

Penilaian Risiko (*Risk Assesstment*) Kavitasi pada Pelimpah Ogee dan Pelimpah Bulat menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Syaeful Annas¹, Dantje Kardana Natakusumah², Annisa Rizki³, Nanda Putri Djambek⁴

Institut Teknologi Bandung, Indonesia

syaefulannaspjt2@gmail.com¹

Abstrak

Kata Kunci:

Pelimpah Ogee,
Pelimpah Bulat,
Risiko Kavitasi,
Penanganan Risiko.

Kavitasi merupakan peristiwa pengikisan permukaan benda dalam hal ini permukaan struktur pelimpah yang terjadi karena perubahan kecepatan mendadak pada saat fluida melewati suatu geometri tertentu. Pelimpah Ogee dan Pelimpah Bulat memiliki bentuk geometri yang berbeda sehingga risiko kavitasi yang terjadi juga pasti berbeda. Data geometri pelimpah yang diambil dalam penelitian ini sebanyak 2 (dua) buah model untuk masing-masing Pelimpah Ogee dan Pelimpah Bulat yaitu rasio $P/Hd=3$ (tinggi muka air desain 3 m dengan tinggi pelimpah 6 m) hulu vertikal dan hulu miring 1:3. Analisis tekanan dan kecepatan aliran dilakukan dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memodelkan perilaku aliran pada suatu geometri struktur dengan metode numerik dalam penelitian ini menggunakan software flow 3D. Penilaian risiko kavitasi dengan menghitung Indeks Kavitasi yang terjadi dengan parameter tekanan dan kecepatan aliran yang terjadi pada geometri pelimpah. Hasil analisis risiko kavitasi menunjukkan pada bagian mercu, pelimpah ogee memiliki risiko lebih rendah dibandingkan dengan pelimpah bulat, sedangkan pada bagian downstream, pelimpah ogee dan pelimpah mempunyai potensi kavitasi yang sama. Secara keseluruhan berdasarkan indeks kavitasi, pada pelimpah $P/Hd=3$ pelimpah ogee dan pelimpah bulat dengan rasio $P/Hd=3$ memiliki tingkat risiko yang rendah (aman terhadap kavitasi) sehingga tidak memerlukan penanganan lebih lanjut.

Abstract

Key Word:

Ogee spillway,
Circular spillway,
Cavitation risk,
Risk Mitigation

Cavitation is an erosion phenomenon on a surface, in this case, the surface of a spillway structure, due to sudden velocity change when fluid flows through a specific geometry. Ogee spillways and circular spillways have different geometric shape, which consequently result in different cavitation risk. In this study, two geometric models were used for each type of spillway; an ogee spillway and circular spillway with a crest height to design head ratio (P/Hd)=3 (design head=3 m and spillway height=6 m), featuring both a vertical upstream face and inclined upstream face 1:3. Flow pressure and velocity analysis were conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) to model the flow behavior within a spillway structure numerically. The study employed Flow 3D software to assess cavitation risk by calculating the Cavitation Index, which is determined based on pressure and velocity parameters within the spillway geometry. The Cavitation risk analysis result indicate that, at the crest section, the ogee spillway exhibits a lower cavitation risk than circular spillway. However, in the downstream section, the ogee spillway have the same cavitation potential. Overall, based on the Cavitation Index, both the ogee spillway and the circular spillway $P/Hd=3$ have a low-risk level (safe from cavitation), thus requiring no further mitigation measures.

Copyright © 2025 Syaeful Annas, Dantje Kardana Natakusumah, Annisa Rizki, Nanda Putri Djambek

This work is licensed under an **Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)**

PENDAHULUAN

Kavitasi adalah suatu kejadian yang timbul dalam aliran dengan kecepatan besar, sehingga tekanan air menjadi lebih kecil daripada tekanan uap air yang dapat menimbulkan erosi pada konstruksi (Patty dalam Refika dkk, 2023). Kavitasi jika dibiarkan secara terus menerus akan mengikis lapisan permukaan struktur dalam hal ini bangunan pelimpah kemudian terjadi rembesan dan berakhir kegagalan struktur pelimpah sehingga sangat penting mengidentifikasi lebih awal terkait tingkat risiko kavitasi yang mungkin terjadi. Indeks kavitasi merupakan ukuran parameter yang menunjukkan tingkat risiko kerusakan kavitasi yang mungkin terjadi pada permukaan struktur.

Pelimpah merupakan bangunan air yang berfungsi melimpaskan air yang berlebih pada waduk, sehingga tidak terjadi overtopping atau pelimpasan air melewati puncak bendungan, terutama bendungan urugan tanah (BPSDM PUPR, 2017). Bentuk geometri pelimpah sangat mempengaruhi kapasitas pelimpah dalam melimpaskan kelebihan air pada bendungan. Pelimpah ogee dan pelimpah bulat merupakan 2 (dua) tipe geometri pelimpah yang paling umum digunakan di Indonesia. Selain kapasitas pelimpah, bentuk tipe

pelimpah juga mempengaruhi tingkat risiko kavitasi, sehingga diperlukan identifikasi dan penilaian tingkat risiko pada saat perencanaan pelimpah baik tipe ogee maupun tipe bulat untuk menghindari kerusakan struktur pelimpah akibat kavitasi.

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu program untuk mensimulasikan aliran fluida baik cairan maupun gas beserta perilakunya pada berbagai permukaan struktur bangunan dengan menggunakan metode numerik dan algoritma. CFD pada penelitian ini digunakan untuk menganalisis tekanan dan kecepatan aliran pada lapisan permukaan pelimpah yang diperlukan dalam perhitungan indeks kavitasi. Dalam analisis perilaku aliran CFD lebih efisien dari segi waktu dan biaya dibandingkan uji model fisik di laboratorium namun memiliki keakuratan yang baik. Tujuan penelitian ini adalah untuk penilaian risiko kavitasi dan rekomendasi penanganan kavitasi pada pelimpah ogee dan pelimpah bulat di tahap awal perencanaan dengan metode CFD sehingga lebih efisien dari segi waktu dan biaya.

METODE

Model pelimpah yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe pelimpah ogee dan tipe pelimpah bulat dengan tinggi pelimpah (P)=6 m, tinggi muka air desain (Hd)=2 m atau P/Hd=3 variasi muka hulu vertikal dan hulu miring 1:3.

Perhitungan Indeks Kavitasi

Indeks kavitasi dihitung dengan persamaan (Falvey, 1990) sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho \frac{V_o^2}{2}} \quad (1)$$

$$P_o = P_a + P_g \quad (2)$$

$$P_g = \rho gh \quad (3)$$

Dimana:

σ = indeks kavitasi; g = percepatan gravitasi (9.81 m/s²);
 P_o = *ambient pressure* (kPa); h = tinggi tekanan (m);
 P_a = tekanan atmosfer (101,0kPa); P_v = tekanan uap (kPa);
 P_g = tekanan setempat (kPa); V_o = kecepatan aliran (m/dt).

Nilai massa jenis air dan tekanan uap yang terpengaruh oleh suhu yang diperlukan pada waktu analisis perhitungan kavitasi dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai Massa Jenis dan Tekanan Uap Air pada Temperatur tertentu

Temperatur	Massa Jenis	Tekanan Uap Air	Kekentalan Kinematis
(t)	(ρ)	(P_v)	(μ)
°C	kg/m ³	kPa	m ² /dt x10 ⁶
0	999,868	0,61	1,787
5	999,992	0,87	1,519
10	999,726	1,23	1,307
15	999,125	1,70	1,140
20	998,228	2,33	1,004
25	997,069	3,16	0,893
30	995,671	4,23	0,801
35	994,055	5,62	0,724
40	992,238	7,52	0,658
45	990,233	9,58	0,602
50	998,052	12,30	0,553
60	983,200	19,90	0,475
70	977,770	31,10	0,413
80	971,800	47,30	0,365
90	965,310	70,10	0,326
100	958,360	101,30	0,294

(Sumber: Falvey, 1990)

Tabel 2. Tingkat Risiko Kavitasi berdasarkan Nilai Indeks Kavitasi

Tingkat	Indeks Kavitasi	Kecepatan Aliran	Risiko Kerusakan
1	$\sigma > 1$	$V \leq 1$	Tidak terjadi kerusakan kavitasi
2	$0,45 < \sigma \leq 1$	$5 < V \leq 16$	Kemungkinan terjadi kerusakan kavitasi
3	$0,25 < \sigma \leq 0,45$	$16 < V \leq 25$	Terjadi kerusakan kavitasi
4	$0,17 < \sigma \leq 0,25$	$25 < V \leq 40$	Kerusakan serius
5	$\sigma \leq 0,17$	$V \geq 40$	Kerusakan besar

(Sumber: Kermani dalam Refika dkk., 2023)

Tabel 2 di atas menunjukka pengelompokkan tingkat risiko kavitasi berdasarkan indeks kavitasi.

Tabel 3.Rekomendasi Penanganan dampak Kavitasi berdasarkan Indeks Kavitasi

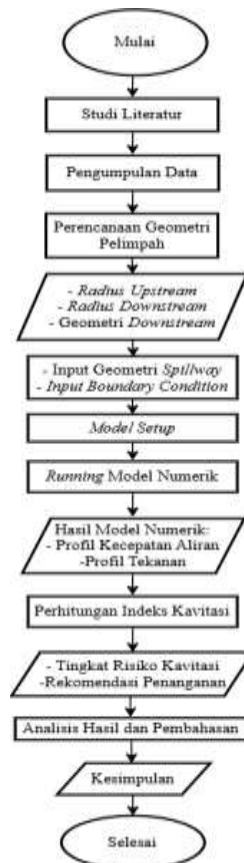
Indeks Kavitasi	Solusi
$\sigma > 1,8$	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
$0,25 < \sigma \leq 1,8$	Memerlukan perlindungan pada permukaan aliran dengan mengurangi kekasaran permukaan
$0,17 < \sigma \leq 0,25$	Modifikasi desain profil aliran (mengurangi kelengkungan atau menambah kemiringan hilir pelimpah) atau pemakaian perangkat aerator
$0,12 < \sigma \leq 0,17$	Perlindungan permukaan aliran dengan penambahan perangkat aerasi ke dalam desain
$\sigma \leq 0,17$	Perlindungan permukaan aliran dari kavitasi tidak dapat dilakukan sehingga perlu pemilihan desain baru

(Sumber: Falvey dalam Kells dan Smith, 1991)

Tabel 3 menunjukkan rekomendasi penanganan untuk dampak kavitasi berdasarkan nilai indeks kavitasi.

Diagram Alir

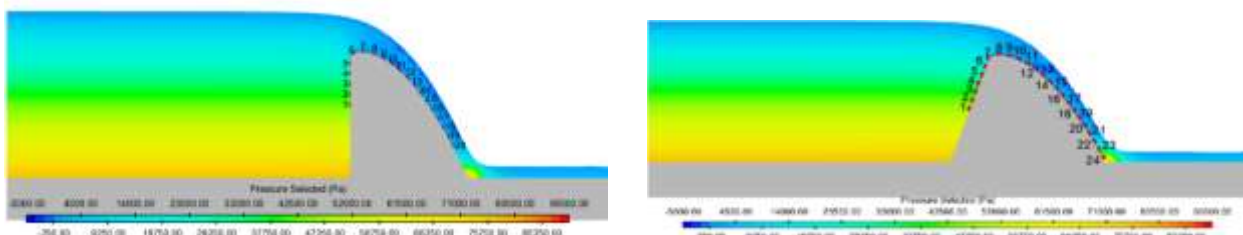
Berikut diagram alir tahapan penelitian yang dilakukan dalam analisis penilaian risiko kavitasi pada pelimpah ogee dan pelimpah bulat:



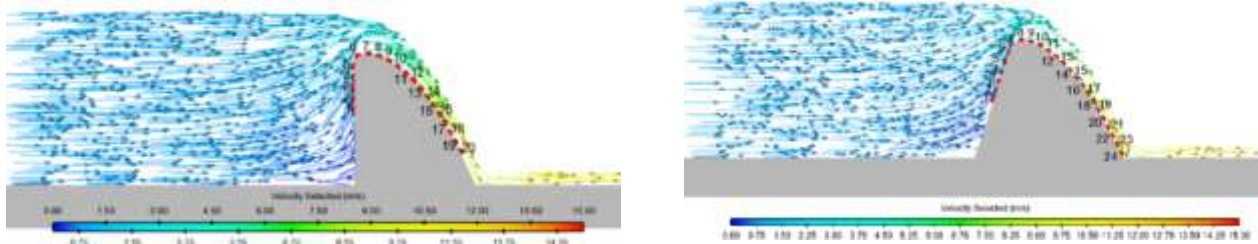
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Ogee



Gambar 2. Profil Tekanan Aliran Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu vertikal (kiri) dan Hulu 1:3 (Kanan)



Gambar 3. Profil Kecepatan Aliran Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu vertikal (kiri) dan Hulu 1:3 (Kanan)

Tabel 4. Nilai Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu Vertikal

No. Titik	x	y	z	Pg (Pa)	Pg (kPa)	Po=101,0+Pg (kPa)	Vo (m/dt)	$\rho Vo^2/2 \cdot 10^{-3}$ (kPa)
1	16.99	0.5	5.50	43,831.91	43.83	144.83	0.74	0.27
2	16.99	0.5	6.00	38,764.95	38.76	139.76	0.94	0.44
3	16.99	0.5	6.50	33,570.94	33.57	134.57	1.22	0.74
4	16.99	0.5	7.00	28,047.29	28.05	129.05	1.68	1.41
5	16.99	0.5	7.50	21,024.14	21.02	122.02	2.79	3.88
6	17.169	0.5	7.93	1,940.43	1.94	102.94	5.30	14.02
7	17.666	0.5	8.01	822.60	0.82	101.82	4.64	10.75
8	18.157	0.5	7.91	340.61	0.34	101.34	4.42	9.74
9	18.618	0.5	7.70	-340.40	-0.34	100.66	4.38	9.58
10	19.045	0.5	7.43	-303.42	-0.30	100.70	6.46	20.81
11	19.44	0.5	7.12	21.87	0.02	101.02	6.93	23.97
12	19.807	0.5	6.80	198.59	0.20	101.20	6.66	22.13
13	20.149	0.5	6.42	272.14	0.27	101.27	7.86	30.83
14	20.463	0.5	6.02	-1,991.16	-1.99	99.01	6.49	21.00
15	20.738	0.5	5.66	-680.12	-0.68	100.32	7.61	28.93
16	21.027	0.5	5.25	334.26	0.33	101.33	9.26	42.84
17	21.298	0.5	4.84	782.87	0.78	101.78	7.13	25.39
18	21.555	0.5	4.41	199.01	0.20	101.20	7.38	27.16
19	21.81	0.5	3.98	-3,409.93	-3.41	97.59	9.75	47.44
20	22.06	0.5	3.54	4,095.62	4.10	105.10	9.39	44.04

Tabel 5. Nilai Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu 1:3

No. Titik	x	y	z	Pg (Pa)	Pg (kPa)	Po=101,0+Pg (kPa)	Vo (m/dt)	$\rho Vo^2/2 \cdot 10^{-3}$ (kPa)
1	16.03	0.5	5.00	48,674.77	48.67	149.67	0.60	0.18
2	16.19	0.5	5.47	43,896.75	43.90	144.90	0.92	0.42
3	16.35	0.5	5.95	39,070.85	39.07	140.07	1.04	0.54
4	16.51	0.5	6.42	33,688.28	33.69	134.69	1.03	0.53
5	16.66	0.5	6.90	28,921.28	28.92	129.92	1.67	1.40
6	16.82	0.5	7.37	22,692.10	22.69	123.69	1.76	1.55
7	16.98	0.5	7.84	10,293.09	10.29	111.29	5.20	13.47
8	17.45	0.5	8.01	603.64	0.60	101.60	4.45	9.87
9	17.95	0.5	7.94	-117.30	-0.12	100.88	5.17	13.36
10	18.41	0.5	7.76	-865.71	-0.87	100.13	4.95	12.21
11	18.84	0.5	7.49	-975.90	-0.98	100.02	4.56	10.37
12	19.23	0.5	7.19	221.61	0.22	101.22	4.64	10.77
13	19.60	0.5	6.85	440.85	0.44	101.44	5.67	16.07
14	19.94	0.5	6.48	-36.90	-0.04	100.96	5.24	13.72
15	20.27	0.5	6.10	1,126.92	1.13	102.13	6.60	21.77
16	20.57	0.5	5.71	-541.76	-0.54	100.46	6.49	21.00
17	20.86	0.5	5.30	937.77	0.94	101.94	7.10	25.17
18	21.14	0.5	4.89	1,168.00	1.17	102.17	8.79	38.57
19	21.40	0.5	4.46	889.94	0.89	101.89	7.60	28.82
20	21.65	0.5	4.03	366.54	0.37	101.37	8.38	35.06
21	21.89	0.5	3.59	3,882.20	3.88	104.88	8.42	35.41
22	22.13	0.5	3.15	4,810.09	4.81	105.81	9.21	42.37
23	22.36	0.5	2.70	26,964.98	26.96	127.96	6.65	22.06
24	22.59	0.5	2.26	56,570.05	56.57	157.57	3.81	7.26

Dari tabel 4 dan tabel 5 menunjukkan bahwa pelimpah ogee P/Hd=3 dengan *downstream* melengkung memiliki distribusi tekanan yang merata dari mercu hingga *downstream* dimana tekanan negatif

pada mercu relatif terkendali dengan nilai yang kecil sedangkan tekanan positif pada *downstream* relatif kecil. Kecepatan aliran meningkat secara bertahap dari bagian mercu sampai akhir *downstream*.

Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Ogee

Tabel 6. Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu Vertikal

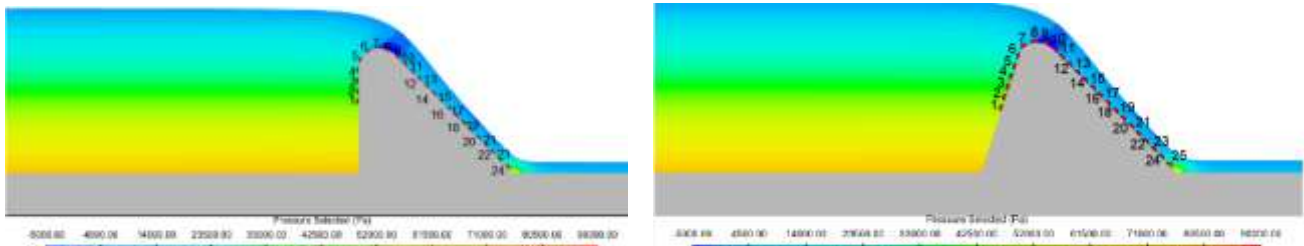
No. Titik	Indeks Kavitas $Po-Pv/(pVo^2/2)$	Tingkat Risiko Kavitas	Rekomendasi Penanganan
1	524.90	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
2	312.87	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
3	178.28	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
4	90.04	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
5	30.83	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
6	7.18	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
7	9.25	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
8	10.17	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
9	10.27	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
10	4.73	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
11	4.12	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
12	4.47	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
13	3.21	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
14	4.60	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
15	3.39	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
16	2.31	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
17	3.92	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
18	3.64	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
19	2.01	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
20	2.33	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)

Tabel 7. Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Ogee P/Hd=3 Hulu 1:3

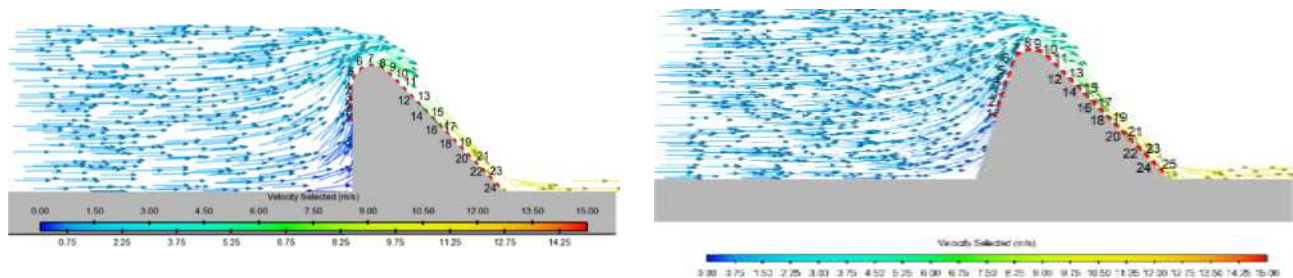
No. Titik	Indeks Kavitas $Po-Pv/(pVo^2/2)$	Tingkat Risiko Kavitas	Rekomendasi Penanganan
1	812.32	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
2	335.80	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
3	253.72	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
4	250.20	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
5	91.25	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
6	78.21	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
7	8.09	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
8	10.06	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
9	7.37	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
10	8.01	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
11	9.42	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
12	9.18	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
13	6.17	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
14	7.19	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
15	4.58	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
16	4.67	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
17	3.96	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
18	2.59	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
19	3.45	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
20	2.82	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
21	2.90	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
22	2.44	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
23	5.70	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
24	21.38	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)

Dari tabel 6 dan tabel 7 di atas, pelimpah ogee dengan P/Hd=3 hulu vertikal dan hulu 1:3 menunjukkan indeks kavitas rata-rata di atas 1 (satu) dimana termasuk ke dalam kategori tingkat 1 (risiko kavitas rendah) sehingga tidak memerlukan penanganan lebih lanjut.

Analisis Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Bulat



Gambar 4. Profil Tekanan Aliran Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu vertikal (kiri) dan Hulu 1:3 (Kanan)



Gambar 5. Profil Kecepatan Aliran Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu vertikal (kiri) dan Hulu 1:3 (Kanan)

Tabel 8. Nilai Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu Vertikal

No. Titik	x	y	z	Pg (Pa)	Pg (kPa)	Po=101,0+Pg (kPa)	Vo (m/dt)	$\rho Vo^2/2 \times 10^{-3}$ (kPa)
1	16.99	0.5	5.50	43,803.47	43.80	144.80	0.81	0.32
2	16.99	0.5	6.00	38,678.82	38.68	139.68	1.04	0.54
3	16.99	0.5	6.50	33,355.80	33.36	134.36	1.41	0.99
4	16.99	0.5	7.00	27,120.86	27.12	128.12	2.22	2.47
5	17.11	0.5	7.48	17,970.28	17.97	118.97	2.82	3.98
6	17.45	0.5	7.85	7,760.73	7.76	108.76	4.28	9.16
7	17.93	0.5	8.01	-2,929.27	-2.93	98.07	5.17	13.36
8	18.42	0.5	7.92	-9,946.28	-9.95	91.05	7.15	25.49
9	18.81	0.5	7.61	-2,787.17	-2.79	98.21	6.15	18.91
10	19.17	0.5	7.26	3,267.87	3.27	104.27	3.88	7.52
11	19.52	0.5	6.91	4,939.03	4.94	105.94	6.51	21.18
12	19.88	0.5	6.55	6,424.20	6.42	107.42	4.48	10.03
13	20.23	0.5	6.20	6,512.63	6.51	107.51	5.63	15.81
14	20.58	0.5	5.85	6,558.81	6.56	107.56	5.37	14.38
15	20.94	0.5	5.49	6,217.25	6.22	107.22	6.09	18.51
16	21.29	0.5	5.14	5,986.82	5.99	106.99	6.33	20.01
17	21.64	0.5	4.78	5,637.37	5.64	106.64	6.41	20.48
18	22.00	0.5	4.43	5,354.76	5.35	106.35	7.28	26.48
19	22.35	0.5	4.08	5,649.59	5.65	106.65	6.56	21.47
20	22.70	0.5	3.72	5,090.77	5.09	106.09	10.61	56.14
21	23.06	0.5	3.37	5,910.87	5.91	106.91	6.90	23.76
22	23.41	0.5	3.02	7,563.27	7.56	108.56	10.99	60.27
23	23.76	0.5	2.66	14,968.74	14.97	115.97	6.64	22.03
24	24.12	0.5	2.31	34,011.23	34.01	135.01	8.73	38.07

Tabel 9. Nilai Tekanan dan Kecepatan Aliran Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu 1:3

No. Titik	x	y	z	Pg (Pa)	Pg (kPa)	Po=101,0+Pg (kPa)	Vo (m/dt)	$\rho Vo^2/2 \times 10^{-3}$ (kPa)
1	16.08	0.50	5.00	48,656.75	48.66	149.66	0.85	0.36
2	16.24	0.50	5.47	43,859.48	43.86	144.86	1.01	0.51
3	16.40	0.50	5.95	38,974.71	38.97	139.97	0.94	0.44
4	16.56	0.50	6.42	33,978.79	33.98	134.98	1.49	1.10
5	16.72	0.50	6.90	28,684.21	28.68	129.68	1.60	1.28
6	16.88	0.50	7.37	22,297.51	22.30	123.30	2.68	3.60
7	17.11	0.50	7.82	6,949.60	6.95	107.95	4.45	9.87
8	17.57	0.50	8.01	-1,712.19	-1.71	99.29	5.71	16.30
9	18.06	0.50	7.95	-10,506.35	-10.51	90.49	6.73	22.60
10	18.48	0.50	7.66	-4,924.00	-4.92	96.08	4.25	9.02
11	18.83	0.50	7.31	2,412.29	2.41	103.41	6.05	18.29

12	19.18	0.50	6.96	5,279.82	5.28	106.28	4.48	10.00
13	19.54	0.50	6.60	5,810.14	5.81	106.81	6.90	23.77
14	19.89	0.50	6.25	6,535.94	6.54	107.54	5.29	13.98
15	20.24	0.50	5.90	6,423.77	6.42	107.42	5.88	17.23
16	20.60	0.50	5.54	6,185.18	6.19	107.19	6.32	19.91
17	20.95	0.50	5.19	6,042.44	6.04	107.04	6.33	19.97
18	21.31	0.50	4.84	5,184.89	5.18	106.18	9.45	44.55
19	21.66	0.50	4.48	5,400.76	5.40	106.40	6.85	23.39
20	22.01	0.50	4.13	5,065.62	5.07	106.07	10.20	51.97
21	22.37	0.50	3.78	5,658.81	5.66	106.66	7.26	26.33
22	22.72	0.50	3.42	5,248.80	5.25	106.25	10.86	58.90
23	23.07	0.50	3.07	7,182.84	7.18	108.18	7.59	28.79
24	23.43	0.50	2.72	12,765.80	12.77	113.77	10.72	57.39
25	23.78	0.50	2.36	29,338.41	29.34	130.34	6.32	19.96

Dari 8 dan tabel 9 menunjukkan bahwa pelimpah bulat P/Hd=3 dengan kemiringan downstream 1:1 terjadi tekanan negatif yang besar di bagian mercu dan distribusi tekanan positif yang besar sepanjang bidang miring *downstream*. Kecepatan aliran meningkat bertahap dari bagian mercu sampai awal bidang miring *downstream* kemudian perubahan kecepatan relatif konstan pada bidang miring *downstream*.

Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Bulat

Tabel 10. Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu Vertikal

No. Titik	Indeks Kavitas Po-Pv/($\rho V_o^2/2$)	Tingkat Risiko Kavitas	Tindakan Penanganan
1	440.22	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
2	252.66	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
3	133.13	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
4	51.00	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
5	29.32	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
6	11.63	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
7	7.17	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
8	3.48	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
9	5.07	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
10	13.56	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
11	4.89	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
12	10.47	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
13	6.65	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
14	7.32	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
15	5.67	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
16	5.23	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
17	5.09	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
18	3.93	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
19	4.86	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
20	1.85	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
21	4.40	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
22	1.76	1	Memerlukan perlindungan pada permukaan aliran dengan mengurangi kekasaran permukaan
23	5.16	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
24	3.49	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)

Tabel 11. Penilaian Tingkat Risiko dan Rekomendasi Penanganan Kavitas Pelimpah Bulat P/Hd=3 Hulu 1:3

No. Titik	Indeks Kavitas Po-Pv/($\rho V_o^2/2$)	Tingkat Risiko Kavitas	Tindakan Penanganan
1	405.23	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
2	277.39	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
3	310.37	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
4	120.44	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
5	99.38	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
6	33.64	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
7	10.70	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
8	5.95	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
9	3.90	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
10	10.40	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)
11	5.53	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitas tidak berdampak)

12	10.39	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
13	4.40	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
14	7.52	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
15	6.10	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
16	5.27	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
17	5.24	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
18	2.33	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
19	4.45	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
20	2.00	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
21	3.96	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
22	1.76	1	Memerlukan perlindungan pada permukaan aliran dengan mengurangi kekasaran permukaan
23	3.68	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
24	1.94	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)
25	6.41	1	Tidak diperlukan perlindungan permukaan (Kavitasi tidak berdampak)

Berdasarkan tabel 10 dan tabel 11 dapat disimpulkan bahwa pelimpah bulat dengan $P/H_d=3$ hulu memiliki rata-rata nilai indeks kavitasi >1 dimana masuk ke dalam kategori tingkat 1 (risiko kavitasi rendah) namun ada 1 (satu) titik pada nomor 22 direkomendasikan untuk dilakukan perlindungan permukaan atau mengurangi kekasaran permukaan untuk memastikan aman terhadap kavitasi. Secara keseluruhan geometri pelimpah bulat $P/H_d=3$ aman untuk diaplikasikan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa pada bagian mercu, pelimpah ogee memiliki risiko kavitasi lebih rendah dibandingkan pelimpah bulat. Sedangkan pada bagian downstream, pelimpah ogee dan pelimpah bulat memiliki indeks kavitasi cukup kecil menunjukkan pada bagian downstream bisa berpotensi terjadi kavitasi. Namun, secara keseluruhan pelimpah ogee dan pelimpah bulat dengan rasio $P/H_d=3$ muka hulu vertikal dan muka hulu 1:3 memiliki tingkat risiko kavitasi yang rendah (aman terhadap kavitasi) sehingga tidak diperlukan penanganan lebih lanjut. Penanganan kavitasi minor direkomendasikan pada 1 (satu) titik di kaki pelimpah bulat dengan cara mengurangi kekasaran permukaan salah satunya dengan pengacian atau penggerindaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aydin, M. C., Isik, E., & Ulu, A. E. (2020). Numerical modeling of spillway aerators in high-head dams. *Applied Water Science*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1126-2>
- BPSDM PUPR. (2017). Modul 8 Desain Bangunan Pelengkap Pelatihan Perencanaan Bendungan tingkat Dasar. Kementerian Pekerjaan Umum Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia.
- Al-Hadeethi, B., Almwala, A. S., Kamel, A. H., Afan, H. A., & Ahmed, A. N. (2024). Numerical Modeling of Flow Pattern with Different Spillway Locations. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(5), 1219–1226. <https://doi.org/10.18280/mmep.110510>
- Falvey, H. T. (1990). *Cavitation in Chutes and Spillways*. United States Departement of the Interior: Bureau of Reclamation.
- Gautam, H., Ahmad, Z., & Sharma, P. K. (2022). CFD-Based Modeling for Computing Discharge Coefficient of an Ogee Spillway. *ISHS 2022 - 9th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 246–255. <https://doi.org/10.26077/d3a8-d233>
- Kells, J. A., & Smith, C. D. (1991). Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(3), 358–377. <https://doi.org/10.1139/l91-047>
- Kermani, E. F., Barani, G. A., & Hesaroeeyeh, M. G. (2018). Cavitation damage prediction on Dam spillways using fuzzy-KNN modeling. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(2), 323–329. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.02.28356>
- Parsaie, A., Hamzeh Haghiabi, A., Saneie, M., & Torabi, H. (2021). The Study of Hydraulic Properties of Quarter-Circular Crested Stepped Spillway. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 43(4), 23–32. <https://doi.org/10.22055/jise.2021.36214.1939>
- Parsaie, A., Shareef, S. J. S., Haghiabi, A. H., Irzooki, R. H., & Khalaf, R. M. (2022). Numerical simulation of flow on circular crested stepped spillway. *Applied Water Science*, 12(9). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01737-w>
- PU Dirjen SDA. (2013). Standar Perencanaan Irigasi Kriteria Perencanaan Bagian: Bangunan Utama (Head Works) KP-02. Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air.
- Refika, C. D., Ziana, Z., & Amal, I. (2023). Analisis Kavitasi pada Bangunan Mercu Pelimpah Bendungan

- Krueng Sabee menggunakan Model Fisik Skala 1:30. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 6(1), 85–92. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v6i1.32603>
- Salmasi, F., & Abraham, J. (2022). Discharge coefficients for ogee spillways. *Water Supply*, 22(5), 5376–5392. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.129>
- Sutopo, Y. (2014). *Kavitasi di Dasar Saluran Curam*. Andi.
- USACE. (1977). *Hydraulic Design Criteria: Vol. I. U.S. Army Waterways Experiment Station Corps of Engineers*.
- USBR. (1987). *Design of Small Dams (Third Edition)*. United States Department of the Interior : Bureau of Reclamation.