

EVALUASI PERENCANAAN TEMPORARY COFFERDAM HULU PADA BENDUNGAN BULANGO ULU

Raihan Pandjab*, Barry Yusuf Labdul, dan Rawiyah Husnan
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo

*nabilpandjab7@gmail.com

Pemasukan: 11 Desember 2024 Perbaikan: 15 Mei 2025 Diterima: 27 Juni 2025

Intisari

Bendungan Bulango Ulu memiliki dua sistem bangunan pengelak utama, yaitu terowongan pengelak dan bendungan pengelak. Terowongan pengelak berfungsi sebagai pengalihan air sungai dari hulu hingga ke hilir selama konstruksi tubuh Bendungan berlangsung, berbeda dengan Bendungan Pengelak yang mempunyai fungsi menjadi penghalang air yang mengakibatkan area pada pekerjaan konstruksi menjadi kering. Penelitian ini adalah untuk Evaluasi Temporary Cofferdam Hulu dengan menggunakan data curah hujan 2007-2021, dikarenakan perencanaan sebelumnya menggunakan data curah hujan dari tahun 2007-2017 sehingga perbedaan debit banjir yang akan berpengaruh dalam proses pembangunan Bendungan Bulango Ulu. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menghitung debit banjir Q_{25} dengan data curah hujan terbaru, keamanan bendungan pengelak terkait tinggi tubuh bendungan pengelak, dan kapasitas terowongan pengelak terhadap debit banjir Q_{25} . Lokasi penelitian ini berada di Bendungan Bulango ulu yang berada di Desa Tulo'a Kecamatan Bulango Utara, Desa Mongiilo dan Desa Owata di Kecamatan Bulango Ulu Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Data yang digunakan yaitu data sekunder berupa data curah hujan. Metode analisis data yaitu analisis hidrologi dan hidraulika. Perencanaan terowongan pengelak di desain dengan menggunakan bentuk tapal kuda, dengan panjang terowongan 466,9 m, diameter terowongan 6,9 m, dan kemiringan terowongan 0,008 m. Hasil penelitian menunjukkan debit banjir dengan menggunakan metode HSS Nakayasu dengan kala ulang 25 tahun sebesar 481,9 m³/detik dan untuk perencanaan sebelumnya sebesar 434,8 m³/detik. Tinggi bendungan pengelak yang di dapat dari hasil penelitian sebesar 62,016 dan untuk perencanaan sebelumnya sebesar 61,33 m dapat disimpulkan bahwa perencanaan bendungan pengelak pada bendungan bulango ulu harus dilakukan penambahan ketinggian.

Kata Kunci: Debit Banjir, Terowongan Pengelak, Bendungan Pengelak

Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur air seperti bendungan merupakan bagian penting dari pengelolaan sumber daya air, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki fluktuasi debit sungai signifikan antara musim hujan dan kemarau. Bendungan berfungsi tidak hanya untuk menampung dan mengatur aliran air sungai

agar tersedia sepanjang tahun, tetapi juga berperan dalam pengendalian banjir, penyediaan air irigasi, pasokan air baku, pembangkit listrik, serta fungsi rekreasi dan konservasi lingkungan. Menurut (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020), bendungan adalah struktur bangunan yang dibuat dari tanah, batu, atau beton yang berfungsi untuk menahan atau menampung air, lumpur, atau limbah tambang.

Salah satu bagian penting dalam pembangunan bendungan adalah keberadaan sistem pengelak. Sistem ini bertujuan untuk mengalihkan aliran sungai agar daerah konstruksi utama dapat terbebas dari genangan air selama masa pembangunan. Terdapat dua komponen utama dalam sistem pengelak, yakni terowongan pengelak (*diversion tunnel*) dan bendungan pengelak sementara (*temporary cofferdam*). Terowongan pengelak biasanya berbentuk terowongan berbentuk tapal kuda atau lingkaran yang berfungsi sebagai saluran pengalihan air sungai dari hulu ke hilir, sedangkan bendungan pengelak sementara merupakan struktur timbunan yang bersifat sementara untuk menahan aliran air dan mengarahkannya ke terowongan pengelak selama fase konstruksi berlangsung (Triatmodjo, 2019). Pekerjaan *temporary cofferdam* umumnya terletak di inlet terowongan dan dibangun untuk memastikan area konstruksi tetap kering hingga pekerjaan utama selesai (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2013).

Hidrologi merupakan metode yang diperlukan pada penerapan perencanaan bangunan air pada Daerah Aliran Sungai (DAS). DAS adalah suatu wilayah daratan yang menerima, menampung dan menyimpan air hujan untuk kemudian menyalurkan ke laut atau danau melalui satu sungai utama (Asdak, 1995). Sherman pada tahun 1932 (dalam Sri Harto, 1993) mengemukakan bahwa dalam suatu sistem DAS terdapat suatu sifat khas yang menunjukkan sifat tanggapan DAS terhadap suatu masukan tertentu. Tanggapan ini diandaikan tetap untuk masukan dengan besaran dan penyebaran tertentu. Tanggapan yang demikian dalam konsep model hidrologi dikenal dengan hidrograf satuan.

Studi ini dilakukan pada Bendungan Bulango Ulu yang berlokasi di Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Bendungan ini dirancang sebagai struktur multifungsi, mencakup fungsi irigasi seluas ± 4.193 hektar, pasokan air baku sebesar 2.200 liter/detik, pembangkit listrik tenaga air (PLTA) berkapasitas 4,95 MW, serta sebagai sarana pariwisata dan olahraga air. Dalam pembangunan bendungan ini, direncanakan dua sistem pengelak, yakni terowongan pengelak dan bendungan pengelak sementara. Permasalahan muncul karena perencanaan awal menggunakan data curah hujan dari periode 2007–2017, sedangkan kondisi aktual saat ini menunjukkan adanya perubahan iklim dan curah hujan yang signifikan. Hal ini memunculkan kekhawatiran mengenai validitas debit banjir rencana (Q_{25}) yang digunakan dalam desain awal sistem pengelak.

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah keakuratan dan kecukupan desain *temporary cofferdam* yang digunakan dalam perencanaan pembangunan Bendungan Bulango Ulu. Penelitian ini menilai apakah struktur tersebut masih relevan dan aman digunakan berdasarkan data hidrologi terbaru. Desain awal *cofferdam* dan terowongan pengelak tidak mempertimbangkan data curah hujan

terkini yang dapat menyebabkan deviasi signifikan pada perhitungan debit banjir rencana, yang berpotensi menimbulkan kegagalan fungsi dalam sistem pengelak. Oleh karena itu, evaluasi diperlukan untuk memastikan bahwa struktur tersebut mampu menangani debit banjir berdasarkan data aktual, serta mampu menjaga area konstruksi tetap aman dari risiko banjir.

Solusi umum yang diterapkan dalam menjawab tantangan tersebut adalah dengan melakukan reevaluasi desain menggunakan data hidrologi terbaru dan menerapkan metode hidrologi dan hidraulika yang sesuai. Dalam konteks ini, pendekatan ilmiah dilakukan melalui analisis frekuensi hujan dan debit banjir berdasarkan data curah hujan terbaru selama 15 tahun (2007–2021). Debit banjir rencana dihitung menggunakan berbagai metode statistik, serta analisis hidrograf satuan sintetik (HSS) Nakayasu untuk menelusuri banjir. Evaluasi kapasitas terowongan pengelak dilakukan melalui analisis kondisi aliran bebas dan tekan, dan tinggi bendungan pengelak dihitung berdasarkan debit banjir baru untuk memastikan kapasitas dan stabilitasnya.

Berbagai penelitian terdahulu telah menyoroti pentingnya pembaruan perhitungan debit banjir dalam perencanaan sistem pengelak. (Simatupang et al., 2020) dalam studinya mengenai Terowongan Pengelak Bendungan Karalloe menunjukkan perbedaan debit banjir akibat perbedaan data curah hujan, yang berdampak pada perubahan desain terowongan. Hal serupa juga dilaporkan oleh (Anga et al., 2022) pada studi Bendungan Pemukulu, di mana revisi data hidrologi mempengaruhi dimensi terowongan dan kehilangan energi. Studi oleh (Nabila et al., 2019) pada Bendungan Ciawi juga menemukan kebutuhan perubahan tinggi dan lebar bendungan pengelak berdasarkan debit puncak yang baru dihitung. Gambaran tentang potensi intensitas hujan dan debit banjir dapat menjadi dasar dalam perencanaan infrastruktur pada Bendungan Bulango Ulu disampaikan dalam penelitian Estimasi Debit Banjir Rancangan pada Bendungan Bulango Ulu di Provinsi Gorontalo (Maini, 2024)

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pengaruh perubahan data curah hujan terhadap debit banjir sangat penting dalam perencanaan sistem pengelak. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa ketidaktepatan data historis dapat menyebabkan ketidaksesuaian dimensi dan kapasitas sistem pengelak, yang berdampak langsung pada keamanan dan kelancaran pembangunan bendungan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi ulang perencanaan menggunakan data terkini untuk menjamin keandalan desain struktur pengelak seperti *cofferdam* dan *diversion tunnel*.

Dalam studi ini, dilakukan penghitungan debit banjir Q_{25} menggunakan data curah hujan 15 tahun terakhir. Selanjutnya, dilakukan analisis kapasitas terowongan pengelak dan evaluasi tinggi bendungan pengelak sementara berdasarkan debit tersebut. Dengan menggunakan pendekatan hidrologi dan hidraulika modern, studi ini mengisi kesenjangan penelitian yang ada terkait ketidakcocokan antara data lama dan kondisi iklim aktual yang semakin dinamis. Kesenjangan tersebut menjadi semakin relevan mengingat perubahan iklim dan pola curah hujan ekstrem yang lebih sering terjadi akhir-akhir ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan evaluasi ilmiah terhadap perencanaan *temporary cofferdam* pada Bendungan Bulango Ulu berdasarkan data hidrologi terkini. Dengan fokus pada perhitungan debit banjir rencana, evaluasi kapasitas aliran pada terowongan pengelak, serta estimasi tinggi bendungan pengelak yang diperlukan, penelitian ini bertujuan memastikan struktur tersebut masih layak digunakan dalam kondisi iklim yang berubah. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penggunaan rentang data curah hujan yang lebih panjang dan representatif (2007–2021) dibanding perencanaan awal, sehingga mampu memberikan desain yang lebih akurat dan adaptif terhadap kondisi aktual. Ruang lingkup studi ini mencakup analisis hidrologi, evaluasi hidraulik terowongan pengelak, dan perhitungan ulang tinggi bendungan pengelak untuk menjamin keamanan selama masa konstruksi.

Metodologi Studi

Lokasi penelitian ini berada di Bendungan Bulango Ulu berada di Desa Tulo'a Kecamatan Bulango Utara, Desa Mongiilo dan Desa Owata di Kecamatan Bulango Ulu Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1



Gambar 1 Lokasi Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data sekunder. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Data curah hujan Stasiun Hujan Dulamayo, Stasiun Hujan Boidu, dan Stasiun Hujan Longalo, dengan pencatatan data selama 15 tahun. (2007-2021)
2. Data Daerah Aliran Sungai (DAS)
3. *Layout* Bendungan Pengelak dan Terowongan

Metode Analisis Data

Penggunaan Metode analisis mempunyai data yang akan digunakan pada penelitian ini adalah analisis hidrologi dan analisis hidrolika.

1. Analisis Hidrologi, tujuannya yaitu untuk mendapatkan debit banjir rencana.
2. Analisis Hidraulika, pada penelitian ini Analisis hidrolika memiliki tujuan yaitu agar mendapatkan tinggi bendungan pengelak, dan lebar bendungan pengelak.

Parameter Statistik

Analisis Parameter Statistik ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Analisis Parameter Statistik

Perbandingan Syarat Distribusi dan Hasil Perhitungan				
No	Jenis Distribusi	Syarat	Hasil Perhitungan	Keterangan
1	Normal	$C_s \approx 0$ $C_k \approx 3$	$C_s = -0,39$ $C_k = 3,05$	Tidak Memenuhi
2	Log Normal	$C_s = 0,68$ $C_k = 16,04$	$C_s = -0,39$ $C_k = 3,05$	Tidak Memenuhi
3	Log Pearson III	Selain dari Nilai diatas	$C_s = -0,39$ $C_k = 3,05$	Memenuhi
4	Gumbel	$C_s = 1,14$ $C_k = 5,4$	$C_s = -0,39$ $C_k = 3,05$	Tidak Memenuhi

Meliputi Tabel 1 dapat dilihat metode yang akan digunakan yaitu metode Log Pearson III.

Tahapan Penelitian

Ada beberapa tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan
Pada tahapan ini tidak lain merupakan awal dari semua tahapan sehingga menjadi tahap dimana akan melakukan studi literatur, dengan hal ini membaca referensi yang berhubungan dengan penelitian dan akan dilanjutkan dengan pengumpulan data.
2. Tahap Pengumpulan Data
Pada tahap ini data yang dikumpulkan hanya untuk penelitian sehingga dalam pengambilan data hanya data yang diperlukan dalam penelitian, yaitu yang meliputi data curah hujan, data DAS, *layout* bendungan pengelak, dan terowongan pengelak.
3. Tahap Analisis
Tahap ini bertujuan untuk mengolah data yang telah dikumpulkan selama penelitian, yaitu analisis hidrologi dan analisis hidraulika.
4. Tahap Akhir
Tahap ini merupakan tahap penyusunan hasil dan pembahasan penelitian dalam bentuk laporan skripsi dan artikel ilmiah.

Hasil Studi dan Pembahasan

Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi memiliki tujuan agar dapat mengetahui curah hujan rata-rata yang akan terdeteksi pada Sub DAS Mongiilo. Data curah hujan diperoleh dari stasiun Longalo, Stasiun Dulamayo, dan Stasiun Boidu. Periode pengamatan curah hujan yang digunakan yaitu dari tahun 2007-2021. Pembagian daerah aliran pada Sub DAS Mongiilo menggunakan *software* ArcMap.

Pengisian Data Curah Hujan

Data curah hujan yang hilang dari stasiun dapat dilengkapi dengan nilai perkiraan berdasarkan data dari stasiun sekitar. Dalam penentuan data curah hujan yang hilang menggunakan Persamaan 1. Hasil analisis untuk mencari curah hujan hilang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

$$p_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i^2}} \tag{1}$$

Dengan keterangan:

p_x : hujan yang hilang di stasiun x

p_i : data hujan di stasiun di sekitarnya pada periode yang sama.

L_i : jarak stasiun di sekitarnya dengan stasiun x.

n : jumlah stasiun hujan di sekitar x.

Tabel 2 Curah Hujan Hilang Stasiun Dulamayo

	Sta. Dulamayo				
	Jarak (km)	CH Tahun 2011 (mm)			CH Tahunan
		10 Apr	20 Apr	30 Apr	
Sta. Boidu	9,50	32,10	0,80	0,00	1371,70
Sta. Longalo	6,29	22,50	0,00	0,00	1875,36
CH Hilang (p_x)		25,43	0,24	0,00	

Tabel 3 Curah Hujan Hilang Stasiun Longalo

	Sta. Longalo				
	Jarak (km)	CH Tahun 2011 (mm)		CH Tahun 2012 (mm)	
		11 Sep	CH Tahunan	9 Des	CH Tahunan
Sta. Boidu	3,77	0,00	1066,70	0,00	1371,70
Sta. Dulamayo	6,29	1,40	2308,60	84,50	2675,87
CH Hilang (p_x)		0,37		22,36	

Distribusi Curah Hujan

Analisis distribusi curah hujan memiliki tujuan yaitu agar dapat mengetahui curah hujan rata-rata yang terjadi pada Sub DAS Mongiilo. Dalam menganalisa distribusi curah hujan pada stasiun Longalo, stasiun Dulamayo, dan stasiun Boidu menggunakan Metode Rerata Aritmatik. Metode ini digunakan karena lokasi stasiun hujan yang berada di luar area Sub DAS Mongiilo. Analisis distribusi curah hujan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Distribusi Curah Hujan Rerata Aritmatik

No	Tahun	Curah Hujan Maksimun
1	2007	57,67
2	2008	58,80
3	2009	40,03
4	2010	57,90
5	2011	47,80
6	2012	67,40
7	2013	43,93
8	2014	66,37
9	2015	53,60
10	2016	69,20
11	2017	38,73
12	2018	46,67
13	2019	28,83
14	2020	63,13
15	2021	50,97

Analisis Distribusi Frekuensi

Hasil analisis frekuensi menggunakan metode Log Pearson III ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Analisis Distribusi Frekuensi

No	Kala Ulang	Rumus	KT	Log Xt	Xt
1	5 Tahun		0,856	1,801	63,310
2	10 Tahun		1,147	1,832	67,966
3	25 Tahun	$Log Xt = Log \bar{X} + KT \cdot Sd$	1,407	1,860	72,416
4	50 Tahun		1,549	1,875	74,967
5	100 Tahun		1,660	1,887	77,025

Uji Distribusi Frekuensi

Penggunaan metode Log Pearson III yang dipilih dalam analisis dapat digunakan atau tidak tergantung pada Uji Distribusi Frekuensi yang akan dilakukan.

1. Uji Chi-Kuadrat

Hasil analisis untuk uji Chi-Kuadrat ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Analisis Uji Chi-Kuadrat

Probabilitas	Ef	Of	Ef - Of	(Ef-Of) ² /Ef
0,00<P<0,20	3	3	0	0,000
0,21<P<0,40	3	3	0	0,000
0,41<P<0,60	3	3	0	0,000
0,61<P<0,80	3	3	0	0,000
0,81<P<0,99	3	3	0	0,000
	15	15	x^2	0,000
α	2			
DK	2			
x^2_{cr}	3,219			
$x^2 < x^2_{cr}$	MEMENUHI			

Berdasarkan Tabel 6 metode Log Pearson III pada analisis frekuensi dapat digunakan karena memenuhi syarat Chi-Kuadrat yaitu $\chi^2 < \chi^2_{cr}$ ($0,000 < 3,219$).

2. Uji Smirnov-Kolmogrov

Hasil analisis untuk uji Smirnov-Kolmogrov ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Analisis Uji Smirnov-Kolmogrov

<i>m</i>	<i>Xi</i>	$P = m/n + 1$	$P(x<) = 1-P$	$K = (Xi - \bar{X})/Sd$	$P'(x)$	$D = P'(x) - P(x<)$
1	28,833	0,06	0,94	-2,03	0,93	0,01
2	38,733	0,13	0,88	-1,19	0,86	0,02
3	40,033	0,19	0,81	-1,08	0,79	0,03
4	43,933	0,25	0,75	-0,75	0,71	0,04
5	46,667	0,31	0,69	-0,52	0,64	0,04
6	47,800	0,38	0,63	-0,42	0,57	0,05
7	50,967	0,44	0,56	-0,15	0,50	0,06
8	53,600	0,50	0,50	0,07	0,43	0,07
9	57,667	0,56	0,44	0,42	0,36	0,08
10	57,900	0,63	0,38	0,44	0,29	0,09
11	58,800	0,69	0,31	0,52	0,21	0,10
12	63,133	0,75	0,25	0,88	0,14	0,11
13	66,367	0,81	0,19	1,16	0,07	0,12
14	67,400	0,88	0,13	1,25	0,00	0,13
15	69,200	0,94	0,06	1,40	-0,07	0,13
\bar{X}	52,74				Δ_{maks}	0,13
Sd	11,77				Δ_{kritik}	0,27
					HASIL	MEMENUHI

Berdasarkan Tabel 7 metode Log Pearson III yang dipilih pada analisis distribusi frekuensi dimana analisis ini menjadi salah satu yang dapat memenuhi syarat untuk uji Smirnov-Kolmogrov yaitu $\Delta_{maks} < \Delta_{kritik}$ ($0,13 < 0,27$).

Analisis Debit Banjir Rencana

1. Hidrograf Satuan Sintetik

Dalam perhitungan hidrograf satuan sintetik (HSS), diperlukan selang waktu analisis antara 5 hingga 7 jam untuk memperoleh gambaran limpasan yang representatif. Salah satu langkah krusial dalam proses ini adalah menentukan distribusi hujan efektif berdasarkan pola hujan jam-jaman, khususnya untuk durasi total selama 6 jam. Penentuan pola ini harus didasarkan pada data intensitas hujan yang terdistribusi secara temporal, guna menghasilkan input hujan yang akurat dan realistis dalam penyusunan HSS. Oleh karena itu, metode distribusi waktu hujan efektif yang diterapkan berfungsi untuk mengonversi total curah hujan harian menjadi sebaran intensitas hujan per jam, sehingga dapat merepresentasikan karakteristik hidrologi daerah tangkapan

secara lebih tepat. Distribusi hujan jam-jaman yang relevan untuk analisis ini ditunjukkan pada Tabel 8 sebagai dasar dalam penyusunan hidrograf satuan.

Tabel 8 Hidrograf Satuan Sintetik dan Pola Distribusi

t (jam)	Rt ₆ (mm/jam)	Distribusi%
1	0,550	R ₂₄ 55,032
2	0,347	R ₂₄ 14,304
3	0,265	R ₂₄ 10,034
4	0,218	R ₂₄ 7,988
5	0,188	R ₂₄ 6,746
6	0,167	R ₂₄ 5,896

2. Analisis Curah Hujan Efektif

Perolehan Analisis distribusi curah hujan harus melewati tahap analisis kembali agar mendapatkan hasil curah hujan yang efektif. Ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Curah Hujan Efektif Jam-Jaman

Kala Ulang	Hujan Harian Maksimum (mm)	Koefisien Pengaliran (C)	Hujan Efektif (mm)
5 Tahun	63,310	0,850	53,813
10 Tahun	67,966	0,850	57,771
25 Tahun	72,416	0,850	61,553
50 Tahun	74,967	0,850	63,722
100 Tahun	77,025	0,850	65,471

Setelah mendapatkan hasil analisis curah hujan yang efektif lalu dikalikan dengan pola distribusi jam-jaman, agar mendapatkan hasil distribusi curah hujan efektif jam-jaman. Sehingga mendapatkan hasil analisis distribusi curah hujan efektif jam-jaman dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10 Distribusi Curah Hujan Jam-Jaman

T (jam)	Distribusi (%)	Hujan Efektif		
		25 Tahun	50 Tahun	100 Tahun
		61,553	63,722	65,471
1	55,032	33,874	35,068	36,030
2	14,304	8,805	9,115	9,365
3	10,034	6,176	6,394	6,569
4	7,988	4,917	5,090	5,230
5	6,746	4,152	4,298	4,416
6	5,896	3,629	3,757	3,860

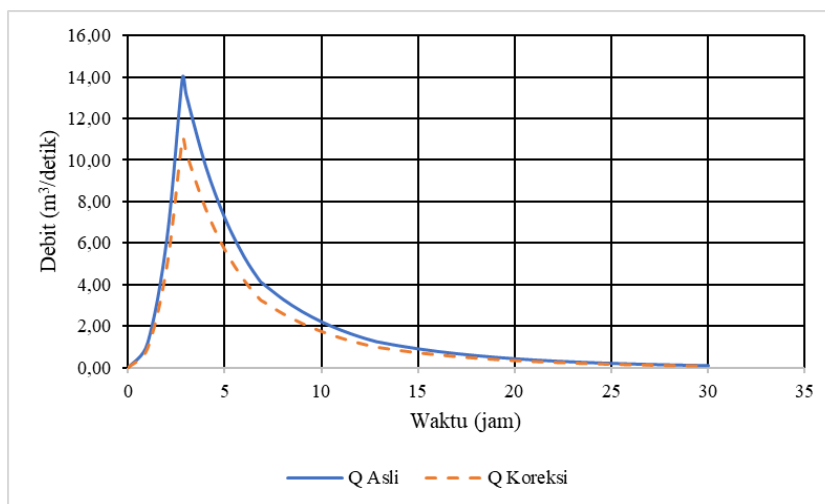
3. Analisis Debit Banjir Metode HSS Nakayasu

Metode HSS Nakayasu memiliki parameter-parameter yang dibutuhkan pada analisis debit banjir, dapat ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11 Parameter Debit Banjir Metode HSS Nakayasu

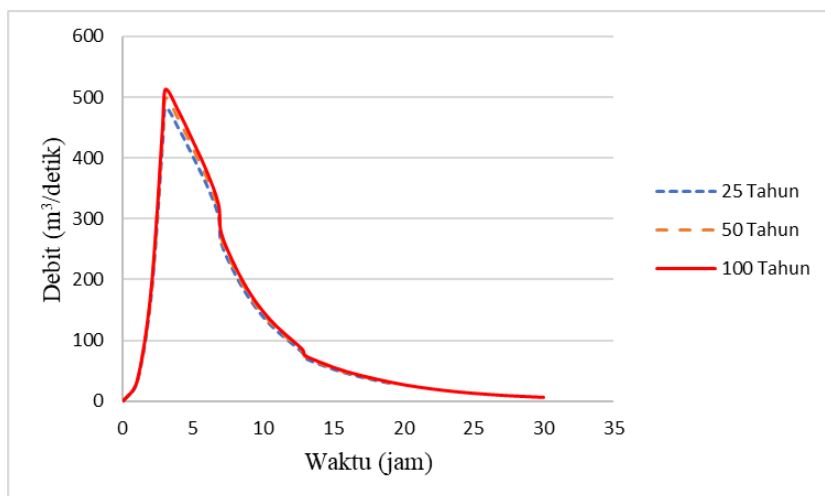
No	Keterangan	Besaran	Satuan
1	Luas DAS (A)	243,190	Km ²
2	Panjang Sungai (L)	27,590	Km
3	Waktu Konsentrasi, T _g (L < 15 Km)	2,000	Jam
4	Waktu Konsentrasi 0,3; T _{0,3}	4,000	Jam
5	Waktu Lama Hujan, t _r	1,000	Jam
6	Waktu Puncak, T _p	2,800	Jam
7	0,3T _p	0,840	Jam
8	Debit Puncak Banjir, Q _p	13,956	m ³ /detik

Selanjutnya ordinat metode HSS Nakayasu ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2 Ordinat HSS Nakayasu

Grafik analisis debit banjir rencana metode HSS Nakayasu yang menggunakan kala ulang 25 tahun, 50 tahun, 100 tahun pada setiap tahun mendapatkan grafik yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Debit Banjir HSS Nakayasu

Dapat dilihat dari Gambar 3 memperoleh debit banjir rencana metode HSS Nakayasu untuk kala ulang 25 tahun sebesar $481,90 \text{ m}^3/\text{detik}$, dan dilanjutkan dengan kala ulang 50 tahun sebesar $498,89 \text{ m}^3/\text{detik}$, dan terakhir pada kala ulang 100 tahun sebesar $512,58 \text{ m}^3/\text{detik}$ masing terjadi pada jam ke 3.

Perencanaan Terowongan Pengelak

Diameter terowongan pengelak 6,9 m, Elevasi inlet 51,1 m, Elevasi Outlet 57,5 m, dan panjang terowongan pengelak 466,9 m.

Perhitungan Kemiringan Terowongan Pengelak

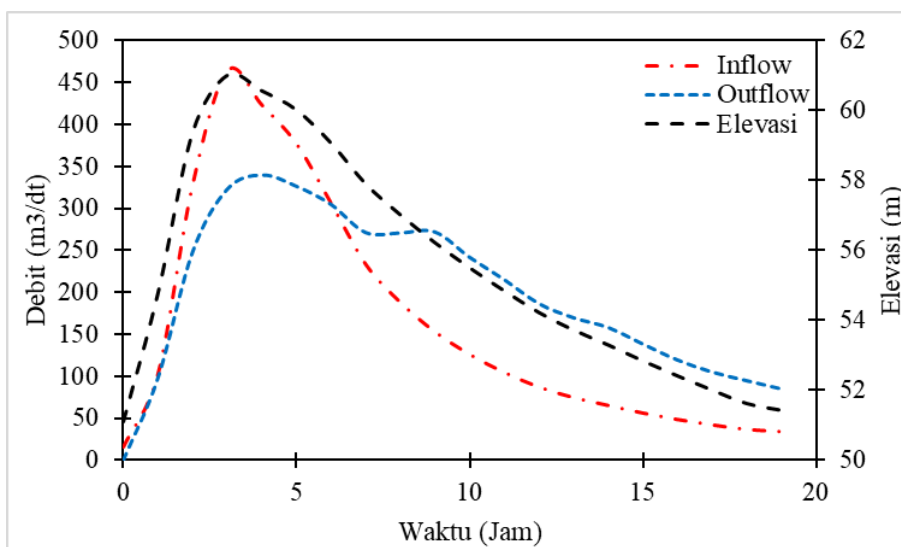
Berdasarkan data yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai (BWS) Sulawesi II, elevasi pada bagian inlet terowongan pengelak tercatat sebesar 51,1 meter, sementara elevasi pada bagian outlet berada pada ketinggian 47,5 meter. Selisih elevasi ini menunjukkan adanya perbedaan ketinggian sebesar 3,6 meter sepanjang lintasan terowongan.

Dengan memperhitungkan panjang terowongan secara keseluruhan, nilai kemiringan (gradient) yang dihasilkan adalah sebesar $0,008 \text{ m/m}$. Nilai kemiringan ini dinilai memenuhi persyaratan teknis untuk memastikan aliran air dapat bergerak secara gravitasi dari inlet menuju outlet tanpa mengalami hambatan signifikan. Kemiringan ini juga penting untuk menjaga efisiensi hidraulik dan mencegah terjadinya sedimentasi dalam sistem terowongan pengelak.

Perhitungan Tinggi Bendungan Pengelak

Gambar 4 menunjukkan hasil penelusuran banjir dengan debit rencana kala ulang 25 tahun, diperoleh bahwa penggunaan terowongan pengelak dengan diameter 6,9 meter mampu mereduksi debit puncak banjir secara signifikan. Dari simulasi hidrograf, kapasitas tampungan maksimum pada struktur cofferdam tercapai pada elevasi muka air tertinggi sebesar +61,016 meter. Debit masuk (inflow) maksimum mencapai $464,035 \text{ m}^3/\text{detik}$, sedangkan debit keluar (outflow) tertinggi tercatat sebesar $323,124 \text{ m}^3/\text{detik}$. Selisih antara inflow dan outflow ini menunjukkan bahwa struktur cofferdam efektif dalam menahan sebagian volume air, sehingga dapat memperlambat aliran menuju hilir dan mengurangi risiko banjir mendadak.

Kurva elevasi menunjukkan kenaikan yang tajam seiring peningkatan inflow, diikuti penurunan bertahap saat inflow menurun dan outflow meningkat. Untuk memastikan keamanan terhadap limpasan ekstrem, maka elevasi puncak bendungan pengelak ditentukan dengan menambahkan tinggi jagaan (freeboard) sebesar 2 meter dari elevasi muka air maksimum, sehingga diperoleh elevasi konstruksi akhir sebesar +63,016 meter. Desain ini diharapkan mampu menjamin fungsi pengelakan air secara optimal selama peristiwa banjir besar.



Gambar 4 Penelusuran Banjir

Analisis Evaluasi Perencanaan

Tabel 12 menyajikan hasil evaluasi perencanaan temporary cofferdam hulu pada proyek Bendungan Bulango Ulu. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh bahwa debit banjir dengan kala ulang 25 tahun mencapai 481,9 m³/detik, dengan tinggi bendungan pengelak yang dibutuhkan sebesar 63,016 meter. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan data yang dirujuk dari BWS tahun 2017, yaitu debit sebesar 434,8 m³/detik dan tinggi bendungan pengelak sebesar 61,33 meter. Selisih nilai tersebut mengindikasikan adanya perbedaan asumsi dan data yang digunakan dalam analisis. Meskipun metode perhitungan debit banjir yang digunakan sama, yaitu metode Nakayasu, namun terdapat perbedaan signifikan pada periode data hujan yang dianalisis. BWS menggunakan data curah hujan selama 10 tahun (periode 2007–2017), sedangkan analisis terkini menggunakan data dengan cakupan waktu yang lebih panjang, yaitu 15 tahun (periode 2007–2021). Perbedaan ini berpengaruh terhadap hasil estimasi debit banjir yang lebih representatif terhadap kondisi aktual dan variabilitas iklim yang lebih luas. Dengan demikian, penambahan elevasi temporary cofferdam dari 61,33 m menjadi 63,016 m menjadi langkah yang diperlukan guna memastikan kapasitas pengelakan yang mencukupi terhadap debit banjir rencana terbaru, serta menjamin keamanan struktur bendungan selama masa konstruksi.

Tabel 12 Analisis Evaluasi Perencanaan

	Data BWS	Hasil Perhitungan
Kala Ulang 25 Tahun	434,8 m ³ /dt	481,9 m ³ /dt
Tinggi Bendungan Pengelak	61,33 m	63,016 m

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil analisis hidrologi, debit banjir rencana dengan kala ulang 25 tahun di lokasi Bendungan Bulango Ulu mencapai 481,9 m³/detik. Nilai ini diperoleh dari analisis data curah hujan selama 15 tahun (2007–2021) menggunakan metode Nakayasu.
2. Perbandingan antara hasil analisis dan data dari Balai Wilayah Sungai (BWS) menunjukkan adanya perbedaan, di mana BWS menggunakan data hujan selama 10 tahun (2007–2017). Perbedaan periode ini menghasilkan selisih dalam estimasi debit banjir, yang secara signifikan memengaruhi desain cofferdam.
3. Evaluasi perencanaan temporary cofferdam menunjukkan bahwa tinggi elevasi eksisting (61,33 m) tidak mencukupi untuk mengatasi debit banjir kala ulang 25 tahun. Oleh karena itu, diperlukan penambahan tinggi cofferdam menjadi 63,016 m agar dapat menjamin keamanan terhadap limpasan air.
4. Dari aspek keamanan konstruksi dan fungsionalitas, penambahan tinggi cofferdam sebesar ±1,686 meter menjadi keharusan demi mencegah potensi kegagalan sistem pengelakan selama masa konstruksi bendungan utama.
5. Studi ini membuktikan pentingnya pemutakhiran data curah hujan dan analisis hidrologi sebagai dasar valid untuk perencanaan infrastruktur pengendali air, khususnya dalam konteks perubahan iklim dan variabilitas cuaca.

Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah:

1. Disarankan agar perencanaan dan evaluasi struktur pengelak, seperti cofferdam, selalu menggunakan data terbaru dan memperhitungkan skenario ekstrem sebagai langkah mitigasi risiko.
2. Dalam proses perencanaan bendungan, pendekatan berbasis risiko sebaiknya diterapkan guna menentukan tinggi optimal cofferdam dan kapasitas saluran pengelak, terutama pada proyek-proyek berskala besar.
3. Penerapan sistem pemantauan real-time pada saat konstruksi perlu dipertimbangkan sebagai bagian dari upaya adaptif terhadap kondisi debit sungai yang dapat berubah secara dinamis akibat intensitas curah hujan ekstrem.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Balai Wilayah Sungai Sulawesi II yang telah membantu dalam pemberian data pada penelitian ini.

Daftar Referensi

- Anga, M. A., Syukur, A., & Uta, F. (2022). Alternatif Perencanaan Terowongan Pengelak (Diversion Tunnel) Bendungan Pemukulu. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6(1), 15–25.
- Asdak, C. (1995). Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Harto, S. (1993). Analisis Hidrologi. PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2013). *Pedoman Perencanaan Teknis Bangunan Utama Bendungan*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 Tentang Bendungan*.
- Maini, M. (2024). Estimasi Debit Banjir Rancangan pada Bendungan Bulango Ulu di Provinsi Gorontalo. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 1(7), 870-880. <https://doi.org/10.59837/jpnmb.v1i7.169>
- Nabila, A., Irawan, D. M., & Hidayat, T. (2019). Perencanaan Desain Konstruksi Bendungan Pengelak dan Saluran Pengelak pada Bendungan Ciawi (Cipayung) di Kabupaten Bogor Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Teknik Sipil Cipta Karya*, 3(2), 60–70.
- Simatupang, M. T., Siregar, D., & Nasution, A. S. (2020). Tinjauan Perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Karalloe di Kabupaten Gowa. *Jurnal Sipil Statik*, 8(5), 392–398. <https://doi.org/10.52722/pcej.v2i1.123>
- Triatmodjo, B. (2019). *Hidrologi Terapan*. Beta Offset.