**. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa debit *outflow* maksimum yang limpas adalah sebesar 22,84 m³/s, namun tinggi jagaan kritis tercatat sebesar 1,47 m (El. +205,39 m) atau lebih kecil dari yang disyaratkan untuk Q_{1000} .

Pada Skenario 2.1 saat kondisi penutupan pintu dilakukan saat muka air telah mencapai 20 cm di atas ambang, debit *outflow* dapat ditekan sampai lebih rendah dari batas kapasitas salurannya. Namun, operasi tersebut memberikan konsekuensi kenaikan muka air pada waduk hingga tidak tinggi kritisnya tidak tercapai. Hal ini juga dibuktikan dengan simulasi tanpa penutupan pintu dengan operasi yang sama, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**. Tinggi jagaan kritis yang dihasilkan adalah sebesar 1,68 meter, dengan puncak debit *outflow* 29,00 m³/s. Hal ini juga menunjukkan bahwa hubungan kontrol antara tinggi jagaan dan debit *outflow* sangat bergantung antara satu dengan yang lain, terutama ketika pintu sudah mulai dioperasikan.

Selanjutnya, Skenario 2.1 juga dievaluasi terhadap $Q_{0,5-PMF}$ dan Q_{PMF} . Hasil evaluasi menunjukkan bahwa Skenario 2.1 tidak dapat

mengendalikan banjir dengan $Q_{0,5-PMF}$ dan Q_{PMF} , terutama untuk debit *outflow* yang dihasilkan. Oleh karena itu, pembukaan pintu tambahan lagi perlu dioperasikan, yang akan disimulasikan pada Skenario 2.2.

Skenario 2.2

Saat operasi pintu di lapangan, petugas lapangan tidak dapat mengidentifikasi periode ulang dari debit banjir rencana. Salah satu metode untuk mengidentifikasi debit banjir rencana tersebut secara praktis adalah mengamati penambahan tinggi muka air pada bendungan. Dengan memperhatikan kecepatan penambahan elevasi muka air dengan simulasi Skenario 2.1, penyesuaian terhadap operasi pintu untuk debit banjir yang lebih besar dapat dilakukan. Kenaikan elevasi muka air dapat diamati lewat kemiringan/gradien dari grafik hasil simulasi elevasi muka air terhadap waktu.

Hasil dari kecepatan penambahan elevasi muka air disajikan pada **Tabel 2**. Pada tabel tersebut, kenaikan elevasi muka air dapat diamati dengan memperhatikan waktu yang dibutuhkan untuk elevasi muka air mencapai 20 cm di atas ambang, atau sebelum pintu ditutup sesuai dengan pola operasi pada Skenario 2.1. Petugas lapangan harus melakukan tindak lanjut operasi, apabila waktu yang dibutuhkan untuk elevasi muka air mencapai 20 cm di atas ambang kurang dari sama dengan 60 menit. Petugas dapat mengambil langkah lebih lanjut untuk membuka lagi pintu tambahan yang lain. Pada skenario 2.2, pintu tambahan sebanyak 2 akan dibuka lagi pada saat muka air telah mencapai tinggi 20 cm di atas ambang. Sesuai dengan pertimbangan tersebut, operasi pembukaan pintu lebih lanjut hanya akan dilakukan untuk $Q_{0,5-PMF}$ dan Q_{PMF} .

Tabel 2 Kecepatan Penambahan Elevasi Muka Air Skenario 2.1

Debit Periode Ulang	Selisih waktu antara muka air 10 dan 20 cm (menit)	Kenaikan Elevasi (cm/20 menit)
Q_{1000}	109	1,8
$Q_{0,5-PMF}$	63	3,2
Q_{PMF}	46	4,3

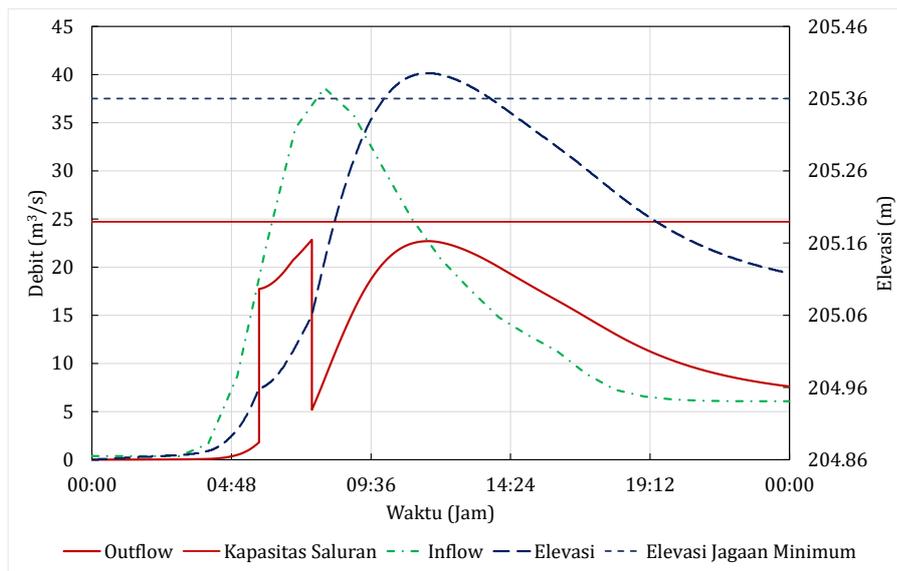
Hasil simulasi untuk $Q_{0,5-PMF}$ disajikan pada **Gambar 9**. Lonjakan pertama pada grafik hubungan antara debit *outflow* terhadap waktu menunjukkan operasi dua (2) pintu tambahan yang mengacu pada aturan Skenario 2.1. Selanjutnya, lonjakan kedua pada grafik yang sama menunjukkan operasi dua (2) pintu tambahan lagi apabila muka air telah

mencapai 20 cm di atas ambang dengan waktu kurang dari sama dengan 60 menit.

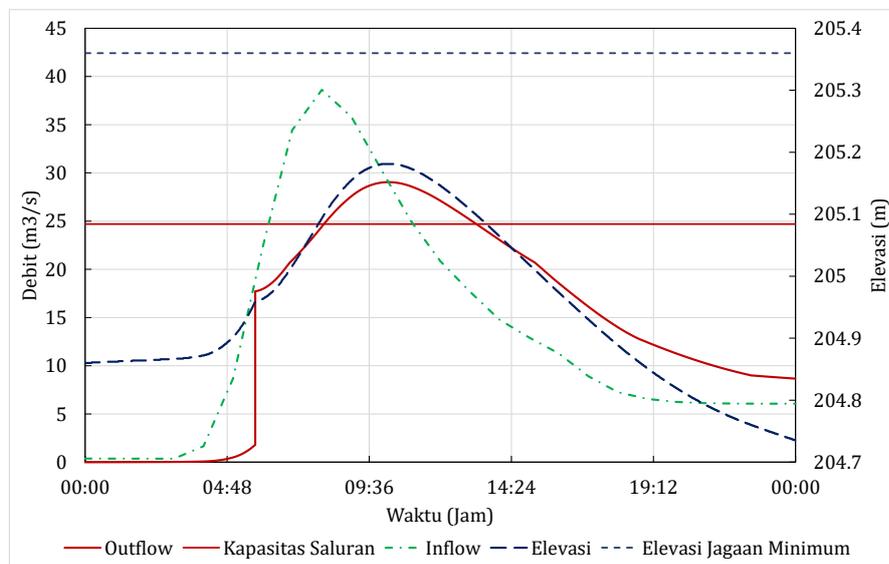
Serupa dengan skenario sebelumnya, percobaan penutupan pintu juga perlu diiterasikan agar dapat meredam debit banjir dengan optimal. Pertimbangan yang digunakan untuk penentuan hasil optimal ini adalah kemampuan operasi untuk menekan debit *outflow*, agar tidak terjadi kenaikan muka air lebih lanjut setelah debit puncak tercapai. Hasil yang paling optimal menunjukkan bahwa untuk $Q_{0,5-PMF}$, operasi penutupan pintu dapat dilakukan setelah debit puncak banjir terjadi. Hal ini dipilih dengan alasan agar saat tinggi jagaan minimum tetap dapat terpenuhi, berarti keamanan bendungan dari *overtopping* tetap dapat terjaga.

Selain itu, penutupan pintu setelah debit puncak untuk $Q_{0,5-PMF}$ juga mampu meredam debit banjir, walaupun belum sangat baik.

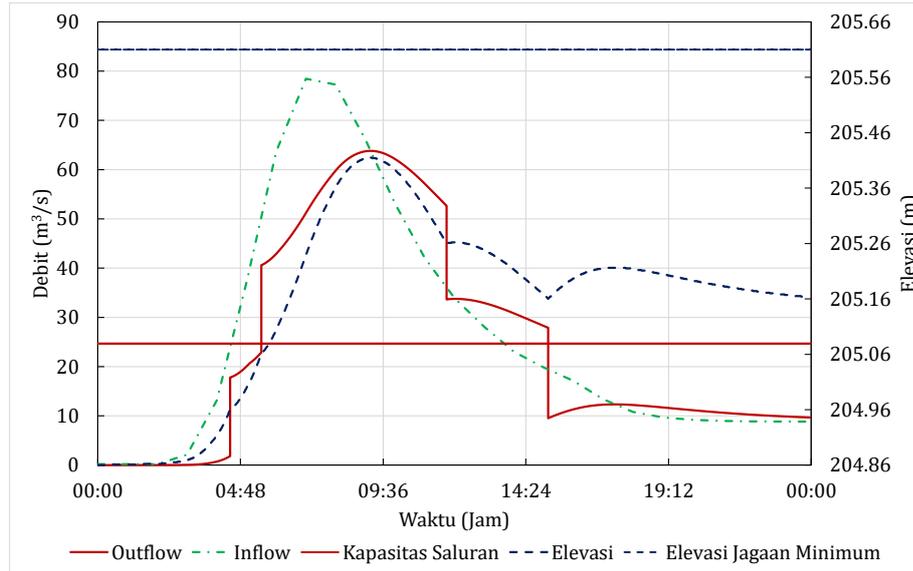
Agar debit *outflow* tetap dapat terkontrol, penutupan pintu dibuat menjadi 2 tahap, dimana masing-masing tahap hanya menutup 2 buah pintu tambahan saja. Penutupan pintu tambahan tahap pertama dilakukan pada saat tinggi muka air 40 cm, kemudian penutupan tahap kedua dilakukan saat tinggi muka air turun sampai 30 cm. Simulasi dengan Skenario 2.2 untuk $Q_{0,5-PMF}$ menghasilkan debit *outflow* puncak pada saluran pelimpah sebesar $63,82 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan tinggi jagaan sebesar 1,45 m.



Gambar 7 Hidrograf Q_{1000} dengan tutupan pintu hasil simulasi Skenario 2.1



Gambar 8 Hidrograf Q_{1000} tanpa tutupan pintu hasil simulasi Skenario 2.1



Gambar 9 Hidrograf $Q_{0.5PMF}$ hasil simulasi Skenario 2.2

Pemodelan yang sama (Skenario 2.2) juga diterapkan untuk Q_{PMF} . Hasil menunjukkan bahwa, empat(4) buah pintu tambahan dengan bukaan maksimum tidak cukup untuk Q_{PMF} memenuhi syarat tinggi jagaan minimum. Oleh karena itu, Q_{PMF} akan dilanjutkan pada skenario berikutnya yaitu Skenario 3.

Skenario 3

Pola bertahap dari Skenario 2.1 untuk Q_{1000} ke Skenario 2.2 untuk $Q_{0.5-PMF}$ juga akan diterapkan pada Skenario 3 untuk Q_{PMF} . Oleh karena itu, kecepatan penambahan elevasi muka air akan terlebih dahulu dibandingkan antara $Q_{0.5-PMF}$ dan Q_{PMF} . Tabel 3 menyajikan waktu yang dibutuhkan untuk muka air mencapai 25 cm pada kedua debit rencana tersebut. Selisih waktu yang dihasilkan pada kedua debit tersebut sangatlah sedikit, yaitu hanya sekitar 10 menit. Hal ini menjadi indikasi bahwa pada kondisi debit banjir $Q_{0.5-PMF}$ dan Q_{PMF} , pengoperasian yang tidak tepat dapat menyebabkan pengendalian banjir yang tidak efektif terjadi.

Tabel 3 Kecepatan Penambahan Elevasi Muka Air Skenario 3

Debit Periode Ulang	Selisih waktu antara muka air 10 dan 20 cm (menit)	Kenaikan Elevasi (cm/10 menit)
$Q_{0.5-PMF}$	33	1,5
Q_{PMF}	20	2,5

Jika terindikasi Q_{PMF} terjadi dengan kenaikan muka air sebesar 5 cm (20 cm ke 25 cm) diatas ambang selama kurang dari 30 menit, maka pembukaan pintu utama perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya *overtopping*. Pintu utama yang perlu dioperasikan untuk Q_{PMF} adalah sebanyak dua

(2) dengan bukaan maksimum 2 meter. Pemodelan ini berhasil memenuhi tinggi jagaan minimum dengan debit *outflow* yang tereduksi dibanding debit *inflow*, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10**.

Pemodelan penutupan pintu juga dilakukan secara bertahap seperti untuk $Q_{0.5-PMF}$. Penutupan pintu secara berurutan yaitu 2 buah pintu utama, 2 buah pintu tambahan, dan 2 buah pintu tambahan sisanya. Pintu utama ditutup pada elevasi muka air 60 cm, kedua pintu tambahan ditutup pada elevasi muka air 50 cm, dan kedua pintu tambahan lainnya ditutup pada elevasi muka air 40 cm. Dengan pola demikian, debit maksimum *outflow* untuk Q_{PMF} adalah 135,11 m³/s dengan tinggi jagaan sebesar 1,29 m.

Skenario 4.1

Skenario 4 mengulang pemodelan dari Skenario 2, yang dilakukan dengan percobaan pembukaan pintu utama terlebih dahulu. Kondisi Skenario 4.1 diujikan untuk Q_{1000} dan akan disesuaikan secara bertahap untuk debit periode ulang yang lebih besar. Hasil pada Skenario 4.1 yang paling optimal untuk menekan debit *outflow* adalah pembukaan pintu utama sebanyak 1 buah dengan tinggi bukaan 2 meter.

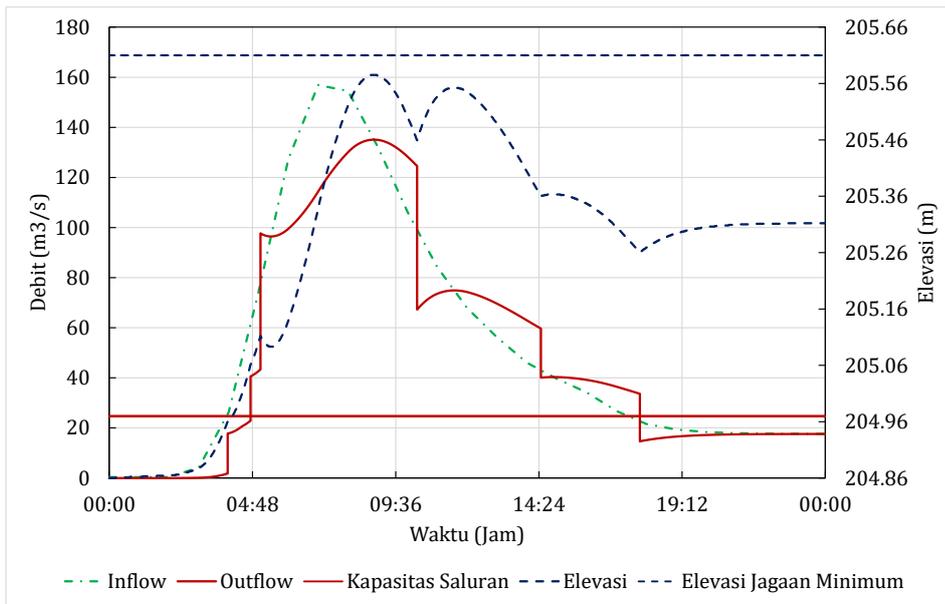
Gambar 11 menunjukkan hasil simulasi Q_{1000} dengan Skenario 4.1. Pada skenario ini, pintu utama dioperasikan saat tinggi muka air 20 cm di atas ambang, atau 10 cm lebih tinggi dibandingkan dengan Skenario 2.1 (operasi pintu tambahan terlebih dahulu). Selain itu, hasil iterasi yang paling optimal untuk menekan debit *outflow* adalah saat tinggi muka air 30 cm di atas ambang. Dengan operasi pintu tersebut, debit *outflow* yang

dihasilkan lebih kecil dari kapasitas debit saluran pelimpah, yaitu sebesar 23,65 m³/s. Akan tetapi, debit *outflow* tersebut lebih besar dibandingkan dengan debit *outflow* pada Skenario 2.1.

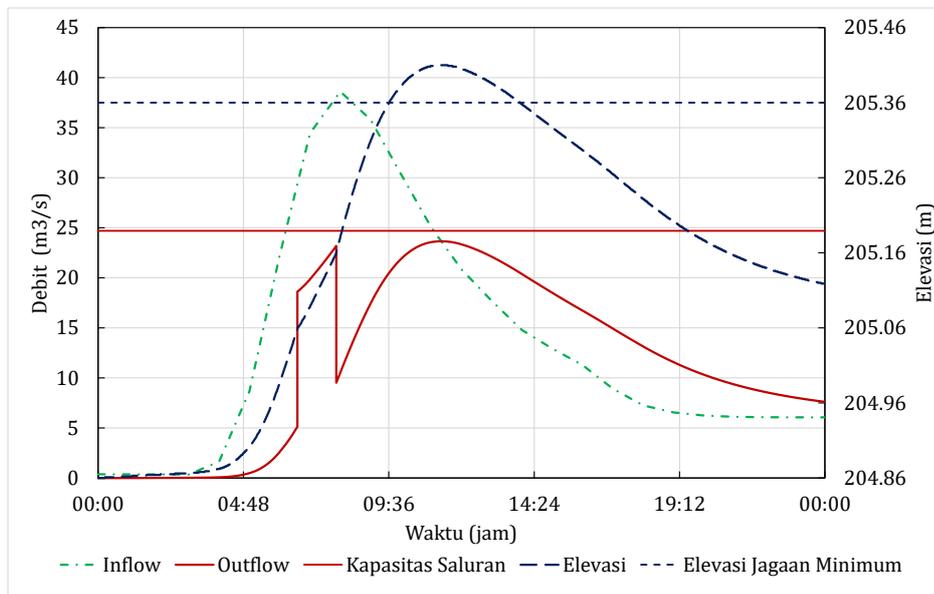
Skenario 4.1 dapat mereduksi debit maksimum Q₁₀₀₀ sehingga memenuhi kapasitas debit saluran, tetapi syarat tinggi jagaan minimum menjadi tidak terpenuhi. Pada saat iterasi dilakukan untuk Skenario 4.1 ditemukan bahwa, apabila penutupan pintu utama tidak dilakukan, maka tinggi jagaan akan terpenuhi namun debit *outflow* akan menjadi lebih tinggi, dan sebaliknya.

Skenario 4.2

Dengan tujuan proses pembukaan pintu yang berkelanjutan, Skenario 4.1 juga dievaluasikan terhadap Q_{0,5-PMF} dan Q_{PMF} untuk mendapatkan nilai penambahan elevasi muka air. Hasil uji kenaikan elevasi muka air tersebut disajikan pada **Tabel 4**. Apabila muka air mencapai 30 cm di atas ambang setelah pembukaan pintu utama dilakukan membutuhkan waktu kurang dari 60 menit, maka memperbesar bukaan pintu menjadi 2meter dapat dilakukan untuk mengakomodir besaran Q_{0,5-PMF}. Waktu ini juga dapat digunakan sebagai deteksi debit banjir secara praktis untuk debit yang lebih besar daripada Q₁₀₀₀.



Gambar 10 Hidrograf Q_{PMF} hasil simulasi Skenario 3



Gambar 11 Hidrograf Q₁₀₀₀ hasil simulasi Skenario 4.1

Tabel 4 Kecepatan Kenaikan Elevasi Muka Air Skenario 4.2

Debit Periode Ulang	Selisih waktu antara muka air 10 dan 20 cm (menit)	Kenaikan Elevasi (cm/20 menit)
Q1000	77	2,6
Q _{0,5-PMF}	40	5,0
Q _{PMF}	27	7,4

Gambar 12 adalah hasil Skenario 4.2 untuk Q_{0,5-PMF}, dengan bukaan pintu utama sebanyak 1 buah pada saat elevasi muka air di atas ambang sebesar 20 cm (lonjakan 1) dan memperbesar bukaan pintu yang sama saat 30 cm di atas ambang (lonjakan 2). Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa debit maksimum Q_{0,5-PMF} juga tidak dapat direduksi hingga memenuhi syarat kapasitas debit saluran sebesar 62,40 m³/s, akan tetapi nilainya lebih kecil dari Skenario 2.2. Penutupan pintu dilakukan setelah puncak banjir terlewati dengan waktu penutupan pintu adalah pada kondisi dimana elevasi muka air 60 cm di atas ambang. Selain itu, dengan Skenario 4.2 tinggi jagaan kritis untuk Q_{0,5-PMF} masih terpenuhi.

Skenario 4.3

Pengujian Skenario 4.2 untuk deteksi Q_{PMF} juga dilakukan dengan mengamati kenaikan muka air setelah bukaan pintu utama kedua. Kenaikan muka air hingga 40 cm di atas ambang setelah bukaan pintu kedua untuk Q_{PMF} memerlukan waktu kurang dari 30 menit, seperti yang disajikan pada **Tabel 5**. Apabila Q_{PMF} terdeteksi, maka tambahan tiga (3) buah pintu dengan bukaan 2 meter dibutuhkan untuk mengalirkan debit tersebut, atau yang disebut sebagai Skenario 4.3. Skenario 4.3 dibuat agar tinggi jagaan minimum tercapai dengan membuka pintu utama lainnya ketika tinggi air mencapai 40 cm di atas ambang.

Gambar 13 menunjukkan hasil simulasi Skenario 4.3 untuk Q_{PMF}. Penutupan pintu juga dilakukan setelah debit puncak tercapai, secara bertahap. Penutupan pintu secara bertahap ini dimaksudkan untuk tetap menjaga tinggi muka air pada bendungan turun secara bertahap. Penutupan pintu dilakukan setelah penurunan muka air pada saat 40 cm di atas ambang sebanyak 2 pintu, 30 cm di atas ambang sebanyak 1 pintu dan 20 cm di atas ambang sisanya. Skenario 4.3 ini juga menghasilkan debit *outflow* puncak yang lebih tinggi dibandingkan Skenario 3, yaitu sebesar 140,90 m³/s. Sedangkan tinggi jagaan kritis masih berhasil dipertahankan.

Tabel 5 Kecepatan Kenaikan Elevasi Muka Air Skenario 4.3

Debit Periode Ulang	Selisih waktu antara muka air 10 dan 20 cm (menit)	Kenaikan Elevasi (cm/10 menit)
Q _{0,5-PMF}	44	2,3
Q _{PMF}	26	3,8

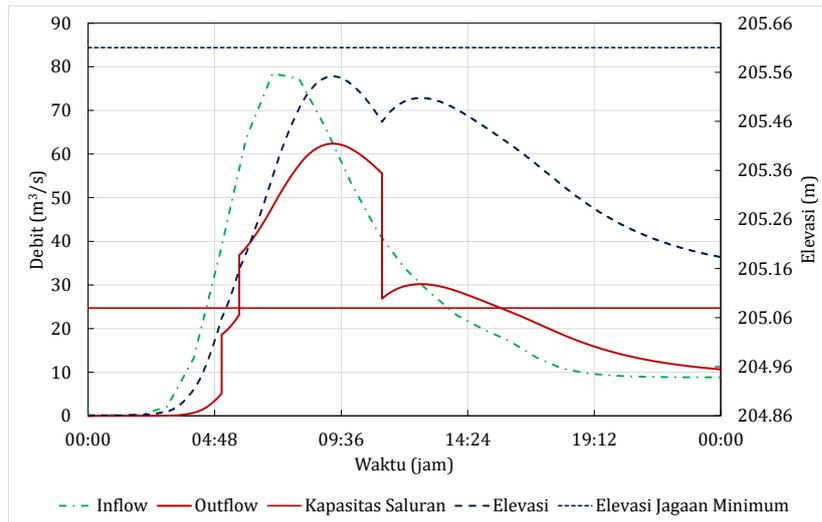
Skenario 5

Skenario 5 menyajikan hasil simulasi bangunan pelimpah dengan bukaan pintu yang bertahap. Hasil iterasi untuk Skenario 5 didasari dari hasil Skenario 4, yang bukaannya disajikan pada **Tabel 6**. Jumlah pintu yang dibuka untuk Q₁₀₀₀ dan Q_{0,5-PMF} adalah 2 buah pintu, dan Q_{PMF} adalah 4 buah pintu. Skenario ini juga memodelkan operasi tanpa penutupan pintu, dengan berfokus pada debit *outflow* yang dihasilkan. **Gambar 14**, **Gambar 15**, dan **Gambar 16** adalah hasil pemodelan skenario 5 untuk Q₁₀₀₀, Q_{0,5-PMF} dan Q_{PMF}, secara berturutan.

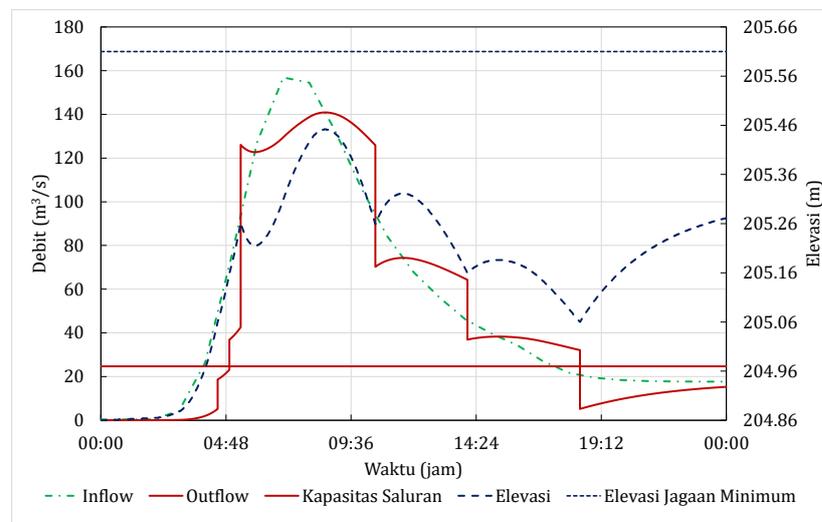
Pemodelan dengan Skenario 5 untuk Q₁₀₀₀; Q_{0,5-PMF} dan Q_{PMF}, secara umum memberikan nilai debit *outflow* puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario-skenario sebelumnya. Simulasi dengan debit limpasan yang lebih besar ini tidak berarti tinggi muka air di dalam waduk sepenuhnya terjaga. Walaupun tinggi jagaan kritis pada simulasi Q₁₀₀₀ dan Q_{0,5-PMF} menjadi lebih baik, namun tinggi jagaan untuk Q_{PMF} tidak terpenuhi, dengan besaran 1,20 m, lebih kecil daripada skenario yang lainnya. Skenario dengan bukaan pintu secara bertahap, seharusnya memberikan gambaran operasi yang lebih akurat, oleh karena itu penelitian ini dapat dikembangkan lebih baik lagi dengan pemodelan operasi pintu otomatis. **Tabel 7** menyajikan hasil resume pemodelan operasi pintu pelimpah Bendungan Delingan untuk berbagai skema.

Tabel 6 Pola Operasi untuk Bendungan Delingan Skenario 5

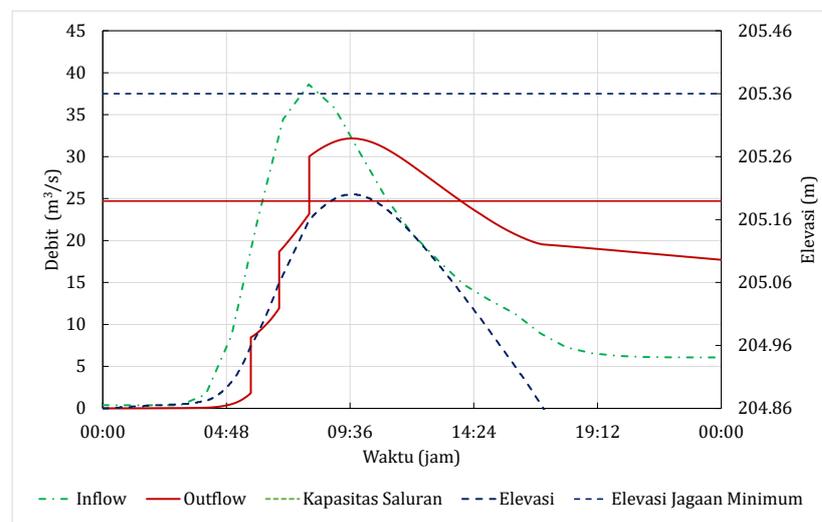
Tinggi Air di atas Ambang (cm)	Nama Skenario		
	5.1 - Q ₁₀₀₀ Besar bukaan 2 buah pintu utama (m)	5.2 - Q _{0,5-PMF} Besar bukaan 2 buah pintu utama (m)	5.3 - Q _{PMF} Besar bukaan 4 buah pintu utama (m)
10	0,25	0,25	0,25
20	0,50	0,50	0,50
30	0,75	0,75	0,75
40		1,00	1,00
50		1,25	1,25
60		1,50	1,50
70			1,75



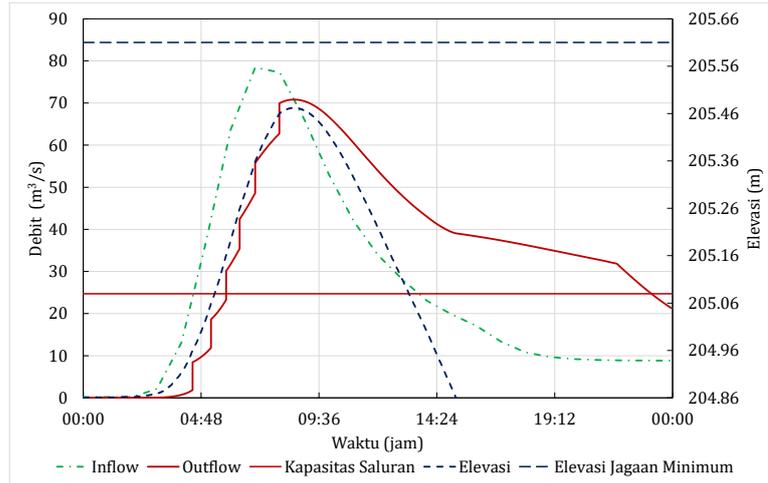
Gambar 12 Hidrograf $Q_{0.5-PMF}$ hasil simulasi Skenario 4.2



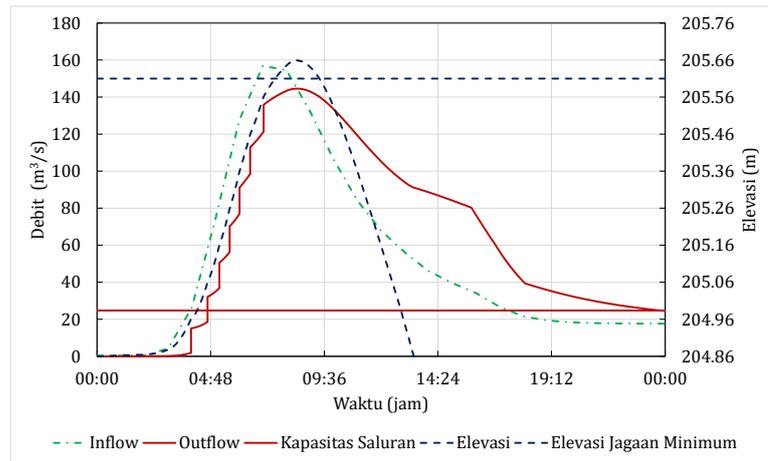
Gambar 13 Hidrograf Q_{PMF} hasil simulasi Skenario 4.3



Gambar 14 Hidrograf Q_{1000} hasil simulasi Skenario 5.1



Gambar 15 Hidrograf $Q_{0.5-PMF}$ hasil simulasi Skenario 5.2



Gambar 16 Hidrograf Q_{PMF} hasil simulasi Skenario 5.3

Tabel 7 Resume skenario pemodelan operasi pintu

Skenario	Q_{25}		Q_{50}		Q_{100}		Q_{1000}		$Q_{0.5-PMF}$		Q_{PMF}	
	Debit puncak (m³/s)	Tinggi jagaan (m)										
Inflow	21,10		24,50		27,90		38,60		78,50		156,90	
1	12,94	1,63	15,26	1,59	17,59	1,55	25,41	1,42	58,09	1,00	125,02	0,33
2.1	19,04	1,83	20,91	1,82	22,55	1,81	22,84	1,47				
2.2									63,82	1,45		
3											135,11	1,29
4.1	19,22	1,79	20,61	1,76	22,25	1,72	23,65	1,45				
4.2									62,40	1,31		
4.3											140,90	1,41
5.1							32,16	1,66				
5.2									70,81	1,39		
5.3											144,57	1,20

KESIMPULAN

Dalam rangka pengendalian banjir dan turut serta menunjang pilar keamanan bendungan, pola operasi pintu pelimpah Bendungan Delingan telah diuji terhadap berbagai skenario. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa operasi dengan ambang bebas

atau tanpa pintu (atau skenario 1) masih memenuhi debit banjir rencana Q_{25} , Q_{50} dan Q_{100} . Untuk debit banjir rencana yang lebih besar, pintu pelimpah harus dioperasikan. Pemilihan skenario terbaik juga didasari pada kondisi dimana operasi di lapangan akan dilakukan berdasarkan tinggi muka air pada waduk.

Secara umum, pola operasi untuk Q_{1000} tidak memenuhi syarat tinggi jagaan minimum. Dengan demikian, pola operasi yang direkomendasikan untuk Q_{1000} adalah Skenario 4.1, dengan debit *outflow* maksimum sebesar 23,65 m³/s. Hal ini didasari bahwa pola ini akan lebih baik untuk debit banjir rencana dengan periode ulang yang lebih besar.

Pola operasi Skenario 1, 2, 3, 4, dan 5 tidak mampu mereduksi besar debit puncak untuk $Q_{0.5-PMF}$ dan Q_{PMF} hingga mencapai kapasitas debit saluran, tetapi pola operasi dengan pintu dapat mereduksi elevasi muka air hingga memenuhi syarat tinggi jagaan minimum. Untuk $Q_{0.5-PMF}$, pola operasi yang memenuhi syarat tinggi jagaan dengan besar debit puncak terkecil adalah pembukaan 1 buah pintu utama dengan tinggi bukaan 2 meter (Skenario 4.2) dengan besar debit maksimum 62,4 m³/s dan tinggi jagaan 1,31 meter.

Untuk Q_{PMF} , pola operasi yang memenuhi syarat tinggi jagaan minimum dengan debit puncak terkecil adalah pola operasi pembukaan 4 buah pintu utama dengan tinggi bukaan masing-masing pintu 2 meter (Skenario 4.3). Pola ini akan menghasilkan debit *outflow* puncak sebesar 140,90 m³/s, dan tercapainya tinggi jagaan minimum sebesar 1,41 m.

Berdasarkan pertimbangan diatas, pola operasi yang direkomendasikan adalah Skenario 4, dengan pembukaan pintu utama pelimpah terlebih dahulu. Pola ini akan menghasilkan operasi yaitu, pembukaan 1 pintu utama sebesar 1 meter pada tinggi muka air 20 cm diatas ambang. Apabila tidak ada penurunan muka air lebih lanjut, maka bukaan pintu yang sama harus diperbesar menjadi 2 meter, pada kondisi ini $Q_{0.5-PMF}$ diestimasi telah terjadi. Jika kondisi ini tetap tidak menurunkan muka air, maka bukaan 3 pintu utama lainnya dengan besar 2meter harus segera diimplementasikan (atau ketika Q_{PMF} sedang terjadi). Penutupan pintu sendiri akan dilakukan saat puncak telah tercapai, dan dilakukan secara bertahap. 2 pintu pada saat muka air mencapai 40 cm diatas ambang, dan setiap pintu secara bertahap saat muka air turun setiap 10 cm.

Dalam rangka perbaikan berkelanjutan terhadap penelitian ini, beberapa rekomendasi dapat diberikan antara lain, pemodelan dengan metode ini masih memiliki kelemahan terhadap pintu pelimpah yang otomatis, sehingga pemodelan perlu dilakukan secara manual. Selain, pemodelan lebih lanjut secara 2 dimensi juga baiknya dilaksanakan pada daerah hilir saluran pelimpah, untuk memastikan bahwa genangan tidak meluap keluar saluran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ungkapan terima kasih penulis sampaikan kepada Pusat Studi Teknik Sumber Daya Air, Universitas Katolik Parahyangan, atas dukungan dan masukan untuk penelitian ini, serta kepada PT. Mettana untuk data yang dibutuhkan untuk melakukan analisis studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 8062:2015 Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan* (p. 64). BSN: Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum. (1995). *Bendungan Besar di Indonesia*.
- Fenton, J. D. (1992). Reservoir routing. *Hydrological Sciences Journal*, 37(3), 233–246. <https://doi.org/10.1080/02626669209492584>
- Ferdowsi, A., Mousavi, S. F., Farzin, S., & Karami, H. (2020). Optimization of dam's spillway design under climate change conditions. *Journal of Hydroinformatics*, 22(4), 916–936. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.019>
- ICOLD CIGB World Register of Dams. (2017). https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/world_register_of_dams.asp
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Modul Operasi Waduk Pelatihan Alokasi Air. In *Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air Konstruksi* (p. 67).
- Komisi Keamanan Bendungan. (2003). *Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan* (p. 87).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang Bendungan. (2010).
- PT. Dehas Inframedia Karsa. (2017). Inspeksi Besar Bendungan Delingan. In *Laporan Pemeriksaan Visual Waduk* (Issue 37).
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). Hydrologic Modeling System User 's Manual. In *US Army Corps of Engineers* (Issue September).
- Sordo-Ward, A., Gabriel-Martin, I., Bianucci, P., Morello, A., & Garrote, L. (2016). Rule operation model for dams with gate-controlled spillways. *October* 2017, 7. <https://doi.org/10.3390/ecws-1-a010>
- Sordo-Ward, A., Garrote, L., Bejarano, M. D., & Castillo, L. G. (2013). Extreme flood abatement in large dams with gate-controlled spillways. *Journal of Hydrology*, 498, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.010>