

Pemodelan Hidrolik Aliran pada Bendung dengan Mercu Tipe Ogee

Flow Hydraulic Modeling on the Weir type Ogee

Moh. Abdillah Pramadhani¹, Nanang Saiful Rizal^{2*}, Pujo Priyono³

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : abdillah681234@gmail.com

²Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember *Koresponden Author
Email : nanangsaifulrizal@unmuhjember.ac.id

³Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : pujo@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Bangunan bendung yaitu sebuah konstruksi yang bertujuan untuk meninggikan muka air sungai dan mengalirkan sebagian aliran air sungai yang ada ke arah tepi kanan dan tepi kiri sungai untuk mengalirkan ke dalam saluran melalui sebuah bangunan pengambilan jaringan irigasi. Tujuan selebihnya adalah dengan naiknya muka air sehingga akan dapat digunakan untuk mengairi sawah. Bendung dirancang dan dibangun oleh tenaga teknik Indonesia, juga oleh tenaga ahli teknik asing yang datang ke Indonesia membawa konsep baru. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh variasi kemiringan hulu bendung tipe ogee terhadap karakteristik aliran dan pengaruh variasi kemiringan hulu bendung terhadap tinggi loncatan air dan bilangan *Froude*. Adapun hasil yang didapat dari penelitian ini adalah ketinggian awal loncatan air (Y_u) didapatkan nilai paling tinggi yaitu pada kemiringan hulu bendung 1/0,6 dengan nilai 0,012 m dan untuk ketinggian loncatan air (Y_2) didapatkan paling tinggi yaitu pada kemiringan hulu bendung 1/0,3 dengan nilai 0,107 m, dan untuk karakteristik aliran yang terjadi Fr_0 pada semua variasi kemiringan memiliki nilai *Froude* <1,00 yaitu aliran subkritis. Fr_1 memiliki nilai *Froude* >1,00 yaitu aliran superkritis, bilangan *Froude* maksimal terjadi pada debit 0,0006 kemiringan hulu 1/0,3 dengan nilai *Froude* 15,732. Fr_2 memiliki nilai *Froude* >1,00 dengan angka maksimal 1,877 pada kemiringan hulu 1/0,6.

Kata Kunci : Bendung, karakteristik aliran, bilangan *Froude*.

Abstract

The weir bulding is a construction aims to raising the face oh the river and drain part of the river which are towards the right edge and the left edge of the river to flow into the channel trough a building taking irrigation network. The rest of the purpose is rising water levels so it will be able to used for irrigate the fields. The weir was designed and build by Indonesian technical personel, also by foreign technicians who came to Indonesia brought a new concept. The purpose of this research to find out the effect of variations in the upstream slope of the weir type ogee to flow characteristics and the effect of variations in the upstream slope of the weir against the height of the water jump and the *Froude* number. The results obtained from this research are initial height of water jump (Y_u) the highest value obtained is on the upstream slope of the weir 1/0,6 with value 0,012 m and for the height of the water jump (Y_2) the highest obtained is the upstream slope of the weir 1/0,3 with value 0,107 m, and for the flow characteristics Fr_0 on all variations have *Froude* <1,00 is subcritical flow. Fr_1 has a *Froude* value >1,00 is a supercritical flow, maximum *Froude* number occurs at 0,0006 upstream slope of the weir 1/0,3 has a *Froude* value 15,732. Fr_2 has a *Froude* value >1,00 maximum *Froude* value occurs at 1,877 upstream slope 1/0,6.

Keywords : Weir, flow characteristics, *Froude* number.

1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bangunan bendung yaitu sebuah konstruksi yang bertujuan untuk meninggikan muka air sungai dan mengalirkan sebagian aliran air sungai yang ada ke arah tepi kanan dan tepi kiri sungai untuk mengalirkan ke dalam saluran melalui sebuah bangunan pengambilan jaringan irigasi. Tujuan selebihnya adalah dengan naiknya muka air sehingga akan dapat digunakan untuk mengairi sawah. Bendung dirancang dan dibangun oleh tenaga teknik Indonesia, juga oleh tenaga ahli teknik asing yang datang ke Indonesia membawa konsep baru. Rancangan itu baik oleh tenaga teknik Indonesia maupun oleh tenaga teknik asing memberikan suatu perkembangan tipe, bentuk dan tata letak bendung. Ribuan bendung yang telah dibangun itu beroperasi dan berfungsi dengan baik. Namun sebagian diantara ribuan bendung baru itu mengalami masalah yang disebabkan oleh berbagai hal. Misalnya masalah-masalah gangguan penyadap aliran, gangguan angkutan sedimen dan sampah, masalah penggerusan setempat di hilir bendung sampai dengan masalah hancurnya bagian bangunan bendung.

B. Latar Belakang

Maka rumusan masalah yang akan dibahas antara lain :

1. Bagaimana mengetahui pengaruh variasi kemiringan hulu bendung tipe ogee terhadap karakteristik aliran ?
2. Bagaimana mengetahui pengaruh variasi kemiringan hulu bendung tipe ogee terhadap tinggi loncatan air ?

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Saluran Terbuka

Saluran terbuka merupakan saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas dengan tekanan yang ada pada semua titik di sepanjang saluran adalah tekanan atmosfer. Saluran terbuka menurut asalnya terdapat dua

jenis, yaitu saluran alam (*Natural Channels*) dan saluran buatan (*Artificial Channels*).

B. Tipe Aliran

Adapun tipe aliran berdasarkan kriteria waktu sebagai berikut :

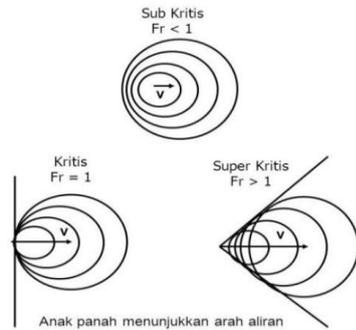
1. Aliran Tetap/mantap (*Steady Flow*) yaitu aliran di mana kedalaman air (h) tidak berubah menurut waktu atau dianggap tetap dalam suatu interval waktu, dengan demikian kecepatan aliran pada suatu titik tidak berubah terhadap waktu dan segala variabel disepanjang saluran sama.
2. Aliran tidak tetap/Tidak Mantap (*Unsteady Flow*) yaitu apabila kedalaman air (h) berubah menurut waktu demikian pula kecepatannya berubah menurut waktu. Aliran ini terbagi dua yaitu: Aliran seragam tidak tetap (*unsteady uniform flow*) dan aliran tidak tetap dan berubah – ubah (*unsteady varied flow*). Aliran ini hampir tidak pernah terjadi.

C. Bilangan Froude

Dijelaskan bahwa akibat gaya tarik bumi terhadap aliran dinyatakan dengan rasio inersia dengan gaya tarik bumi (G). Rasio ini diterapkan sebagai bilangan *Froude* (Fr). Bilangan *Froude* untuk saluran terbuka dinyatakan sebagai berikut :

1. Aliran kritis, merupakan aliran yang mengalami gangguan permukaan, seperti yang diakibatkan oleh riak yang terjadi karena batu yang dilempar ke dalam sungai tidak akan bergerak menyebar melawan arus. Aliran dapat dikategorikan aliran kritis apabila bilangan *Froude* memiliki nilai sama dengan satu ($Fr = 1$).
2. Aliran sub kritis, pada aliran ini biasanya kedalaman aliran lebih besar dari pada kecepatan aliran rendah, semua riak yang timbul dapat bergerak melawan arus. Apabila bilangan lebih kecil dari satu *Froude* ($Fr < 1$) maka termasuk aliran sub kritik.
3. Aliran super kritis, pada aliran ini kedalaman aliran relatif lebih kecil dan kecepatan relatif tinggi, segala riak yang

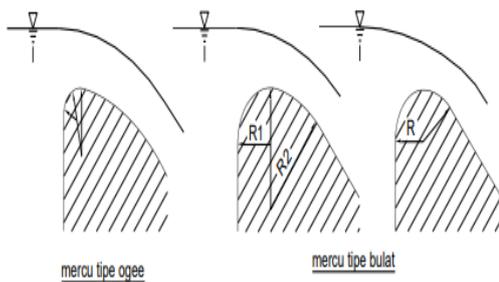
ditimbulkan dari suatu gangguan adalah mengikuti arah arus. Apabila bilangan *Froude* lebih besar dari satu ($Fr > 1$) maka aliran tersebut termasuk aliran super kritis.



Gambar 1. Pola Penjalaran Gelombang di Saluran Terbuka
 (Sumber : Bambang Triadjomojo, 1993)

D. Mercu Bendung

Mercu bendung adalah bagian teratas dari tubuh bendung, dimana aliran dari hulu dapat mengalir atau melimpah ke hilir. Fungsi mercu bendung itu sendiri adalah sebagai penentu tinggi muka air minimum di sungai bagian hulu bendung, sebagai pengempang sungai dan sebagai pelimpah aliran air. Letak mercu bendung dan tubuh bendung diusahakan tegak lurus arah aliran sungai agar aliran yang menuju bendung terbagi merata (Standart Perencanaan Irigasi KP-02, 2013). Di Indonesia pada umumnya digunakan dua tipe mercu yaitu tipe mercu ogee dan tipe mercu bulat.

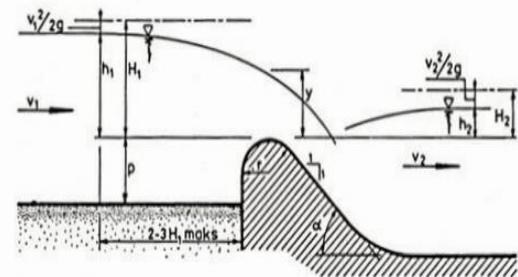


Gambar 2. Bentuk Mercu
 (Sumber : KP-02 bagian bangunan utama)

E. Mercu Bulat

Bendung dengan mercu bulat memiliki harga koefisiensi debit yang jauh lebih tinggi (44%) dibandingkan dengan koefisiensi bendung ambang lebar. Pada sungai, ini akan

banyak memberikan keuntungan karena bangunan ini akan mengurangi tinggi muka air hulu selama banjir. Untuk menghindari bahaya kavitas lokal, tekanan minimum pada mercu bendung harus dibatasi sampai - 4 m tekanan air jika mercu terbuat dari beton; untuk pasangan batu tekanan subatmosfir sebaiknya dibatasi sampai -1 m tekanan air. (Standart Perencanaan irigasi KP – 02, 2013).



Gambar 3. Bendung Mercu Bulat
 (Standart perencanaan irigasi KP – 02, 1986)

Dari gambar 2.3 tampak bahwa jari jari meru bendung pasangan batu akan berkisaran antara 0,3 sampai 0,7 kali H_{1maks} dan untuk mercu bendung beton dari 0,1 sampai 0,7 kali H_{1maks} persamaan tinggi energi debit untuk bendung ambang pendek dengan pengontrol segi empat adalah :

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

Dengan :

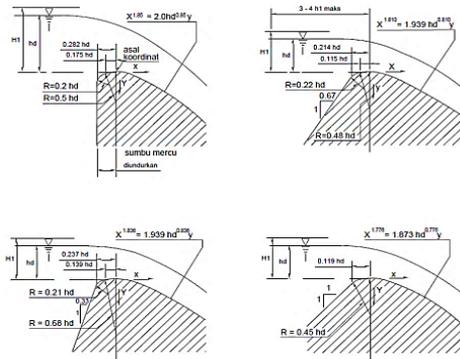
- Q = debit rencana (m^3/det)
- C_d = koefisien debit ($C_d = C_0 \times C_1 \times C_2$)
- D = percepatan gravitasi ($9,80 m/det^2$)
- B_e = lebar efektif bendung (m)
- H_1 = tinggi energi di atas mercu (m)

F. Mercu Ogee

Mercu Ogee berbentuk tirai luapan bawah dari bendung ambang tajam aerasi. Oleh karena itu mercu ini tidak akan memberikan tekanan subatmosfir pada permukaan mercu sewaktu bendung mengalirkan air pada debit rencana. Untuk debit yang lebih rendah, air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu.

$$\frac{Y}{Hd} = \frac{1}{Hd} \left[\frac{X}{Hd} \right]^n$$

Dengan :
 X dan Y = koordinat permukaan hilir
 H_d = tinggi energi diatas mercu
 K dan n = parameter permukaan

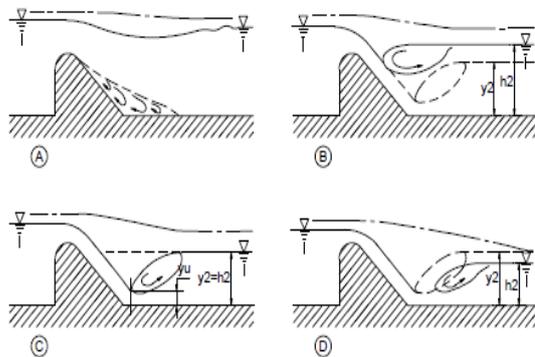


Gambar 4. Bendung Mercu Ogee
 (Sumber : KP-02 Bagian Bangunan Utama)

G. Peredam Energi

Bangunan peredam energi adalah struktur bangunan di hilir tubuh bendung yang terdiri dari berbagai tipe, bentuk, dan kanan kirinya dibatasi oleh tembok pangkal bendung dilanjutkan dengan tembok sayap hilir dengan entuk tertentu.

Prinsip peredam energi pada bangunan peredam energi adalah dengan cara menimbulkan gesekan air dengan lantai dan dinding struktur, gesekan air dengan air, membentuk pusaran air berbalik vertical ke atas dan ke bawah serta pusaran arah horizontal dan menciptakan benturan aliran ke struktur serta membuat loncatan air di dalam ruang olakan.



Gambar 5. Peredam Energi
 (Sumber : KP-02 Bagian Bangunan Utama)

3. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jember



Gambar 6. Laboratorium Air Universitas Muhammadiyah Jember
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi 2022)

B. Jenis Penelitian dan Sumber Data

1. Jenis penelitian
 Penelitian ini dilakukan adalah eksperimen dengan model simulasi dimana kondisi dibuat dan diatur sendiri oleh penelitian dengan mengacu pada literatur yang berkaitan dengan judul penelitian tersebut.
2. Sumber Data
 Penelitian ini menggunakan data primer yang diperoleh langsung dari simulasi model fisik di laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jember.

C. Prosedur Penelitian

Dalam prosedur ini dilakukan langkah – langkah sebagai berikut :

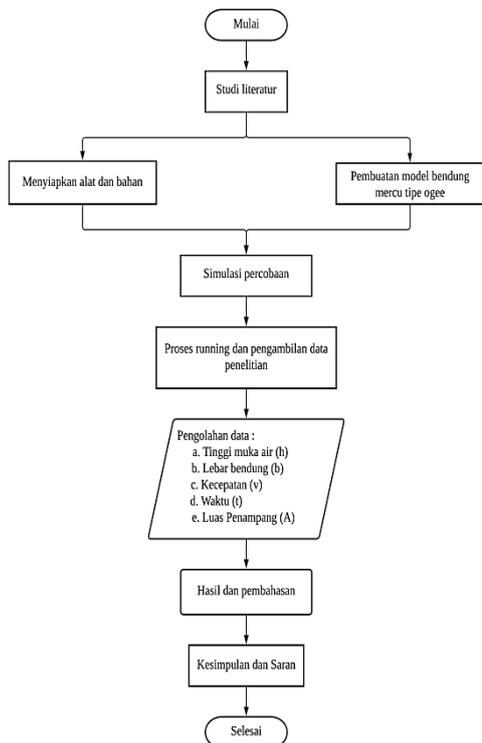
1. Mempersiapkan peralatan di laboratorium yang akan digunakan termasuk membuat model fisik bendung mercu tipe ogee dengan tiga varian kemiringan.
2. Hidupkan pompa air dan bersihkan terlebih dahulu saluran terbuka di laboratorium keairan unmuh jember.
3. Melakukan pengaliran dengan variasi debit (Q) dengan lima variasi debit percobaan.
4. Melakukan pengukuran kecepatan aliran (V) dengan menggunakan sterofoam.
5. Melakukan pengukuran tinggi muka air (h).

- Lakukan proses pengambilan data pada setiap varian model fisik bendung mercu tipe ogee.
- Mencatat data-data penelitian yang perlu diperhitungkan.
- Analisis data dan hasil pengamatan laboratorium yang telah dilakukan.

- Elevasi Pelimpah = 0,15 m
- Debit rencana (Q) = 0,004 m³/det

$$\begin{aligned}
 Q(\text{rencana}) &= Q(\text{kontrol}) \\
 0,002 &= Cd \times B \times H_e^{3/2} \\
 0,002 &= 1,00 \times 0,15 \times 0,05^{3/2} \\
 0,002 &= 0,002 \text{ m}^3/\text{det}
 \end{aligned}$$

D. Flow Chart Penelitian



Gambar 7. Diagram Alur Penelitian
 (sumber : Lucid Art 2022)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perencanaan Mercu

Mercu yang digunakan dalam penelitian ini yaitu mercu ogee dengan kemiringan hulu 1:3, 1:4, dan 1:6. Mercu ini tidak akan terjadi tekanan sub atmosfer pada permukaan mercu saat bendung mengalirkan air pada debit rencana. Dan untuk debit yang lebih rendah, air akan memberikan tekanan ke bawah pada mercu. Perhitungan bendung disesuaikan dengan data awal laboratorium. Data-datanya sebagai berikut :

- Lebar saluran (B) = 0,15 m

B. Hasil Pengujian Laboratorium

a. Pengujian Aliran

Pengujian aliran dilakukan dengan mengalirkan air sepanjang flume melalui pelimpah ogee dengan lima variasi debit dengan menggunakan pompa air. Besarnya debit yang lewat yaitu 0,0006 m³/detik, 0,001 m³/detik, 0,002 m³/detik, 0,003 m³/detik dan 0,004 m³/detik. Data pertama yang didapatkan adalah panjang flume 4,1 m, lebar flume 0,15 m dan tinggi flume 0,24 m. Pengujian aliran dilakukan sebanyak tiga kali percobaan untuk mendapatkan waktu rata-rata yang dilewati air di flume.



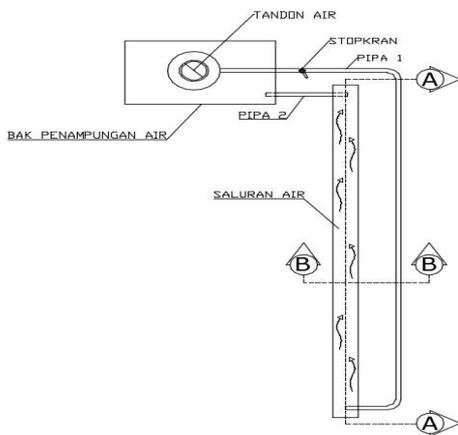
Gambar 8. Dokumentasi Saluran (flume)
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi 2022)

b. Pengambilan Data

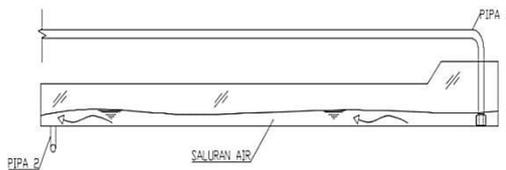
Pengambilan data dilakukan dengan meletakkan model fisik bendung mercu tipe ogee di dalam saluran terbuka dan dilakukan proses running. Penelitian dilakukan dengan tiga variasi bentuk bendung mercu tipe ogee dan lima variasi debit. Proses pengambilan data dikerjakan oleh empat mahasiswa untuk mendapatkan data yang akurat.



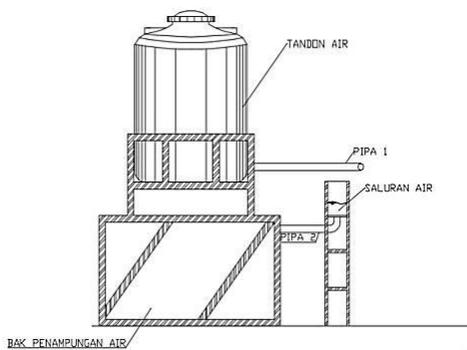
Gambar 9. Proses Pengambilan Data
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi 2022)



1. Denah Saluran



2. Potongan B-B



3. Potongan A-A

Gambar 10. Denah Saluran dan Potongan
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi 2022)

c. Data Pengujian Aliran

Pengujian dilakukan secara manual dengan menggunakan bahan yang mudah terapung yaitu sterofoam dan dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Waktu (t)} &= \frac{t_1+t_2+t_3}{3} \\ &= \frac{4,80 + 4,30 + 4,75}{3} \\ &= 4,65 \text{ det} \end{aligned}$$

Untuk mengetahui hasil dari kecepatan aliran tersebut menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V &= \text{Panjang Flume (s) / waktu (t)} \\ &= 4,1 / 4,65 \\ &= 0,882 \text{ m/det} \end{aligned}$$

Untuk menghitung besarnya debit diperlukan menghitung luas penampang dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} A &= \text{Lebar flume (B) x Tinggi air (h)} \\ &= 0,15 \times 0,03 \\ &= 0,0045 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Setelah didapatkan kecepatan aliran dan luas penampang, kemudian menghitung besarnya debit (Q). Untuk menghitung besarnya debit digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q &= A \times V \\ &= 0,0045 \times 0,882 \\ &= 0,004 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

Data hasil perhitungan uji aliran yang dilakukan disajikan secara lengkap pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Debit Aliran

b	T	H	V	A	Q
m	det	m	m/det	m ²	m ³ /det
0,15	4,65	0,030	0,882	0,0045	0,004
	5,2	0,025	0,788	0,0038	0,003
	6,5	0,020	0,631	0,0030	0,002
	7,35	0,015	0,558	0,0023	0,001
	9,7	0,010	0,423	0,0015	0,0006

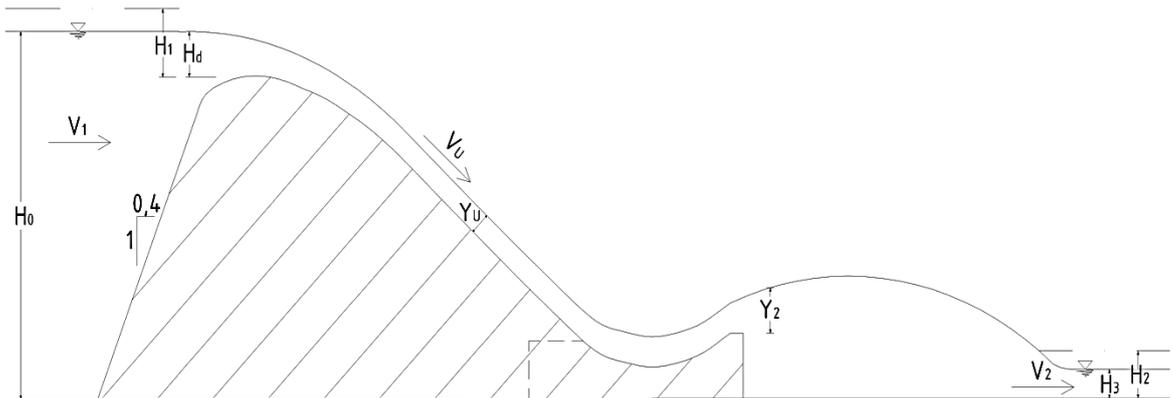
(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

C. Pengolahan Data Hasil Pengujian

Data yang didapatkan dari hasil uji laboratorium kemudian dilakukan kajian. Pengkajian tersebut meliputi tinggi muka air di hulu bendung (H₀), menghitung tinggi energi diatas mercu bendung (H₁), menghitung tinggi energi di hilir bendung

(H_2), mengukur tinggi muka air di hilir bendung (H_3), menghitung tinggi muka air diatas mercu bendung (H_d), menghitung kecepatan aliran air yang melintas pada hulu bendung (V_1), menghitung kecepatan aliran yang melintas pada hilir bendung (V_2), menghitung kecepatan awal loncatan air (V_u), menghitung kedalaman awal loncatan air (Y_u),

menghitung kedalaman air diatas ambang ujung (Y_2), menghitung bilangan Froude di hulu (Fr_0), menghitung bilangan Froude di awal loncatan air (Fr_1), menghitung bilangan Froude di atas ambang ujung kolam olak (Fr_2) dan mengukur panjang loncatan air (L_j). Berikut disajikan secara lengkap pada gambar berikut ini.



Gambar 11. Parameter Data yang Diolah
 (Sumber : AutoCad,2022)

a. Ketinggian Muka Air

Ketinggian muka air diperlukan untuk menghitung beda tinggi energi, beda tinggi energi diperlukan untuk meredam energi pada kolam olak. Untuk menghitung tinggi muka air diatas mercu (H_d) menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 H_d &= H_0 - P \\
 &= 0,182 \text{ m} - 0,150 \text{ m} \\
 &= 0,032 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Untuk menghitung kecepatan aliran di hulu dan hilir bendung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{Q}{(H_0 \cdot B)} \\
 &= \frac{0,004}{(0,182 \times 0,150)} \\
 &= 0,147 \text{ m/det} \\
 V_2 &= \frac{Q}{(H_3 \cdot B)} \\
 &= \frac{0,004}{(0,014 \times 0,150)} \\
 &= 1,905 \text{ m/det}
 \end{aligned}$$

Data hasil perhitungan tinggi air diatas mercu (H_d), kecepatan air di hulu bendung (V_1) dan kecepatan air di hilir bendung (V_2) disajikan dengan lengkap pada tabel sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil Perhitungan H_d, V_1, V_2

Variasi kemiringan	Debit m^3/det	H_0 (m)	H_3 (m)	H_d (m)	V_1 (m/det)	V_2 (m/det)
1 / 0,6	0,004	0,182	0,014	0,032	0,147	1,905
	0,003	0,175	0,013	0,025	0,114	1,538
	0,002	0,167	0,012	0,017	0,080	1,111
	0,001	0,161	0,009	0,011	0,041	0,741
	0,0006	0,154	0,008	0,004	0,026	0,500
1 / 0,4	0,004	0,190	0,015	0,040	0,140	1,778
	0,003	0,188	0,014	0,038	0,106	1,429

	0,002	0,170	0,013	0,020	0,078	1,026
	0,001	0,165	0,011	0,015	0,040	0,606
	0,0006	0,158	0,010	0,008	0,025	0,400
1 / 0,3	0,004	0,200	0,020	0,050	0,133	1,333
	0,003	0,195	0,018	0,045	0,103	1,111
	0,002	0,183	0,017	0,033	0,073	0,784
	0,001	0,177	0,015	0,027	0,038	0,444
	0,0006	0,162	0,011	0,012	0,025	0,364

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

b. Tinggi Energi Air

Kecepatan yang tinggi menyebabkan bertambahnya kehilangan tinggi energi. Oleh karena itu keseimbangan antara kecepatan yang tinggi dan kehilangan tinggi energi yang diizinkan harus tetap dijaga. Kehilangan tinggi energi terdiri dari kehilangan energi akibat gesekan dan kehilangan energi akibat terjunan.

Untuk menghitung tinggi energi air di hulu (H_1) dan di hilir (H_2) bendung menggunakan persamaan :

Tabel 3. Hasil Perhitungan H_1 , H_2

Variasi kemiringan	Debit m^3/det	V_1 (m/det)	V_2 (m/det)	H_0 (m)	H_3 (m)	H_1 (m)	H_2 (m)
1 / 0,6	0,004	0,147	1,905	0,182	0,014	0,183	0,199
	0,003	0,114	1,538	0,175	0,013	0,176	0,134
	0,002	0,080	1,111	0,167	0,012	0,167	0,075
	0,001	0,041	0,741	0,161	0,009	0,161	0,037
	0,0006	0,026	0,500	0,154	0,008	0,154	0,021
1 / 0,4	0,004	0,040	0,606	0,190	0,015	0,190	0,034
	0,003	0,025	0,400	0,188	0,014	0,188	0,022
	0,002	0,133	1,333	0,170	0,013	0,171	0,104
	0,001	0,103	1,111	0,165	0,011	0,166	0,074
	0,0006	0,073	0,784	0,158	0,010	0,158	0,041
1 / 0,3	0,004	0,133	1,333	0,200	0,020	0,201	0,111
	0,003	0,103	1,111	0,195	0,018	0,196	0,081
	0,002	0,073	0,784	0,183	0,017	0,183	0,048
	0,001	0,038	0,444	0,177	0,015	0,177	0,025
	0,0006	0,025	0,364	0,162	0,011	0,162	0,018

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

$$\begin{aligned}
 H_1 &= H_0 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \\
 &= 0,182 + \frac{0,147^2}{2 \times 9,81} \\
 &= 0,183 \text{ m} \\
 H_2 &= H_3 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \\
 &= 0,014 + \frac{1,905^2}{2 \times 9,81} \\
 &= 0,199 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Data hasil perhitungan tinggi energi air di hulu (H_1) dan di hilir (H_2) bendung disajikan dengan lengkap pada tabel sebagai berikut :

c. Kecepatan dan Ketinggian Loncatan Air

Loncatan air merupakan salah satu contoh bentuk aliran berubah cepat (*rapidly varied flow*). Dengan peristiwa loncatan air di hilir bendung dapat mengurangi energi aliran. Panjang loncatan hidrolis air dapat di definisikan sebagai jarak antara permukaan depan loncatan air sampai menuju pada suatu titik permukaan gulungan ombak di bagian hilir. Dalam menghitung kecepatan awal loncatan air menggunakan rumus sebagai berikut :

$$V_u = \sqrt{2 \cdot g \cdot (0,5 \cdot H_1 + Z)}$$

Dengan Z merupakan tinggi jatuh air, yaitu tinggi pelimpah + tinggi energi di hulu bendung dikurangi tinggi energi di hilir, sehingga didapat perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z &= (P + H_d) - H_3 \\ &= (0,150 + 0,032) - 0,014 \\ &= 0,168 \text{ m} \end{aligned}$$

Kemudian kecepatan aliran saat awal loncatan air :

$$\begin{aligned} V_u &= \sqrt{2 \cdot g \cdot (0,5 \cdot H_1 + Z)} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (0,5 \cdot 0,183 + 0,168)} \\ &= 2,257 \text{ m/det} \end{aligned}$$

Setelah diketahui kecepatan awal loncatan air, maka bisa dihitung kedalaman air saat awal loncatan menggunakan persamaan sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Perhitungan Z, V_u, Y_u, Fr, Y₂

Variasi kemiringan	Debit m ³ /det	H _d (m)	H ₃ (m)	Z (m)	H ₁ (m)	V _u (m/det)	Y _u (m)	Fr	Y ₂ (m)
1 / 0,6	0,004	0,032	0,014	0,168	0,183	2,257	0,012	6,628	0,105
	0,003	0,025	0,013	0,162	0,176	2,214	0,009	7,437	0,091
	0,002	0,017	0,012	0,155	0,167	2,164	0,006	8,802	0,074
	0,001	0,011	0,009	0,152	0,161	2,136	0,003	12,207	0,052
	0,0006	0,004	0,008	0,146	0,154	2,092	0,002	15,273	0,040
1 / 0,4	0,004	0,040	0,015	0,175	0,190	2,302	0,012	6,828	0,106
	0,003	0,038	0,014	0,174	0,188	2,293	0,009	7,840	0,092
	0,002	0,020	0,013	0,157	0,171	2,181	0,006	8,906	0,074
	0,001	0,015	0,011	0,154	0,166	2,155	0,003	12,373	0,053
	0,0006	0,008	0,010	0,148	0,158	2,111	0,002	15,484	0,041
1 / 0,3	0,004	0,050	0,020	0,180	0,201	2,346	0,011	7,024	0,107
	0,003	0,045	0,018	0,177	0,196	2,322	0,009	7,987	0,093

$$\begin{aligned} Y_u &= \frac{Q}{B \cdot V_u} \\ &= \frac{0,004}{0,15 \cdot 2,257} \\ &= 0,012 \text{ m} \end{aligned}$$

Dengan diketahui V_u dan Y_u , kemudian dapat dihitung bilangan *Froude* menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Fr &= \frac{V_u}{\sqrt{g \cdot Y_u}} \\ &= \frac{2,257}{\sqrt{9,81 \cdot 0,012}} \\ &= 6,628 \end{aligned}$$

Dengan diketahui bilangan *Froude* sebesar 6,628 dan kedalaman awal loncatan air, maka kedalaman air diatas ambang ujung didapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{Y_2}{Y_u} &= \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot Fr^2} - 1) \\ Y_2 &= \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot Fr^2} - 1) \cdot Y_u \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{1 + 8 \cdot 6,628^2} - 1) \cdot 0,012 \\ &= 0,105 \text{ m} \end{aligned}$$

Data hasil perhitungan tinggi jatuh air (Z), Kecepatan awal loncatan air (V_u), Kedalaman awal loncatan air (Y_u), Bilangan *Froude* (Fr) dan kedalaman air diatas ambang ujung (Y₂) disajikan lengkap pada tabel sebagai berikut :

	0,002	0,033	0,017	0,166	0,183	2,248	0,006	9,321	0,075
	0,001	0,027	0,015	0,162	0,177	2,217	0,003	12,909	0,053
	0,0006	0,012	0,011	0,151	0,162	2,134	0,002	15,732	0,041

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

d. Perhitungan Bilangan Froude

Bilangan Froude saat di hulu bendung didapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

Bilangan Froude di hulu :

$$Fr_0 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot H_0}}$$

$$= \frac{0,147}{\sqrt{9,81 \cdot 0,182}}$$

$$= 0,110$$

Bilangan Froude di awal loncatan air :

$$Fr_1 = \frac{V_u}{\sqrt{g \cdot Y_u}}$$

$$= \frac{2,257}{\sqrt{9,81 \cdot 0,012}}$$

$$= 6,628$$

Bilangan Froude di ambang ujung kolam olak :

$$Fr_2 = \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot Y_2}}$$

$$= \frac{1,905}{\sqrt{9,81 \cdot 0,105}}$$

$$= 1,877$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan Fr₀, Fr₁, Fr₂

Variasi kemiringan	Debit m ³ /det	V ₁ (m/det)	H ₀ (m)	Fr ₀	V _u (m/det)	Y _u (m)	Fr ₁	V ₂ (m/det)	Y ₂ (m)	Fr ₂
1 / 0,6	0,004	0,147	0,182	0,110	2,257	0,012	6,628	1,905	0,105	1,877
	0,003	0,114	0,175	0,087	2,214	0,009	7,437	1,538	0,091	1,632
	0,002	0,080	0,167	0,062	2,164	0,006	8,802	1,111	0,074	1,307
	0,001	0,041	0,161	0,033	2,136	0,003	12,207	0,741	0,052	1,034
	0,0006	0,026	0,154	0,021	2,092	0,002	15,273	0,500	0,040	0,795
1 / 0,4	0,004	0,140	0,190	0,103	2,302	0,012	6,828	1,778	0,106	1,742
	0,003	0,106	0,188	0,078	2,293	0,009	7,840	1,429	0,092	1,500
	0,002	0,078	0,170	0,061	2,181	0,006	8,906	1,026	0,074	1,204
	0,001	0,040	0,165	0,032	2,155	0,003	12,373	0,606	0,053	0,844
	0,0006	0,025	0,158	0,020	2,111	0,002	15,484	0,400	0,041	0,634
1 / 0,3	0,004	0,133	0,200	0,095	2,346	0,011	7,024	1,333	0,107	1,299
	0,003	0,103	0,195	0,074	2,322	0,009	7,987	1,111	0,093	1,163
	0,002	0,073	0,183	0,054	2,248	0,006	9,321	0,784	0,075	0,913
	0,001	0,038	0,177	0,029	2,217	0,003	12,909	0,444	0,053	0,614
	0,0006	0,025	0,162	0,020	2,134	0,002	15,732	0,364	0,041	0,575

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

D. Pembahasan Data Hasil Perhitungan

Setelah data laboratorium diolah kemudian semua data hasil olahan dimasukkan kedalam grafik berikut disajikan secara lengkap sebagai berikut :

a. Analisis Pengaruh Variasi Kemiringan Terhadap Kecepatan Aliran

Pada Penelitian yang dilakukan mengamati beberapa kecepatan yaitu :

Kecepatan di hulu bendung (V_1), kecepatan awal loncatan (V_u), dan kecepatan di hilir bendung (V_2). Kecepatan di hulu bendung merupakan kecepatan yang paling rendah, karena disebabkan adanya efek

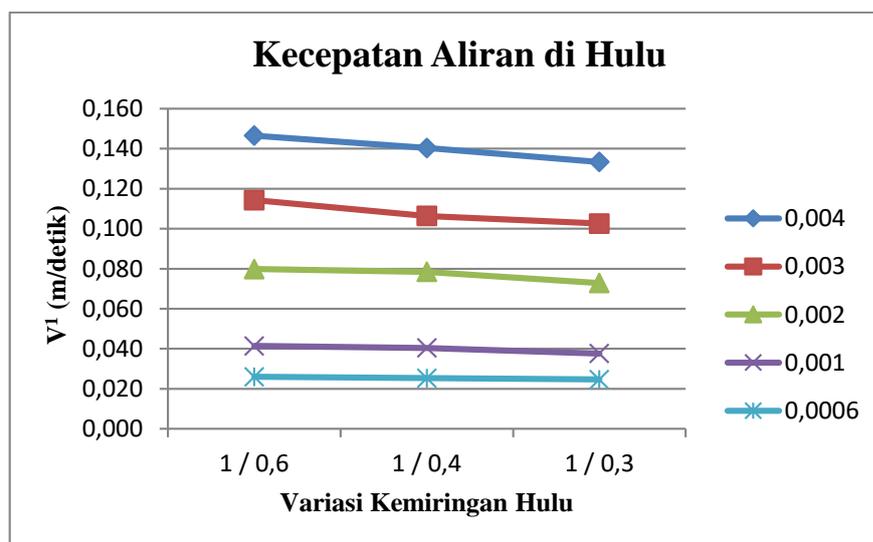
pembendungan, kecepatan awal loncatan merupakan kecepatan yang paling tinggi karena adanya penurunan air.

Berikut tabel kecepatan disajikan pada tabel 4.7

Tabel 6. Kecepatan Aliran

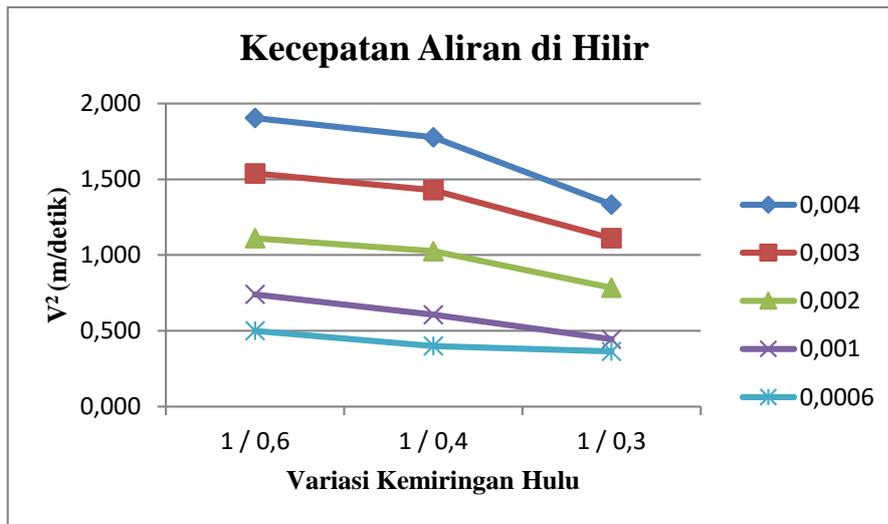
Variasi kemiringan	Debit m^3/det	V_1 (m/det)	V_u (m/det)	V_2 (m/det)
1 / 0,6	0,004	0,147	2,257	1,905
	0,003	0,114	2,214	1,538
	0,002	0,080	2,164	1,111
	0,001	0,041	2,136	0,741
	0,0006	0,026	2,092	0,500
1 / 0,4	0,004	0,140	2,302	1,778
	0,003	0,106	2,293	1,429
	0,002	0,078	2,181	1,026
	0,001	0,040	2,155	0,606
	0,0006	0,025	2,111	0,400
1 / 0,3	0,004	0,133	2,346	1,333
	0,003	0,103	2,322	1,111
	0,002	0,073	2,248	0,784
	0,001	0,038	2,217	0,444
	0,0006	0,025	2,134	0,364

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)



Gambar 12. Grafik Kecepatan Aliran Hulu

(Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)



Gambar 13. Grafik Kecepatan Aliran Hilir
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)

Dari grafik V_1 diatas dapat disimpulkan bahwa semakin landai kemiringan hulu bendung, semakin tinggi kecepatannya. Begitu juga dengan kecepatan awal loncatan air dan kecepatan aliran di hilir dilihat dari data kecepatan aliran dengan kemiringan hulu (1/0,6), (1/0,4), (1/0,3) data kecepatan alirannya semakin menurun.

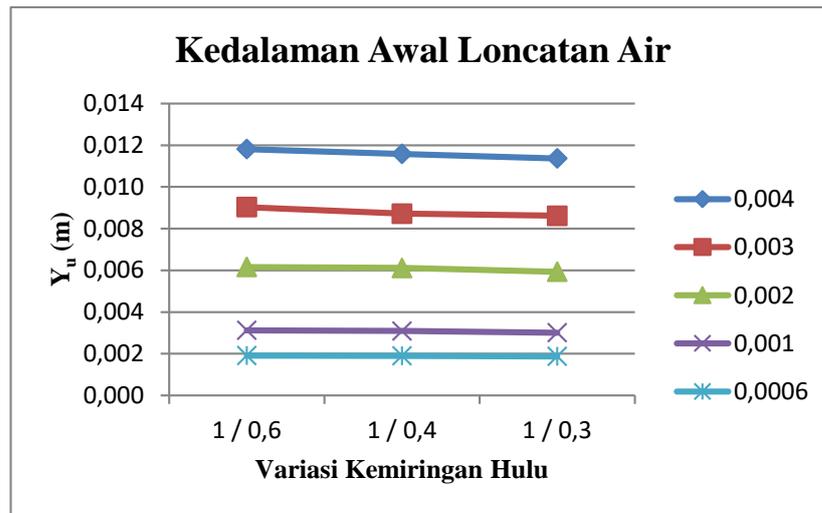
b. Analisis Pengaruh Variasi Kemiringan Terhadap Loncatan Air

Penelitian yang dilakukan di laboratorium mengamati kedalaman awal loncatan air (Y_u) dan ketinggian loncatan air diatas ambang ujung (Y_2). Berikut data ketinggian loncatan air disajikan dalam tabel sebagai berikut :

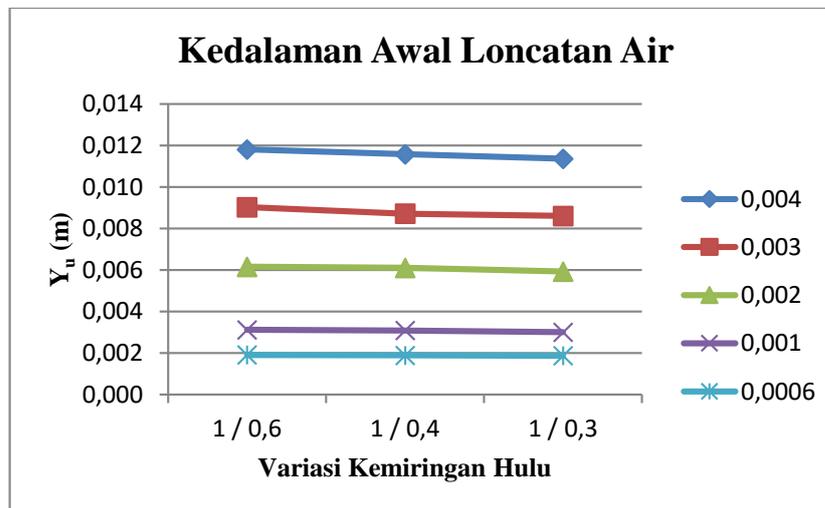
Tabel 7. Ketinggian Loncatan Air

Variasi kemiringan	Debit m^3/det	Y_u (m)	Y_2 (m)
1 / 0,6	0,004	0,012	0,105
	0,003	0,009	0,091
	0,002	0,006	0,074
	0,001	0,003	0,052
	0,0006	0,002	0,040
1 / 0,4	0,004	0,012	0,106
	0,003	0,009	0,092
	0,002	0,006	0,074
	0,001	0,003	0,053
	0,0006	0,002	0,041
1 / 0,3	0,004	0,011	0,107
	0,003	0,009	0,093
	0,002	0,006	0,075
	0,001	0,003	0,053
	0,0006	0,002	0,041

(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)



Gambar 14. Grafik Kedalaman Awal Loncatan
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)



Gambar 15. Grafik Tinggi Loncatan Air
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa semakin besar debit aliran maka tinggi loncatan semakin besar. Bisa dilihat tinggi loncatan air dengan debit 0,004 m³/detik ke 0,0006 m³/detik, ketinggian loncatan air pada kemiringan hulu bendung 1/0,6 yaitu = 0,105 m, 0,091 m, 0,074 m, 0,052 m dan 0,040 m. Dari grafik diatas juga dapat diketahui bahwa bendung dengan kemiringan hulu 1/0,6 adalah yang paling efektif karena mempunyai tinggi loncatan air yang paling rendah pada setiap perubahan debit aliran.

c. Analisis Pengaruh Variasi Kemiringan Terhadap Bilangan Froude

Pengaruh gravitasi terhadap aliran dapat dinyatakan dengan bilangan Froude, bilangan Froude yang diteliti yaitu bilangan Froude di hulu bendung (Fr_0), di awal/sebelum loncatan air (Fr_1) dan pada loncatan air (Fr_2). Berikut data bilangan Froude disajikan dalam tabel sebagai berikut :

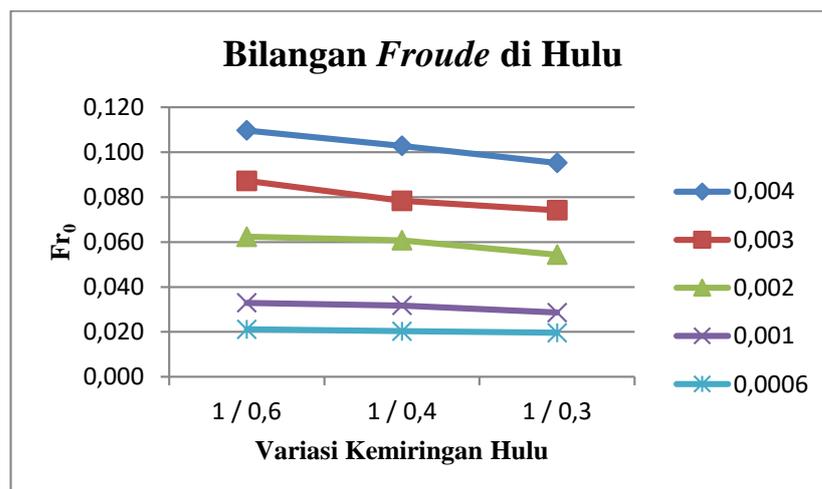
Tabel 8. Bilangan *Froude*

Variasi kemiringan	Debit m ³ /det	Fr ₀	Fr ₁	Fr ₂
1 / 0,6	0,004	0,110	6,628	1,877
	0,003	0,087	7,437	1,632
	0,002	0,062	8,802	1,307
	0,001	0,033	12,207	1,034
	0,0006	0,021	15,273	0,795
1 / 0,4	0,004	0,103	6,828	1,742
	0,003	0,078	7,840	1,500
	0,002	0,061	8,906	1,204
	0,001	0,032	12,373	0,844
	0,0006	0,020	15,484	0,634
1 / 0,3	0,004	0,095	7,024	1,299
	0,003	0,074	7,987	1,163
	0,002	0,054	9,321	0,913
	0,001	0,029	12,909	0,614
	0,0006	0,020	15,732	0,575

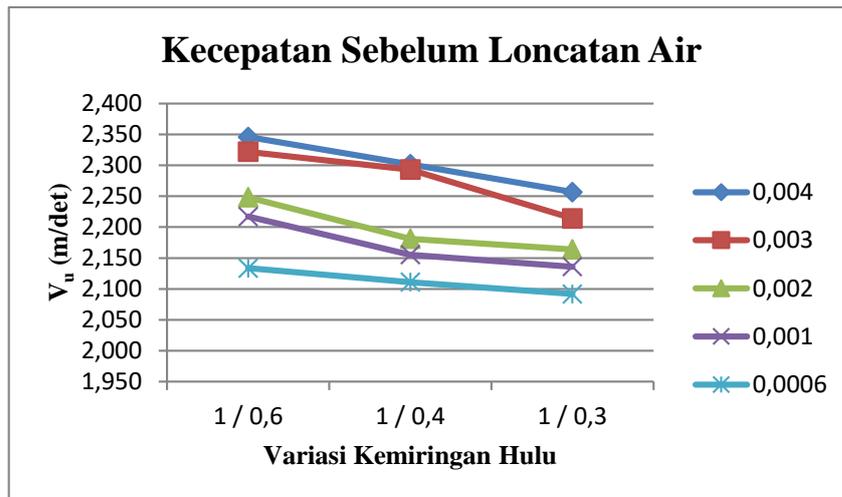
(Sumber : Hasil Perhitungan, 2022)

Bilangan *Froude* bertujuan untuk mengetahui dan menetapkan jenis aliran yang terjadi dalam saluran pada saat proses pengaliran. Melalui bilangan *Froude* juga dalam penelitian dapat mengklasifikasi karakteristik aliran. Klasifikasi aliran dapat dilakukan dengan mengacu pada bilangan

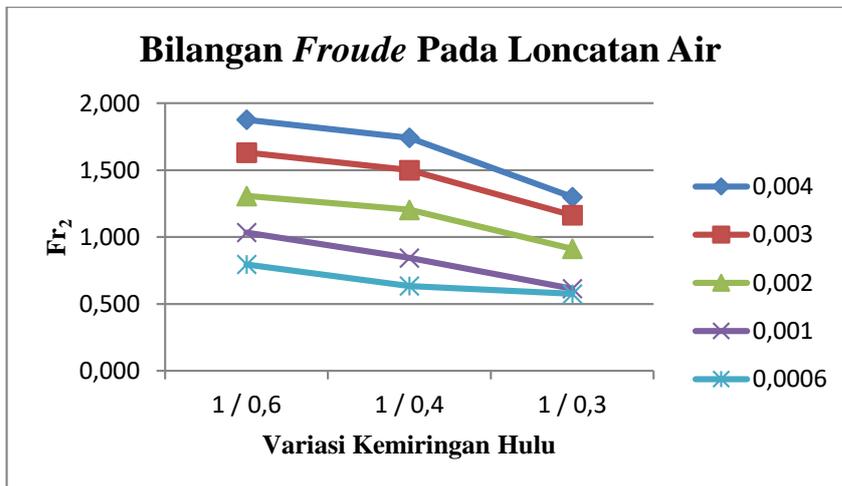
Froude (*Fr*) tak berdimensi, dimana acuan dengan bilangan *Froude* yang ada dapat digolongkan menjadi tiga golongan yaitu $Fr < 1,00$ adalah aliran subkritis, $Fr = 1,00$ adalah aliran kritis dan $Fr > 1,00$ adalah aliran superkritis.



Gambar 16. Grafik Bilangan *Froude* Hulu
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)



Gambar 17. Grafik *Froude* Awal Loncatan
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)



Gambar 18. Grafik *Froude* Loncatan Air
 (Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui bahwa Fr_0 pada semua variasi kemiringan hulu bendung memiliki nilai angka *Froude* $<1,00$ yaitu subkritis. Pada gambar 4.13 dapat diketahui bilangan *Froude* awal loncatan air (Fr_1) memiliki nilai angka *Froude* $>1,00$ yaitu superkritis pada semua variasi kemiringan hulu bendung. Terjadi kenaikan nilai angka *Froude* setelah melewati bangunan pelimpah, yang sebelumnya aliran subkritis menjadi superkritis. Berdasarkan grafik (Fr_1), juga dapat diketahui bahwa pada setiap bertambahnya debit aliran bilangan *Froude* yang diperoleh semakin kecil.

Bilangan *Froude* maksimal terjadi pada debit 0,0006 dengan kemiringan hulu 1/0,3 dengan nilai *Froude* 15,732.

Pada gambar 4.14 Grafik bilangan *Froude* pada loncatan air (Fr_2) dapat dilihat pada semua variasi kemiringan hulu bendung memiliki nilai bilangan *Froude* $>1,00$ pada debit 0,004 dan 0,003 $m^3/detik$, pada debit yang lebih kecil yaitu 0,002, 0,001 dan 0,0006 $m^3/detik$ bilangan *Froude* $<1,00$ yaitu aliran subkritis. Pada penelitian tersebut dapat disimpulkan aliran pada hulu bendung merupakan aliran subkritis ($Fr < 1,00$) kemudian menjadi superkritis ($Fr > 1,00$) setelah melewati bangunan pelimpah,

kemudian kembali menjadi aliran subkritis ($Fr < 1,00$) pada saat diatas ambang ujung kolam olak / loncatan air dan ber angsur-angsur normal kembali pada saat berada di hilir.

E. Hasil Perhitungan di Lapangan

Lokasi penelitian pemodelan mercu bendung yang lebih besar dilakukan di Dusun Sumber Salak, Kelurahan Kranjingan, Kecamatan

Sumbersari, Kabupaten Jember. Disajikan pada gambar di bawah ini :



Gambar 19. Peta Lokasi Penelitian
 (Sumber : Google Earth, 2022)

Elevasi mercu bendung dirancang sedemikian rupa untuk tujuan menerjunkan sejumlah air ke tempat lain yang lebih rendah dengan memperhatikan berbagai kehilangan tinggi air.

Menghitung luas penampang (A) pada saluran dengan cara melakukan pengukuran lapangan terhadap tinggi muka air (h) diatas bendung dan lebar saluran (b), disajikan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Luas penampang (A)} &= h \times b \\ &= 0,25 \times 0,60 \\ &= 0,15 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Kemudian pengukuran kecepatan aliran, untuk menghitung waktu dilakukan sebanyak tiga kali trial untuk mendapatkan waktu rata-rata air di lapangan, dengan hasil sebagai berikut :

$$\text{Waktu (t)} = \frac{t_1+t_2+t_3}{3}$$

$$\text{Waktu (t)} = \frac{6,23 + 6,38 + 6,32}{3} = 6,31 \text{ det}$$

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan aliran (v)} &= \text{jarak} / \text{waktu} \\ &= 6 / 6,31 \\ &= 0,95 \text{ m/det} \end{aligned}$$

Kemudian dilakukan perhitungan debit yang mengalir pada saluran

$$\begin{aligned} \text{Debit aliran (Q)} &= A \times V \\ &= 0,15 \times 0,95 \\ &= 0,143 \text{ m}^3/\text{det} \end{aligned}$$

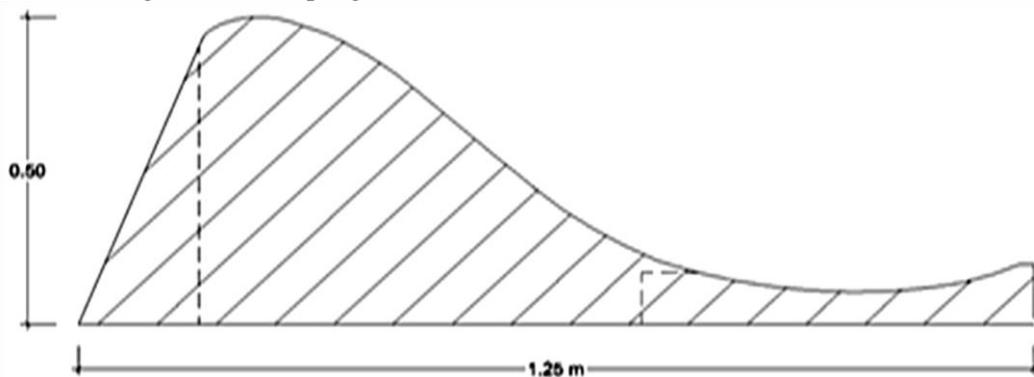


Gambar 20. Pengukuran di Lapangan

(Sumber : Dokumentasi Pribadi, 2022)

Data-data yang didapatkan dari pengukuran di lapangan dengan cara metode ukur yaitu antara lain :

Lebar saluran	= 0,60 m
Tinggi saluran	= 0,81 m
Tinggi muka air	= 0,25 m
Debit air	= 0,143 m ³ /det
Kecepatan	= 0,95 m/det



Gambar 21. Pemodelan Mercu di Lapangan

(Sumber : AutoCAD, 2022)

Hasil penelitian dilapangan dihasilkan panjang loncatan 0,40 dengan kecepatan di hulu bendung (V_1) = 0,433 m/det, kecepatan di hilir bendung (V_2) = 2,383 m/det dan Tinggi loncatan air (Y_2) = 0,403 m. Dari hasil penelitian juga didapatkan nilai bilangan froude di hulu (Fr_0) = 0,187 yaitu adalah aliran subkritis, bilangan froude pada loncatan air (Fr_1) = 4,963 yaitu aliran subkritis dan bilangan froude di hilir bendung (Fr_2) = 1,198 yaitu aliran subkritis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dianalisa, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Variasi kemiringan hulu bendung mercu tipe ogee berpengaruh terhadap kecepatan aliran, bahwa semakin landai kemiringan hulu bendung semakin tinggi

kecepatan alirannya (V_1). Dari kemiringan (1/0,6), (1/0,4), (1/0,3) data kecepatan alirannya semakin menurun.

2. Pengaruh variasi kemiringan hulu terhadap tinggi loncatan air mengalami perubahan, dimana semakin besar debit aliran yang melewati mercu bendung maka tinggi loncatan air juga semakin besar. Dari hasil penelitian diketahui bendung dengan kemiringan 1/0,6 adalah yang paling efektif karena mempunyai tinggi loncatan air (Y_2) yang paling rendah pada setiap perubahan debit aliran.
3. Pengaruh variasi kemiringan hulu bendung terhadap panjang loncatan air mengalami perubahan dimana semakin landai kemiringan hulu bendung, panjang loncatan air juga semakin panjang. Dengan nilai pada kemiringan hulu bendung 1/0,6 - 1/0,3 pada debit 0,004 m³/det yaitu 0,230 m, 0,225 m, 0,220 m.
4. Karakteristik aliran pada bagian hulu bendung (Fr_0) merupakan aliran subkritis, setelah aliran melewati pelimpah (Fr_1) aliran berubah menjadi superkritis, kemudian kembali menjadi aliran subkritis pada saat di ambang ujung kolam olak / loncatan air (Fr_2) dan berangsur-angsur normal kembali pada saat di hilir.

B. Saran

Berdasarkan tugas akhir “Pemodelan Hidrolik Aliran pada Bendung dengan Mercu Tipe Ogee” untuk penelitian selanjutnya disarankan beberapa hal seperti berikut :

1. Kapasitas tank di laboratorium diperbesar karena ketika proses running air dalam tank cepat habis, setelah aliran stabil pengukuran harus dilakukan dengan cepat.
2. Penelitian selanjutnya diharapkan mencoba mengkombinasikan mercu bendung tipe ogee dengan kolam olak yang lain, seperti kolam olak tipe vluhter dan USBR, juga penambahan variasi debit dan variasi kemiringan hulu bendung.

6. DAFTAR PUSTKA

- Anonim. 2013. *Standart Perencanaan irigasi KP – 03*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Hayat, Reski. (2020). *Pengaruh Bentuk Mercu Bendung Tipe Ogee Terhadap Gerusan di Hilir Peredam Energi USBR III*. Universitas Muhammadiyah Makassar, Makassar
- Junaidi, F. F. (2014). Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. *Analisis Distribusi Kecepatan Aliran Sungai Musi (Ruas Jembatan Ampere Sampai Dengan Pulau Kemaro)* , 542-552.
- Mawardi. E, Memed, M. (2002). *Desain Hidraulik Bendung Tetap*. Bandung: Alfabeta.
- Raju, Ranga. (1986). *Aliran Melalui Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga.
- Rizal, Nanang Saiful, 2014. *Aplikasi Perencanaan Irigasi dan Bangunan Air*. LPPM. Universitas Muhammadiyah Jember, Jember.
- Triatmojo, B. (2008). *Hidraulika II*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmojo, B. (2012). *Hidraulika II*. Yogyakarta: Beta Offset
- Triatmojo, B. (2013). *Hidraulika II*. Yogyakarta: Beta Offset.