



Penentuan *Initial Elevation* Untuk Mendukung Operasi *Early Release* Bendungan Sadawarna

*Andri Puji Wahyudi, Dyah Ari Wulandari, Ignatius Sriyana
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
*)andri.wahyudi@pu.go.id

Received: 23 Februari 2024 Revised: 22 Agustus 2024 Accepted: 27 Agustus 2024

Abstract

Modifications of Sadawarna Dam include the addition of a sluice gate that is placed on the right side of the spillway which functions as an early release facility along with an intake to lower the reservoir water level before the flood comes. Implementation of early release on reservoir routing requires an initial elevation that is different from the initial elevation in general. The aim of this research is to determine the new initial elevation to support early release operations for the Sadawarna Reservoir. This research was conducted by calculating return flood discharge and flood routing in reservoir with 3 (three) scenarios of initial elevation. The method used for analysis of return flood discharge is SCS (Soil Conservation Service). The reservoir routing method uses level pool routing with the HEC-HMS application. Initial elevation is determined by 3 (three) scenarios that started from initial elevation +75,25 masl, +77,00 masl, and +78,50 masl. The results of 3 (three) scenarios showed that the optimal initial elevation that can be used in early release operations is at an elevation of +77,00 masl. The results of the reservoir flood routing simulation with initial elevation resulted reduction flood discharge up to return period of 50 years and resulted in the fastest reservoir water level recovery.

Keywords: *Initial elevation, early release, reservoir routing, flood discharge*

Abstrak

Modifikasi Bendungan Sadawarna berupa penambahan pintu yang ditempatkan di samping kanan pelimpah yang berfungsi sebagai fasilitas early release bersama dengan bangunan pengambilan untuk menurunkan muka air waduk sebelum banjir datang. Penerapan early release pada penelusuran banjir di waduk membutuhkan initial elevation yang berbeda dengan initial elevation pada umumnya. Tujuan penelitian ini adalah menetapkan initial elevation baru dalam mendukung operasi early release Waduk Sadawarna. Penelitian dilakukan dengan menghitung debit banjir rencana kemudian melakukan penelusuran banjir lewat waduk dengan 3 skenario initial elevation. Metode yang digunakan untuk analisis debit banjir kala ulang adalah SCS (Soil Conservation Service). Metode penelusuran banjir menggunakan level pool routing dengan aplikasi HEC-HMS. Initial elevation ditetapkan dengan 3 (tiga) skenario yang dimulai dari initial elevation +75,25 mdpl, +77,00 mdpl dan +78,50 mdpl. Hasil analisis dari 3 skenario diperoleh initial elevation optimal yang dapat digunakan dalam operasi early release berada pada elevasi +77,00 mdpl. Hasil simulasi penelusuran banjir dengan initial elevation tersebut menghasilkan reduksi debit banjir rencana hingga debit kala ulang 50 tahunan dan menghasilkan recovery muka air waduk tercepat.

Kata kunci: *Initial elevation, early release, penelusuran banjir waduk, debit banjir*

Pendahuluan

Banjir merupakan salah satu permasalahan air yang sering terjadi di wilayah yang mempunyai kepadatan penduduk cukup tinggi (Safitri *et al.*, 2022). Upaya untuk mengurangi dampak banjir dapat dilakukan secara struktural dan non struktural (Purwanto, 2020). Secara umum, pengendalian

banjir secara struktural dilakukan dengan pembangunan struktur bangunan air dengan tujuan meningkatkan kapasitas sungai sehingga mengurangi debit banjir (Nanlohy *et al.*, 2008).

Adapun bangunan air yang dapat dibangun antara lain, tanggul, sumur resapan, sudetan, dan bendungan (Pramitha *et al.*, 2020). Bendungan

merupakan salah satu bangunan air yang dapat menahan debit banjir berskala besar (Balandatu, 2021). Debit banjir dapat direduksi dengan cara mengoperasikan bendungan melalui bangunan pengeluaran yang telah disediakan (Inayah *et al.*, 2019).

Bangunan pengeluaran pada bendungan multiguna yang berfungsi untuk pengendalian banjir adalah pelimpah. Kombinasi antara pelimpah dan volume tampungan akan mereduksi debit banjir yang mengalir ke wilayah hilirnya dan mencegah bendungan mengalami *overtopping*. Pada debit banjir kala ulang tertentu, debit *outflow* yang dialirkan ke sungai di wilayah hilir bendungan melebihi kapasitas sungainya sehingga diperlukan adanya peningkatan fungsi pengendalian banjir berupa modifikasi pada bangunan pelimpah ataupun penyesuaian pola operasi sesuai dengan kondisi di masing-masing bendungan. Modifikasi pelimpah ini, salah satunya dilakukan pada pelimpah Bendungan Sadawarna.

Bendungan Sadawarna berada pada DAS Cipunegara, tepatnya pada Sub DAS Sadawarna. dan berada di tengah alur Sungai Cipunegara pada koordinat 06°35'00" - 06°49'00" LS dan 107°36'30" - 107°53'30" BT. Kemiringan aliran Sungai Cipunegara adalah 1,46% dengan keadaan geografis berupa pegunungan dan lereng. Tipe bendungan adalah bendungan urugan tanah inti tegak dengan tinggi dari dasar sungai 40,0 m. Bendungan ini mempunyai volume tampungan normal waduk 44,61 juta m³, volume tampungan maksimum 70,98 juta m³, luas genangan waduk maksimum 695,61 ha dengan elevasi puncak bendungan +85,0 m. Tipe pelimpah Bendungan Sadawarna adalah kombinasi yang berupa pelimpah ogee tak berpintu dan berpintu. Elevasi mercu pelimpah berada pada +80,00 mdpl dan elevasi dasar pintu berada pada +75,25 mdpl. Pelimpah dan pintu *early release* kombinasi dapat dilihat pada Gambar 1 dan Tabel 1.

Modifikasi pelimpah ditujukan untuk menghadapi banjir tahunan di Kabupaten Subang, tepatnya wilayah Kabupaten Subang bagian utara, yaitu Kecamatan Pamanukan (Dinarwati & Hidayat, 2023). Hampir semua desa di Kecamatan Pamanukan masuk dalam kategori risiko tinggi banjir (Lesmanawati & Fardani, 2022).

Modifikasi pelimpah yang dilakukan berupa penambahan pintu yang ditempatkan di sisi kanan pelimpah tanpa pintu dengan tipe *sluice gate*. Pintu difungsikan sebagai fasilitas *early release*. *Early release* adalah sebuah strategi pelepasan air sebelum banjir datang yang memanfaatkan data prakiraan hujan (Ishak & Hashim, 2018). Konsep

early release merupakan kebijakan baru yang diterapkan pada bendungan-bendungan di Indonesia untuk mengoptimalkan fungsi pengendalian banjir pada bendungan. Penerapan *early release* dalam pengoperasian waduk membutuhkan *initial elevation* yang lebih rendah dari elevasi puncak mercu pelimpah agar fungsi pengendalian banjir lebih optimal.

Tabel 1. Dimensi pelimpah dan pintu *early release*

Pelimpah	
Elevasi mercu (mdpl)	+80,00
Panjang mercu (m)	132,30
Elevasi apron (mdpl)	+75,00
Panjang apron (m)	10,00
Pintu <i>early release</i>	
Lebar (m)	3,50
Tinggi (m)	5,00
Elevasi dasar (mdpl)	+75,25
Elevasi puncak pintu (mdpl)	+85,00



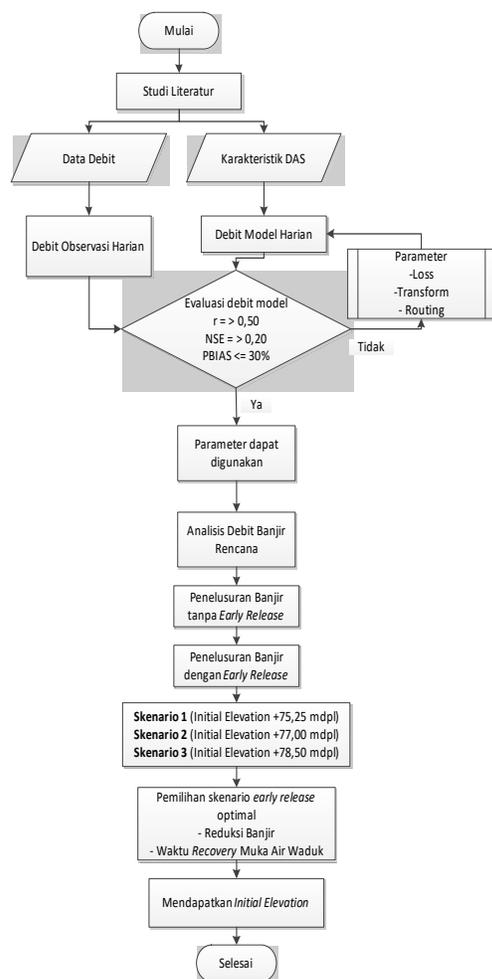
Gambar 1. Pelimpah dan pintu *early release* Bendungan Sadawarna

Initial elevation pada penelusuran banjir di waduk yang tidak menerapkan *early release* biasanya berada pada muka air normal atau sama dengan elevasi mercu pelimpah. Limbong dan Wulandari (2022) dan Prabowo (2018) melakukan simulasi penelusuran banjir Waduk Greneng dan Waduk Pancur Hanau dengan *initial elevation* sama dengan elevasi mercu pelimpah. Penelitian yang sama juga telah dilakukan oleh (Qais & Permana, 2021) mengenai *initial elevation* pada simulasi penelusuran banjir di Waduk Cipanas sama dengan elevasi mercu pelimpah.

Initial elevation pada umumnya dibuat sama dengan elevasi mercu pelimpah. sedangkan pada penelitian ini *initial elevation* lebih rendah dari elevasi mercu pelimpah. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menetapkan *initial elevation* dalam mendukung operasi banjir Waduk Sadawarna yang optimal menggunakan konsep *early release*.

Metode

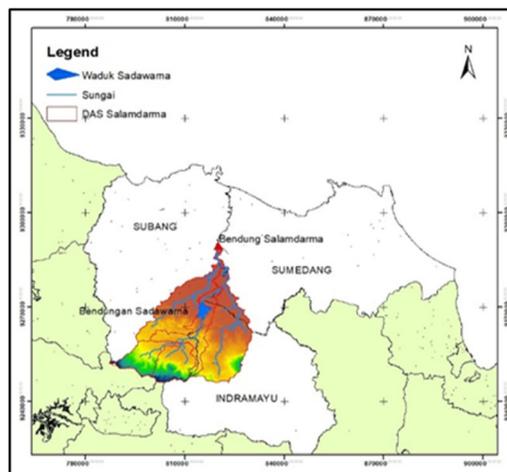
Secara garis besar, metode dan analisis pada penelitian ini dibagi dalam lima tahap sebagai Gambar 2. Lokasi penelitian berada pada Wilayah Sungai Citarum, tepatnya pada Sungai Cipunegara. Bendungan Sadawarna terletak di tiga kabupaten, yaitu Kabupaten Subang, Indramayu dan Sumedang seperti pada Gambar 3



Gambar 2. Diagram alir penelitian

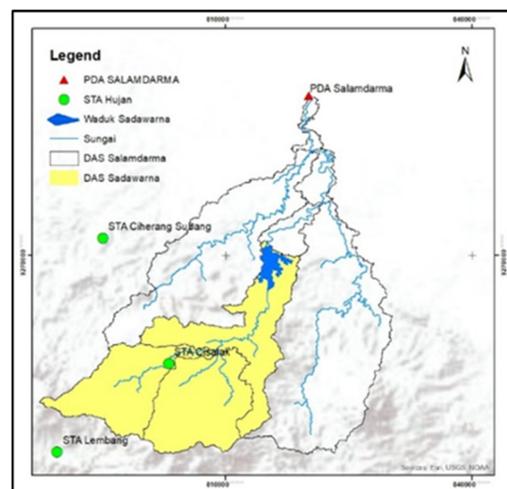
Tahap pertama adalah pengumpulan data hujan, data debit, data teknis bendungan, data tata guna lahan, dan data jenis tanah. Data tersebut diperoleh dari berbagai sumber antara lain: (1) Data hujan dari STA Cisalak dan STA Ciherang Subang dan STA Lembang selama 23 tahun, dari tahun 1999 - 2021 dari Balai Besar Wilayah Sungai Citarum; (2) Data debit dari pos duga air Bendung Salamdarma selama delapan tahun pada tahun 2014-2021 yang didapat dari PT Perum Jasa Tirta II; (3) Data teknis bendungan diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Citarum; (4) Tata guna lahan dan topografi diperoleh dari Badan Informasi Geospasial melalui

portal (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web>) versi Tahun 2006; (5) Data jenis tanah diperoleh dari *Digital Soil Map of the World* yang telah dikembangkan FAO melalui portal (<https://data.apps.fao.org/map/catalog/static/search?keyword=DSMW>) versi tahun 2007.



Gambar 3. Lokasi penelitian

Tahap kedua adalah menganalisis debit harian pada tahun 2014 – 2021 menggunakan beberapa stasiun hujan dan pos duga air seperti pada Gambar 4. Pada tahap ketiga adalah melakukan evaluasi debit harian dengan cara membandingkan hasil analisis debit harian dengan debit observasi pada tahun 2014 – 2016 untuk proses kalibrasi dan tahun 2017 – 2021 untuk proses validasi.



Gambar 4. Lokasi stasiun hujan dan pos duga air

Nilai Evaluasi debit model terhadap debit observasi dapat dilihat pada Tabel 2, 3 dan 4. Selanjutnya menganalisis debit banjir rencana pada beberapa kala ulang dan melakukan analisis penelusuran

banjir pada beberapa skenario. Pada tahap keempat adalah rekapitulasi hasil penelusuran banjir untuk menentukan skenario *early release* optimal. Tahap kelima adalah menentukan skenario *early release* optimal. Skenario *early release* dikatakan optimal jika mempunyai reduksi debit banjir terbanyak dan waktu *recovery* mendekati muka air normal (lebih dari +78,50 mdpl) dengan batasan debit *outflow* dari Bendungan Sadawarna tidak lebih dari 202 m³/dt. Berdasarkan laporan rencana tindak darurat, apabila debit yang keluar dari Bendungan Sadawarna melebihi 202 m³/dt, maka sungai di hilirnya berpotensi tidak mampu menampungnya/meluap.

Tabel 2. Evaluasi Model r

Nilai	Interpretasi
$0,75 < r \leq 1$	Sangat baik
$0,65 < RMSE \leq 0,75$	Baik
$0,50 < RMSE \leq 0,65$	Memenuhi
$r \leq 0,50$	Tidak memenuhi

Sumber: (Ouedraogo et al., 2018)

Tabel 3. Evaluasi Model NSE

Nilai	Interpretasi
$0,60 < NSE \leq 1,00$	Sangat baik
$0,40 < NSE \leq 0,60$	Baik
$0,20 < NSE \leq 0,40$	Memenuhi
$NSE \leq 0,20$	Tidak memenuhi

Sumber: (Agustin et al., 2022)

Tabel 4. Evaluasi Model PBIAS

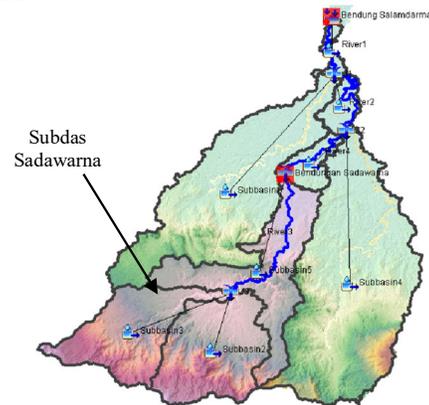
Nilai	Interpretasi
$PBIAS \leq 15\%$	Sangat baik
$15\% < PBIAS \leq 20\%$	Baik
$20\% < PBIAS \leq 30\%$	Memenuhi
$PBIAS \geq 30\%$	Tidak memenuhi

Sumber: (Agustin et al., 2022)

Hasil dan Pembahasan

Analisis debit harian

Debit harian dianalisis untuk mendapatkan parameter yang terkalibrasi yang disimulasikan dengan aplikasi HEC-HMS dengan komponen-komponen: (1) Analisis kehilangan air dengan metode SCS *curve number dan initial abstraction*; (2) Analisis limpasan langsung menggunakan metode SCS unit hydrograph; (3) Analisis aliran dasar (*baseflow*) menggunakan *recession*. Skema pemodelan pada HEC-HMS dapat dilihat pada Gambar 5.

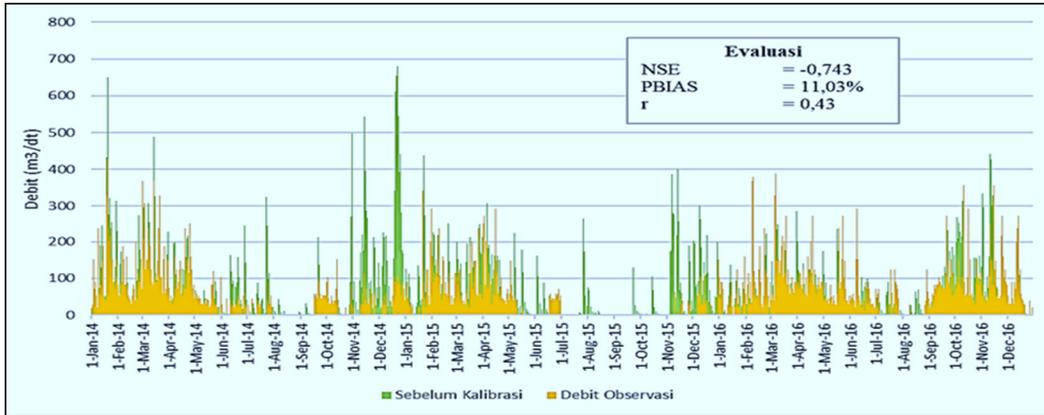


Gambar 5. Skema pemodelan DAS Salamdarma dan Sub DAS Sadawarna

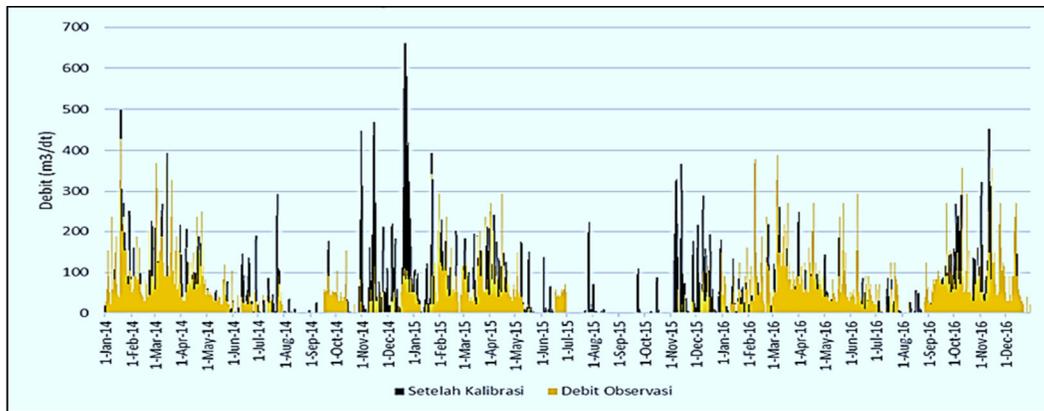
Parameter awal sub DAS diperoleh dari kombinasi data jenis tanah dan tata guna lahan yang akan menghasilkan nilai CN, *impervious* dan Ia. Data topografi akan menghasilkan nilai *lag time* dan *baseflow*, sedangkan data topografi dan lengkung debit akan menghasilkan nilai K. Parameter awal sub DAS selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter awal subDAS

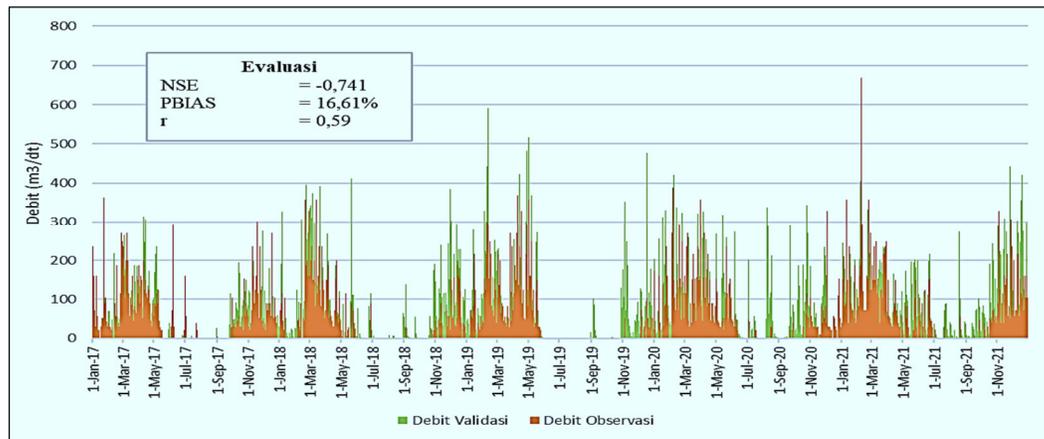
Deskripsi	Loss			Transfor m	River Routing	Baseflow		
	CN	Impervious	Ia	Lag time (menit)	K (jam)	In. discharge (m ³ /dt)	Recession constant	Ratio to peak
Subbasin1	71	7,17	20,78	149,25		3,89	0,5	0,1
Subbasin2	70	6,02	21,69	45,98		1,03	0,5	0,1
Subbasin3	77	6,68	15,50	58,13		1,43	0,5	0,1
Subbasin4	76	6,93	16,16	146,59		3,39	0,5	0,1
Subbasin5	64	6,26	28,14	85,72		2,20	0,5	0,1
Subbasin6	75	8,87	17,03	41,38		2,02	0,5	0,1
Subbasin7	63	10,63	29,62	58,24		2,88	0,5	0,1
Subbasin8	71	12,75	20,42	38,60		2,34	0,5	0,1
Reach1					0,95	0,00	0,5	0,1
Reach2					1,14	0,00	0,5	0,1
Reach3					1,68	0,00	0,5	0,1
Reach4					0,83	0,00	0,5	0,1



Gambar 6. Debit model sebelum kalibrasi Tahun 2014 – 2016



Gambar 7. Debit model setelah kalibrasi Tahun 2014-2016



Gambar 8. Debit validasi Tahun 2017-2021

Perbandingan debit hasil model dan debit observasi sebelum dikalibrasi dapat dilihat pada Gambar 6. Tampak bahwa debit model sebelum dikalibrasi telah mendekati kondisi di lapangan dimana nilai r dan NSE sebesar 0,43 dan -0,743 berada pada interpretasi “tidak memenuhi” dan nilai PBIAS sebesar 11,03% berada pada interpretasi “sangat baik”. Untuk memperoleh debit model yang lebih

mendekati kondisi di lapangan, maka diperlukan penyesuaian terhadap beberapa parameter.

Hal ini juga sejalan dengan penelitian (Tassew *et.al.*, 2019) yang melakukan penyesuaian beberapa parameter DAS Gilbey Abay dengan membandingkan debit puncak pada beberapa kejadian dengan debit puncak hasil model.

Tabel 6. Parameter terkalibrasi

Deskripsi	Loss		Transform	River Routing
	CN	Ia	Lag time (menit)	K (jam)
Subbasin1	63,30	35,69	396,46	
Subbasin2	51,86	47,15	137,94	
Subbasin3	56,70	38,79	174,39	
Subbasin4	36,31	29,25	448,37	
Subbasin5	47,62	55,87	257,17	
Subbasin6	40,42	32,70	121,76	
Subbasin7	63,18	61,31	135,73	
Subbasin8	77,59	53,31	93,30	
Reach1				2,55
Reach2				2,38
Reach3				6,72
Reach4				1,31

Parameter yang disesuaikan adalah nilai *loss*, *transform* dan Muskingum *routing*. Hasil parameter terkalibrasi dan debit model kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 7. Tampak debit hasil model setelah parameternya disesuaikan semakin mendekati kondisi di lapangan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai PBIAS sebesar 6,50% berada pada interpretasi “sangat baik”. Tetapi, nilai NSE dan r sebesar -0,622 dan 0,41 masih berada pada interpretasi “tidak memenuhi”. Hasil interpretasi tersebut tidak jauh berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh (Wiliya & Lasminto, 2022) di DAS Bengawan Solo Hulu yang melakukan evaluasi debit hasil model hanya pada kriteria nilai NSE dengan nilai awal dari 0,481 menjadi 0,578 yang berada pada interpretasi “memenuhi”. Oleh karena itu, penyesuaian parameter pada proses kalibrasi telah menunjukkan perbaikan dan akan dilanjutkan dengan melakukan validasi dengan menggunakan data debit pada Tahun 2017 – 2021.

Validasi dilakukan untuk meyakinkan bahwa parameter model hasil proses kalibrasi dapat mewakili kondisi sistem. Hal ini juga dilakukan oleh (Ranjan & Singh, 2022) yang melakukan kalibrasi dengan data pada Tahun 2005 – 2012 dan validasi dengan data pada Tahun 2013 – 2017 setelah melakukan kalibrasi.

Hasil debit model validasi dan evaluasinya disajikan pada Gambar 8. Berdasarkan Gambar 8 evaluasi debit pada proses validasi telah memenuhi 2 dari 3 kriteria. Hal ini ditunjukkan dengan nilai r sebesar 0,59 berada pada interpretasi “memenuhi” dan nilai PBIAS sebesar 16,61% berada pada

interpretasi “memenuhi”. Sementara nilai NSE lebih baik dari sebelumnya / mendekati nilai 0 dengan nilai sebesar -0,741 namun masih berada pada interpretasi “tidak memenuhi”.

Evaluasi debit hasil model pada proses validasi yang memenuhi 2 dari 3 kriteria juga ditunjukkan oleh penelitian (Gebre, 2015) pada DAS Ribb dimana nilai NSE sebesar 0,53 berada pada interpretasi “memenuhi”, nilai r sebesar 0,78 berada pada interpretasi “sangat baik”, dan nilai MBE (*mass balance error*) sebesar 46,2% berada pada interpretasi “tidak memenuhi”. Oleh karena itu, parameter hasil kalibrasi akan digunakan untuk menganalisis debit banjir rencana. Hujan rencana dihitung dengan menggunakan aplikasi hydrogonomon dan telah lolos uji Smirnov-kolmogorof serta chi square, sedangkan nilai PMP dihitung menggunakan metode *hersfield*. Adapun hasil transformasi hujan rencana menjadi debit banjir rencana dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hujan dan debit banjir rencana

Periode Ulang	Hujan rencana (mm/hari)	Debit banjir rencana (m ³ /dt)
2	89,2	117,5
5	123,0	253,7
10	145,5	368,8
25	174,0	535,8
50	195,5	673,8
100	216,8	819,3
200	238,5	974,6
1000	290,3	1369,4
PMP	505,5	3219,2

Tabel 8. Penelusuran banjir tanpa *early release*

	Q _{2th}	Q _{5th}	Q _{10th}	Q _{25th}	Q _{50th}	Q _{100th}	Q _{200th}	Q _{1000th}	PMF
Inflow Maks (m ³ /d)	117,5	253,7	368,8	535,8	673,8	819,3	974,6	1369,4	3219,2
Outflow maks (m ³ /d)	56,1	141,7	220,9	348,8	458,1	578,2	712,4	1046,4	2700,7
Elevasi maks (mdpl)	80,4	80,7	80,9	81,2	81,5	81,7	81,9	82,5	84,4
Reduksi debit (%)	52,26	44,15	40,10	34,90	32,01	29,43	26,90	23,59	16,11

Tabel 9. Penelusuran banjir Skenario 1

	Q _{10th}	Q _{25th}	Q _{50th}	Q _{100th}	Q _{200th}	Q _{1000th}	PMF
Inflow Maks (m ³ /d)	368,8	535,8	673,8	819,3	974,6	1369,4	3219,2
Outflow maks (m ³ /d)	42,7	65,6	96,4	180,9	286,5	615,9	2380,3
Reduksi debit banjir (%)	88,4	87,8	85,7	77,9	70,6	55,0	26,1
Elevasi akhir simulasi (mdpl)	78,2	79,2	79,9	80	80,1	80,3	80,8

Tabel 10. Penelusuran banjir Skenario 2

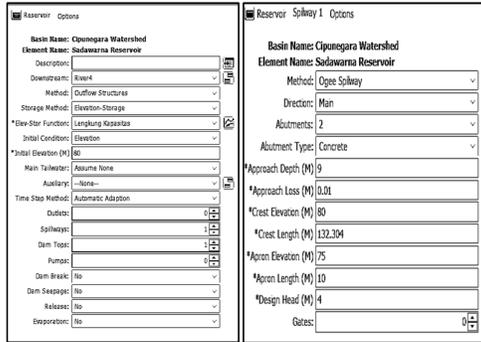
	Q _{10th}	Q _{25th}	Q _{50th}	Q _{100th}	Q _{200th}	Q _{1000th}	PMF
Inflow Maks (m ³ /d)	368,8	535,8	673,8	819,3	974,6	1369,4	3219,2
Outflow maks (m ³ /d)	67,4	98,1	183,8	288,6	414,6	762,7	2480,4
Reduksi debit banjir (%)	81,7	81,7	72,7	64,8	57,5	44,3	22,9
Elevasi akhir simulasi (mdpl)	78,7	79,6	79,9	80	80,1	80,2	80,6

Tabel 11. Penelusuran banjir Skenario 3

	Q _{10th}	Q _{25th}	Q _{50th}	Q _{100th}	Q _{200th}	Q _{1000th}	PMF
Inflow Maks (m ³ /d)	368,8	535,8	673,8	819,3	974,6	1369,4	3219,2
Outflow maks (m ³ /d)	97,6	206,9	310,8	429,5	558,9	910,5	2617,3
Reduksi debit banjir (%)	73,5	61,4	53,9	47,6	42,7	33,5	18,7
Elevasi akhir simulasi (mdpl)	79,4	79,7	79,9	80	80,1	80,2	80,6

Penelusuran banjir awal (initial condition)

Penelusuran banjir di Waduk Sadawarna menggunakan metode *outflow structure* dengan bangunan pengeluaran berupa pelimpah dan *initial elevation* pada elevasi +80,00 mdpl. Data teknis pelimpah yang diinput dapat dilihat pada Gambar 9.



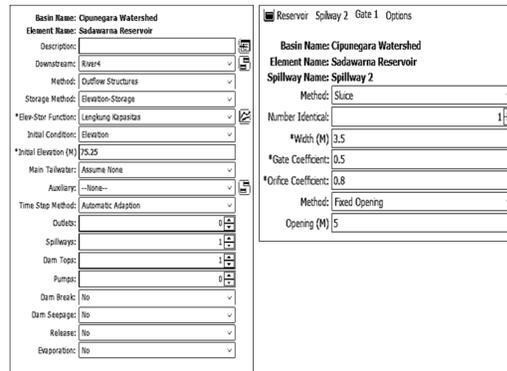
Gambar 9. Data input initial elevation dan pelimpah

Berdasarkan Tabel 8 didapat bahwa debit yang melebihi dari kapasitas sungai di hilir Bendungan Sadawarna adalah debit *outflow* pada debit banjir rencana kala ulang 10 tahun hingga PMF. Reduksi debit banjir pada Q_{10th} hingga PMF akan ditingkatkan menggunakan skenario *early release*.

Penelusuran banjir waduk Skenario-1

Penelusuran banjir di waduk Skenario-1 dimulai pada *initial elevation* +75,25 mdpl (elevasi dasar pintu *early release*). Hal ini mengacu kepada (SNI 3432:2022) yang menyebutkan bahwa bendungan

dengan pelimpah kombinasi (pelimpah tanpa pintu dan berpintu), penelusuran banjir dapat dimulai dari elevasi dasar pintu. Perubahan *initial elevation* dan konfigurasi pintu *early release* dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Data input initial elevation

Pada Tabel 9 didapatkan bahwa operasi *early release* skenario 1 dapat mereduksi banjir hingga debit banjir rencana 100 tahun dengan elevasi akhir simulasi yang tidak mendekati muka air normal berada pada Q_{10th}, sedangkan pada Q_{25th} sampai dengan Q_{100th} mendekati muka air normal.

Penelusuran banjir waduk Skenario-2

Penelusuran banjir di waduk Skenario-2 dimulai pada *initial elevation* +77,00 mdpl dengan bukaan penuh pada *intake* irigasi dan PLTM serta bukaan bertahap dari sebagian hingga penuh pada pintu *early release*. Hal ini bertujuan agar layanan air lainnya, seperti irigasi, air baku dan PLTM tidak

terganggu. Data yang diinputkan pada HEC-HMS adalah *initial elevation* dan konfigurasi pintu *early release* dapat dilihat pada Gambar 11.

Time (dMMM, H:mm)	Percent (%)
01Jan, 00:00	0.0
01Jan, 01:00	20.000
01Jan, 02:00	20.000
01Jan, 03:00	50.000
01Jan, 04:00	50.000
01Jan, 05:00	50.000
01Jan, 06:00	50.000
01Jan, 07:00	100.000
01Jan, 08:00	100.000
01Jan, 09:00	100.000
01Jan, 10:00	100.000
01Jan, 11:00	100.000
01Jan, 12:00	100.000
01Jan, 13:00	100.000
01Jan, 14:00	100.000
01Jan, 15:00	100.000
01Jan, 16:00	100.000
01Jan, 17:00	100.000
01Jan, 18:00	100.000

Gambar 11. Data input *initial elevation*

Hasil penelusuran banjir skenario 2 dapat dilihat pada Tabel 10. Pada Tabel 10 didapatkan bahwa operasi *early release* skenario 2 dapat mereduksi banjir hingga debit banjir rencana 50 tahun dengan elevasi akhir simulasi yang mendekati muka air normal berada pada Q_{10th} sampai dengan Q_{100th} .

Penelusuran banjir waduk Skenario-3

Penelusuran banjir di waduk Skenario-3 dimulai pada *initial elevation* +78,50 mdpl dengan bukaan penuh pada *intake* irigasi dan PLTM serta bukaan bertahap dari sebagian hingga penuh pada pintu *early release*. Data yang diinputkan pada HEC-HMS adalah *initial elevation* dan konfigurasi pintu *early release* dapat dilihat pada Gambar 12.

Time (dMMM, H:mm)	Percent (%)
01Jan, 00:00	0.0
01Jan, 01:00	20.000
01Jan, 02:00	20.000
01Jan, 03:00	50.000
01Jan, 04:00	50.000
01Jan, 05:00	50.000
01Jan, 06:00	50.000
01Jan, 07:00	100.000
01Jan, 08:00	100.000
01Jan, 09:00	100.000
01Jan, 10:00	100.000
01Jan, 11:00	100.000
01Jan, 12:00	100.000
01Jan, 13:00	100.000
01Jan, 14:00	100.000
01Jan, 15:00	100.000
01Jan, 16:00	100.000
01Jan, 17:00	100.000
01Jan, 18:00	100.000

Gambar 12. Data input *initial elevation*, pintu *early release* dan *intake*

Pada Tabel 11 didapatkan bahwa operasi *early release* Skenario-3 dapat mereduksi banjir hingga debit banjir rencana 25 tahun dengan elevasi akhir simulasi yang mendekati muka air normal berada pada Q_{10th} sampai dengan Q_{100th} .

Rekapitulasi penelusuran banjir waduk

Hasil penelusuran banjir di Waduk Sadawarna pada penelusuran banjir Skenario-1 hingga Skenario-3 dapat memberikan informasi tidak hanya debit

outflow tapi juga elevasi muka air waduk di akhir simulasi. Hasil penelusuran banjir di waduk dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Rekapitulasi penelusuran banjir di waduk

Skenario	Initial elevation (mdpl)	Penerapan <i>early release</i>	Waktu <i>recovery</i>
1	+75,25	Q_{10th} - Q_{100th}	Q_{25th} - Q_{100th}
2	+77,00	Q_{10th} - Q_{50th}	Q_{10th} - Q_{100th}
3	+78,50	Q_{10th} - Q_{25th}	Q_{10th} - Q_{100th}

Berdasarkan Tabel 12 didapatkan bahwa penelusuran banjir di waduk menghasilkan reduksi banjir dan waktu *recovery* yang berbeda beda. Semakin rendah *initial elevation* maka reduksi banjir semakin meningkat namun waktu *recovery* muka air waduk semakin jauh dari muka air normal. Maka, skenario optimal yang dapat dijadikan *initial elevation* dalam operasi *early release* adalah Skenario-2 karena mempunyai waktu *recovery* tercepat dan reduksi debit banjir terbanyak.

Perubahan *initial elevation* untuk mendukung operasi *early release* dapat diterapkan sepanjang operasi banjir atau sesaat. Jika diterapkan sepanjang operasi banjir maka dibutuhkan analisis lanjutan berupa dampak perubahan *initial elevation* terhadap fungsi irigasi, air baku dan PLTMH. Sedangkan diterapkan sesaat, maka dibutuhkan prakiraan curah hujan yang akurat. Selain itu, diperlukan analisis lanjutan berupa waktu pengosongan yang dibutuhkan sebelum debit banjir datang dan dampak penurunan muka air waduk terhadap skenario terpilih agar dapat memastikan bendungan dalam kondisi yang dipersyaratkan.

Kesimpulan

Hasil kajian penentuan elevasi untuk mendukung operasi *early warning system* adalah sebagai berikut: Skenario optimal yang dapat diterapkan untuk mendukung operasi *early release* Waduk Sadawarna adalah Skenario-2 dengan *initial elevation* berada pada +77,00 mdpl. Skenario ini menghasilkan reduksi debit banjir rencana hingga 50 tahun dengan waktu *recovery* yang tidak jauh dari muka air normal. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi waktu pengosongan, laju penurunan muka air waduk, dan analisis stabilitas bendungan pada kondisi *rapid draw down*.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis disampaikan kepada Bapak Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas Beasiswa Magister Super Spesialis

Angakatan IV Tahun Anggaran 2023 dan Balai Besar Wilayah Sungai Citarum serta Perum Jasa Tirta II atas dukungan data yang telah diberikan.

Daftar Pustaka

Balandatu, N. (2021). Dampak Pembangunan Bendungan Lolak Terhadap Kehidupan Masyarakat Di Kecamatan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal Governance* 1(2):1–8.

Dinarwati, S., & Hidayat, T. (2023). Efektivitas Forum Koordinasi Pimpinan Daerah Kabupaten Subang Dalam Penanggulangan Bencana Banjir Di Kabupaten Subang. *The World of Public Administration* 5(1):48–63.

Gebre, S. L. (2015). Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis* 06(02).

Inayah, Nur, A., Hidayat, Y. & Tarigan, S.D. (2019). Simulasi Bendungan Ciawi Dan Sukamahi Sebagai Pengendali Banjir Das Ciliwung Hulu. *Seminar Nasional Teknologi Dan Humaniora (SemantECH)* 1(1):162–70.

Ishak, Hidayah, N., & Hashim, A.M (2018). Dam Pre-Release as an Important Operation Strategy in Reducing Flood Impact in Malaysia. *E3S Web of Conferences* 02017:1–6.

Lesmanawati, F., & Fardani, I. (2022). Studi Identifikasi Tingkat Risiko Bencana Banjir Di Kecamatan Pamanukan Kabupaten Subang. *Jurnal Riset Perencanaan Wilayah Dan Kota* 44–53.

Limbong, B., & Wulandari, D.A. (2022). Reservoir Routing Di Waduk Greneng, Blora Dengan Model HEC-HMS. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil* 8(2):230–47.

Nanlohy, B. J. B., Jayadi, R., & Istiarto. (2008). Studi Alternatif Pengendalian Banjir Sungai Tondano Di Kota Manado. *Forum Teknik Sipil No. XIX/1-Januari* 756–67.

Ouédraogo, W. A. A., Raude, J. M., & Gathenya, J. M. (2018). Continuous Modeling of the

Mkurumudzi River Catchment in Kenya Using the HEC-HMS Conceptual Model: Calibration, Validation, Model Performance Evaluation and Sensitivity Analysis. *Hydrology* 5(3).

Prabowo, E. (2018). Studi Pengendalian Banjir Di Kota Barabai Terkait Rencana Pembangunan Bendungan Pancur Hanau Di Sungai Barabai Kabupaten Hulu Sungai Tengah. *Jurnal Teknologi Berkelanjutan* 7(01):43–51.

Pramitha, A. A. S., Utomo, R. P., & Miladan, N. (2020). Efektivitas Infrastruktur Perkotaan Dalam Penanganan Risiko Banjir Di Kota Surakarta. *Region: Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Perencanaan Partisipatif* 15(1):1.

Purwanto. (2020). Analisis Sistem Pengendalian Banjir Sungai Pampang Daerah Aliran Hulu Sungai KarangmumuS. *Junral Keilmuan Teknik Sipil* 1(1):102–14.

Qais, A. N., & Permana, S. (2021). Analisis Debit Banjir Dan Penelusuran Banjir Di Bendungan Cipanas Kabupaten Sumedang. *Jurnal Konstruksi* 19(1):157–68.

Ranjan, S., & Singh, V. (2022). HEC-HMS Based Rainfall-Runoff Model for Punpun River Basin. *Water Practice and Technology* 17(5):986–1001.

Safitri, D., Putra, R. A. M., & Dewantoro, F. (2022). Analisis Pola Aliran Banjir Pada Sungai Cimadur, Provinsi Banten Dengan Menggunakan Hec-Ras. *JICE (Journal of Infrastructural in Civil Engineering)* 3(01):19.

SNI 3432:2022. (2022). *Tata Cara Penetapan Banjir Desain Dan Kapasitas Pelimpah Untuk Bendungan*. BSN.

Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2019). Modeling Water Quality Parameters Using Data-Driven Models, a Case Study Abu-Ziriq Marsh in South of Iraq. *Hydrology* 6(1).

Wiliya., & Lasminto, U. (2022). Pemodelan Hujan-Debit Menggunakan Model HEC-HMS Di DAS Bengawan Solo Hulu. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 20(2):193.