

EVALUASI PERENCANAAN BENDUNG GEMPAL DI DESA WIROLEGI KECAMATAN SUMBERSARI KABUPATEN JEMBER

Ardianto

Dosen pembimbing

Dr. Ir. Noor Salim, M.Eng.¹), Arief Alihudien ST.,MT.²)

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Jalan Karimata No. 49 Telp. (0331) 336728 Jember 68121
ardiansipil96@gmail.com

ABSTRAK

Bendung Gempal terletak di Desa Wirolegi Kecamatan Sumbersari Kabupaten Jember. Bendung ini dibuat dari pasangan batu kali dan hanya terdapat satu pintu pembilas, dan memiliki daerah layanan seluas 770 Ha. Sayangnya kondisi saat ini Bendung Gempal mengalami kerusakan pada endsill bendung sehingga tekanan air menjadi semakin besar dan mengakibatkan tanah dihilir bendung mengalami erosi. Penyebab patahnya endsill karena terjadinya banjir yang melebihi ambang maksimum. Maka yang perlu dilakukan dengan merencanakan ulang Bendung Gempal.

Berdasarkan penelitian lebih lanjut terkait dengan kerusakan endsill bendung dan erosi tanah yang terjadi di Bendung Gempal, maka dilakukan perencanaan ulang Bendung Gempal dengan menggunakan data debit banjir maks 7 tahun terakhir. Desain bendung menggunakan mercu ogee dan menggunakan tipe kolam olakan USBR III. Berdasarkan analisa perhitungan hidrolis bendung didapatkan dimensi sebagai berikut: tinggi bendung = 6,9 m, jarak tinggi mercu - kolam olakan = 5 m, panjang kolam olakan = 6,48 m, panjang total bendung = 18,7 m, tinggi endsill = 1 m dan tinggi air banjir diatas mercu = 2,15 m.

Analisa stabilitas bendung terhadap gaya-gaya yang bekerja pada tubuh bendung dalam kondisi air normal dengan gempa, kondisi air banjir dengan gempa dan dalam kondisi tanpa gempa. Lebih jelasnya sebagai berikut: Analisa kontrol stabilitas dengan gaya gempa dalam kondisi air normal, stabilitas terhadap guling, geser, daya dukung tanah dan terhadap erosi bawah tanah (piping) adalah Aman, tapi kontrol stabilitas eksentrisitas (retak) Tidak Aman. Analisa kontrol stabilitas dengan gaya gempa dalam kondisi air banjir, stabilitas terhadap guling, geser, eksentrisitas (retak), daya dukung tanah dan terhadap erosi bawah tanah (piping) adalah Aman.

Kata kunci : Desain Bendung, Analisa Hidrolis, Analisa Stabilitas

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Bendung Gempal termasuk tipe bendung permanen jenisnya bendung tetap. Bendung Gempal terletak di Desa Wirolegi Kecamatan Sumbersari Kabupaten Jember Provinsi Jawa Timur. Bendung Gempal terletak dikoordinat $08^{\circ}11'39.7"S$ dan $113^{\circ}44'22.3"T$. Bendung ini dibuat dari pasangan batu kali dan hanya terdapat satu pintu pembilas, dan memiliki

daerah layanan seluas 770 Ha. Sayangnya kondisi saat ini bendung gempal mengalami kerusakan pada endsill bendung sehingga tekanan air menjadi semakin besar dan mengakibatkan tanah dihilir bendung mengalami erosi. Penyebab patahnya endsill karena terjadinya banjir yang melebihi ambang maksimum. Maka yang perlu dilakukan dengan merencanakan ulang bendung dengan menggunakan acuan data debit banjir 7 tahun terakhir.

Berdasarkan masalah tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui dengan pasti penyebab kerusakan endsill bendung dan erosi tanah di hilir bendung. Oleh karena itu, penulis memutuskan untuk melakukan penelitian yang berjudul *Evaluasi Perencanaan Bendung Gempal di Desa Wirolegi Kecamatan Sumbersari Kabupaten Jember.*

Identifikasi Masalah

Pada studi penelitian ini ditemukan bahwa Bendung Gempal mengalami kerusakan pada endsill bendung sehingga tekanan air menjadi semakin besar dan mengakibatkan tanah dihilir bendung mengalami erosi. Maka yang harus dilakukan dengan memecah energi air dimuka bendung agar tekanan air dikolam olak semakin kecil atau dengan memperpanjang lantai olakan.

Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dibahas adalah sebagai berikut:

1. Berapa debit banjir puncak yang terjadi di Bendung Gempal?
2. Mengapa terjadi kerusakan Endsill Bendung dan terjadi erosi di hilir Bendung Gempal?
3. Bagaimana solusi untuk mengatasi kerusakan pada Endsill Bendung dan mencegah agar tidak terjadi erosi di hilir Bendung Gempal?

Batasan Masalah

Agar pembahasan ini tidak meluas dan dapat terarah sesuai dengan tujuan penelitian ini, maka permasalahan dibatasi pada :

1. Redesain Bendung Gempal menggunakan acuan gambar sesuai dengan keadaan bendung dilapangan.
2. Menggunakan data dari Dinas PU Bina Marga dan Sumber Daya Air Kabupaten Jember.
3. Tidak membahas Rencana Anggaran Biaya (RAB).
4. Tidak membahas karakteristik aliran.
5. Tidak membahas bangunan pelengkap.

Tujuan Studi

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa debit banjir puncak yang terjadi di Bendung Gempal.
2. Mengevaluasi kembali perencanaan Bendung Gempal, agar mengetahui penyebab kerusakan pada bendung dan erosi pada hilir bendung.
3. Mendesain ulang Bendung Gempal dengan menggunakan data debit banjir 7 tahun terakhir.

Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Bagi Instansi terkait, penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat dan himbauan agar dapat mencegah terjadinya bencana banjir.
2. Bagi akademik, dari hasil penelitian ini dapat dijadikan bahan informasi dan menjadi acuan bagi peneliti lainnya khususnya yang mendalami bidang air, untuk terus mengembangkan ilmunya khususnya tentang Hidrologi.

TINJAUAN PUSTAKA

Analisa Hidrologi

Analisa hidrologi diperlukan untuk menentukan besarnya curah hujan rencana dan debit banjir rencana dalam periode ulang tertentu.

Perencanaan Hidrolis Bendung

1. Kemiringan Dasar Sungai

Merupakan perbandingan antara beda tinggi dengan jarak pengukuran dua titik, rumus perhitungan (*Soenarno, 1972*)

$$i = \frac{\Delta H / L}{n - 1}$$

dimana :

i = kemiringan dasar sungai

ΔH = beda tinggi antara dua titik (m)

L = jarak antara dua titik (m)

N = banyaknya titik yang ditinjau

2. Tinggi Air Banjir di Hilir Bendung

Tinggi air banjir rencana adalah tinggi air banjir sungai sebelum ada bendung.

3. Lebar Efektif Bendung

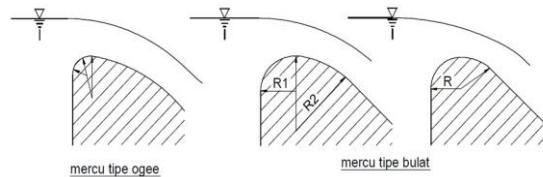
Lebar bendung, yaitu jarak antara pangkal-pangkalnya (abutment), sebaiknya sama dengan lebar rata-rata sungai pada bagian yang stabil.

4. Elevasi Mercu Bendung

Elevasi mercu bendung ditentukan oleh beberapa macam faktor, sebagai pedoman angka-angka dibawah sering digunakan dalam perencanaan bendung.

5. Perencanaan Mercu Bendung

Di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu untuk bendung pelimpah, yaitu tipe Bulat dan tipe Ogee.



Gambar 1. Bentuk-bentuk mercu

6. Tinggi Air Banjir Diatas Mercu

Persamaan antara tinggi energi dan debit untuk bendung mercu Ogee adalah (*Standart Perencanaan irigasi KP – 02, 1986 : 47*) :

$$Q = C_d \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} g \cdot B_e \cdot H_1^{\frac{3}{2}}$$

dimana :

Q = debit rencana (m^3/dt)

C_d = koefisien debit ($C_d = C_0 \times C_1 \times C_2$)

g = gravitasi ($9,80 m/dt^2$)

B_e = lebar efektif bendung (m)

H_1 = tinggi energi diatas mercu (m)

7. Peredam Energi

Aliran di atas bendung di sungai dapat menunjukkan berbagai perilaku disebelah bendung akibat kedalaman air yang ada

8. Ruang Olakan

Secara garis besar kolam olak terdiri dari riga tipe (*Standart Perencanaan irigasi KP – 02, 1986 : 60*) :

- Bendung sungai yang mengangkut bongkah atau batu-batu besar, biasanya cocok dengan kolam olak tipe bak tenggelam/**submerged bucket**.
- Bendung disungai yang mengangkut batu-batu besar, tetapi sungai itu mengandung bahan aluvial, biasanya cocok dengan kolam olak tipe bak tenggelam/**tipe vlughter**.
- Bendung sungai yang hanya mengangkut bahan-bahan sedimen halus dapat direncanakan dengan kolam olak loncat air

yang diperpendek dengan menggunakan blok-blok penghalang yang disebut **tipe USBR**.

Analisa Stabilitas Bendung

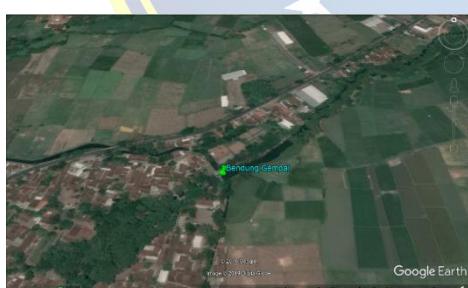
Dalam perencanaan bendung perlu diketahui besarnya gaya-gaya yang berusaha mengangkat dan mendorong tubuh bendung dari kedudukannya. (Soenarno, 1972). Terdapat beberapa gaya yang akan dikaji ulang diantaranya :

- Gaya berat bendung (G)
- Gaya gempa (K)
- Gaya tekanan lumpur (Ps)
- Gaya tekanan air (W)
- Gaya tekanan tanah (P)
- Gaya Uplift Pressure (Px)

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Bendung Gempal yang berada di Desa Wirolegi Kecamatan Sumbersari Kabupaten Jember Provinsi Jawa Timur. Bendung Gempal terletak di koordinat $08^{\circ}11'39.7"S$ dan $113^{\circ}44'22.3"E$.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Kondisi Bendung

Kondisi saat ini bendung gempal mengalami kerusakan pada endsill bendung dan mengalami erosi. Penyebab patahnya endsill karena terjadinya banjir.



Gambar 3. Kondisi Bendung

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam Penelitian ini berupa data primer dan data sekunder yang didapat dari Dinas PU Kabupaten Jember :

1. Data dimensi Bagian-bagian Bendung yang sudah ada dalam bentuk gambar.
2. Peta DAS dan aliran sungai lokasi sampel.
3. Data curah hujan 10 tahun terakhir dari tahun 2009 sampai dengan 2018.
4. Data debit banjir Bendung Gempal 7 tahun terakhir.
5. Data tanah.
6. Peta zona gempa tahun 2017

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan tahapan:

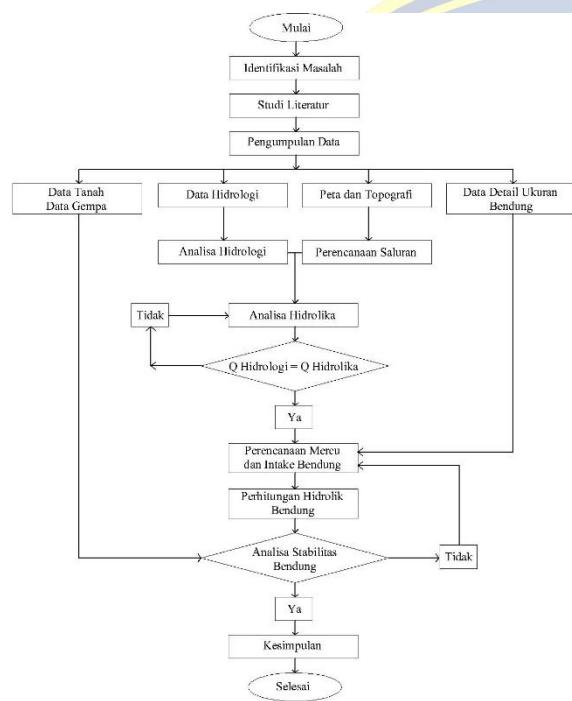
1. Analisa Hidrologi
 - a. Menentukan debit banjir rencana.
2. Analisa Hidrolika
 - a. Mendesain mercu bendung
 - b. Mendesain tubuh bendung
 - c. Menghitung kolam olakan
3. Analisa Stabilitas
 - a. Gaya Akibat Tekanan Lumpur (S)
 - b. Gaya Akibat Hidrostatis (W)
 - c. Gaya Akibat Berat Bendung (G)
 - d. Gaya Akibat Uplift Pressure (U)
 - e. Gaya Akibat Gempa (K)
 - f. Gaya Akibat Tekanan Tanah

- g. Cek stabilitas terhadap Guling, Geser, dan Daya Dukung Tanah

Kesimpulan

Pada tahap kesimpulan bertujuan untuk menetukan desain bendung yang mengacu pada data curah hujan 10 tahun terakhir mulai dari tahun 2009 sampai 2018 dan data debit banjir Bendung Gempal 7 tahun terakhir.

Flowchart Penelitian



Gambar 4. Flowchart Penelitian

HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN

Analisa Hidrologi

Analisa hidrologi menggunakan data debit banjir 7 tahun terakhir.

Tabel 1. Data debit banjir Bendung Gempal

No.	Tahun	Debit Banjir Maksimum (m ³ /det)
1	2012	37,602
2	2013	46,465
3	2014	348,730
4	2015	35,347
5	2016	46,465
6	2017	46,465
7	2018	58,552
Debit Maks		348,730

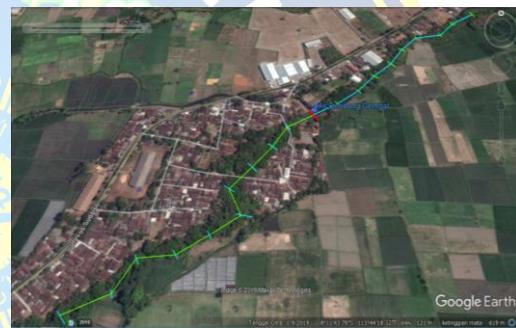
Sumber : Data UPT Pengairan Sumbersari

Penyebab utama terjadinya kerusakan pada endsill bendung dan terjadinya erosi tanah di hilir bendung, karena pada tahun 2014 terjadi banjir dengan debit banjir diambil normal yaitu 348.730 m³/det.

Maka perlu dilakukan redesain dengan mengambil debit banjir maksimum 7 tahun terakhir yaitu 348.730 m³/det. Namun mengingat sangat jarang terjadi banjir yang melampaui batas dalam 7 tahun terakhir dan pertimbangan biaya maka diambil data debit **58,552 m³/det.**

Analisa Hidrologika

1. Perhitungan Kemiringan Dasar Sungai



Gambar 5. Kemiringan Dasar Sungai

Tabel 2. Kemiringan Dasar Sungai

No	No. Patok	L (m)	Elevasi	AH (m)	AH/L
1	L.9	60	120,01	0,080	0,001
2	L.8	50	119,93	0,930	0,019
3	L.7	50	119,00	0,340	0,007
4	L.6	50	118,66	-0,030	-0,001
5	L.5	50	118,69	-0,760	-0,015
6	L.4	50	119,45	0,760	0,015
7	L.3	50	118,69	-0,260	-0,005
8	L.2	50	118,95	0,210	0,004
9	L.1	50	118,74	-0,210	-0,004
10	As Bendung	50	118,95	0,800	0,016
11	P1	50	118,15	-0,850	-0,017
12	P2	50	119,00	-0,830	-0,017
13	P3	50	119,83	0,260	0,005
14	P4	45	119,57	0,220	0,005
15	P5	50	119,35	1,200	0,024
16	P6	50	118,15	0,470	0,009
17	P7	50	117,68	-1,190	-0,024
18	P8	50	118,87	0,160	0,003
19	P9	60	118,71	0,490	0,008
20	P10	60	118,22		
Jumlah		965		0,034	

Sumber : Hasil Perhitungan

2. Perhitungan Tinggi Air Banjir Di Hilir Bendung

Perhitungan tinggi air dihilir bendung dilakukan dengan coba-coba sampai diperoleh debit banjir hitung yang mendekati debit banjir rencana sebesar 58,552 m³/det.

Tabel 3. Perhitungan tinggi air dihilir bendung

No	h (m)	b (m)	m	A (m ²)	P (m)	R (m)	n	i	V (m ³ /det)	Q (m ³ /det)
1	0,2	12,5	0,68	2,527	12,984	0,195	0,025	0,0018	0,572	1,444
2	0,4	12,5	0,68	5,109	13,467	0,379	0,025	0,0018	0,892	4,556
3	0,6	12,5	0,68	7,745	13,951	0,555	0,025	0,0018	1,149	8,902
4	0,8	12,5	0,68	10,435	14,435	0,723	0,025	0,0018	1,371	14,304
5	1	12,5	0,68	13,180	14,919	0,883	0,025	0,0018	1,567	20,651
6	1,2	12,5	0,68	15,979	15,402	1,037	0,025	0,0018	1,744	27,867
7	1,4	12,5	0,68	18,833	15,886	1,185	0,025	0,0018	1,906	35,898
8	1,6	12,5	0,68	21,741	16,370	1,328	0,025	0,0018	2,056	44,702
9	1,89	12,5	0,68	26,054	17,071	1,526	0,025	0,0018	2,256	58,773
10	2	12,5	0,68	27,720	17,337	1,599	0,025	0,0018	2,327	64,500
11	2,2	12,5	0,68	30,791	17,821	1,728	0,025	0,0018	2,450	75,448
12	2,4	12,5	0,68	33,917	18,305	1,853	0,025	0,0018	2,567	87,072
13	2,6	12,5	0,68	37,097	18,788	1,974	0,025	0,0018	2,678	99,356
14	2,8	12,5	0,68	40,331	19,272	2,093	0,025	0,0018	2,784	112,290
15	3	12,5	0,68	43,620	19,756	2,208	0,025	0,0018	2,885	125,865

Sumber : Hasil Perhitungan

3. Perhitungan Lebar Efektif Bendung

Perhitungan lebar efektif bendung disesuaikan dengan data eksisting dan data ukuran detail kondisi lapangan bendung gempal. Data-datanya sebagai berikut:

Lebar Bendung	(B) = 12,5 m
Lebar Pintu Pembilas	(Bp) = 2 m jumlah 1 buah
Tebal Pilar Pintu Pembilas	= 1 m jumlah 1 buah
Kp	= 0,01
Ka	= 0,01
Lebar Mercu	(Bm) = B - (Bp total + Tp Total) = (12,5) - (2 + 1) = 9,5 m
Lebar Efektif Bendung	(Be) = Bm - (2 x (n x Kp + Ka) x H ₁) = 9,5 - (2 x (1) x (0,01 + 0,01)) H ₁ = 9,5 - 0,04 H ₁

4. Perhitungan Elevasi Mercu Bendung

Elevasi sawah tertinggi	= 120 m
Tinggi air di sawah	= 0,1 m
Kehilangan tekanan dari tersier ke sawah	= 0,1 m
Kehilangan tekanan dari sekunder ke tersier	= 0,1 m
Kehilangan tekanan dari primer ke sekunder	= 0,1 m
Kehilangan tekanan dari sungai ke primer	= 0,2 m
Kehilangan tekanan karena kemiringan sungai	= 0,15 m
Kehilangan tekanan pada alat-alat ukur	= 0,4 m
Persediaan tekanan karena eksplorasi	= 0,1 m
Persediaan untuk lain-lain bangunan	= 0,25 m
Elevasi Mercu Bendung	= 121,5 m

5. Perhitungan Tinggi Air diatas Mercu

Perhitungan tinggi air di atas mercu dilakukan dengan cara coba -coba memasukan nilai H₁ dan Cd sampai didapat nilai Cd coba -coba sama dengan Cd hitung serta debit rencana sama dengan debit hitung.

Dicoba :

$$H_1 = 2,15$$

$$Cd = 1,176$$

$$Q = Cd \times 2/3 \times (2/3 \times g)^{1/2} \times Be \times H_1^{3/2}$$

$$58,552 = (1,176 \times 0,66 \times (0,66 \times 9,81^{0,5}) \times 9,4 \times (2,15^{1,5}))$$

$$58,552 = 1,176 \times 0,67 \times 3 \times 9,4 \times 3,15$$

$$58,552 = 59,495 \text{ m3/det}$$

Faktor-faktor lain yang mempengaruhi tinggi air banjir di atas mercu perhitungannya sebagai berikut :

$$\text{Debit Persatuan Lebar (q)} = Q / Be = (58,773 / 9,414)$$

$$= 6,243 \text{ m3/dt'.m}$$

$$\text{Kecepatan air di hulu Bendung (V)} = q / (P + H_1) = (6,243) / (0,888 + 2,15)$$

$$= 2,055 \text{ m/det}$$

$$\text{Tinggi Kecepatan Energi (Ha1)} = V^2 / 2g = (2,055^2) / (2 \times 9,81)$$

$$= 0,215 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi Muka Air di hulu Bendung (Hd)} = H_1 - Ha_1 = (2,15 - 0,215)$$

$$= 1,935 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman Air Kritis (Hc)} = (q / g)^{2/3} = (6,243 / 9,81)^{0,66}$$

$$= 0,740 \text{ m}$$

CEK...!!!

$$H_1 / Hd = 1,111$$

$$P / Hd = 0,459$$

$$P / H_1 = 0,413$$

$$\text{Tinggi Mercu (P)} = 0,888 \text{ m}$$

$$\text{Konstanta (C}_0\text{)} = 1,3$$

$$(\text{Grafik C}_1) = 0,900$$

$$(\text{Grafik C}_2) = 1,005$$

$$\text{Cd (Coba)} = \text{Cd (Hitung)}$$

$$1,176 = C_0 \times C_1 \times C_2$$

$$1,176 = (1,3 \times 0,9 \times 1,005)$$

$$1,176 = 1,176$$

Karena Cd coba-coba sama dengan Cd hitung, maka nilai Cd coba-coba dapat diterima.

6. Perhitungan Jari-jari Mercu

Perencanaan dimensi bendung bagian hulu dengan kemiringan permukaan 1 : 0,33 dan dibagian hilir dengan kemiringan permukaan 3 : 2 dengan nilai K = 1,939 dan n = 1,810.

Perhitungan dimensi mercu mercu bendung dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$R = 0,68 \times H_d$			
= 0,929	m		
Jarak R = 0,139 x Hd			
= 0,222 m			
$X^{1,81} = 1,939 \times H_d^{0,81}$	x	Y	
= 1,939	x	1,707 x Y	
= 3,309	x	Y	
Y = 1	x	$X^{1,81}$	
3,309			
Y = 1,810	x	$X^{1,81}$	
3,309			
Kemiringan di Hilir Bendung direncanakan		1 : 0,7	
Dengan :			
$Y' = \tan \theta$			
$Y' = 1,429$			
1,429 = 1,81	x	$X^{1,81}$	
3,309			
$X^{0,81} = 2,612$			
X = 3,272	m		
Y = 1	x	3,272 1,81	
3,309			
= 2,582	m		

7. Kolam Loncat Air

Elevasi kolam loncat air direncanakan +109 m. Perhitungan kecepatan awal loncatan dihitung dengan data-data sebagai berikut :

$$H_1 = 2,15 \text{ m}$$

$$Z = \text{elv. mercu} - \text{elv. kolam loncat air}$$

$$= 121,5 - 116,5 = 5,0 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \text{ m/dt}$$

Kecepatan awal loncatan (V₁) :

$$V_1 = \sqrt{2g (\frac{1}{2}H_1 + Z)}$$

$$= \sqrt{2 \times 9,81 (1/2 \times 2,15 + 5)} = 5,108 \text{ m/dt}$$

Tinggi air pada titik V1 (Yu) :

$$Q = A \times V_1$$

$$= b \times h \times V_1$$

$$h(Y_u) = Q / (b \times V_1)$$

$$= 58,773 / (12,5 \times 5,108) = 0,92 \text{ m}$$

Kedalaman konjugasi dalam loncat air Y2

$$Y_2/Y_u = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 F_r^2} - 1)$$

$$\text{Dengan } Fr = V_1 / \sqrt{g Y_u}$$

$$= 5,108 / \sqrt{9,81 \times 0,92} = 1,7$$

$$= \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8 F_r^2} - 1) = 1,955$$

$$Y_2 = 1,955 \times 0,92 = 1,8 \text{ m}$$

8. Perhitungan Kolam Olakan

Berdasarkan tipe sedimen yang diangkut yaitu sendimen halus, maka dalam *perencanaan kolam olak dipilih kolam olak tipe USBR I. Perencanaan kolam olak, antara lain ;*

Panjang Lantai	= 3,6 x Y ₂
Olakan (Lj)	= 3,6 x 1,8 = 6,48 m
Blok-blok	
Penghalang (nj)	= Yu x (4 + Fr) / 6
	= 0,92 x (4 + 1,7) / 6
Endsill (n)	= 0,874 → 1 m
	= Yu x (18 + Fr) / 10
	= 0,92 x (18 + 1,7) / 10
	= 1,007 m → 1 m

9. Perhitungan tebal lantai kolam olak

Sesuai dengan standart perencanaan irigasi KP-02, perhitungan tebal lantai olak dihitung dengan persamaan dibawah ini :

$$d_x \geq S \frac{P_x - W_x}{\Sigma}$$

Dengan :

d_x = tebal lantai olak pada titik x,

P_x = gaya angkat pada titik x, (1421 kg/m³)

W_x (Yu) = kedalaman air pada titik x, (1,524 m)

Σ = berat jenis bahan (2200 kg/m³)

S = factor keamanan (1,5)

$$1,2 \geq 1,5 \frac{1421 - 0,92}{2200}$$

1,2 ≥ 0,968 Aman!!!!

Analisa Stabilitas Bendung

1. Gaya Akibat Berat Bendung (G)

Tabel 4. Perhitungan Berat Tiap Bagian

Bagian G	Luas Bagian (m ²)			Berat bagian G = F . γ . P (Ton)		
G1	0,5	x	1,82	x	5,43 = 4,941	10,871
G2	4,43	x	1	=	4,430	9,746
G3	0,5	x	3,77	x	4 = 7,540	16,588
G4	4,38	x	1,43	=	6,263	13,779
G5	3,38	x	1,34	=	4,529	9,964
Jumlah (Σ G)					60,949	

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 5. Hasil Perhitungan Gaya

Bagian G	Berat (ton)	Jarak Titik Berat		Momen (t . m)	
		Z(X)	Z(Y)	M _v = G . X	M _h = G . Y
G1	10,871	5,98	3,17	65,01	34,46
G2	9,746	4,88	4,58	47,56	44,64
G3	16,588	3,12	4,11	51,75	68,18
G4	13,779	2,19	2,06	30,18	28,39
G5	9,964	1,69	0,67	16,84	6,68
Σ	60,949	-	-	211,34	182,34

Sumber : Hasil perhitungan

2. Gaya Akibat Gempa (K)

Tabel 6. Hasil Perhitungan Gaya

Bagian (K)	Berat (ton)	Jarak Titik berat terhadap potongan (m) Z(Y)	Momen (t . Mm)
K1	0,402 x 10,871 = 4,371	3,17	13,857
K2	0,402 x 9,746 = 3,919	4,58	17,948
K3	0,402 x 16,588 = 6,670	4,11	27,414
K4	0,402 x 13,779 = 5,541	2,06	11,414
K5	0,402 x 9,964 = 4,007	0,67	2,684
	$\Sigma K = 24,508$	$\Sigma MK = 73,317$	

Sumber : Hasil perhitungan

3. Gaya Akibat Tekanan Lumpur (Ps)

Tabel 7. Hasil Perhitungan Gaya

Gaya (Ps)	Besar Gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (t.m)
Psh	$\frac{\gamma_s h^2}{2} \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)$ 1,066	5,15	5,489
Psv	$\frac{1}{2} \times \gamma_s \times h \times b$ 1,063	6,01	6,405

Sumber : Hasil perhitungan

4. Gaya Akibat Tekanan Air

Tabel 8. Gaya Akibat Tekanan Air Normal

Gaya (W)	Besar Gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (t.m)
Pwh	$\frac{1}{2} \times \gamma_w \times h^2$ 3,200	5,15	16,482
Pwv	$\frac{1}{2} \times \gamma_w \times h \times b$ 1,063	6,01	6,386

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 8. Gaya Akibat Tekanan Air Banjir Secara Horizontal

Gaya (W)	Besar Gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (t.m)
Wh1	$0,5 \times 1 \times 2,6 \times 2,6 = 3,380$	9,08	30,690
Wh2	$0,5 \times 1 \times 2,6 \times 1,94 = 1,300$	7,21	9,373
Wh3	$0,5 \times 1 \times 0,92 \times 0,92 = 0,423$	-0,31	-0,131
Wd	$0,583 \times 1 \times 0,402 \times 20,612 \times 0,230 = 1,113$	11,59	12,895
$\Sigma Wh = 6,216$			$MWh = 52,827$

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 9. Gaya Akibat Tekanan Air Banjir Secara Vertikal

Gaya (Wv)	Besar Gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (t.m)
Wv1	$1,00 \times 0,5 \times 0,84 \times 2,6 = 1,092$	5,82	6,355
Wv2	$1,00 \times 0,84 \times 1,94 = 1,630$	7,67	12,499
Wv3	$1,00 \times 0,50 \times 0,75 \times 2,06 = 0,773$	8,18	6,319
Wv4	$1,00 \times 2,1 \times 1,2 = 2,472$	7,28	17,996
Wv5	$1,00 \times 0,50 \times 0,74 \times 1,5 = 0,555$	6,46	3,585
Wv6	$1,00 \times 0,50 \times 1,68 \times 1,94 = 1,630$	6,58	10,723
Wv7	$1,00 \times 0,50 \times 1,68 \times 1,92 = 1,613$	5,29	8,532
Wv8	$1,00 \times 0,50 \times 0,99 \times 1,92 = 0,950$	4,67	4,438
Wv9	$1,00 \times 0,50 \times 0,99 \times 1,41 = 0,698$	3,56	2,485
Wv10	$1,00 \times 0,50 \times 0,64 \times 1,41 = 0,451$	3,1	1,399
Wv11	$1,00 \times 0,50 \times 0,64 \times 0,92 = 0,294$	2,31	0,680
$\Sigma Wv = 12,157$			$Wv = 75,011$

Sumber : Hasil perhitungan

Kedaan Air Dinamis

Perhitungan air dinamis menggunakan di bawah ini dan hasilnya sebagai berikut :

Pd = gaya tekanan air dinamis (ton)

γ_w = berat jenis air (1,00 ton/m³)

H = tinggi air di atas crest (4,54 m)

K_H = Koef gempa (0,401)

Z = Hd / H = 4,54 / 4,75 = 0,96

Jarak pusat tekanan terhadap titik Z = 7,73 m

$$Pd = 7/12 \times \gamma_w \times K_H \times H^2 \times (1 - Z^{1.5}) \times 7,73$$

$$= 7/12 \times 1,00 \times 0,402 \times 4,54^2 \times (1 - 0,96^{1.5}) \times 7,73$$

$$= 2,451 \text{ t.m}$$

5. Gaya Akibat Tekanan Tanah

Kadar air (w)	=	46,948%
Berat jenis tanah	=	1,844 Kg/cm ³
Spesific gravity	=	2,611
Angka pori (e)	=	1,465
Porositas tanah efektif (n)	=	0,594
Berat jenis tanah kering (γd)	=	1.059
Berat jenis tanah jenuh (γ _{sat})	=	1,928
Sudut geser dalam	=	36,557 °

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{sub}} &= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \\ &= 1,557 - 1 \\ &= 0,928\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_a &= \tan^2 (45 - \phi/2) \\ &= \tan^2 (45 - 36,557/2) \\ &= 0,253\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_p &= \tan^2 (45 + \phi/2) \\ &= \tan^2 (45 + 36,557/2) \\ &= 3,946\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_a &= \frac{1}{2} \times K_a \times \gamma_{\text{sub}} \times h_1^2 \\ &= 1,878\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_p &= -\frac{1}{2} \times K_p \times \gamma_{\text{sub}} \times h_2^2 \\ &= -0,897\end{aligned}$$

6. Gaya Uplift Pressure

Tabel 10. Perhitungan besar tekanan pada tiap titik kondisi air normal

Titik	Tinggi Titik (Hx)	Panjang Bidang Kontak (Lx)	Uplift Pressure (Px)
A	2,90	0,00	2,900
B	5,56	2,80	4,397
C	5,56	4,62	3,641
D	6,90	5,96	4,425
E	6,90	11,34	2,191
F	6,20	12,04	1,200

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 11. Hasil perhitungan gaya uplift pressure pada kondisi normal

Gaya	Besar Gaya Px = F . Gw (ton)	Jarak (X) (m)	Moment (t.m)
Pv1	-1/2 x (4,397 - 3,641) x 1,82 x 1 = -0,688	6,59	-4,533
Pv2	-3,641 x 1,82 x 1 = 6,627	6,28	41,620
Pv3	-1/2 x (4,425 - 2,191) x 5,38 x 1 = -6,010	3,58	-21,516
Pv4	-2,191 x 5,38 x 1 = -11,786	2,69	-31,704
	$\sum P_v = -11,856$		$\sum M_v = -16,133$

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 12. Perhitungan besar tekanan pada tiap titik kondisi air banjir

Titik	Tinggi Titik (Hx)	Panjang Bidang Kontak (Lx)	Uplift Pressure (Px)
A	5,05	0,00	5,050
B	7,71	2,80	6,717
C	7,71	4,62	6,072
D	9,05	5,96	6,936
E	9,05	11,34	5,028
F	8,35	12,04	4,080

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 13. Hasil perhitungan gaya uplift pressure pada kondisi banjir

Gaya	Besar Gaya Px = F . Gw (ton)	Jarak (Y) (m)	Moment (t.m)
Pv1	-1/2 x (6,717 - 6,072) x 1,82 x 1 = -0,587	6,59	-3,871
Pv2	-6,072 x 1,82 x 1 = 11,050	6,28	69,395
Pv3	-1/2 x (6,936 - 5,028) x 5,38 x 1 = -5,133	3,58	-18,375
Pv4	-5,028 x 5,31 x 1 = -27,052	2,69	-72,770
	$\sum P_v = -21,722$		$\sum M_v = -25,620$

Sumber : Hasil perhitungan

7. Rekapitulasi Gaya-gaya yang bekerja

Tabel 14. Rekapitulasi Gaya horizontal yang bekerja pada kondisi air normal

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Moment (ton.m)
Gempa (K)	24,508	2,992	73,317
Lumpur (Ps)	1,066	5,150	5,489
Air (Wh)	3,200	5,150	52,827
Tanah (Pa)	1,878	1,330	2,498
Tanah (Pp)	-0,897	0,220	-0,197
Jumlah	29,755	-	133,934

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 15. Rekapitulasi Gaya vertikal yang bekerja pada kondisi air normal

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Moment (ton.m)
Berat bendung (G)	60,949	2,992	211,339
Lumpur (Ps)	1,063	6,010	6,405
Air (Wv)	1,063	6,010	6,386
Uplift (Px)	-11,856	1,361	-16,133
Jumlah	51,217	-	207,998

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 16. Rekapitulasi Gaya horizontal yang bekerja pada kondisi air banjir

Gaya yang bekerja	Besarnya gaya (ton)	Jarak (m)	Moment (ton.m)
Gempa (K)	24,508	2,992	73,317
Lumpur (Ps)	1,066	5,150	5,489
Air (Wh)	6,216	8,499	52,827
Air Dinamis (Pd)	0,317	7,730	2,451
Tanah (Pa)	1,878	1,330	2,498
Tanah (Pp)	-0,897	0,220	-0,197
Jumlah	33,087	-	136,385

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 15. Rekapitulasi Gaya vertikal yang bekerja pada kondisi air banjir

Gaya yang bekerja	Besarnya gaya (ton)	Jarak (m)	Moment (ton.m)
Berat bendung (G)	60,949	2,992	211,339
Lumpur (Ps)	1,063	6,010	6,405
Air (Wv)	12,157	6,170	75,011
Uplift (Uv)	-21,722	1,179	-25,620
Jumlah	74,169	-	292,756
Σ dengan Uh	52,447	-	267,135

Sumber : Hasil perhitungan

8. Daya Dukung Tanah

Besarnya daya dukung tanah yang diijinkan dihitung dengan rumus Terzaghi, hasilnya sebagai berikut :

$$qu = \alpha C N_c + \gamma_t D N_q + \gamma_t \beta B N_\gamma$$

Dengan :

qu = daya dukung tanah keseimbangan, (ton/m^2)

C = kohesi tanah, ($0,02 \text{ ton}/\text{m}^2$)

D = dalamnya pondasi, (2,9 m)

B = lebar dasar pondasi, (5,38 m)

L = lebar sungai, (18 m)

$N_c = 28,51$

$N_q = 15,32$

$N_\gamma = 10,9$

$\gamma_t = 1,8 \text{ t}/\text{m}^3$

$\alpha = 1 + (0,3 \times B / L)$

$$= 1 + (0,3 \times 5,38 / 18) = 1,09$$

$\beta = 0,5 - 0,1 \times B / L$

$$= 0,5 - 0,1 \times 5,38 / 18 = 0,47$$

$F_s = \text{faktor keamanan, } 2$

$$\begin{aligned} qu &= (1,09 \times 0,02 \times 36,9) + (1,8 \times 2,9 \times 25,5) + \\ &\quad (1,8 \times 0,47 \times 5,38 \times 27,2) \\ &= \mathbf{130,215 \text{ t}/\text{m}^2} \end{aligned}$$

Jadi tegangan tanah yang diijinkan ($\bar{\sigma}_t$) adalah:

$$\bar{\sigma}_t = \frac{qu}{\text{faktor keamanan}}$$

$$\bar{\sigma}_t = \frac{130,215}{2} = \mathbf{65,107 \text{ t}/\text{m}^3}$$

9. Kontrol Stabilitas Kondisi Air Normal Dengan Gempa

a. Stabilitas terhadap guling

$$F_g = \frac{\sum M_t}{\sum M_g} \geq 1,5$$

$$F_g = \frac{207,998}{133,934} \geq 1,5$$

$$F_g = 1,553 \geq 1,5 \quad \dots\text{Aman !!!}$$

b. Stabilitas terhadap geser

$$F_s = \frac{\sum V \times f}{\sum H} \geq 1,5$$

$$F_s = \frac{51,217 \times 0,75}{23,216} \geq 1,5$$

$$F_s = 1,635 \geq 1,5 \quad \dots\text{Aman !!!}$$

c. Stabilitas terhadap eksentrisitas (retak) dengan gempa

$$e = \left(\frac{B}{2} - \frac{\sum M_t - \sum M_g}{\sum V} \right) < \frac{1}{6} B$$

$$e = \left(\frac{5,38}{2} - \frac{207,998 - 133,934}{51,217} \right) < \frac{1}{6} \times 5,38$$

$$e = 1 > 1 \quad \text{Aman !!!}$$

d. Stabilitas terhadap daya dukung tanah

$$\sigma = \frac{\sum V}{B} \times \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) < \sigma_{ijin}$$

$$\sigma = \frac{51,217}{5,38} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 1}{5,38} \right) < 65,107 \text{ t}/\text{m}^2$$

$$\sigma = 22,727 < 65,107 \text{ t}/\text{m}^2 \quad \dots\text{Aman !!!}$$

e. Stabilitas terhadap erosi bawah tanah (piping)

$$C_L = \frac{\sum L_V + \frac{1}{3} \sum L_H}{\Delta H}$$

Dimana :

$$LV = 11,04 \text{ m}$$

$$LH = 19,58 \text{ m}$$

$$\Delta H = 5 \text{ m}$$

$$CL_{\min} = 1,5$$

$$1,5 \leq \frac{11,04 + \frac{1}{3} \times 19,58}{5}$$

$$1,5 \leq 3,512 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

10. Kontrol Stabilitas Kondisi Air Banjir

Dengan Gempa

a. Stabilitas terhadap guling

$$F_g = \frac{\sum M_t}{\sum M_g} \geq 1,5$$

$$F_g = \frac{267,135}{136,385} \geq 1,5$$

$$F_g = 1959 \geq 1,5 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

b. Stabilitas terhadap geser

$$F_s = \frac{\sum V \times f}{\sum H} \geq 1,5$$

$$F_s = \frac{52,447 \times 0,75}{33,087} \geq 1,5$$

$$F_s = 1,506 \geq 1,5 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

c. Stabilitas terhadap eksentrisitas (retak)

$$e = \left(\frac{5,38}{2} - \frac{\sum M_t - \sum M_g}{\sum V} \right) < \frac{1}{6} B$$

$$e = \left(\frac{5,38}{2} - \frac{267,135 - 136,385}{52,447} \right) < \frac{1}{6} \times 5,38$$

$$e = 0,197 < 0,897 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

d. Stabilitas terhadap daya dukung tanah

$$\sigma = \frac{\sum V}{B} \times \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) < \sigma_{ijin}$$

$$\sigma = \frac{52,447}{5,38} \times \left(1 \pm \frac{6 \times 0,197}{5,38} \right)$$

$$< 65,107 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma = 11,89 < 65,107 \text{ t/m}^2 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

e. Stabilitas terhadap erosi bawah tanah (piping)

$$C_L = \frac{\sum L_V + \frac{1}{3} \sum L_H}{\Delta H}$$

$$LV = 11,04 \text{ m}$$

$$LH = 19,58 \text{ m}$$

$$\Delta H = 4,26 \text{ m}$$

$$CL_{\min} = 1,5$$

$$1,5 \leq \frac{11,04 + \frac{1}{3} \times 19,58}{4,26}$$

$$1,5 \leq 4,112 \quad \dots \text{Aman !!!}$$

Penutup

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian lebih lanjut terkait dengan kerusakan endsill bendung dan erosi tanah yang terjadi di Bendung Gempal, ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Penyebab utama terjadinya kerusakan pada endsill bendung dan terjadinya erosi tanah di hilir bendung, karena pada tahun 2014 terjadi banjir dengan debit banjir diambil normal yaitu 348.730 m³/det, hal tersebut mengakibatkan tekanan air menjadi semakin besar dan tanah dihilir bendung mengalami erosi.

2. Menggunakan desain bendung dengan mercu ogee dan menggunakan tipe kolam olakan USBR III. Berdasarkan analisa perhitungan hidrologis bendung didapatkan dimensi sebagai berikut :

Tinggi bendung = 6,9 m

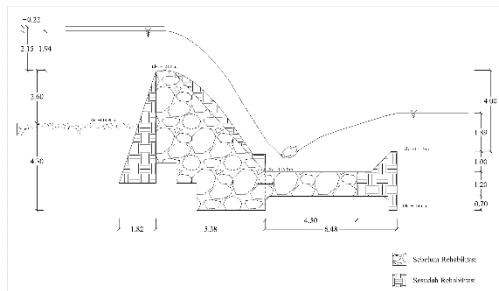
Jarak mercu - kolam olakan = 5 m

Panjang kolam olakan = 6,48 m

Panjang total bendung = 18,7 m

Tinggi endsill = 1 m

Tinggi air banjir diatas mercu = 2,15 m



3. Analisa stabilitas bendung terhadap gaya-gaya yang bekerja pada tubuh bendung dalam kondisi air normal dengan gempa dan kondisi air banjir dengan gempa. Lebih jelasnya sebagai berikut : Analisa kontrol stabilitas dengan gaya gempa dalam kondisi air normal dan air banjir, stabilitas terhadap guling, geser, eksentrisitas (retak), daya dukung tanah dan terhadap erosi bawah tanah (piping) adalah **Aman**.

Saran

1. Untuk mengatasi erosi tanah yang terjadi di hilir bendung maka diperlukan perkuatan lereng sungai/Revertments menggunakan Bronjong/Gabion untuk melindungi lereng tebing sungai dari terjadinya erosi atau penggerusan tanah.
2. Diperlukan penanganan masalah sampah yang menumpuk di bagian mercu, pintu pembilas dan pintu irigasi agar tidak mengganggu operasional bendung.
3. Perlu adanya pengontrolan dan pengawasan tiap tahunnya secara terprogram terhadap Bendung Gempal untuk mengetahui kondisi disetiap tahunnya.

Anonim. 2010. *Standart Perencanaan Irigasi KP-02*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.

Anonim. 2010. *Standart Perencanaan Irigasi KP-04*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.

Anonim. 2010. *Standart Perencanaan Irigasi KP-06*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.

Anonim. 2010. *Standart Perencanaan Irigasi KP-07*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.

Rizal, Nanang Saiful. 2014. *Aplikasi Perencanaan Irigasi dan Bangunan Air*. LPPM.Universitas Muhammadiyah Jember, Jember.

Indarto. 2010. *Hidrologi Dasar Teori Dan Contoh Aplikasi Moel Hidrologi*. Bumi Aksara, Jakarta.

Mawardi, Erman dan Memed, Moch. 2006. *Desain Hidraulik Bendung Tetap Untuk Irigasi Teknis*. Alfabeta, Bandung.

Streeter, Victor L., Wylie, E. Benjamin dan Prijono, Arko. 1985. *Mekanika Fluida*. Erlangga, Jakarta.

Daftar Pustaka

- Departemen Pekerjaan Umum. 2012. *Buku Informasi Statistik Pekerjaan Umum*.