# JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

# Analisis Kavitasi pada Saluran Transisi dan Peluncur Pelimpah Bendungan Kluet - Model Fisik Skala 1:60

#### Imam Faudli

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7 Indonesia, E-mail: imamfaudli37@gmail.com

# Azmeri<sup>(\*)</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7 Indonesia, E-mail: azmeri@unsyiah.ac.id

#### Cut Dwi Refika

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala Banda Aceh, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7 Indonesia, E-mail: cut.dwi.refika@unsyiah.ac.id

#### **Abstrak**

Wilayah Sungai Baru-Kluet umumnya memiliki kontur dengan kemiringan yang curam dan curah hujan tinggi sehingga rentan terhadap banjir, saat musim kemarau areal persawahan mengalami kekeringan akibat kekurangan air. Mengatasi permasalahan tersebut yaitu dengan membangun bendungan. Pelimpah merupakan suatu komponen saluran pengatur aliran pada bendungan berfungsi untuk lebih meningkatkan pengaturan serta memperbesar debit aliran yang akan melintasi bangunan pelimpah. Pelimpah yang memiliki kemiringan yang curam beresiko terhadap munculnya perilaku hidrolika yaitu Kavitasi. Lokasi eksperimen dilakukan pada Laboratorium Sungai dan Pantai Universitas Syiah Kuala, Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai interval indeks kavitasi damage pada setiap seri dan variasi debit. Metode analisis indeks kavitasi damage memakai rumus perbandingan antara tekanan air setempat dengan kecepatan aliran. Analisis kavitasi dilakukan dengan pengambilan data kecepatan aliran dan tinggi tekan pada setiap debit outflow. Hasil interval indeks kavitasi damage pada seri 0 dan seri modifikasi terletak di level 1 untuk daerah transisi, level 3 untuk daerah peluncur pada seri 0, dan level 2 pada seri modifikasi untuk bagian saluran peluncur. Perubahan seri 0 menjadi seri modifikasi yaitu penambahan ambang lebar pada saluran samping, penurunan elavasi saluran samping dan perpindahan sill pada saluran transisi dengan tujuan untuk mengecilkan kecepatan aliran. Perubahan tersebut masih ada kemungkinan terjadi kavitasi damage, tetapi sudah jauh lebih aman dibandingkan dengan hasil kavitasi pada seri 0. Penggunaan beton mutu tinggi tidak disarankan dikarenakan harga yang mahal dan tidak ekonomis, maka pemilihan penggunaan slot aerasi/aerator adalah yang cocok digunakan pada kondisi ini.

Kata Kunci: Bendungan, spillway, kavitasi, model fisik.

#### **Abstract**

River Region of Baru-Kluet has a steep slope contour and high rainfall so that it is vulnerable to flooding while during the dry season rice fields experience drought due to lack of water. Therefore, a dam is built to mitigate these issues. The spillway is a flow-control component in the dam which is used to improve regulation and enlarge the flow rate that will cross the spillway building. Spillway that has a steep slope is vulnerable to hydraulic behavior called cavitation. The experiment was carried out at the River and Coast Laboratory of Syiah Kuala University, Indonesia. This study aims to determine the value of the damage cavitation index interval in each series and discharge variation. Cavitation index analysis method used formula of ratio between local water pressure and flow velocity. Flow velocity and pressure at each outflow discharge was collected from the experiment. The results of the damage cavitation index interval in the 0 series and the modified series are located at level 1 for the transition region, level 3 for the launcher region and level 2 for the launcher region of modified series. It is found that the change in series 0 to a modified series with extending width in the side channel, lowering the elevation of side channel, and displacement sill in the transition channel with the aim of reducing the flow velocity. This change still has the possibility of cavitation damage, but it is much safer than the cavitation results of the 0 series. High quality of materials or concrete are not recommended because they are expensive and economically unfeasible, therefore the use of slot aeration/aerator is a suitable option for this case.

**Keyword:** Dam, spillway, cavitation, model test.

<sup>\*</sup>Penulis Korespondensi

#### 1. Pendahuluan

Baru Kluet merupakan Wilayah Sungai yang memiliki kontur yang terjal dan curah hujan tinggi sehingga rentan terjadi banjir, musim kemarau areal pertanian mengalami kekeringan akibat kurang pasokan air. Permasalahannya dapat diatasi dengan membangun bendungan. Bendungan merupakan suatu konstruksi air yang mempunyai fungsi utama untuk menampung air di bagian hulu sungai (Sosrodarsono, 1981). Bendungan Kluet memiliki multi fungsi (Multi purpose) yaitu untuk kebutuhan air irigasi, pengendalian banjir, air baku, dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Konstruksi ini dibangun bertujuan untuk meningkatkan kehandalan penyediaan air menjadi lebih baik, sehingga diharapkan dapat meningkatkan surplus produksi pertanian, pasokan listrik, pelayanan penyediaan air baku, perekonomian masyarakat, dan pengendalian banjir. Manfaatnya akan tercapai apabila konstruksi pelimpah aman terhadap perilaku hidrolika, maka perlu perhatian lebih pada perencanaanya. Lokasi Bendungan Kluet terletak diantara Kecamatan Kluet Tengah, Kluet Utara dan Kluet Timur di Kabupaten Aceh Selatan, Provinsi Aceh.

Pelimpah merupakan suatu komponen saluran pengatur aliran pada bendungan yang berfungsi untuk lebih meningkatkan pengaturan serta memperbesar debit aliran yang akan melintasi bangunan pelimpah (Sosrodarsono, 2003). Pelimpah yang memiliki kemiringan yang curam beresiko terhadap munculnya perilaku hidrolika yaitu Kavitasi (Falvey, 1990). Kavitasi yang tidak dihilangkan dapat membahayakan permukaan dasar saluran pelimpah akibat terjadinya gerusan/erosi. Kerusakan terhadap lantai saluran akibat gerusan yang terjadi terus menerus dapat menyebabkan masuknya air melewati celah-celah gerusan sehingga terganggunya stabilitas pelimpah (Elnikhely, 2018). Diperolehnya data dan desain yang optimum pada pelimpah Bendungan Kluet. maka perlu dilakukan kajian perilaku hidrolika dengan membuat model fisik (Sosrodarsono, 1981).

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis interval indeks kavitasi damage seri 0 dan seri modifikasi pada pelimpah Bendungan Kluet dengan variasi debit outflow  $Q_{2\text{th}}$  s/d  $Q_{1000\text{th}}$ . Metode analisis kavitasi memakai persamaan perbandingan antara tekanan air setempat dan kecepatan aliran. Analisis kavitasi terlebih dahulu dilakukan dengan pengambilan data kecepatan aliran dan tinggi tekan pada setiap debit outflow. Data kecepatan aliran yang dipakai adalah data pias tengah saluran dan tinggi tekan adalah data beda tinggi air pada pisometer titik tersebut. Apabila seri 0 tidak aman maka perlu dilakukan modifikasi menjadi seri selanjutnya untuk memperoleh kondisi hidrolika yang optimal.

# 2. Kavitasi

Kavitasi didefinisikan sebagai fenomena terjadinya tekanan lebih kecil dari 1 atm, mengakibatkan gelembung udara pada permukaan bangunan, sehingga menimbulkan lubang-lubang karena terlepasnya butiran agregat pada permukaan konstruksi (Direktorat

Jenderal Sumber Daya Air, 2013). Menurut Patty (1995) kavitasi merupakan suatu kondisi yang timbul dalam aliran dengan kecepatan begitu besar, sehingga tekanan uap air maksimum di temperatur tersebut menjadi lebih besar dari pada tekanan air setempat. Proses ini dapat berpotensi menyebabkan erosi pada konstruksi akibat timbulnya gelembung uap air. Saat kecepatan aliran meningkat, maka tekanan akan berkurang, penurunan tekanan ini dapat saja cukup besar, sehingga tekanan aliran tersebut turun mencapai tekanan uapnya (Hager, et. al, 2006).

Persamaan untuk memperkirakan interval indeks kavitasi damage berupa parameter tak berdimensi. Interval indeks kavitasi damage merupakan hubungan antara gaya pelindung terhadap kavitasi (ambient pressure) dan penyebab kavitasi (dynamic pressure) yang disebut indeks kavitasi (Roberson, et. al, 1998). Perhitungan indeks kavitasi dengan persamaan berikut (Falvey, 1990):

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho \frac{v_o^2}{2}} \tag{1}$$

$$P_o = P_a + P_g \tag{2}$$

$$P_{a} = \rho g h \tag{3}$$

dimana:

 $\sigma$  = indeks kavitasi

Po = ambient pressure (kPa)

 $Pa = \text{tekanan atmosfir (kPa)}^2$ 

Pg = tekanan setempat (kPa)

 $\rho$  = massa jenis cairan (kg/m<sup>3</sup>) g = percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

g = percepatan gravitasi h = tinggi muka air (m)

Pv = tekanan uap (kPa)

vo = kecepatan aliran (m/s)

Indeks kavitasi *damage* level menunjukkan tingkat resiko terjadinya kavitasi. **Tabel 1** menunjukkan nilai interval indeks kavitasi *damage* (Fadaei, et. al, 2018). Perhitungan indeks kavitasi *damage* membutuhkan data massa jenis air dan tekanan uap yang dipengaruhi oleh suhu saat dilakukan pengukuran. Adapun besarnya nilainya berdasarkan suhu dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Percobaan dari Holl (1960) menunjukkan besaran dari kecepatan aliran dan konsentrasi udara mempunyai pengaruh yang besar terhadap terjadinya kavitasi, makna penting adalah penelitian model mampu

Tabel 1. Interval indeks kavitasi damage

Kavitasi index	Kavitasi damage risk	Level
<i>σ&gt;</i> 1	No kavitasi damage	1
0,45 < σ ≤ 1	Possible kavitasi damage	2
$0.25 < \sigma \le 0.45$	Kavitasi damage	3
$0,17 < \sigma \le 0,25$	Serious damage	4
<i>σ</i> ≤ 0,17	$\sigma$ ≤ 0,17 Major damage	

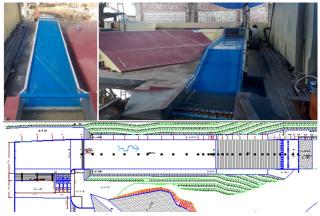
Sumber: Fadaei, et. al. (2013)

meramalkan secara teliti potensi kavitasi di aliran dalam prototipe, penelitian model fisik sebaiknya dilakukan dengan menggunakan parameter kecepatan aliran yang tinggi serta saat gelembung udara pecah. Pencegahan terjadinya kavitasi dapat dilakukan dengan menggunakan sistem peluap pengudaraan/aerator (menghilangkan sumber dari penurunan tekanan), penggunaan sill atau ambang lebar (mengurangi kecepatan aliran) dan penggunaan beton mutu tinggi (melawan terjadinya erosi), daerah muncul gejala kavitasi sedemikian rupa sehingga pada daerah tersebut terjadi tekanan tinggi yang dapat mereduksi tekanan negatif (Wibowo, 2016). Menurut Hay (1988) menyelidiki berbagai faktor mempengaruhi kerusakan kavitasi pada permukaan pelimpah, menyarankan bahwa kerusakan kavitasi dapat dicegah dengan menggunakan bahan tahan damage dan aerasi. Chanson (1989) kavitasi menyarankan agar erosi kavitasi dikurangi atau dihilangkan dengan cara memasang slot aeration atau

Tabel 2. Sifat fisik air pada tekanan atmosfer

Temperatur	Massa jenis	Tekanan Uap Air	Kekentalan Kinematis
(t)	(p)	(P <sub>v</sub> )	(µ)
°C	Kg/m <sup>3</sup>	kPa	m <sup>2</sup> /dt.10 <sup>6</sup>
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)



Gambar 1. Instalasi percobaan dan titik pengukuran

# 3. Instalasi Percobaan dan Prosedur Pemasangan

Eksperimen kajian terhadap kavitasi dari side channel spillway dalam bentuk model fisik dilaksanakan pada Laboratorium Sungai dan Pantai Universitas Syiah Kuala, Indonesia. Pengaliran air dilakukan dengan sistem pompa dari kolam tampungan menuju ke saluran terbuka yang terletak diatas kolam tampungan. Aliran yang keluar dari saluran terbuka melewati peluap berbentuk segi empat (rechbox) sebagai pengatur debit outflow sesuai pengujian, debit outflow yang keluar dialirkan ke pelimpah samping bendungan, dan dilakukan pengukuran untuk pengambilan data primer. Model fisik spillway didesain sesuai gambar yang sudah disusun dan diskalakan (Dinas Pengairan Aceh, 2020).

Model fisik pelimpah Bendungan Kluet yang digunakan pada penelitian ini adalah model hidraulik tak distorsi. Model hidraulik tak distorsi (undistorted model) merupakan model fisik yang mempunyai sama akan skala panjang horizontal (nL) dan vertikal (nh). Skala parameter aliran ditentukan berdasarkan skala geometri, nL = nh (Triatmodjo, 2008). Berdasarkan Triatmodjo (2008) pembuatan model fisik perlu pertimbangan beberapa faktor yaitu ruang yang tersedia di laboratorium, kemampuan suplai fluida, kemampuan ketelitian alat ukur, dan pembuatan model, maka ditetapkan skala model untuk pelimpah Bendungan Kluet adalah 1:60.

Pengambilan data primer untuk analisis indeks kavitasi damage yaitu dilakukan pengukuran kecepatan aliran dan tinggi tekan. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan pada pias tengah saluran transisi dan peluncur dengan menggunakan alat ukur berupa pitot tube. Pengukuran kecepatan aliran dan tinggi tekan dilakukan pada setiap debit outflow yaitu  $Q_{2th}$  s/d  $Q_{1000th}$ . Pengukuran tinggi tekan diukur pada titik-titik pisometer yang telah ditentukan seperti Gambar 1.

Kriteria desain yang digunakan untuk mendapatkan kondisi indeks kavitasi *damage* yang optimum pada saluran transisi dan peluncur yaitu kecepatan aliran yang terjadi rendah dan tekanan aliran tinggi. Perubahan desain dari seri 0 menjadi seri modifikasi berupa penambahan letak ambang lebar dengan dimensi 4,5 x 2,5 m di awal saluran transisi pada seri modifikasi,

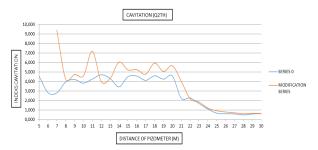


Gambar 2. Desain bentuk seri 0

perpindahan sill kearah hilir dengan jarak 25 m dari peletakan sill lama pada saluran transisi, penurunan elevasi lantai saluran samping dengan kedalaman 4,2 m dari elavasi lama. Selain itu, perubahan juga dilakukan pada pintu air di mercu pelimpah yaitu dihilangkannya pintu air dengan penambahan dua lengkung hidrolis (lengkung bagian hulu R1= 25 m dan R2 = 25 m dan lengkung bagian hilir R1 = 14 m dan R2 = 10 m), dan penambahan panjang lantai saluran transisi dengan jarak 45 meter ke arah hulu. Bentuk desain saluran pelimpah seri 0 dapat dilihat pada **Gambar 2**. Desain saluran pelimpah untuk seri



Gambar 3. Desain bentuk seri modifikasi

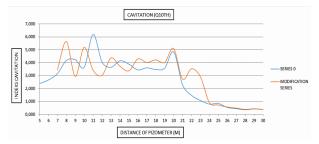


Gambar 4. indeks kavitasi pada debit aliran Q<sub>2th</sub>

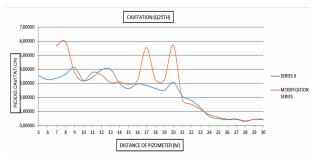
#### 4. Hasil dan Pembahasan

Perilaku hidrolika berupa indeks kavitasi damage pada pelimpah Bendungan Kluet terlebih dahulu dilakukan analisis pada seri 0, setelah itu dilanjutkan dengan menganalisis seri modifikasi. Pengujian untuk analisis kavitasi dalam model fisik dilakukan dengan enam variasi debit periode ulang yaitu Q<sub>2</sub>, Q<sub>10</sub>, Q<sub>25</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>100</sub>, dan Q<sub>1000</sub> masing-masing debit periode ulang sebesar 5,72 m³/s, 8,97 m³/s, 11,32 m³/s, 13,45 m³/s, 16,62 m³/s, dan 18,91 m³/s. Debit periode ulang diperoleh dari hasil analisis hidrologi pada lokasi studi (Dinas Pengairan Aceh, 2020). Hasil analisis kavitasi untuk seri 0 dan seri modifikasi diperlihatkan pada Gambar 4 s/d Gambar 9.

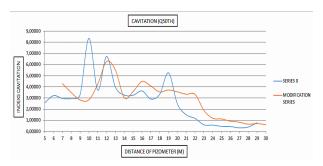
Berdasarkan Gambar 4 s/d Gambar 9 hasil indeks kavitasi *damage* seri 0 pada titik 5 s/d 20 memiliki nilai 2,4 s/d 4,5 terletak di level 1 (tidak terjadi kerusakan kavitasi) untuk bagian saluran transisi.



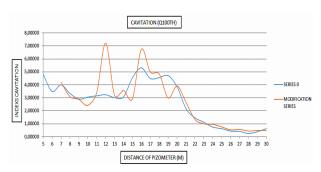
Gambar 5. indeks kavitasi pada debit aliran Q<sub>10th</sub>



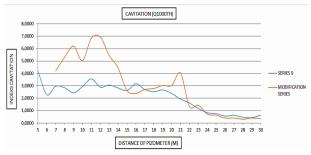
Gambar 6. indeks kavitasi pada debit aliran Q<sub>25th</sub>



Gambar 7. indeks kavitasi pada debit aliran  $\mathbf{Q}_{50th}$ 



Gambar 8. indeks kavitasi pada debit aliran Q<sub>100th</sub>



Gambar 9. indeks kavitasi pada debit aliran Q<sub>1000th</sub>

176 Jurnal Teknik Sipil

Indeks kavitasi pada titik 21 s/d 25 mempunyai nilai 0,5 s/d 2,0 terletak di level 1 (tidak terjadi kerusakan kavitasi) untuk daerah saluran peluncur. Sedangkan pada titik 26 s/d 30 mengalami penurunan indeks kavitasi yaitu 0,43 s/d 0,50 terletak di level 3 (terjadi kerusakan oleh kavitasi) untuk daerah saluran peluncur. Penyebab perbedaan level pada titik-titik pisometer bagian transisi dan peluncur diakibatkan kecepatan aliran di saluran peluncur lebih besar dari saluran transisi. Menurut percobaan dari Holl (1960) menunjukkan bahwa besaran dari kecepatan aliran dan konsentrasi udara mempunyai pengaruh yang besar terhadap terjadinya kavitasi, makna penting adalah bahwa penelitian model mampu meramalkan secara teliti potensi kavitasi di aliran dalam penelitian model sebaiknya prototip, menggunakan parameter kecepatan aliran yang tinggi serta pada saat gelembung udara pecah. Saat kecepatan aliran meningkat, maka tekanan akan berkurang, penurunan tekanan ini dapat saja cukup besar, sehingga tekanan aliran tersebut turun mencapai tekanan uapnya (Hager, et. al, 2006).

Perubahan desain pada seri modifikasi dilakukan berupa peletakan ambang lebar berdimensi 4,5 x 2,5 m di awal saluran transisi. Selain itu juga dilakukan perpindahan sill ke arah hilir dengan jarak 25 m dari posisi sill lama pada saluran transisi. Hasil simulasi model pada seri modifikasi juga tidak memerlukan pintu air untuk dapat mengalirkan debit banjir PMF. Hidrolis aliran dapat tercapai melalui penambahan dua lengkung hidrolis yaitu dengan lengkung dihulu  $R_1$ = 25 m dan  $R_2$  = 25 m dan lengkung hilir  $R_1 = 14$  m dan  $R_2 = 10$  m di dekat mercu pelimpah. Seri modifikasi juga memerlukan penambahan panjang lantai saluran transisi 45 m ke arah hulu, dan penurunan elevasi lantai saluran samping sedalam 4,2 m dari elavasi awal. Perubahan tersebut bertujuan agar dapat menurunkan kecepatan aliran, Gambar 4 s/d 9 menunjukkan hasil indeks kavitasi damage seri modifikasi pada titik 5 s/d 20 mengalami peningkatan nilai indeks kavitasi dari seri 0 yaitu 3,0 s/d 6,0 terletak pada level 1. Titik 21 s/d 25 mempunyai nilai indeks kavitasi lebih tinggi dari seri 0 yaitu 0,6 s/d 3,5 terletak di level 1. Sedangkan pada titik 26 s/d 30 mengalami peningkatan interval indeks kavitasi yaitu naik pada level 2 (kemungkinan terjadi kavitasi damage) dengan nilai indeks kavitasi 0,45 s/d 1,0. Berdasarkan Tabel 1 hasil indeks kavitasi damage dari variasi debit outflow pada seri modifikasi masih ada di level 2 (kemungkinan teriadi kavitasi damage), maka dampak erosi akibat kavitasi di titik 26 s/d 30 pada saluran peluncur dapat dikurangi atau dihilangkan dengan cara meningkatkan tinggi tekanan, meningkatkan kehalusan dasar dan dinding saluran peluncur, serta memasang slot aeration (Chanson, 1993). Upaya aerator meningkatkan kehalusan dasar dan dinding saluran dengan cara menggunakan material tertentu merupakan langkah yang mahal. Menurut Chanson (1989) menyarankan agar erosi kavitasi dikurangi atau dihilangkan dengan cara memasang slot aeration atau aerator. Prinsip pemasangan slot aeration atau aerator adalah memasukkan udara hingga ke dasar saluran curam, sehingga tekanan di dasar saluran dapat ditingkatkan.

# 5. Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan perilaku hidrolika berupa kavitasi pada saluran pelimpah. Berikut ini penjelasan kesimpulan dari percobaan lebih lanjut:

- Secara umum pada saluran transisi tidak memiliki permasalahan terhadap munculnya kavitasi, dikarenakan kemiringan saluran yang landai sehingga kecepatan aliran yang dihasilkan kecil dan tekanan aliran menjadi besar.
- 2. Modifikasi desain dilakukan pada pelimpah adalah peletakan ambang lebar berdimensi 4,5 x 2,5 m di awal saluran transisi, perpindahan *sill* ke arah hilir dengan jarak 25 m dari *sill* lama pada saluran transisi, dihilangkan pintu air pada mercu pelimpah dengan penambahan dua lengkung hidrolis yaitu dengan lengkung dihulu R<sub>1</sub>= 25 m dan R<sub>2</sub> = 25 m dan lengkung hilir R<sub>1</sub> = 14 m dan R<sub>2</sub> = 10 m di dekat mercu pelimpah, penambahan panjang lantai saluran transisi 45 m ke arah hulu, dan penurunan elevasi lantai saluran samping dengan kedalaman 4,2 m dari elavasi awal saluran samping.
- 3. Modifikasi desain dilakukan pada pelimpah adalah peletakan ambang lebar berdimensi 4,5 x 2,5 m di awal saluran transisi, perpindahan sill kearah hilir dengan jarak 25 m dari sill lama pada saluran transisi, dihilangkan pintu air pada mercu pelimpah dengan penambahan dua lengkung hidrolis yaitu dengan lengkung dihulu  $R_1\!=\!25$  m dan  $R_2=25$  m dan lengkung hilir  $R_1=14$  m dan  $R_2=10$  m di dekat mercu pelimpah, penambahan panjang lantai saluran transisi 45 m ke arah hulu, dan penurunan elevasi lantai saluran samping dengan kedalaman 4,2 m dari elavasi awal saluran samping.
- 4. Perpindahan letak *sill* pada saluran transisi, penambahan ambang lebar pada saluran samping, penambahan panjang saluran transisi di hulu dan mendalamkan saluran samping masih ada kemungkinan terjadi kavitasi *damage*, tetapi sudah jauh lebih aman dibandingkan dengan hasil kavitasi pada seri 0.

# **Daftar Pustaka**

- Chanson, H., 1989, Study of air entrainment and aerator devices, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27 (23), 301 319.
- Chanson, H., 1993, Stepped Spillway Flows and Air Entrainment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 422-435. https://doi.org/10.1139/193-057.
- Dinas Pengairan Aceh, 2020, Final Report Model Test dan Penyempurnaan Desain Bendungan Krueng Kluet Kab. Aceh Selatan. Banda Aceh.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2013, Kriteria Perencanaan Irigasi KP-04, Jakarta.
- Elnikhely, E.A., 2018, Investigation and Analysis of Scour Downstream of a Spillway, *Ain Shams*

- Engineering Journal. 9(4) p. 22752282 https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.03.08.
- Fadaei, K. E., Barani, G. A., Ghaeini, M. H., 2013, Investigation of Cavitation Damage Levels on Spillways. World Applied Sciences Journal, Vol. 21(1), 73-78.
- Falvey, H. T., 1990, *Kavitasi in Chutes and Spillways*, United States Department of The Interior: Bureau of Reclamation.
- Hager, W. H., Kramer, K., Minor, H.-E., 2006, Development of Air Concentration on Chute Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, Issue 9, 908–915.
- Hay, D., 1988, Model-Prototype Correlation: Hydraulic Structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 113(8): 899-907.
- Holl, J. W., 1960, An Effect of Air Content on the Occurrence of Kavitasi, *Journal of Basic Engineering, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, series D, vol. 82, pp. 941.946.
- Patty, O.F., 1995, Tenaga Air, Erlangga, Surabaya.
- Sosrodarsono, S. dan Takeda, K., 1981, *Bendungan type urugan*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sosrodarsono, S. dan Takeda, K., 2003, *Hidrologi*, Cetakan Kesembilan, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Triatmodjo, B., 2008, *Hidraulika II*, Cetakan Kedua, Beta Offset, Yogyakarta.
- Roberson, J. A., Cassidy, J. J., Chaudhry, M. H., 1998, *Hydraulic Engineering 2nd (second)*, edition published by Wiley.
- Wibowo, A.C., 2016, Pemodelan Numerik Pelimpah Samping Waduk Telagawaja Bali Kabupaten Karangasem Dengan Analisa Komputasi Fluida Dinamis, Jurnal Teknik Pengairan, Vol. 07, No. 2, Desember, Universitas Brawijaya, Malang.