

Analisis Peningkatan Kapasitas Hidrolik Terowongan Pengelak Menghadapi Perubahan Debit Banjir Rencana (Studi Kasus Bendungan Bener)

Cindy Tryamarti, Sri Sangkawati Sachro

*Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275*

Abstrak

Pembangunan bendungan ketika konstruksi dilindungi oleh bangunan pengelak terdiri dari terowongan pengelak dan bendungan pengelak. Bangunan pengelak berfungsi mengelakkan air saat konstruksi agar area kerja terbebas dari gangguan aliran air. Terowongan pengelak di Bendungan Bener sedang tahap konstruksi sedangkan konstruksi bendungan pengelak dilaksanakan pada akhir tahun 2023. Oleh karenanya perlu dilakukan estimasi kapasitas terowongan pengelak serta penentuan elevasi bendungan pengelak dalam menampung debit banjir dengan kala ulang 25 tahun bertujuan agar tidak terjadi overtopping pada masa konstruksi. Metode untuk mendapatkan kapasitas terowongan pengelak dengan melakukan penelusuran banjir pada terowongan pengelak. Hasil analisis debit banjir rencana kala ulang 25 tahun dengan software HEC – HMS sebesar 565,90 m³/det. Penelusuran banjir di terowongan pengelak diameter 7,00 meter didapatkan elevasi bendungan pengelak +250,00 meter. Elevasi tersebut melebihi dari elevasi rencana perlu adanya skenario lain. Skenario 1 dengan penambahan 1 buah terowongan diameter 7,00 meter diperoleh tinggi bendungan pengelak pada elevasi +236,50 meter dan skenario 2 pada elevasi +235,00 penambahan 1 buah terowongan diameter 9,00 meter. Berdasarkan analisis kapasitas terowongan pengelak dapat terpenuhi pada skenario2 sehingga yang terpilih skenario 2.

Kata kunci: bendungan pengelak; elevasi; perubahan; terowongan pengelak

Abstract

[Title: Analysis of Increment the Hydraulic Capacity in Diversion Tunnel ue to Adjustment of Design Flood Discharge] *The construction of the dam during construction is protected by river diversion buildings consisting of diversion tunnels and cofferdam. River diversion functions to prevent water during construction so that the work area is free from interference of water flow. Diversion tunnel at the Bener Dam is ongoing, while the cofferdam is planned to be built at the end of 2023. Therefore, it is necessary to estimate the capacity of the diversion tunnel and determine the elevation of the cofferdam to accommodate discharge flood with a period of 25 years in order to avoid overtopping during the construction period. The method for obtaining the diversion tunnel capacity is by carrying out flood tracing in the diversion tunnel. The design flood discharge analysis using HEC – HMS software were $Q_{25th} = 565,90 \text{ m}^3/\text{sec}$. Flood investigation in the 7.00 meter diameter diversion tunnel revealed an elevation of the cofferdam of +250.00 meters. This elevation exceeds the planned elevation, therefore it requires another scenario. In scenario 1 with addition of 1 tunnel with a diameter of 7.00 meters, the height of the cofferdam is obtained at an elevation of +236.50 meters and in scenario 2 at an elevation of +235.00 the addition of 1 tunnel with a diameter of 9.00 meters. Based on the analysis, diversion tunnel capacity can be fulfilled in scenario 2 so that scenario 2 is selected.*

*) Penulis Korespondensi.
E-mail: tryamartincindy@gmail.com

Keywords: cofferdam; elevation; change; diversion tunnel

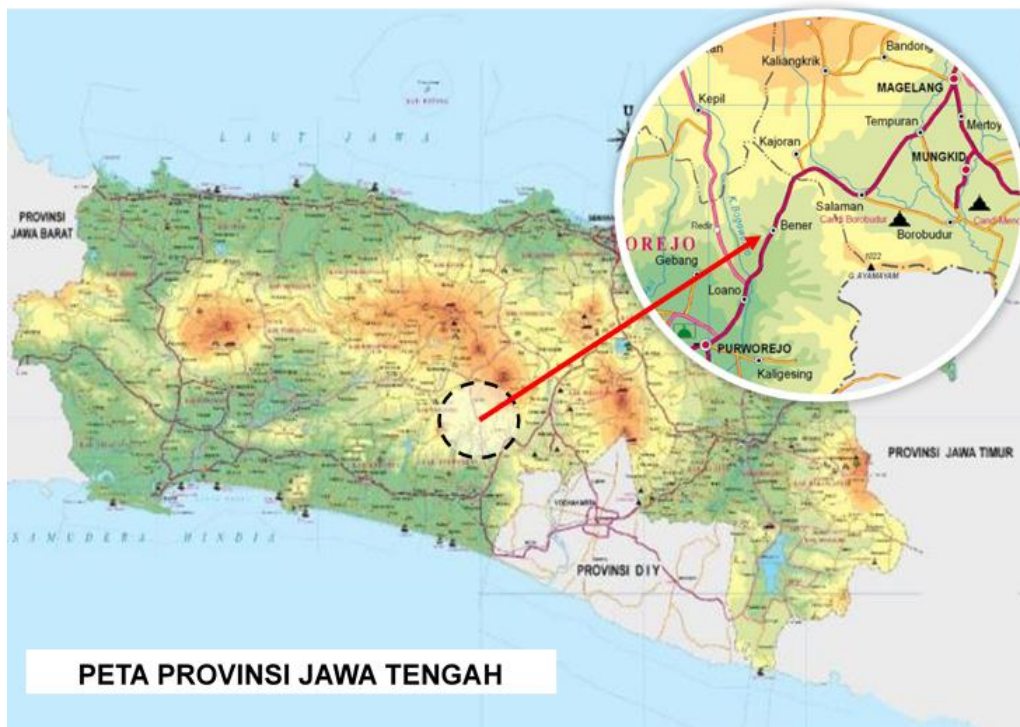
1. Pendahuluan

Pembangunan bendungan merupakan usaha untuk mengatasi masalah yang sering dijumpai di Indonesia yaitu saat kemarau terjadi kekurangan untuk memenuhi kebutuhan air serta terjadinya penurunan kualitas air, sebaliknya saat musim hujan air berlebih yang menyebabkan banjir. Secara garis besar dalam pelaksanaan pembangunan bendungan terdapat 3 bangunan utama yang dikerjakan, yaitu terowongan pengelak (dengan material utama berupa beton), bangunan bendungan utama (dengan material utama berupa material urugan/beton) dan bangunan pelimpah (dengan material utama berupa beton) (Raharjo & Sutardi, 2021). Proses pembangunan bendungan yang perlu diperhatikan yaitu area konstruksi terbebas dari gangguan air. Terowongan pengelak dibangun untuk melindungi daerah konstruksi dari gangguan air (Maulaya, Noerhayati, & Suprpto, 2020). Terowongan pengelak (*diversion tunnel*) dalam perencanaan bendungan berfungsi sebagai penyalur debit banjir dan mengalihkan aliran sungai dari hulu bendungan ke hilir bendungan selama masa konstruksi tubuh bendungan. Perencanaan pengelakkan yang baik dan tepat meminimalisir akan terjadinya banjir saat konstruksi bendungan utama berlangsung. Bendungan pengelak (*cofferdam*) berfungsi sebagai penghalang sementara yang kedap air sehingga daerah pada pekerjaan konstruksi bendungan menjadi tidak tergenang oleh air.

Terowongan pengelak dan bendungan pengelak merupakan komponen terpenting dalam sistem pengelak banjir pada masa pelaksanaan konstruksi suatu bendungan berlangsung, oleh karena itu keduanya mempunyai hubungan yang sangat erat antara terowongan pengelak dengan bendungan pengelak. Apabila bendungan pengelak ditinggikan, maka tingginya tekanan pada terowongan pengelak akan meningkat juga (Simatupang, Tanan, & Lukman, 2020).

Kapasitas terowongan pengelak harus mampu mengalirkan debit sesuai dengan debit banjir rencana. Debit banjir rencana merupakan hal penting dalam perencanaan bangunan bendungan (Harto, 2000). Memungkinkan terjadinya banjir yang lebih besar dari pada debit banjir rencana yang dihitung dalam perencanaan bendungan pengelak. Hal tersebut dapat menyebabkan fungsi dari bangunan pengelak menjadi tidak efektif digunakan selama konstruksi berlangsung karena dikhawatirkan bangunan yang seharusnya mampu mencegah dampak yang fatal sudah tidak sesuai dengan keadaan lapangan (Dwi, Puspasari, Sulistiyono, & Hanifah, 2023). Dalam perencanaan terowongan pengelak dan bendungan pengelak, diperlukan data debit banjir rancangan kala ulang 25 tahun untuk menentukan dimensi terowongan pengelak dan bendungan pengelak (Fakhrulloh, Marsudi, & Nur Cahya, 2023).

Evaluasi dimensi terowongan pengelak diperlukan manakala diduga ada perubahan debit banjir rencana.



Gambar 1. Lokasi Bendungan Bener

Tabel 1 Parameter performa

Tingkat Performa	RMSE	NSE	PBIAS
Sangat Baik	$0 \leq RSR \leq 0,50$	$NSE > 0,80$	$PBIAS \leq \pm 5$
Baik	$0,5 < RSR \leq 0,60$	$0,70 < NSE < 0,80$	$\pm 5 \leq PBIAS \leq \pm 10$
Memuaskan	$0,6 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE < 0,70$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Tidak Memuaskan	$RSR > 0,70$	$NSE < 0,50$	$PBIAS \geq \pm 15$

Sumber: (Moriassi et al., 2007)

Hasil studi di Bendungan Tiu Suntut Provinsi Nusa Tenggara Barat, penelusuran banjir melalui terowongan pengelak didapatkan bahwa ukuran dari terowongan pengelak yang sudah ada jika dilihat dari aspek fungsinya sudah tidak efektif. Berdasarkan analisis menyatakan elevasi muka air akibat debit banjir rencana maksimum dan elevasi puncak bendungan yang diperoleh melebihi elevasi puncak bendungan pengelak yang sudah ada oleh karena itu perlu adanya perubahan elevasi puncak bendungan pengelak yang sudah ada untuk mencegah terjadinya *overtopping* pada puncak bendungan pengelak (Dwi et al., 2023). Penampang terowongan pengelak dapat dibuat dengan berbagai bentuk seperti lingkaran, tapak kuda dan lain sebagainya. Bentuk terowongan pengelak di Bendungan Kualu Provinsi Sumatera Utara direncanakan dengan bentuk tapak kuda *shape* F diameter 9,00 meter. Hal ini karena bentuk terowongan tapal kuda *shape* F memiliki kelebihan yaitu pada pelaksanaan pengerjaannya lebih mudah tanpa mengorbankan efisiensi hidrolis yang tetap sama seperti luas potongan melintang berbentuk bulat dan cocok untuk kondisi batuan keras (Rofikha, Marsudi, & Cahya, 2019).

Bendungan Bener yang berlokasi di Kabupaten Purworejo Jawa Tengah seperti pada Gambar 1 merupakan salah satu Proyek Strategi Nasional Indonesia di bidang Sumber Daya Air yang dibangun melintang Sungai Bogowonto Volume tampungan bendungan ini sebesar 100,94 juta m³ untuk mensuplai daerah irigasi seluas 15.519 ha, kebutuhan air baku sebesar 1.500 liter/det, memiliki potensi sumber pembangkit listrik sebesar 10 Megawatt dan juga dapat mereduksi banjir sebesar 8,73 juta m³. Pada saat ini Bendungan Bener masih dalam tahap konstruksi. Pekerjaan yang masih berjalan saat ini salah satunya adalah pembangunan terowongan pengelak yang direncanakan mempunyai panjang 850,00 meter dengan diameter 7,00 meter yang berbentuk tapal kuda.

Pada akhir tahun 2023 direncanakan untuk pelaksanaan konstruksi bendungan pengelak. Bendungan pengelak ini didesain dapat menampung debit banjir kala ulang 25 tahun dengan tinggi 15,00 meter pada elevasi +235,00 meter, Panjang 111,83 meter dan lebar puncak 10,00 meter. Sedangkan dimensi terowongan pengelak adalah diameter 7,00 meter dan masih dalam tahap konstruksi.

Perencanaan dilakukan pada tahun 2015 yang tertuang dalam Laporan Desain Lanjutan dan Sertifikasi Bendungan Bener dengan debit banjir rencana sebesar 410,18 m³/det. Adanya perubahan pada debit rencana dikarenakan penggunaan data historis yang berbeda serta lokasi stasiun yang digunakan juga berbeda. Pada perencanaan menggunakan stasiun hujan Sapuran, Kepil, Guntur dan Ngasinan. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan stasiun hujan Tajungsari, Sapuran, Guntur dan Ngasinan. Stasiun Kepil tidak digunakan pada penelitian ini dikarenakan data yang dimiliki kurang dari 10 tahun sehingga tidak dapat digunakan.

Bendungan urugan dalam konstruksinya dilindungi oleh bendungan pengelak, Oleh karenanya perlu dilakukan estimasi kapasitas terowongan pengelak serta penentuan elevasi bendungan pengelak dalam menampung debit banjir dengan kala ulang 25 tahun bertujuan agar tidak terjadi *overtopping* pada masa konstruksi. Penentuan kapasitas terowongan pengelak dan elevasi bendungan pengelak dengan metode penelusuran banjir pada terowongan pengelak.

2. Metode Penelitian

Studi ini adalah untuk estimasi kapasitas terowongan yang mampu mengalirkan debit banjir kala ulang 25 tahun agar tidak terjadi *overtopping* pada bendungan pengelak. Data yang digunakan periode curah hujan tahun 2009 – 2022 (14 tahun) dari 4 stasiun hujan yaitu Stasiun Tajungsari, Stasiun Sapuran, Stasiun Ngasinan, dan Stasiun Guntur. Data debit obeservasi yang digunakan untuk kalibrasi periode 31 Desember 2020 sampai 31 Desember 2022. Tahapan awal studi ini mencari debit banjir rencana 25 tahun selanjutnya melakukan kalibrasi dengan debit harian Bendungan Guntur dan mendapatkan debit banjir rencana 25 tahun dari hasil kalibrasi tersebut. Lokasi Bendungan Guntur berjarak 3,20 kilometer dari *outlet* Bendungan Bener. Kalibrasi tidak menggunakan data AWLR yang berada di hulu dari Bendungan Bener dikarenakan alat pencatat belum berfungsi dengan baik .Sehingga datanya belum tercatat dengan baik dan tidak bisa digunakan sebagai kalibrasi.

Tahapan berikutnya melakukan evaluasi penelusuran banjir pada terowongan pengelak dengan diameter 7,00 meter. Jika hasil penelusuran banjir di terowongan pengelak melebihi elevasi rencana bendungan pengelak maka dilakukan beberapa skenario

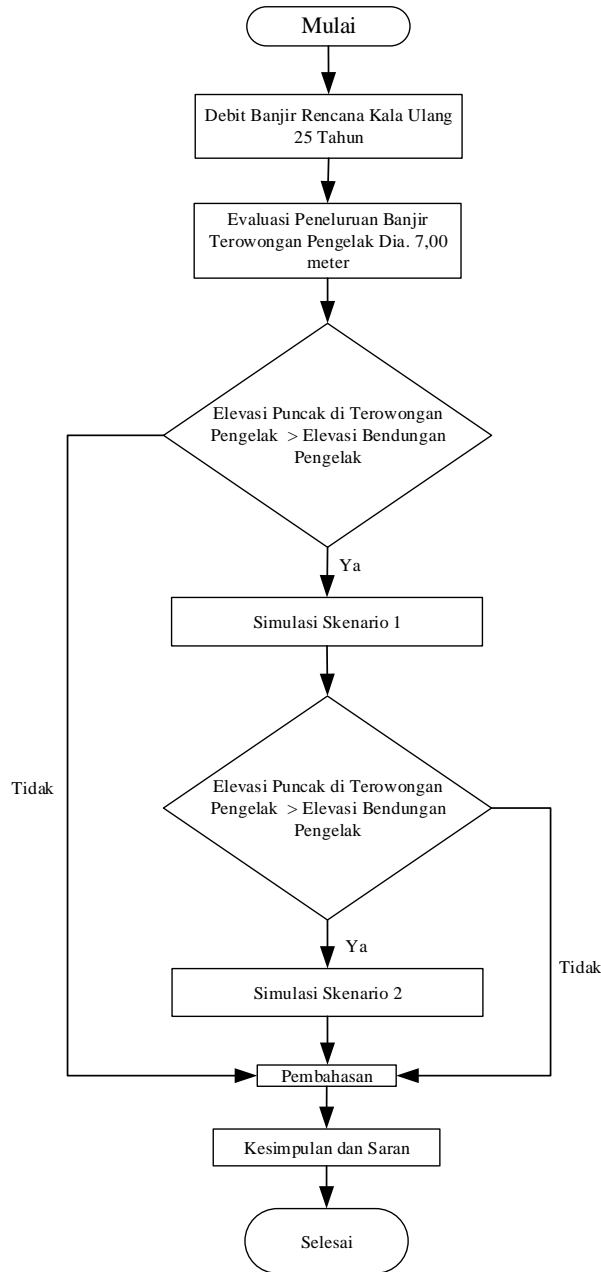
sampai sesuai dengan elevasi rencana bendungan pengelak agar tidak terjadi *overtopping*. Skenario yang dilakukan dengan cara memperbesar kapasitas tampungan pada terowongan pengelak dan petinggian elevasi pada bendungan pengelak. Metode penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

2.1 Debit Banjir Rencana

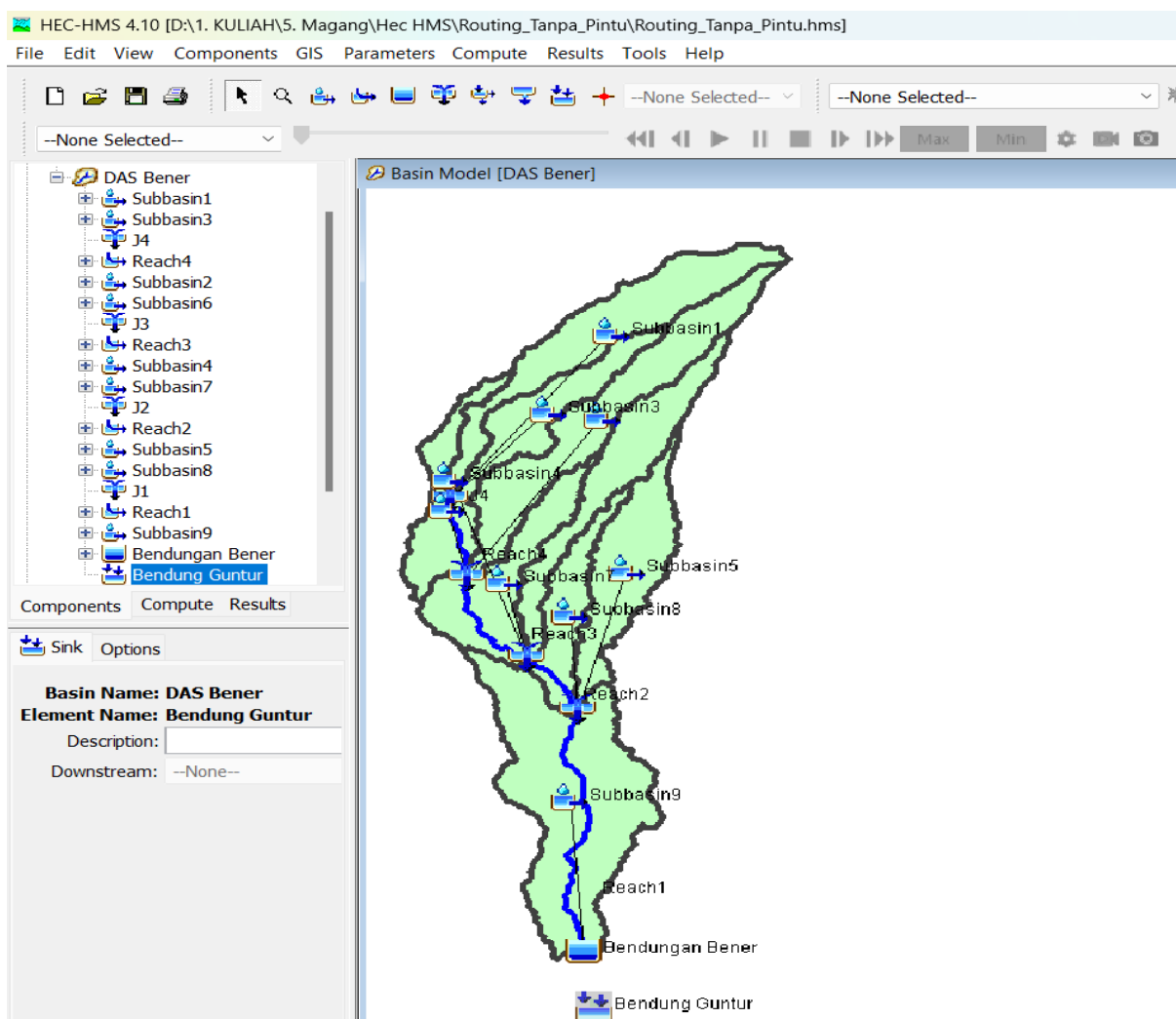
Analisis debit banjir rencana dilakukan dengan menggunakan metode hidrograf SCS *Curve Number* dengan *software* HEC – HMS untuk memperoleh debit banjir periode ulang 25 tahun. Metode SCS dipilih karena

memiliki nilai kesamaan yang tinggi dengan kondisi di lapangan (Arifin, Hidayah, & Widiarti, 2018). Adapun parameter yang digunakan saat proses kalibrasi yaitu *lag time*, *curve number*, *recession constant* dan *ratio to peak* (US Army Corps of Engineers, 2016).

Proses kalibrasi model dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter yang lebih optimum agar pemodelan memiliki nilai korelasi dengan pengamatan (Mardhotillah et al., 2014). Hasil hidrograf satuan HEC – HMS dapat menggambarkan curah hujan di Sub DAS



Gambar 2. Bagan alir metode penelitian



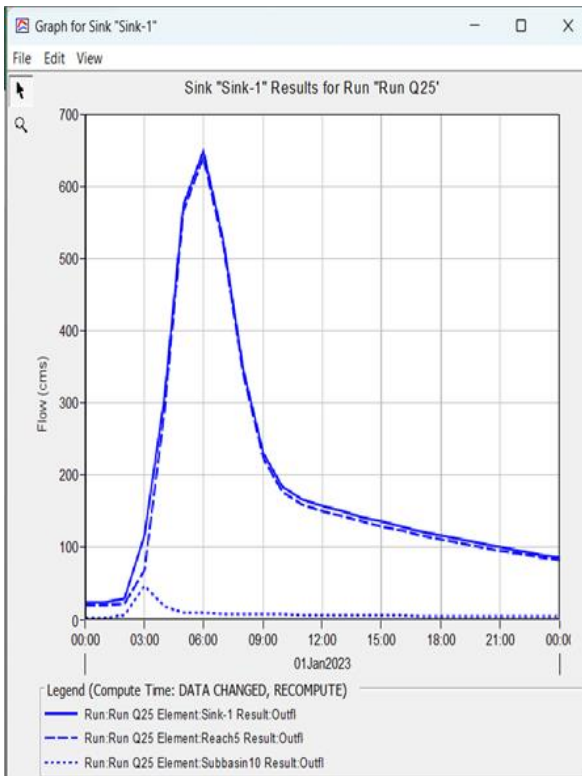
Gambar 3. Model DAS Bendungan Bener

terhadap pencatatan AWLR kondisi lapangan sebagai kalibrasi (Indra, Suhartanto, & Yuliani, 2019).

Uji performa dilakukan dengan membandingkan data hasil pemodelan dan data observasi, dengan kriteria statistik *coefficient of determination R square* (R^2) yang merupakan varians dalam data terukur yang dijelaskan model, *Nash-Stuclift* (NSE) dan PBIAS. (Legates & McCabe, 1999). Kalibrasi dengan NSE digunakan untuk menilai hasil model hidrologi terhadap data observasi. Nilai rerata hasil pemodelan terhadap data observasi dapat dilihat juga dengan PBIAS (Novrizal, Hermawan, Wibowo, & Nasution, 2023). Kalibrasi studi ini menggunakan metode *trial – error* terhadap parameter hidrologi model hingga pemodelan HEC – HMS memiliki kesesuaian dengan kondisi lapangan. Setelah dilakukan kalibrasi, parameter hasil kalibrasi dapat digunakan dalam analisis debit banjir rencana. Selanjutnya akan menghasilkan debit banjir rencana kala ulang 25 tahun. Selanjutnya memasukan distribusi hujan

Tabel 2. Nilai parameter setelah kalibrasi

Subbasin/ Reach	CN	Lag Time	Recession Constant	Ratio To Peak
Subbasin 1	79	68,756	0,2	0,1
Subbasin 2	80,67	72,267	0,2	0,1
Subbasin 3	86	50,643	0,2	0,1
Subbasin 4	83,45	70,862	0,2	0,1
Subbasin 5	80	80,375	0,2	0,1
Subbasin 6	84,49	79,91	0,2	0,1
Subbasin 7	82,21	69,652	0,2	0,1
Subbasin 8	83	70,138	0,2	0,1
Subbasin 9	79	124,739	0,2	0,1
Reach 1	95	87,007	0,2	0,1
Reach 2	95	39,315	0,2	0,1
Reach 3	95	48,17	0,2	0,1
Reach 4	95	40,34	0,2	0,1



Gambar 4. Hidrograf Banjir Q₂₅th di Bendung Guntur Sebelum Kalibrasi

jam – jaman kala ulang 25 tahun pada menu *precipitation gages*. Aliran dasar dilakukan pendekatan sebagai fungsi luas DAS dan kerapatan jaringan sungai (D). Aliran dasar (*base flow*) dihitung dengan persamaan Hidrograf Satuan Sintesis Gama I (Harto, 2000)

2.2 Penelusuran Banjir Melalui Terowongan Pengelak

Penelusuran banjir melalui terowongan pengelak dianalisis melalui metode *outflow structures* pada *software* HEC – HMS. Parameter yang dimasukkan dalam metode tersebut yaitu diameter terowongan, panjang terowongan, tipe terowongan, dan koefisien *manning*. Kapasitas debit dalam terowongan dipengaruhi oleh besarnya koefisien *manning* dan dimensi dari terowongan (Marengo, 2006). Bahan terowongan pengelak di Bendungan Bener berupa beton nilai koefisien *manning* 0,008 (United States Department of The Interior Bureau Of Reclamation, 1987)

2.3 Penentuan Elevasi Bendungan Pengelak

Hasil penelusuran banjir terdapat elevasi tertinggi sebagai penentuan elevasi puncak bendungan pengelak. Puncak bendungan pengelak ditempatkan setinggi kebutuhan jagaan diatas muka air tertinggi dari hasil perhitungan analisa muka air tertinggi didepan terowongan pengelak. Sehingga elevasi tertinggi

Project: Kalibrasi DAS Bener Guntur		Simulation Run: Run 1	
Sink: Sink-1			
Start of Run: 31Dec2020, 00:00	Basin Model: Bener Guntur		
End of Run: 31Dec2022, 00:00	Meteorologic Model: Met Kalibrasi - edit		
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE	Control Specifications: Control 1		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3			
Computed Results			
Peak Discharge: 112.1 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 11Dec2022, 00:00		
Volume: 12404.93 (MM)			
Observed Flow Gage Qobs - New			
Peak Discharge: 76.9 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 12Dec2022, 00:00		
Volume: 10862.53 (MM)			
RMSE Std Dev: 0.4	Nash-Sutcliffe: 0.829		
Percent Bias: 14.25 %			

Gambar 5. Hasil nilai performa kalibrasi di bendung Guntur

ditambahkan dengan tinggi jagaan (h_f) sehingga dapat menghasilkan elevasi puncak bendungan pengelak. Pada studi ini melakukan 3 kondisi untuk rekomendasi yang dilakukan pada pembangunan bendungan pengelak Bendungan Bener. Kondisi tersebut terdiri dari terowongan pengelak diameter 7,00 meter, Skenario 1 dan Skenario 2.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Debit Rencana

Pemodelan DAS Bener dengan HEC – HMS terdiri dari 9 subbasin, 4 *reach*, dan 4 *junction* dengan total luas DAS 112,30 km² bentuk pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3. Pemodelan ini dilakukan sampai pada Bendung Guntur karena ketersediaan data observasi berada di bendung tersebut.

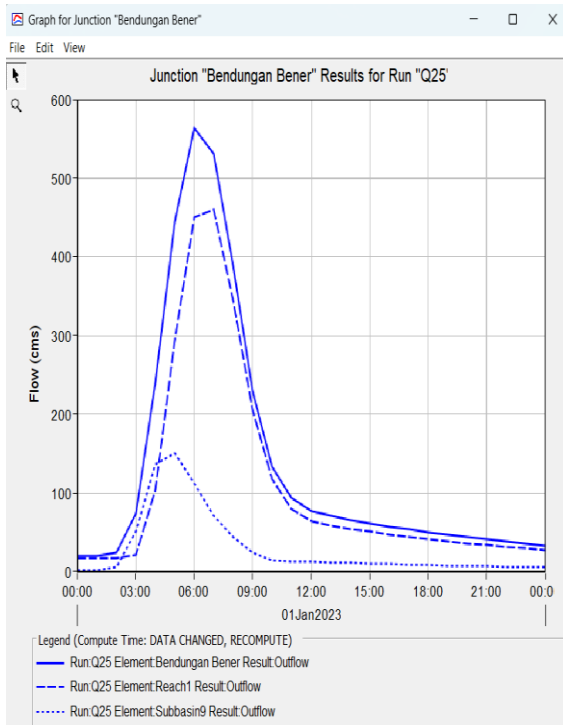
Debit rencana kala ulang 25 tahun di Bendung Guntur sebesar 649,7 m³/det. Hidrograf banjir Q₂₅th pada Bendung Guntur dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.** puncak debit terjadi pada jam ke – 6. Perubahan parameter setelah kalibrasi dapat dilihat pada **Tabel 2.**

Berdasarkan hasil kalibrasi pada Gambar 5 menunjukkan NSE 0,829, PBIAS 14,25% dan RMSE 0,4 nilai – nilai performa tersebut berada di kategori kriteria baik. Sehingga perubahan parameter tersebut dapat digunakan untuk mencari debit kala ulang 25 tahun di Bendungan Bener.

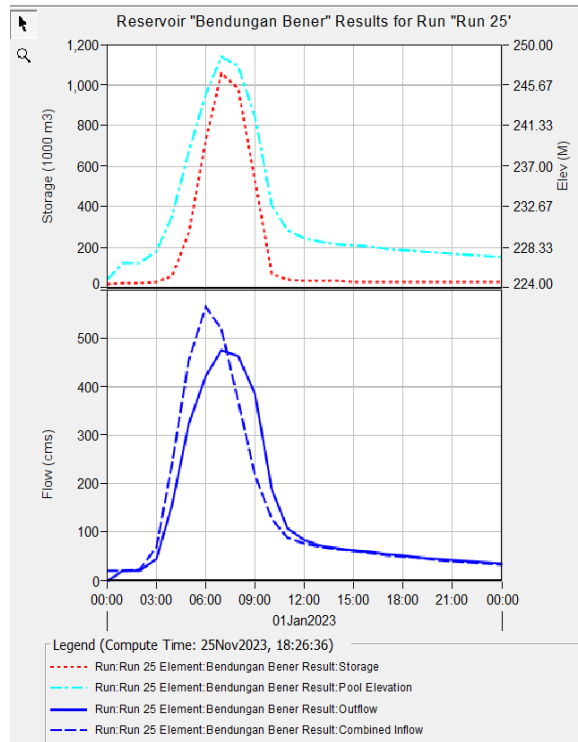
Berdasarkan hasil simulasi dengan menggunakan *software* HEC – HMS diketahui bahwa debit kala ulang 25 tahun sebesar 565,90 m³/det. Grafik hidrograf banjir Q₂₅th dapat dilihat pada Gambar 6.

3.2 Penelusuran Banjir Melalui Terowongan Pengelak

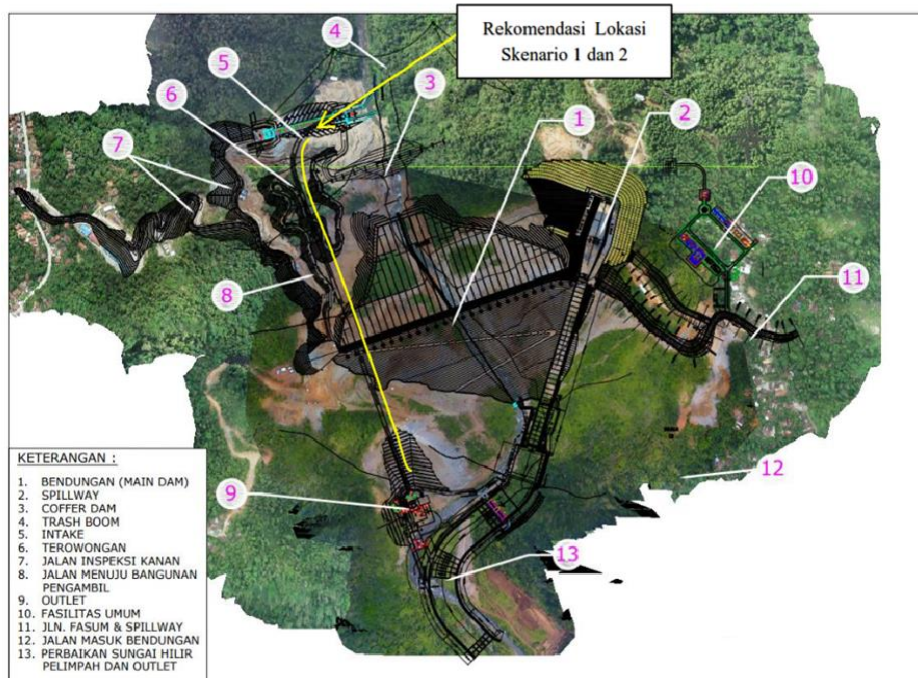
Penelusuran banjir menggunakan hidrograf banjir Gambar 6. Hasil *running* penelusuran banjir terowongan pengelak dengan diameter 7,00 meter dapat dilihat pada menunjukkan bahwa elevasi tertinggi adalah +248,70



Gambar 6. Hidrograf banjir Q₂₅th bendungan Bener



Gambar 7. Hidrograf Penelusuran Banjir Melalui Terowongan Q₂₅th (Terowongan Dia. 7,00 meter)



Gambar 8. Lokasi penambahan 1 buah terowongan (skenario 1 dan skenario 2)

meter untuk menampung debit banjir kala ulang 25 tahun sebesar 565,90 m³/det. Puncak elevasi tertinggi terjadi

pada jam ke – 7 dengan nilai debit *outflow* sebesar 474,10 m³/det dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 3. Rekap penelusuran banjir pada 3 kondisi

Jam Ke -	Inflow m ³ /det	Terowongan Pengelak Dia. 7,00 m			Skenario 1			Skenario 2		
		Storage	Elevasi	Outflow	Storage	Elevasi	Outflow	Storage	Elevasi	Outflow
		1000 m ³	meter	m ³ /det	1000 m ³	meter	m ³ /det	1000 m ³	meter	m ³ /det
0	20,00	20,00	225,00	0,00	20,00	225,00	0,00	20,00	225,00	0,00
1	20,10	26,60	226,70	20,10	23,80	226,00	20,10	23,50	225,90	20,10
2	22,60	26,90	226,70	21,50	24,00	226,00	21,70	23,70	225,90	21,70
3	69,50	31,60	227,90	46,10	26,60	226,70	46,10	26,10	226,50	46,10
4	241,80	61,20	231,80	155,70	35,10	228,80	155,70	33,80	228,40	155,80
5	454,70	273,10	238,60	323,70	60,60	231,70	348,50	52,70	231,10	348,50
6	565,90	729,00	244,70	420,90	93,90	234,50	510,40	79,60	233,30	510,40
7	519,30	1060,40	248,70	474,10	100,40	235,00	540,70	85,40	233,80	540,70
8	371,60	981,10	247,70	461,90	78,90	233,20	440,60	67,20	232,30	440,60
9	218,60	528,50	242,30	385,20	50,00	230,80	289,80	43,70	230,30	289,80
10	127,10	73,70	232,80	188,70	36,10	229,00	169,90	34,60	228,70	170,00
11	89,90	42,60	230,20	108,50	31,80	227,90	107,80	30,70	227,70	107,80
12	75,50	37,30	229,30	82,70	29,80	227,50	82,80	29,00	227,20	82,80
13	69,60	35,80	228,90	72,60	29,00	227,30	72,80	28,20	227,10	72,80
14	65,10	35,00	228,80	67,40	28,60	227,10	67,40	27,90	227,00	68,00
15	60,90	34,30	228,60	63,00	28,30	227,10	64,00	27,60	226,90	64,00
16	56,90	33,70	228,40	58,90	27,80	227,00	59,10	27,20	226,80	59,20
17	53,20	33,10	228,30	55,10	27,50	226,90	55,90	26,90	226,70	55,90
18	49,70	32,50	228,10	51,50	27,20	226,80	52,20	26,60	226,60	52,20
19	46,40	31,90	228,00	48,10	26,90	226,70	48,80	26,30	226,60	48,80
20	43,40	31,40	227,80	45,00	26,60	226,60	45,60	26,00	226,50	45,60
21	40,60	30,90	227,70	42,10	26,30	226,60	42,60	25,80	226,40	42,70
22	38,00	30,40	227,60	39,40	26,00	226,50	39,90	25,50	226,40	39,90
23	35,50	29,90	227,50	36,80	25,80	226,40	37,30	25,30	226,30	37,30
24	33,20	29,50	227,40	34,40	25,50	226,40	34,80	25,00	226,30	34,90

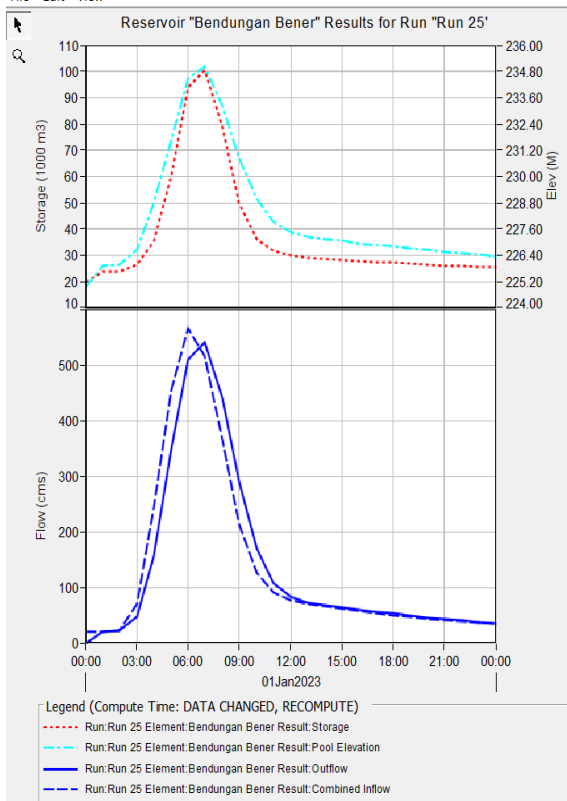
Pada kondisi tersebut terjadi *overtopping* karena elevasi tertinggi melebihi elevasi rencana bendungan pengelak +235,00 meter. Maka perlu dilakukan peninggian pada bendungan pengelak untuk kondisi tersebut atau menambahkan kapasitas hidrolik terowongan pengelak. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan memperbesar kapasitas terowongan pengelak agar tidak terjadi *overtopping* pada elevasi rencana bendungan pengelak. Simulasi pertama yang

selanjutnya disebut sebagai Skenario 1 adalah dengan menambahkan 1 buah terowongan pengelak disebelah terowongan pengelak diameter 7,00 meter.

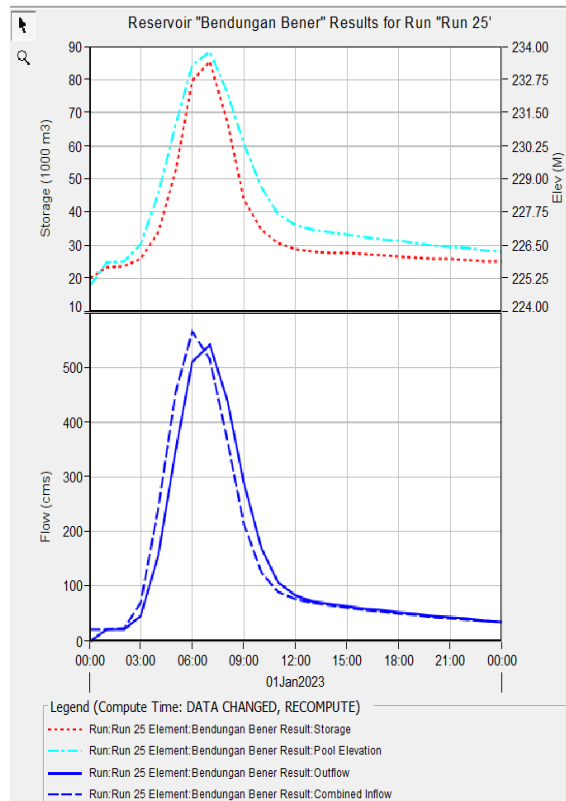
Penambahan terowongan ini didasarkan pada **Gambar 8**. Skenario penambahan terowongan pengelak berada disamping terowongan pengelak diameter 7,00 meter. Pada lokasi tersebut masih terdapat lahan kosong sehingga memungkinkan untuk ditambahkan terowongan pengelak.

Tabel 4. Tinggi puncak bendungan pengelak untuk 3 Kondisi

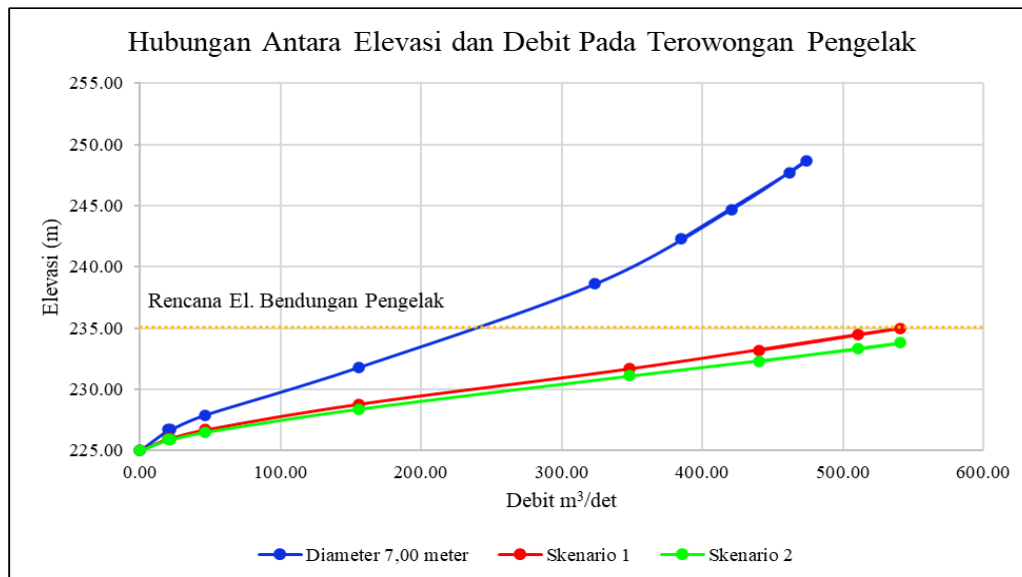
Rekomendasi	Elevasi Tertinggi (meter)	Tinggi Jagaan (meter)	Elevasi Puncak Bendungan Pengelak
Terowongan Dia. 7,00 m	248,70	1,2	249,90 ≈ 250,00
Skenario 1	235,10	1,2	236,30 ≈ 236,50
Skenario 2	233,80	1,2	235,00



Gambar 9. Hidrograf penelusuran banjir melalui terowongan Q₂₅th (Skenario 1)



Gambar 10. Hidrograf penelusuran banjir melalui terowongan Q₂₅th (Skenario 2)



Gambar 11. Hubungan antara elevasi dan debit pada terowongan pengelak

Penelusuran banjir hasil *running* skenario 1 dapat dilihat pada Gambar 9 menunjukkan bahwa elevasi tertinggi +235,00 meter. Elevasi tertinggi pada jam ke – 7 dengan debit *outflow* sebesar 540,70 m³/det dapat

dilihat pada Gambar 9. Elevasi tertinggi pada penelusuran banjir terowongan pengelak tersebut masih melebihi elevasi puncak rencana bendungan pengelak. Oleh karena itu perlu simulasi kedua yaitu dengan Skenario 2.

Skenario 2 adalah dengan menambahkan 1 buah terowongan di sebelah terowongan pengelak yang ada (diameter 7,00 meter) dengan diameter 9,00 meter. Lokasi terowongan dapat dilihat pada **Gambar 9** dengan pertimbangan di lokasi tersebut masih ada lahan kosong untuk dilakukan Skenario 2. Hasil *running* Skenario 2 dapat dilihat pada **Gambar 10** menunjukkan bahwa elevasi tertinggi +233,80 meter dengan *outflow* sebesar 540,70 m³/det jam ke - 7. Elevasi tersebut lebih rendah dibandingkan dengan elevasi rencana bendungan pengelak sehingga tidak terjadi *overtopping*.

Pada **Gambar 11** menunjukkan kapasitas terowongan pengelak diameter 7,00 meter lebih kecil dibandingkan dengan Skenario 1 dan Skenario 2. Sehingga debit yang mengalir di dalam terowongan pengelak kecil dan mengakibatkan elevasi di terowongan pengelak lebih tinggi. Hal tersebut berpengaruh terhadap elevasi puncak pada bendungan pengelak. Pada kondisi terowongan pengelak diameter 7,00 meter dan Skenario 1 elevasi tertinggi di terowongan pengelak melebihi elevasi rencana bendungan pengelak.

Rekap penelusuran banjir terowongan pengelak pada 3 kondisi dapat dilihat pada **Tabel 3**. Dapat disimpulkan semakin besar kapasitas terowongan pengelak semakin besar debit yang mengalir di dalam terowongan pengelak dan elevasi rencana untuk di bendungan pengelak semakin rendah. Agar mempertahankan elevasi rencana bendungan pengelak diperlukan penambahan kapasitas hidrolis terowongan pengelak. Pada penelitian di Bendungan Kualu Provinsi Sumatera Utara hal tersebut juga dilakukan dengan memperbesar diameter terowongan pengelak menjadi berdiameter 9,00 meter untuk mempertahankan elevasi tinggi bendungan pengelak sesuai perencanaan (Rofikha et al., 2019).

3.3 Penentuan Tinggi Bendungan Pengelak (Cofferdam)

Pada

Tabel 4 terlihat bahwa tinggi elevasi puncak bendungan pengelak beserta tinggi jagaan (h_r) 1,20 meter untuk 3 kondisi. Pada terowongan pengelak yang ada (diameter 7,00 meter) elevasi bendungan pengelak pada +250,00 meter, Skenario 1 berada pada elevasi +236,50 meter dan Skenario 2 berada pada elevasi +235,00 meter. pada Skenario 2 elevasi puncak bendungan pengelak tidak melebihi elevasi rencana bendungan pengelak.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis adanya perubahan debit banjir rencana dikarenakan penggunaan data historis yang berbeda. Historis data berbeda maka hasilnya akan berbeda juga. Debit banjir rencana kala ulang 25 tahun pada perencanaan sebesar 410,18 m³/det sedangkan pada studi ini sebesar 565,90 m³/det. Hasil penelusuran banjir di terowongan pengelak menunjukkan kapasitas hidrolis

terowongan pengelak yang ada tidak mencukupi maka dilakukan simulasi penambahan terowongan pengelak diameter 7,00 meter (Skenario 1). Skenario 1 dengan 2 buah terowongan diameter 7,00 meter berada pada elevasi +237,00 meter. Pada penambahan terowongan pengelak diameter 7,00 meter masih belum mencukupi sehingga dilakukan lagi simulasi dengan penambahan terowongan pengelak dengan diameter 9,00 meter (Skenario 2) dan hasilnya mencukupi untuk elevasi rencana bendungan pengelak dengan kemampuan kapasitas *outflow* sebesar 540,70 m³/det. Berdasarkan hasil simulasi dari dua skenario terpilih skenario 2. Saran untuk penelitian selanjutnya dapat mengkaji kedua skenario tersebut dari segi efisiensi biaya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat melalui BPSDM yang telah memberikan dana dalam penelitian ini, Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak Kementerian PUPR, Dinas PU SDA Kabupaten Purworejo, PT.Tambi yang telah berkenan memberikan data pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Arifin, M., Hidayah, E., & Widiarti, W. Y. (2018). Perbandingan metode SCS UH dan Clark UH dalam pemodelan hujan aliran pada DAS (Comparison of SCS UH and Clark Methods for rainfall-runoff model in Deluwang Watershed). *Rekayasa Sipil Dan Lingkungan*, 2(1), 77–86.
- Dwi, N., Puspasari, K., Sulistiyono, H., & Hanifah, L. (2023). *Analisis Efektivitas Dimensi Saluran Pengelak Bendungan Tiu Suntuk Terhadap Debit Banjir Rencana*.
- Fakhrulloh, A., Marsudi, S., & Nur Cahya, E. (2023). *Studi Perencanaan Pengelak Tipe Konduit dan Cofferdam Di Planning Study Of Conduit Diversion And Cofferdam In The Cijurey Dam*, 3(2), 165–177.
- Harto, S. (2000). *Hidrologi: Teori, Masalah, Penyelesaian*. Yogyakarta: Nafiri Offset.
- Indra, N., Suhartanto, E., & Yuliani, E. (2019). Analisa Hujan Debit Banjir menggunakan Model HEC HMS SUB DAS SADAR. *Jurnal Poros Teknik*, Vol. 8, pp. 55–103.
- Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Water Resources Research - 1999 - Legates - Evaluating the use of goodness-of-fit Measures in hydrologic and.pdf. *Water Resour. Res*, Vol. 35, pp. 233–241.
- Mardhotillah, M., Sipil, J. T., Teknik, F., Riau, U., Sutikno, S., Sipil, J. T., ... Riau, U. (2014). Pemodelan hujan-aliran daerah aliran sungai rokan dengan menggunakan data penginderaan jauh.

- Teknik Sipil*, 1–12.
- Marengo, H. (2006). Dam Safety During Construction, Lessons of The Overtopping Diversion Works at Aguamilpa Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1121–1127.
- Maulaya, F. I., Noerhayati, E., & Suprpto, B. (2020). Studi Perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Semantok Di Kecamatan Rejoso Kabupaten Nganjuk. *Riset.Unisma.Ac.Id*, 8(4), 328–338.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. N., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Colombia Medica*, 50(3), 885–900.
- Novrizal, D., Hermawan, F., Wibowo, M. A., & Nasution, I. A. (2023). Analisis Inflow Lokal Waduk Jatiluhur. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 300–309.
- Raharjo, D. P. K., & Sutardi, S. (2021). Pengaruh Kesiapan Perencanaan Detail Bendungan Terhadap Kinerja Pelaksanaan Kontrak dari Aspek Biaya, Waktu dan Mutu (Studi Kasus Pelaksanaan Bendungan Tiga Dihaji Paket 2 Sumatera Selatan). *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development (Cesd)*, 4(2), 85–98. <https://doi.org/10.25105/cesd.v4i2.10416>
- Rofikha, A. A., Marsudi, S., & Cahya, E. N. (2019). Analisis Struktur Terowongan Pengelak Pada Bendungan Kualu Kabupaten Toba Samosir Provinsi Sumatra Utara. *Jurnal Teknik Pengairan*, 10(1), 28–38.
- Simatupang, S. A., Tanan, B., & Lukman, M. (2020). Tinjauan Perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Karalloe di Kabupaten Gowa. *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(1), 63–69. <https://doi.org/10.52722/pcej.v2i1.123>
- United States Department of The Interior Bureau Of Reclamation. (1987). Design of Small Dams (Water Resources Technical Publication Series). In *United States Government Printing; 3rd edition*. <https://doi.org/10.1002/3527603514.ch5>
- US Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual CPD-74A*.