Analisa Keruntuhan Bendungan Batujai dan Pengga dengan Aplikasi HEC-RAS 5.0.7

Diah Fitri Maulida^{1*}, Pitojo Tri Juwono², Runi Asmaranto³

¹Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jalan MT Haryono No.167, Malang, 65145, INDONESIA

*Korespondensi Email: diahfitri13@gmail.com

Abstract: Batujai and Pengga Dam are cascade dams with homogeneous types, are authorized in 1982 and 1994. These dams are located at the same mainstream that ends at Alas Strait. Batujai and Pengga Dam break may occur due to overtopping and piping. According to HEC-RAS 5.0.7 simulation suggested that the collapsed of each or both dams has the biggest impact when conditioned with design flood of QPMF are due to overtopping, when the peak of discharge are at 2036.151 m³/second and 3204,089 m³/second, which caused 34.127 km² and 107,025 km² area to be flooded, with maximum inundation of 19.656 meters and 19.837 meters. According to InaSAFE, if the collapse of these dams were merged, reported that there are 34 villages and 29,100 people are exposed to the risk, classified with high disaster risk. The cost that has to be paid by the dam's owner due to the collapse is estimated to be Rp 201,584,808.36/Ha or Rp. 2,845,409,886,907 in total.

Keywords: Batujai and Pengga Dam, Dambreak, InaSAFE, Overtopping, Piping,

Abstrak: Bendungan Batujai dan Pengga merupakan bendungan bertingkat dengan jenis bendungan urugan yang diresmikan pada tahun 1982 dan 1994. Kedua bendungan ini berada pada satu sungai utama yang berakhir di Selat Alas. Keruntuhan Bendungan Batujai dan Pengga dapat disebabkan oleh overtopping maupun piping. Hasil simulasi dengan HEC-RAS 5.0.7 menunjukkan overtopping adalah penyebab utama keruntuhan yang memberikan dampak terbesar dengan banjir desain QPMF dimana puncak banjir berada pada Qinfow 2036,151 m³/detik dan 3204,089 m³/detik dan luas genangan 34,127 km² dan 107,025 km² dengan ketinggian banjir masing masing 19,656 meter dan 19,837 meter. Dengan bantuan aplikasi InaSAFE, jika dipadukan keruntuhan kedua bendungan ini mengakibatkan 34 Desa terdampak banjir dan 29.100 jiwa, dengan klasifikasi bahaya tingkat tinggi. Kerugian yang harus ditanggung oleh Pengelola Bendungan ditaksir sekitar Rp 201.584.808,36/Ha atau dengan total Rp. 2.845.409.886.907.

Kata kunci: Bendungan Batujai dan Pengga, InaSAFE, Keruntuhan Bendungan, Overtopping, Piping

1. Pendahuluan

Permasalahan ketidakseimbangan antara peningkatan kebutuhan air dan ketersediannya yang semakin menurun menyebabkan penggunaan air perlu dikelola dengan memperhatikan aspek sosial, lingkungan hidup dan ekonomi di berbagai sektor. Salah satu cara untuk mengelola air adalah dengan

*Penulis korespondensi: diahfitri13@gmail.com

membentuk wadah buatan berupa bendungan yang nantinya membentuk waduk yang akan menampung air [1].

Namun dengan seiring berjalannya waktu, pembangunan bendungan menyimpan berbagai macam resiko salah satunya yaitu akan terjadinya keruntuhan bendungan. Dalam Permen PU No.27 Pasal 1 Tahun 2015 disebutkan bahwa kegagalan bendungan adalah keruntuhan sebagian atau seluruh bendungan atau bangunan pelengkap yang akan menyebabkan tidak berfungsinya bendungan [2]. Keruntuhan ini menyebabkan banjir yang memberikan banyak korban jiwa, hilang atau rusaknya harta benda, kerusakan lingkungan, dan dapat memberikan dampak psikologis yang berkepanjangan pada korban bencana.

Maka dari itu, selain harus dilakukannya inspeksi setiap 5 tahun sekali untuk mencegah dan meminimalisir adanya kerusakan di tubuh bendungan, bangunan pelengkap, serta instrument yang ada di bendungan, setiap bendungan harus dilengkapi dengan Dokumen Rencana Tindak Darurat (RTD) untuk mengantisipasi penyelamatan jiwa dan harta benda apabila terjadi keruntuhan. Salah satu bentuk dari Rencana Tindak Darurat adalah melakukan analisis keruntuhan bendungan agar dapat diketahui resiko bahaya bendungan pada daerah terdampak sesuai dengan klasifikasi yang telah diberikan.

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan

a. Data Hujan

Data hujan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki rentang waktu selama 30 tahun dari tahun 1999 – 2019, dimana nantinya data hujan ini digunakan untuk melakukan analisis hidrologi dari uji kualitas data sampai dengan *flood routing*.

b. Data Teknis dan Peta Isohayet Pulau Lombok tahun 2019/2020 [3]

Data teknis yang digunakan pada penelitian ini yaitu berupa data teknis tinggi bendungan, lengkung kapasitas waduk, dan dimensi bendungan. Sementara untuk Peta Isohayet Pulau Lombok yang digunakan pada penelitian ini yaitu tahun 2019/2020. Nantinya peta ini digunakan untuk membandingkan hasil PMP hitung dengan PMP Peta. Apabila nilai PMP Hitung > PMP Peta, maka yang digunakan adalah PMP Hitung pada perhitungan selanjutnya, begitupula dengan sebaliknya.

c. Peta DEM dan Peta RBI

Peta DEM atau *Digital Elevation Model* digunakan pada penelitian ini untuk menggambarkan kondisi bagian hilir bendungan pada software HEC-RAS, sementara peta RBI dengan skala 1:25.000 nantinya digunakan untuk *overlay* agar mengetahui daerah mana saja yang terdampak banjir oleh keruntuhan bendungan.

d. Data Jumlah Penduduk

Sesudah melakukan *overlay* terhadap peta banjir untuk mendapatkan daerah terdampak, selanjutnya adalah menggunakan data jumlah penduduk agar mengetahui berapa jumlah jiwa yang terdampak. Tahap ini digunakan pada aplikasi InaSAFE.

e. Data OSM

Data OSM ini nantinya akan digunakan pada aplikasi InaSAFE untuk menentukan unit daerah terdampak. Biasanya yang digunakan adalah data dalam bentuk .shp. Dalam penelitian ini penulis menggunakan 4 basis data, yaitu data bangunan, tata guna lahan, jalan, dan penduduk.

2.2 Metode

Gambar 1: Diagram Pengerjaan

2.3 Persamaan

2.3.1 Analisa Frekuensi

Tujuan dari analisa frekuensi sangat erat hubungannya dengan besarnya kejadian ekstrim terhadap frekuensi kejadian dengan menggunakan distribusi peluang (probabilitas). Dalam distribusi peluang, biasanya akan diperkirakan kemungkinan terjadinya suatu debit dengan besaran tertentu atau akan diperkirakan berapa besar debit dengan suatu kala ulang tertentu.

2.3.1.1 Distribusi Normal

Distribusi Normal atau kurva normal biasa disebut distribusi Gauss. Fungsi densitas peluang distribusi ini terdapat dari variable kontinyu X [4]

$$X = X_{\text{rerata}} + K.Sd \quad \text{Pers. 1}$$

2.3.1.2 Distribusi Log Normal

Distribusi Log Normal dalam bentuk sederhana adalah fungsi kepadatan dari sebuah perubahan acak yang logaritmanya mengikuti hukum distribusi normal. Selain mempunyai fungsi kepekatan peluang, distribusi Log Normal juga memiliki fungsi distribusi kumulatif. [4]

$$\text{Log } X_t = \overline{\log x} + K \times S_{\log x} \quad \text{Pers. 2}$$

2.3.1.3 Distribusi Log Pearson Tipe III

Untuk menghitung banjir perencanaan dalam praktek, *The Hydrology of Water Resources Council, USA* menganjurkan untuk mentransformasikan data keharga logaritmanya, kemudian menghitung parameter statistiknya. [5]

$$\text{Log } X_t = \text{Log } X + K.S \quad \text{Pers. 3}$$

2.3.1.4 Distribusi Gumbel

Metode Gumbel biasanya digunakan pada analisis data maksimum, yaitu seperti analisis frekuensi banjir. Sementara persoalan yang biasanya dibicarakan berhubungan dengan nilai-nilai ekstrim yang datang dari persoalan banjir [5]. Tujuan dari teori statistik nilai ekstrim adalah untuk menganalisa hasil dari pengamatan nilai ekstrim tersebut untuk memperkirakan nilai ekstrim berikutnya.

$$Y_t = -\ln \left[-\ln \left(\frac{Tr(X)-1}{Tr(X)} \right) \right] \quad \text{Pers. 4}$$

$$Tr = \frac{1}{1 - e^{-e^{-Yt}}} \quad \text{Pers. 5}$$

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \quad \text{Pers. 6}$$

$$X = \bar{X} + Sd . K \quad \text{Pers. 7}$$

2.3.2 Uji Kesesuaian Distribusi

Untuk menentukan apakah pemilihan distribusi yang digunakan dalam perhitungan curah hujan rancangan diterima atau ditolak perlu dilakukan sebuah pengujian hipotesis berdasarkan pada derajat kepercayaan (*level of significance*) dan derajat kebebasan (*degress of freedom*), pengujian hipotesis tersebut menentukan suatu hipotesis diterima atau ditolak, yaitu dengan menggunakan Uji Smirnov Kolmogorov dan Chi Square [6].

2.3.3 Debit Banjir Rancangan

Hidrograf satuan digunakan dalam analisis banjir rancangan [7]. Hidrograf satuan sintetis yang telah dikembangkan oleh beberapa pakar antara lain yaitu HSS Nakayasu, HSS Snyder, HSS Gama I, HSS Limantara, dan banyak lainnya [8]. Debit Banjir Rencana pada penelitian ini dihitung dengan Hidrograf Satuan Sintetis. Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) dilakukan pada Bendungan Batujai dan Bendungan Pengga dengan Metode Nakayasu.

➤ Rumus Hidrograf Satuan Sintetis Nakayasu:

$$tg = 0.21 L^{0.7} \text{ (untuk } L < 15\text{km)} \quad \text{Pers. 8}$$

$$tg = 0.4 + 0.058L \text{ (untuk } L > 15\text{km)} \quad \text{Pers. 9}$$

$$tr = 0.5 \text{ sampai } 1 \text{ tg} \quad \text{Pers. 10}$$

$$Tp = tg + 0.8 \text{ tr} \quad \text{Pers. 11}$$

$$T_{0.3} = \alpha \text{ tg} \quad \text{Pers. 12}$$

$$Qp = \frac{1}{3.6} \left[\frac{CA \times Ro}{0.3 Tp + T_{0.3}} \right] \quad \text{Pers. 13}$$

➤ Rumus Hidrograf Satuan Sintetis Limantara:

$$Qp = 0.042 . A^{0.451} . L^{0.497} . Lc^{0.356} . S^{-0.131} . n^{0.16} \quad \text{Pers. 14}$$

$$n = 0.035 (1 + Af/A)$$

Pers. 15

2.3.4 Keruntuhan Bendungan

Pembangunan bendungan menyimpan segudang resiko kegagalan, salah satunya yaitu keruntuhan bendungan yang bisa disebabkan oleh *overtopping* dan atau *piping*.

Gambar 2: Proses Keruntuhan Bendungan akibat *Overtopping*

Gambar 3: Proses Keruntuhan Bendungan akibat *Piping*

Pada keruntuhan bendungan dengan sekenario *piping*, air yang keluar melalui celah bendungan dimodelkan dengan persamaan tekanan aliran *orifice*. Persamaan ini juga membutuhkan koefisien debit dan menghitung seberapa efisien aliran bisa mengalir melalui pipa. Karena keruntuhan bendungan dengan sekenario *piping* tidak didesain secara hidrolika, maka diasumsikan bahwa rekahan tidak merata. Nilai yang direkomendasikan untuk koefisien tekanan untuk sekenario *piping* yaitu berkisar 0,5 sampai 0,6 [9]. Berikut adalah koefisien keruntuhan bendungan sesuai dengan jenis bendungannya.

Tabel 1: Koefisien Keruntuhan Bendungan

Dam Types	Overflow/Weir Coefficient	Piping/Pressure Flow Coefficients
Earthen Clay or Clay Core	2,6 – 3,3	0,5 – 0,6
Earthen Sand and Gravel	2,6 – 3,0	0,5 – 0,6
Concrete Arch	3,1 – 3,3	0,5 – 0,6
Concrete Gravity	2,6 – 3,0	0,5 – 0,6

Gambar 4: Sketsa parameter keruntuhan bendungan

Pada penelitian ini, penulis menggunakan persamaan yang ditemukan oleh Froehlich yang tercantum pada *user guide* di aplikasi HEC-RAS [9], yang sudah digunakan untuk beberapa perhitungan keamanan bendungan. Berdasarkan penelitian terbarunya, Froehlich menyatakan bahwa sisi rata-rata lereng adalah 1,0H : 1,0V untuk keruntuhan *overtopping* dan 0.7H : 1.0V untuk keruntuhan *piping* [9]. Berikut adalah persamaan regresi untuk lebar rerata keruntuhan bendungan dan waktu runtuhnya:

$$B_{ave} = 0.27 \cdot K_o \cdot V_w^{0.32} \cdot h_b^{0.04} \quad \text{Pers. 16}$$

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{ghb^2}} \quad \text{Pers. 17}$$

dimana:

B_{ave}	= Lebar rerata rekahan (m)
K_o	= Konstanta (1,3 untuk <i>overtopping</i> dan 1,0 untuk <i>piping</i>)
V_w	= Volume waduk saat keruntuhan terjadi (m ³)
h_b	= Tinggi akhir rekahan (m)
g	= Persamaan gravitasi (9,81 m/detik ²)
t_f	= Waktu keruntuhan (detik)

3 Aplikasi HEC-RAS

HEC-RAS (*Hydraulic Engineering Center's River Analysis System*) adalah aplikasi yang memungkinkan penggunaannya untuk melakukan simulasi hidraulik aliran satu dimensi, perhitungan aliran sungai tidak seragam satu maupun dua dimensi, pemodelan pergerakan sedimen dalam aliran tidak seragam dan aliran tidak seragam penuh, analisis suhu air, dan pemodelan kualitas air secara umum. Dalam melakukan simulasi keruntuhan bendungan dengan HEC-RAS biasanya dilakukan beberapa tahap, yaitu:

- Memulai proyek baru
- Memasukkan data geometris sesuai dengan lokasi bendungan
- Memasukkan data aliran dan kondisi batas
- Melakukan perhitungan hidraulik
- Melihat dan mencetak hasil banjir akibat keruntuhan bendungan

4 Klasifikasi Tingkat Bahaya

Untuk mendapatkan klasifikasi tingkat bahaya dan karakteristik banjir, digunakan bantuan aplikasi InaSAFE 5.0.1 dengan analisa ancaman (*hazard*) berdasarkan Peraturan BNPB No.02 Tahun 2012. Dimana indeks yang digunakan merupakan indeks tinggi banjir yang telah disusun berdasarkan data dan catatan sejarah kejadian yang pernah terjadi di suatu daerah [10]. Menurut Peraturan BNPB No.02 Tahun 2012 klasifikasi bahaya terdiri dari indeks ancaman dengan ketinggian banjir < 1 meter merupakan ancaman rendah, 1 - 3 meter merupakan ancaman sedang, dan > 3 meter merupakan ancaman tinggi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisa Hidrologi

Dalam melakukan analisis hidrologi, penulis melakukan dua kali perhitungan sebab masing-masing bendungan memiliki DTA (Daerah Tangkapan Air) tersendiri dengan rentang data sepanjang yang sama, yaitu 30 tahun (1999- 2020).

- a. Hujan PMP (*Probable Maximum Precipitation*) yaitu ketebalan hujan maksimum dalam lama waktu tertentu yang mungkin terjadi pada suatu wilayah yang nantinya kemudian akan digunakan

dalam melakukan perhitungan banjir PMF (*Probable Maximum Flood*) [6]. Berikut adalah perhitungan hujan PMP dengan Metode Hersfield:

Tabel 2: Perhitungan Hujan PMP Metode

Hersfield Batujai

No.	Tahun	Curah Hujan (mm)	Curah Hujan Terurut (mm)
1	1990	101,00	49,00
2	1991	95,40	54,50
3	1992	97,00	55,00
4	1993	137,70	59,50
5	1994	80,00	60,00
6	1995	65,70	65,70
7	1996	81,10	80,00
8	1997	100,90	81,00
9	1998	49,00	81,10
10	1999	60,00	83,50
11	2000	83,50	86,30
12	2001	59,50	89,20
13	2002	100,50	90,00
14	2003	108,20	90,01
15	2004	94,00	93,07
16	2005	90,01	94,00
17	2006	55,00	94,50
18	2007	94,50	95,40
19	2008	54,50	97,00
20	2009	141,90	100,50
21	2010	81,00	100,90
22	2011	90,00	101,00
23	2012	110,00	108,20
24	2013	113,70	110,00
25	2014	133,00	113,70
26	2015	134,70	118,40
27	2016	89,20	133,00
28	2017	118,40	134,70
29	2018	86,30	137,70
30	2019	93,07	141,90
Total X			2798,781
Xrerata			93,293
Jumlah Data (n)			30
Standar Deviasi (Sd)			24,891
Xrerata - m			91,617
Standar Deviasi - m			23,546

Tabel 3: Perhitungan Hujan PMP Metode

Hersfield Pengga

No.	Tahun	Curah Hujan (mm)	Curah Hujan Terurut (mm)
1	1990	78,152	23,96
2	1991	44,582	25,18
3	1992	46,744	27,86
4	1993	77,999	29,52
5	1994	25,183	29,94
6	1995	46,755	30,64
7	1996	23,957	33,09
8	1997	50,142	39,00
9	1998	73,142	40,62
10	1999	74,657	43,12
11	2000	72,428	44,57
12	2001	48,248	44,58
13	2002	56,271	45,69
14	2003	44,571	46,74
15	2004	46,800	46,76
16	2005	27,863	46,80
17	2006	29,944	48,25
18	2007	30,643	50,14
19	2008	33,094	52,20
20	2009	45,694	55,45
21	2010	39,000	56,27
22	2011	29,517	56,83
23	2012	52,204	61,29
24	2013	40,615	62,96
25	2014	43,123	72,43
26	2015	56,828	73,14
27	2016	78,557	74,66
28	2017	61,285	78,00
29	2018	62,957	78,15
30	2019	55,455	78,56
Total X			1496,410
Xrerata			49,880
Jumlah Data (n)			30
Standar Deviasi (Sd)			16,701
Xrerata - m			48,891
Standar Deviasi - m			16,078

Contoh Perhitungan Hujan PMP Batujai

$$\begin{aligned}
 X_n \text{ terkoreksi } (X_p) &= X_n \cdot f_1 \cdot f_2 \\
 &= 93,29 \times 1,029 \times 1,01 \\
 &= 96,96 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$S_n \text{ terkoreksi } (S_p) = S_n \cdot f_3 \cdot f_4$$

$$\begin{aligned}
&= 24,89 \times 1,14 \times 1,04 \\
&= 29,51 \\
X_m &= X_p + K_m \cdot S_p \\
&= 96,96 + 15,7 \times 29,51 \\
&= 560,285 \text{ mm} \\
PMP_{hitung} &= 560,285 \times 1,13 \text{ (Faktor pengali SNI)} \\
&= 633,125 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Berdasarkan nilai Peta PMP Isohyet Pulau Lombok, PMP yang terjadi di Bendungan Batujai yaitu sebesar 542,70 mm, namun hasil PMP_{hitung} lebih besar sebesar 633,125 mm, maka dari itu untuk perhitungan selanjutnya digunakan nilai PMP terbesar yaitu PMP_{hitung} , sementara untuk Bendungan Pengga menggunakan PMP_{peta} .

HSS Limantara juga sesuai dengan wilayah penelitian, khususnya HSS Limantara yang dianggap mewakili lokasi di Indonesia, yaitu Pulau Jawa, Bali, Lombok, dan Kalimantan [8].

Tabel 4: Rekapitulasi Nilai Hidrograf Satuan Sintetis Batujai

Metode HSS	Debit Banjir Rancangan (m^3/dt)						PMF
	5 tahun	10 tahun	25 tahun	50 tahun	100 tahun	1000 tahun	
Nakayasu	430,598	462,004	495,972	515,660	534,592	581,316	2036,151
Limantara	119,622	128,474	137,972	143,625	148,984	162,320	569,537

Tabel 5: Rekapitulasi Nilai Hidrograf Satuan Sintetis Pengga

Metode HSS	Debit Banjir Rancangan (m^3/dt)						PMF
	5 tahun	10 tahun	25 tahun	50 tahun	100 tahun	1000 tahun	
Nakayasu	419,369	481,516	554,866	615,415	673,267	856,979	3204,089
Limantara	277,877	320,274	369,751	411,775	451,407	578,272	2186,260

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, kedua bendungan menggunakan HSS Metode Nakayasu sebab memberikan hasil debit yang lebih besar yaitu sebesar Q_{PMF} Batujai = 2036,151 $m^3/detik$ dan Q_{PMF} Pengga = 3024,089 $m^3/detik$ dibandingkan HSS Metode Limantara. Selisih kedua debit sangatlah jauh, untuk itu perlu dilakukan pengecekan dengan data nilai debit sungai tercatat (AWLR) pada AWLR Karang Anyar sebesar Q_{PMF} = 2812,36 $m^3/detik$. Hasilnya perhitungan HSS Metode Nakayasu lebih mendekati data yang tercatat, oleh sebab itu untuk perhitungan selanjutnya akan menggunakan perhitungan hasil HSS Nakayasu.

b. Penelusuran Banjir diatas Pelimpah Bendungan

Perhitungan penelusuran banjir atau *flood routing* melalui pelimpah dilakukan untuk mengetahui tinggi muka air yang ada diatas mercu pelimpah saat suatu debit dengan kala ulang tertentu melewati pelimpah. Pada studi analisa keruntuhan bendungan, hasil analisa penelusuran banjir melewati pelimpah digunakan untuk menentukan apakah bendungan mengalami *overtopping* atau tidak.

Dalam melakukan penelusuran banjir pada pelimpah Bendungan Pengga, terdapat beberapa perbedaan, yaitu *Qinflow* yang masuk ke Waduk Pengga berasal dari *Qoutflow* hasil *routing* dari Bendungan Batujai ditambah dengan *Qinflow* yang berasal dari Bendungan Pengga.

Gambar 5: Peta Skema *Inflow* dan *Outflow* yang diterima Waduk Pengga

Gambar 6: Grafik Hubungan *Inflow* dan *Outflow* pada Pelimpah Bendungan Batujai dengan QPMF

Gambar 7: Grafik Hubungan *Inflow* dan *Outflow* pada Pelimpah Bendungan Pengga dengan QPMF

Dari Gambar 6 dan Gambar 7, dapat diketahui bahwa apabila Bendungan Batujai dengan 4 (empat) pintu, dan Bendungan Pengga dengan 6 (enam) pintu jika disimulasikan menerima banjir sebesar QPMF dengan skenario semua pintu tidak dapat dibuka maka akan menghasilkan *overtopping* dengan ketinggian air 5,876 meter di atas pelimpah untuk Bendungan Batujai dan 10,535 meter untuk Bendungan Pengga.

3.2 Analisa Keruntuhan Bendungan dengan HEC-RAS 5.0.7

a. Parameter Keruntuhan

Keruntuhan Bendungan Batujai disimulasikan menggunakan bantuan aplikasi HEC-RAS versi 5.0.7 dengan pemodelan 2D. Selain HEC-RAS dengan 7 (tujuh) macam skenario. Parameter keruntuhan bendungan dihitung dengan rumus Froehlich [9].

Contoh perhitungan untuk skenario *overtopping* untuk Bendungan Batujai:

$$\begin{aligned} B_{ave} &= 0,27 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.04} \\ &= 0,27 \cdot 1,3 \cdot 25574800^{0.32} \cdot 15^{0.04} \\ &= 91,802 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_f &= 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{g h_b^2}} \\ &= 63,2 \sqrt{\frac{25574800}{9.81 (15)^2}} \\ &= 6802,952 \text{ detik} \\ &= 1,890 \text{ jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_b &= B_{ave} - 2 \cdot \text{slide slope} \times \frac{1}{2} H_{akhir} \text{ keruntuhan} \\ &= 91,802 - 2 \times 1 \times \frac{1}{2} \times 15 \\ &= 76,802 \text{ m} \end{aligned}$$

dimana:

B_{ave} = Lebar rerata rekahan

K_o = Konstanta (1,3 untuk keruntuhan *overtopping* dan 1,0 untuk *piping*)

V_w = Volume tampungan air waduk

W_b = Lebar rekahan bagian bawah

h_b = Elevasi puncak bendungan – Elevasi dasar bendungan

g = Koefisien gravitasi (9,81 m/s²)

t_f = Waktu mulai keruntuhan bendungan

Parameter *slope* rekahan menurut Froehlich (2008)

1H : 1V = Keruntuhan akibat *overtopping*

0,7H : 1V = Keruntuhan akibat *piping*

b. Hasil Simulasi Keruntuhan

Gambar 8: Sebaran Genangan Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Batujai

Gambar 9: Sebaran Genangan Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Pengga

Tabel 6: Luas Genangan Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Batujai

No	Simulasi Keruntuhan	Panjang		Luas	
		m	km	m ²	km ²
1	Overtopping	242204,953	242,205	34126607,354	34,127
2	Piping MAB Atas	85883,597	85,884	13123362,364	13,123
3	Piping MAB Tengah	83469,979	83,470	12989791,070	12,990
4	Piping MAB Bawah	83430,965	83,431	12986070,082	12,986
5	Piping MAN Atas	77684,522	77,685	12217988,879	12,218
6	Piping MAN Tengah	76484,277	76,484	12185364,867	12,185
7	Piping MAN Bawah	76483,612	76,484	12185845,134	12,186

Tabel 7: Luas Genangan Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Pengga

No	Simulasi Keruntuhan	Panjang		Luas	
		m	km	m ²	km ²
1	Overtopping	456059,630	456,060	107024742,680	107,025
2	Piping MAB Atas	455500,736	455,501	106867179,814	106,867
3	Piping MAB Tengah	453930,052	453,930	106717046,978	106,717
4	Piping MAB Bawah	453686,168	453,686	106561635,084	106,562
5	Piping MAN Atas	455820,443	455,820	106754830,000	106,755
6	Piping MAN Tengah	453824,151	453,824	106581253,658	106,581
7	Piping MAN Bawah	452430,695	452,431	106397886,054	106,398

Tabel 8: Kedalaman Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Batujai

No	Simulasi Keruntuhan	Depth Max	Mean Depth	Jarak dari Bendungan
		m	m	m
1	Overtopping	19,656	9,397	12976,024
2	Piping MAB Atas	12,985	8,054	4450,780
3	Piping MAB Tengah	12,928	7,869	4451,875
4	Piping MAB Bawah	12,925	7,864	4451,458
5	Piping MAN Atas	12,772	7,026	12976,024
6	Piping MAN Tengah	12,369	6,950	12975,123
7	Piping MAN Bawah	12,368	6,950	12975,200

Tabel 9: Kedalaman Banjir akibat Keruntuhan Bendungan Pengga

No	Simulasi Keruntuhan	Depth Max	Mean Depth	Jarak dari Bendungan
		m	m	m
1	Overtopping	19,837	13,730	6725,383
2	Piping MAB Atas	19,913	13,817	5846,841
3	Piping MAB Tengah	19,970	13,848	5846,345
4	Piping MAB Bawah	20,056	13,885	5846,789
5	Piping MAN Atas	19,815	13,710	6725,383
6	Piping MAN Tengah	19,805	13,696	6725,123
7	Piping MAN Bawah	19,792	13,680	6725,456

Dari gambar dan tabel diatas memberikan hasil yang sangat beragam, namun dapat disimpulkan dari luas banjir, kedalaman banjir, dan kecepatan banjir, bahwa keruntuhan kedua bendungan dengan kondisi terekstrim dihasilkan oleh sekenario *overtopping*, dengan perbedaan keruntuhan Bendungan Pengga mencapai laut sementara tidak dengan Bendungan Batujai. Hal ini disebabkan karena air dengan *inflow* QPMF dan parameter yang diisi, Bendungan Pengga masih dapat menampung air banjir dari Bendungan Batujai selama 3 jam setelah banjir masuk melalui sungai sebelum akhirnya ditampung oleh Waduk Pengga.

Hasil dari simulasi keruntuhan Bendungan Batujai dengan HEC-RAS 5.0.7 memperlihatkan bahwa terdapat 29 Desa yang terdampak dan hasil keruntuhan Bendungan Pengga menyebabkan 23 Desa yang terdampak. Jika kedua peta banjir ini digabungkan, maka akan menghasilkan 34 Desa yang terdampak oleh banjir akibat keruntuhan kedua bendungan. Rincian desa terdampak dapat dilihat pada Gambar 9.

Gambar 10: Sebaran Banjir di 34 Desa terdampak akibat Keruntuhan Bendungan Batujai dan Pengga

3.3 Klasifikasi Tingkat Bahaya

Hasil dari analisa keruntuhan Bendungan Batujai dan Pengga yang telah dilakukan dengan bantuan aplikasi InaSAFE 5.0.1 menunjukkan bahwa dengan panjang banjir 36,94 Km dan luas total 141,152 Km² terdapat 34 Desa yang tergenang banjir dan 29.100 jiwa yang harus diungsikan.

Sesuai dengan indeks tinggi banjir, jika kedalaman banjir diatas 3 meter dengan penduduk yang terdampak lebih dari 1000 jiwa [10], maka dapat disimpulkan bahwa keruntuhan kedua bendungan merupakan bahaya dengan klasifikasi tinggi.

3.4 Analisa Kerugian

Berdasarkan analisa kerugian yang telah dilakukan, kerugian akan ditanggung oleh pemerintah dan atau pengelola bendungan diperkirakan mencapai Rp. 2.845.409.886.907. Dengan luas banjir total akibat keruntuhan Bendungan Batujai dan Pengga 141,152 Km² atau 14115,2 Ha, maka dapat dikatakan bahwa kerusakan yang dialami oleh daerah terdampak yang tergenang banjir sekitar Rp.201.584.808,36/Ha. Hal tersebut sudah mencakup kerugian ekonomi, materil langsung dan tak langsung, dan kerugian fungsional.

3.5 Desa Evakuasi

Pada Peraturan Kepala BNPB No.7 Tahun 2008 dikatakan tempat evakuasi atau penampungan sementara adalah tempat tinggal sementara selama korban bencana mengungsi, baik berupa tempat penampungan massal maupun keluarga, atau individual [11]. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, terdapat 14 Desa terdekat yang dapat diakases sebagai Desa evakuasi untuk pengungsi yang terlanda banjir.

Gambar 11: Sebaran 14 Desa Evakuasi terdekat

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah pada Bendungan Batujai dan Bendungan Pengga, dapat disimpulkan bahwa kedua keruntuhan bendungan dihasilkan oleh kondisi terekstrim yaitu *overtopping*. Jika kedua peta keruntuhan digabungkan, maka akan menghasilkan 34 Desa yang rawan akan banjir, dengan 29.100 jiwa yang terdampak dan memiliki indeks ancaman dengan klasifikasi tingkat tinggi, dengan kerugian sebesar Rp. 2.845.409.886.907 atau Rp.201.584.808,36/Ha.

Daftar Pustaka

- [1] Putri LA, Juwono PT. 2018. Analisa Keruntuhan Bendungan Ponre Ponre Di Kabupaten Bone Provinsi Sulawesi Selatan Dengan Menggunakan Program Zhong Xing HY21.
- [2] Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia No.27/PRT/M/2015 tentang Bendungan. 2015. Jakarta
- [3] Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I. 2019. *Katalog DAS Dodokan*. Mataram: BWS NT I
- [4] Soewarno. 1995. *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data..* Bandung: Nova
- [5] Soemarto, C.D. *Hidrologi Teknik*. 1987. Surabaya: Usaha Nasional
- [6] SNI 2415. 2016. *Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- [7] Bambang Triatmodjo. 2008. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta
- [8] Limantara, Lily M. 2010. *Hidrologi Praktis*. Bandung: Lubuk Agung
- [9] US Army Corps of Engineers Hydrolic Engineering Center. 2014. *User Guide Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. CA
- [10] Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana No. 02 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana. 2012. Jakarta
- [11] Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana No. 07 Tahun 2008 tentang Pedoman Tata Cara Pemberian Bantuan Pemenuhan Kebutuhan Dasar. 2008. Jakarta