

# BENDUNG BERTANGGA SEBAGAI ALTERNATIF PADA PERENCANAAN BANGUNAN IRIGASI

## STEPPED WEIR AS AN ALTERNATIVE DESIGN OF IRRIGATION STRUCTURE

Oleh:

Denik Sri Krisnayanti<sup>1)</sup>, Very Dermawan<sup>2)</sup>, M. Sholichin<sup>2)</sup>, Suhardjono<sup>2)</sup>,  
Dian Noorvy Khaerudin<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto Penfui, Kupang, Indonesia

<sup>2)</sup> Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya  
Jl. MT. Haryono 167, Malang, Indonesia

<sup>3)</sup> Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tribuwana Tungadewi  
Jl. Telaga Warna Tlogomas, Malang, Indonesia

Komunikasi penulis, email: denik.krisnayanti@gmail.com, Telp: +62-8123794142

Naskah ini diterima pada 19 Januari 2017; revisi pada 3 Maret 2017;  
disetujui untuk dipublikasikan pada 28 April 2017

### ABSTRACT

*Stepped weir is generally a modification on the downstream face of a standard ogee weir. The overflow on stepped weir classified in to three types: nappe flow, transition flow, and skimming flow. The skimming flow more used in planning the weir because almost all the operations of weir for large discharge. This study aimed to investigate and examine the advantages of stepped weir by conducting variations models such as slope angle of weir, number of steps, and the value of Froude number. In this research, the models test of stepped spillway carried out with two models of weir type were the ogee weir and the stepped weir. The slope of stepped spillway ( $\theta$ ) are used  $30^\circ$  and  $45^\circ$ , the number of steps ( $N$ ) are 40 and 20, and the critical depth to the height of steps ( $y_c/h$ ) ranging from  $0,700 < y_c/h < 3,00$  with the Froude number ( $Fr$ )  $< 10$ . The results showed that friction factor of Darcy-Weisbach ( $f$ ) for the stepped weir is 0.311 which affect the value of energy loss. Levels of dissolved oxygen at stepped weir flow increased by 2.011% - 2.846%. The value of relative energy losses ( $\Delta E_1/E_0$ ) are 86.129% on the stepped weir and 72.466% on the ogee weir. The increase in value relative energy loss will affect the length of stilling basin in the downstream.*

**Keywords:** *stepped weir, relative energy loss, dissolved oxygen, skimming flow, friction factor*

### ABSTRAK

Bendung bertangga merupakan modifikasi dari profil standar untuk bendung tipe ogee. Aliran yang melimpas pada bendung bertangga diklasifikasikan menjadi tiga tipe, yaitu aliran bebas, aliran transisi dan aliran tenggelam. Aliran tenggelam ini lebih banyak digunakan dalam perencanaan bendung dikarenakan hampir semua pengoperasian bendung adalah untuk perhitungan debit besar. Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan mengetahui keunggulan bendung bertangga dengan melakukan variasi perlakuan model meliputi sudut kemiringan, jumlah anak tangga dan nilai bilangan Froude. Penelitian ini dilakukan pengujian terhadap dua model tipe bendung yakni bendung ogee dan bendung bertangga pada kondisi aliran tenggelam. Untuk variasi sudut kemiringan pelimpah ( $\theta$ ) yang digunakan  $30^\circ$  dan  $45^\circ$ , jumlah anak tangga ( $N$ ) 40 dan 20 serta kedalaman kritis terhadap tinggi tangga ( $y_c/h$ ) berkisar  $0,70 < y_c/h < 3,00$ . Model penelitian ini menggunakan bilangan Froude ( $Fr$ )  $< 10$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor gesekan Darcy Weisbach ( $f$ ) untuk bendung bertangga adalah 0,311 yang mempengaruhi terhadap nilai kehilangan energi. Kadar oksigen terlarut pada aliran bendung bertangga meningkat sebesar 2,011% - 2,846%. Sedangkan nilai kehilangan energi relatif ( $\Delta E_1/E_0$ ) pada bendung bertangga adalah 86,129% dan bendung ogee adalah 72,466%. Peningkatan nilai kehilangan energi relatif akan mempengaruhi terhadap panjang kolam olak di hilir bendung.

**Kata kunci:** **bendung bertangga, kehilangan energi relatif, oksigen terlarut, aliran tenggelam, koefisien gesekan**

## I. PENDAHULUAN

Bendung atau yang dikenal dengan *weir* berfungsi untuk meninggikan muka air sungai dan mengalirkan sebagian aliran air sungai yang ada ke arah tepi kanan atau tepi kiri sungai ke dalam saluran melalui sebuah bangunan pengambilan jaringan irigasi. Bendung bertangga ini juga semakin populer digunakan dalam penanganan debit besar dikarenakan bentuk desain yang dapat meningkatkan stabilitas struktur atau kemampuan dalam menghilangkan energi kinetik aliran (peredaman energi).

Peredaman energi pada saluran di pelimpah bendung berguna untuk mencegah erosi yang dapat terjadi pada hilir bendung. Kikisan dan gerusan adalah proses gesekan pada permukaan dasar saluran atau sungai yang menyebabkan lapisan itu terkelupas sedikit demi sedikit. Makin tinggi kecepatan aliran, makin besar kikisan atau gerusan yang terjadi. Kecepatan aliran yang tinggi menyebabkan terjadinya tekanan rendah/ negatif sehingga mengakibatkan kavitasasi pada dinding saluran lurus. Gaya yang disebabkan oleh tekanan negatif akan menarik unsur-unsur pada struktur bangunan hidraulik yang selanjutnya akan mengakibatkan pengelupasan pada permukaan dasar bangunan. Lama kelamaan pengelupasan dasar bangunan hidraulik akan membentuk lubang kecil yang selanjutnya menjadi lubang besar yang membahayakan struktur hidraulik. Untuk mengurangi kemampuan aliran dalam mengikis dasar saluran, maka salah satu cara adalah memperkecil kecepatan aliran. Kecepatan aliran dikurangi dengan memperkecil energi limpasan yang lewat di atas saluran. Tangga-tangga yang dibangun pada permukaan hilir bendung bisa mengurangi energi limpasan yang terjadi di hilir bendung.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perilaku hidraulik bendung bertangga pada kondisi aliran tenggelam, parameter terpenting yang bisa diamati adalah jumlah anak tangga yang berpengaruh terhadap kehilangan energi. Sehingga untuk menguji karakteristik aliran tenggelam dilakukan variasi terhadap bentuk bendung bertangga meliputi kedalaman kritis pada mercu bendung ( $y_c$ ), tinggi tangga ( $h$ ), panjang tangga ( $l$ ), dan sudut kemiringan ( $h/l = \theta$ ). Variasi pemodelan bentuk bendung bertangga dilakukan untuk menyelidiki kedalaman aliran di kaki hilir bendung ( $y_1$ ), kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik ( $y_2$ ), panjang loncatan hidraulik ( $L_j$ ), faktor gesekan Darcy Weisbach ( $f$ ), kadar oksigen terlarut, dan nilai kehilangan energi ( $\Delta E$ ). Untuk mengidentifikasi pemodelan bendung bertangga yang paling optimum dalam

mempengaruhi kehilangan energi maka dilakukan analisis statistik dengan menggunakan regresi non linier terhadap model.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Bendung Bertangga

Bendung bertangga merupakan modifikasi saluran peluncur dengan membuat beberapa tangga dari lokasi dekat puncak bendung sampai kaki di hilir bendung. Tujuan utama dari bendung bertangga adalah meningkatkan peredaman energi karena masuknya udara pada dasar aliran semu (*pseudo bottom*) dan mengurangi kelebihan energi kinetik yang terjadi pada saluran lurus.

Pada bendung bertangga, kecepatan aliran berkurang karena peredaman yang diakibatkan oleh anak-anak tangga. Tangga bertindak seperti bangunan terjun kecil yang ditempatkan secara berseri dan tiap tangga juga bertindak sebagai peredam energi kecil bagi tangga sebelumnya.

Keuntungan dari bendung bertangga adalah kemudahan konstruksi, pengurangan potensi resiko kavitasasi, dan pengurangan dimensi kolam penenang di bagian hilir kaki bendung karena peredaman energi yang signifikan di sepanjang saluran (Otto, 2006).

Pada bendung bertangga dengan kondisi aliran tenggelam, aliran yang melimpas pada anak-anak tangga berkembang dan berputar membentuk pusaran air pada sumbu horizontal di bawah dasar saluran semu dengan dibatasi ujung tangga seperti pada Gambar 1.d. Pusaran air tersebut membawa turbulensi tegangan geser antara aliran utama dengan pusaran aliran di bawah tangga. Hambatan aliran adalah jumlah hambatan permukaan dan hambatan dari pengaruh struktur tangga. Estimasi hambatan aliran ini diperlukan dalam memperhitungkan kehilangan energi akibat gesekan.

Faktor gesekan pada bendung bertangga mempengaruhi tingkat kehilangan energi. Semakin tinggi faktor gesekan, maka kecepatan aliran semakin berkurang. Kecepatan aliran yang berkurang mengakibatkan konsentrasi udara menurun. Konsentrasi udara pada aliran yang menurun akan mengakibatkan energi kinetik juga menurun. Energi kinetik yang menurun akan mengakibatkan peredaman energi yang lebih tinggi. Sehingga pengurangan resiko kavitasasi pada bendung bertangga dapat diatasi jika kecepatan yang melimpas pada saluran bendung bertangga adalah rendah.

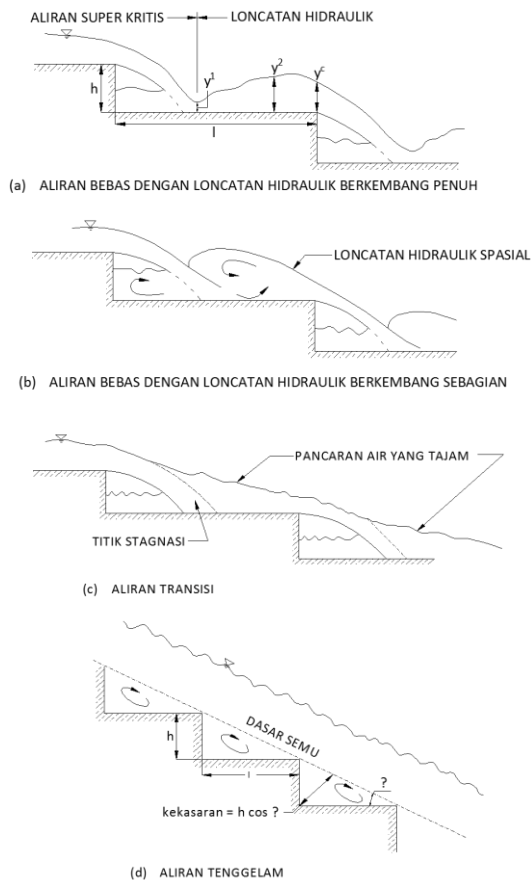
Peterka (1953) serta Russell & Sheehan (1974) seperti yang dikutip oleh Chanson (1989) telah melaksanakan eksperimen pada model bangunan

pelimpah yang terbuat dari beton menunjukkan bahwa konsentrasi udara sebesar 1% - 2% dapat mengurangi erosi karena kavitasi, sedangkan pada konsentrasi udara antara 5% - 7% erosi dapat dihentikan sama sekali. Chanson (1989) selanjutnya mengatakan bahwa masuknya udara dari atmosfer ke dalam tubuh aliran sehingga mencapai dasar aliran >7% dapat mencegah dasar bangunan pelimpah dari kejadian kavitasi.

Penelitian yang dilakukan oleh Matos (2000) dan Boes & Hager (2003), menunjukkan bahwa konsentrasi udara rata-rata pada titik pemasukan udara untuk bendung bertangga mencapai 20% - 26%. Sehingga bisa disimpulkan pula bahwa konsentrasi udara yang tinggi pada bendung bertangga juga salah satu cara dalam mengurangi resiko kavitasi.

### 2.2. Regim Aliran pada Bendung Bertangga

Menurut Khatsuria (2005) aliran yang melimpas pada bendung dengan permukaan hilir bertangga diklasifikasikan menjadi tiga tipe, yaitu aliran bebas (*nappe flow*), aliran transisi (*transition flow*) dan aliran tenggelam (*skimming flow*) seperti pada Gambar 1.



Sumber: Khatsuria (2005)

**Gambar 1** Regim Aliran di Peluncur Bendung Bertangga

Aliran bebas ditandai oleh serangkaian aliran yang jatuh bebas menimpa pada tangga di bawahnya dan diikuti oleh sebuah loncatan hidraulik sempurna atau sebagian. Kondisi ini mungkin berlaku untuk debit kecil atau bendung dengan kemiringan hilir yang relatif datar.

Aliran transisi terjadi karena meningkatnya debit air sehingga rongga udara terbentuk di bawah aliran bebas yang jatuh pada anak tangga berikutnya dengan pancaran air yang kuat melimpas pada ujung tangga mendekati kondisi stagnasi. Regim ini ditandai dengan aerasi yang signifikan, percikan air, dan permukaan aliran yang turbulen.

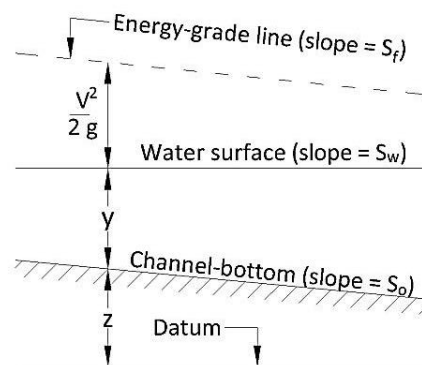
Dalam aliran tenggelam, air mengalir melalui permukaan bertangga sebagai suatu aliran yang tidak terputus. Di bagian hulu dekat puncak, alirannya nampak halus dan tidak terjadi pemasukan udara, namun di bagian hilirnya karakteristik aliran sebagian besar mengandung udara dan terjadi pusaran air yang kuat di setiap kaki tangga. Oleh karena itu peredaman energinya sebagian besar ditentukan oleh perpindahan momentum antara aliran utama dan putaran air yang terjebak di antara tangga. Semakin tinggi kecepatan aliran, maka titik pemasukan udara akan mendekati hilir kaki bendung. Hal ini menjadi rawan terhadap resiko kavitasi.

### 2.3. Kehilangan Energi

Fenomena loncatan hidraulik memudahkan dalam melakukan proses pada desain kolam olak pada hilir bendung yang lebih praktis. Kehilangan energi pada loncatan adalah sama dengan perbedaan energi spesifik sebelum dan sesudah terjadinya loncatan.

Energi spesifik adalah energi relatif terhadap dasar saluran. Besarnya energi (E) ini seperti digambarkan pada Gambar 2 adalah:

$$E = \frac{v^2}{2g} + y \dots \dots \dots (1)$$



Sumber: Chaudhry (2008)

**Gambar 2** Energi Aliran pada Saluran Terbuka

Besarnya kehilangan energi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4 y_1 y_2} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- $\Delta E$  = kehilangan tinggi energi;
- $E_1$  = tinggi energi di kaki pelimpah;
- $E_2$  = tinggi energi di hilir pelimpah;
- $y_1$  = kedalaman air di kaki pelimpah sebelum loncatan hidraulik;
- $y_2$  = kedalaman air di kaki pelimpah setelah loncatan hidraulik

Loncatan hidraulik adalah transisi cepat dari superkritis untuk aliran subkritis. Ini adalah proses turbulensi yang ekstrim, yang ditandai dengan turbulensi skala besar, gelombang permukaan dan deburan, peredaman energi dan entrainment udara. Panjang loncatan hidraulik adalah jarak antara permukaan depan loncatan hidraulik sampai suatu titik pada permukaan gelombang ombak yang segera menuju ke hilir.

Panjang loncatan hidraulik ( $L_j$ ) merupakan parameter yang penting dan berpengaruh terhadap ukuran kolam olak. Peterka (1984) meneliti bahwa akhir loncatan hidraulik diasumsikan sebagai posisi dimana kecepatan pancaran tertinggi yang mulai terlepas dari dasar dan kemudian meluncur ke arah hilir. Hasil dari penelitian Peterka ini adalah salah satu yang sering digunakan untuk menghitung panjang loncatan hidraulik pada kolam olak.

Beberapa peneliti menetapkan bahwa panjang loncatan hidraulik ( $L_j$ ) adalah:

$$L_j = 8,5 (y_2 - y_1) \dots\dots\dots (3)$$

Sebagian besar peneliti menyatakan bahwa  $L_j/y_2 = f(Fr_1)$  dengan asumsi interval  $2 \leq Fr_1 \leq 20$ .

Kolam olak sebagai tempat peredaman energi dirancang untuk menghilangkan kelebihan energi kinetik pada akhir saluran peluncur bendung sebelum menuju hilir. Dalam regim aliran tenggelam, aliran yang bergerak meluncur turun pada tubuh bendung didukung oleh vortisitas di dasar tangga. Oleh karena itu sebagian besar energi diredam pada tekanan pusaran yang menerus (Rajaratnam, 1990).

#### 2.4. Faktor Gesekan pada Aliran Tenggelam (*Friction Factor*)

Hambatan aliran pada kondisi aliran tenggelam tergantung pada beberapa faktor yakni kedalaman aliran dan geometri bendung

bertangga seperti kemiringan saluran. Faktor lain termasuk kondisi aliran seperti aliran berubah lambat laun, aliran seragam, tinggi anak tangga dan tingkat pemasukan udara (*air entrainment*). Estimasi hambatan aliran ini berdasar pada pengukuran kedalaman dan kecepatan aliran. Pengukuran ini cukup sulit dan tidak meyakinkan, karena adanya turbulensi aliran dan pemasukan udara sehingga menghasilkan peredaman energi yang terlalu tinggi (Khatsuria, 2005).

Chanson (1993) menyatakan bahwa koefisien gesekan ( $f$ ) merupakan fungsi dari Bilangan Reynolds, tinggi kekasaran ( $k_s$ ) dan kemiringan pelimpah ( $\theta$ ), dengan analisis dimensi sebagai berikut:

$$f = f_1 \left( \frac{k_s}{D_{hw}}; Re; \frac{h}{l} \right) \dots\dots\dots (4)$$

Chanson (2001) melakukan studi pada saluran curam ( $\theta = 21,8^\circ$ ,  $h = 0,1$  m,  $B = 1$  m) dan memperkirakan faktor gesekan dengan menggunakan persamaan:

$$f = \frac{4\tau_0}{1/2 \rho_w v_w^2} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

- $f$  = faktor gesekan Darcy - Weisbach;
- $\tau_0$  = tegangan geser;
- $\rho_w$  = berat jenis air bersih;
- $v_w$  = kecepatan aliran pada pelimpah anak-anak tangga

Pada studi ini, diperoleh tiga nilai koefisien gesekan yang dominan yakni 0,105; 0,17 dan 0,3.

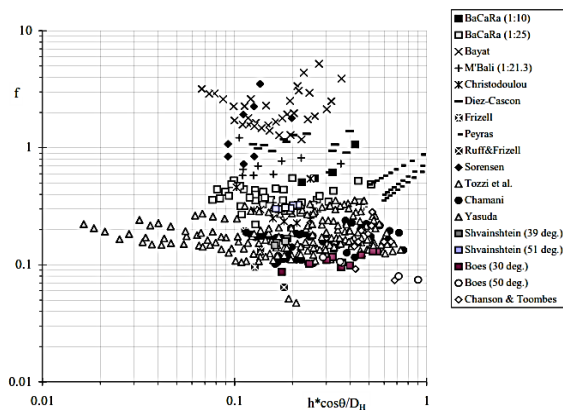
Yasuda, Takahashi, & Ohtsu (2001) menyajikan hubungan berikut pada kondisi keseimbangan:

$$f = \frac{4\tau_0}{1/2 \rho_w v_w^2} = \frac{8g y_w \sin \theta}{v_w^2} = 8 \left( \frac{y_w}{y_c} \right)^3 \sin \theta \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- $g$  = percepatan gravitasi;
- $y_w$  = kedalaman aliran diukur normal terhadap kemiringan saluran pada ujung anak tangga;
- $y_c$  = kedalaman kritis aliran yang dihitung pada puncak ambang

Pada Gambar 3 menunjukkan hubungan antara tinggi kekasaran pada pelimpah bertangga ( $h \cos \theta / D_{hw}$ ) terhadap faktor gesekan Darcy-Weisbach ( $f$ ). Sedangkan  $D_{hw} = 4 y_w$  adalah diameter hidraulik untuk aliran air jernih seragam pada saluran persegi.



Sumber: Chanson, Yasuda, & Ohtsu (2002)

**Gambar 3** Faktor Gesekan Darcy-Weisbach untuk Aliran Tenggelam pada  $\theta > 20^\circ$

### 2.5. Kadar Oksigen Terlarut / Dissolved Oxygen (DO)

Peningkatan kualitas air berhubungan erat dengan adanya oksigen terlarut. Konsentrasi oksigen di permukaan air merupakan indikator utama dari kualitas air untuk kebutuhan manusia serta biota perairan. Proses fisik perpindahan oksigen atau penyerapan oksigen dari atmosfer ke dalam aliran air disebut aerasi. Peningkatan aerasi dengan kekasaran makro dikenal dalam pengolahan air, dan salah satu bentuknya adalah aerasi dengan menggunakan saluran bertangga. Kekasaran makro berupa anak-anak tangga cukup signifikan mengurangi kecepatan aliran dan menyebabkan air yang mengalir mengalami aerasi sepanjang saluran bertangga (Baylar, Emiroglu, & Bagatur, 2009).

Perputaran udara yang terjadi pada anak-anak tangga dapat meningkatkan kadar oksigen dalam aliran yang menyebabkan makhluk hidup di dalamnya dapat bertahan lebih lama di sekitar hilir saluran. Oksigen terlarut yang cukup diperlukan untuk kualitas air yang baik. Proses pemurnian aliran alami memerlukan kadar oksigen yang cukup untuk menyediakan bentuk kehidupan aerobik. Kadar oksigen terlarut dalam air di bawah 5,0 mg/l, kehidupan air di dalamnya akan mengalami tekanan. Semakin rendah konsentrasi, semakin besar tekanan yang dialami oleh makhluk hidup yang ada di dalamnya.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001 tentang pengelolaan kualitas air dicantumkan bahwa batas minimum nilai oksigen terlarut/Dissolved Oxygen (DO) untuk kriteria mutu air baku yang baik adalah 6,0 mg/l. Dalam pengolahan air minum, aerasi pada saluran bertangga dapat digunakan untuk menghilangkan klorin dan menghilangkan/mengurangi ketajaman rasa dan bau (Toombes & Chanson, 2000).

Oleh karena itu, bentuk saluran bertangga dapat digunakan sebagai aerator yang efektif pada bangunan pengolahan air limbah, kolam pembenihan ikan, alur sungai, bangunan irigasi, bendung, pelimpah, dan lain lain. Oleh karena oksigen terlarut dianggap sebagai indikator penting dari kualitas air.

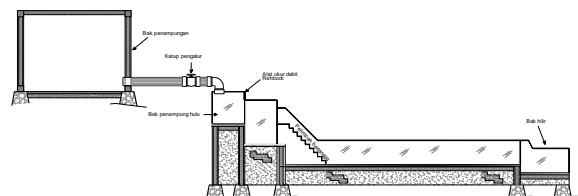
### 2.5. Model Fisik Hidraulik

Dalam perencanaan bangunan air, banyak persoalan atau permasalahan yang tidak dapat dipecahkan dengan rumus-rumus yang ada, hal ini mengingat beberapa rumus yang ada diturunkan dari suatu kondisi tertentu yang belum tentu keadaannya sama dengan kondisi bangunan air yang akan direncanakan. Model fisik dipilih untuk dibuat atau dilakukan apabila fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototip dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan yang cukup memadai (Yuwono, 1994).

## III. METODOLOGI

### 3.1. Tempat Penelitian

Tempat Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidraulika Dasar serta Laboratorium Sungai dan Rawa Jurusan Teknik Pengairan – Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Untuk sketsa rancangan laboratorium digambarkan pada Gambar 4.



**Gambar 4** Sketsa Percobaan di Laboratorium

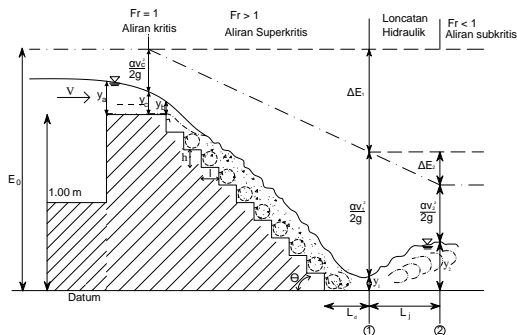
### 3.2. Variabel

Beberapa variabel untuk mendukung hasil penelitian ini, sebagai berikut:

- 1) Variabel terikat:
  - a) kehilangan energi ( $\Delta E$ ),
  - b) tinggi energi awal ( $E_0$ )
  - c) kedalaman aliran di kaki pelimpah ( $y_1$ ),
  - d) kedalaman aliran setelah loncatan air ( $y_2$ ),
  - e) kecepatan aliran ( $v$ ),
  - f) tinggi kekasaran permukaan ( $k_s$ )
  - g) panjang loncatan air ( $L_j$ ),
- 2) Variabel bebas:
  - a) kemiringan pelimpah ( $\theta$ )
  - b) kedalaman air kritis ( $y_c$ ),
  - c) tinggi tangga ( $h$ ),
  - d) panjang tangga ( $l$ ),
  - e) tinggi pelimpah ( $H_{dam}$ ),
  - f) lebar saluran = lebar tangga ( $B$ ).

- 3) Variabel lain:
- rapat massa air ( $\rho$ ),
  - percepatan gravitasi ( $g$ ),
  - kekentalan dinamik ( $\mu$ )

Secara detail, variabel yang diukur pada pemodelan bendung bertangga dalam penelitian ini digambarkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Sketsa Pemodelan Bendung Bertangga

### 3.3. Metode Eksperimen

Penelitian ini tidak bertujuan untuk melakukan evaluasi terhadap bendung bertangga pada prototip tertentu. Namun, hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan secara generik pada bendung bertangga yang memiliki kondisi seperti pada batasan penelitian ini. Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah penelitian eksperimen.

Kemiringan dasar model bendung menggunakan  $\theta = 30^\circ$  dan  $45^\circ$ . Menurut Chanson (2001) dan Ohtsu, Yasuda, & Takahashi (2004) bahwa aliran tenggelam dapat dibagi dalam dua sub regim: 1) sub-regim untuk kisaran yang lebih rendah dari debit aliran tenggelam ( $\theta \leq 30^\circ$ ), dimana sirkulasi pusaran terbentuk antara tepi tangga tidak sepanjang permukaan tangga yang memungkinkan mempengaruhi aliran air pada permukaan tangga, 2) untuk kisaran di atas debit aliran tenggelam ( $\theta \geq 30^\circ$ ), dimana sirkulasi pusaran sudah terjadi pada sepanjang permukaan tangga dan mengganggu pada tangga berikutnya.

Oleh karena itu, penulis menggunakan kemiringan dasar flume  $\theta = 30^\circ$  dan  $45^\circ$  agar memiliki dasar ilmiah yang kongruen dengan peneliti terdahulu. Untuk model bendung tipe ogee dan bendung bertangga digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Pemodelan Bendung Tipe Ogee dan Bendung Bertangga

### 3.4. Rancangan Penelitian di Laboratorium

Untuk rancangan perlakuan pada model fisik bendung bertangga pada penelitian ini dilakukan dengan variasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Rancangan Perlakuan Model Fisik Bendung Bertangga

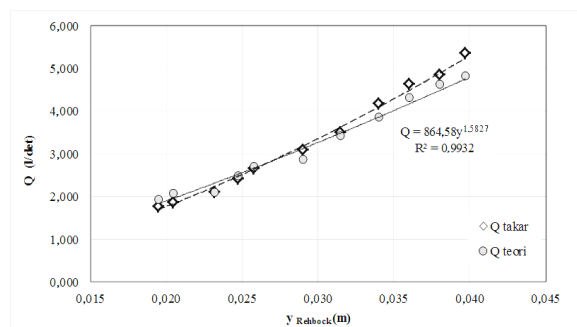
No Profil tangga	Sudut	Tinggi	Jumlah	Panjang Anak	Tinggi Anak	Kedalaman		
	( $\theta$ )	Bendung (H)	Tangga (N)	Tangga (l)	Tangga (h)	Kritis ( $y_c$ )		
	cm	cm	buah	cm	cm	cm variasi		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Bendung halus	$30^\circ$	100	-	-	-	$\geq 1,75$	13
2	Bendung halus	$45^\circ$	100	-	-	-	$\geq 1,75$	13
3	Tangga datar (Flat steps)	$30^\circ$	100	20	8,66	5,00	$\geq 3,50$	8
4	Tangga datar (Flat steps)	$45^\circ$	100	20	5,00	5,00	$\geq 3,50$	8
			40	2,50	2,50		$\geq 1,75$	10

Sumber: Hasil Analisis, 2016

### 3.5. Kalibrasi Data

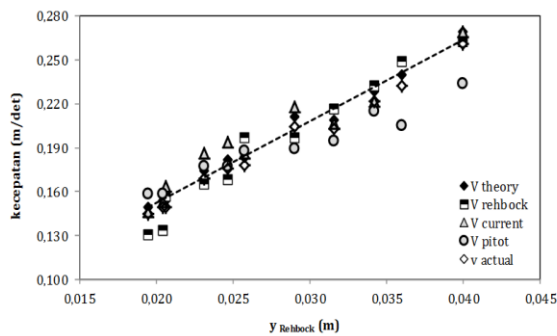
Tangki yang digunakan untuk mengkalibrasi pompa dan bangunan ukur debit dalam penelitian ini digunakan bak persegi empat. Tangki mempunyai dimensi lebar = 1,20 m, panjang = 1,20 m serta tinggi ( $t$ ) = 1,80 m. Volume tangki adalah 2,59  $m^3$ . Pompa yang digunakan dapat mengalirkan debit sebesar 50 l/det. Debit yang digunakan untuk penelitian ini adalah berkisar 3,457 l/det – 35,383 l/det.

Alat ukur debit menggunakan peluap ambang tajam segi empat (Rehbock). Untuk alat ukur kecepatan menggunakan *currentmeter* dan tabung pitot. Kalibrasi data debit dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan teoritis (formulasi Rehbock) dengan pengukuran debit keluar (debit takar) menggunakan bak ukur dan *stopwatch*. Pada pengukuran untuk kalibrasi debit menggunakan peluap ambang tajam segi empat digunakan 12 debit yang mewakili seperti pada Gambar 7.



Gambar 7 Kurva Hubungan  $y_{Rehbock}$  Terhadap  $Q_{takar}$

Grafik kalibrasi untuk nilai kecepatan aliran yang melimpas pada ambang tajam segi empat dengan menggunakan 3 alat ukur tersaji pada Gambar 8.



**Gambar 8** Kurva Hubungan  $y_{Rehbeck}$  (m) terhadap Kecepatan Aliran (m/det)

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dan pembahasan yang diuraikan meliputi pengaruh kedalaman kritis pada bendung halus dan bendung bertangga.

##### 4.1. Analisis Teoritis untuk Bendung Halus

Kedalaman kritis aliran adalah tinggi muka air pada hulu bendung yang telah dihitung secara teoritis berdasarkan energi spesifik minimum untuk debit yang ditentukan. Kedalaman kritis yang diukur pada penelitian ini  $y_c = 1,75$  cm hingga  $y_c = 8,25$  cm. Besaran angka Reynolds,  $Re = 1,97 \times 10^5 > 600$  yang menunjukkan bahwa tipe aliran adalah turbulen.

Tabel 2 menyajikan data hasil perhitungan  $L_j$  secara teoritis untuk bendung halus dengan sudut  $45^\circ$ .

**Tabel 2** Hasil Perhitungan Teoritis  $L_j$  untuk Bendung Halus dengan  $\theta = 45^\circ$

No	$y_c$ (cm)	Q (l/det)	$y_1$ (cm)	$y_2$ (cm)	$E_0$ (cm)	$E_1$ (cm)	$E_2$ (cm)	$Fr_1$	$Fr_2$	$L_j$ (cm)
1	1,750	3,457	0,250	2,300	102,63	43,125	6,489	18,520	0,142	38,703
2	1,850	3,757	0,275	2,500	102,775	42,137	6,721	17,449	0,147	40,344
3	2,000	4,223	0,325	2,700	103,000	38,195	6,941	15,266	0,158	42,225
4	2,125	4,625	0,375	2,800	103,188	34,493	7,068	13,489	0,168	43,485
5	2,187	4,829	0,450	2,900	103,281	26,278	6,717	10,714	0,191	42,061
6	3,500	9,777	0,900	5,800	105,250	27,366	9,568	7,669	0,230	60,789
7	3,750	10,843	0,950	6,500	105,625	30,166	10,332	7,843	0,227	65,613
8	4,000	11,945	1,000	6,600	106,000	33,000	11,098	8,000	0,225	70,441
9	4,125	12,510	1,050	6,700	106,188	32,882	11,337	7,787	0,228	72,005
10	4,250	13,083	1,100	7,000	106,375	32,821	11,579	7,594	0,231	73,576
11	4,375	13,664	1,200	7,500	106,563	30,276	11,561	6,961	0,243	73,524
12	7,000	27,654	2,350	15,100	110,500	33,405	16,625	5,141	0,291	104,665
13	7,500	30,669	2,550	15,750	111,250	34,989	17,693	5,044	0,294	111,228
14	8,000	33,786	2,900	17,750	112,000	33,340	18,243	4,582	0,312	113,634
15	8,250	35,383	3,150	19,500	112,375	31,445	18,303	4,239	0,327	112,879

Sumber: Hasil Analisis, 2016

##### 4.2. Analisis Data Pengukuran pada Model Fisik Bendung Halus

Pengujian model fisik pada bendung halus dilakukan berdasar tinggi kedalaman kritis ( $y_c$ )

yang melewati hulu bendung. Hasil pengambilan data seperti kedalaman air di kaki bendung ( $y_1$ ), kedalaman air di hilir ( $y_2$ ), dan panjang loncatan hidraulik ( $L_j$ ) diukur dan dianalisis seperti pada Tabel 3.

**Tabel 3** Hasil Perhitungan  $L_j$  dari Data Pengukuran untuk Model Fisik Bendung Halus dengan  $\theta = 45^\circ$

No	$y_c$ (cm)	Q (l/det)	$y_1$ (cm)	$y_2$ (cm)	$E_0$ (cm)	$E_1$ (cm)	$E_2$ (cm)	$Fr_1$	$Fr_2$	$L_j$ (cm)
1	1,750	3,457	0,250	2,300	102,63	43,125	2,807	18,520	0,664	31,300
2	1,850	3,757	0,275	2,500	102,775	42,137	3,007	17,449	0,637	32,500
3	2,000	4,223	0,325	2,700	103,000	38,195	3,249	15,266	0,638	43,227
4	2,125	4,625	0,375	2,800	103,188	34,493	3,412	13,489	0,661	53,581
5	2,187	4,829	0,450	2,900	103,281	26,278	3,522	10,714	0,655	73,797
6	3,500	9,777	0,900	5,800	105,250	27,366	6,437	7,669	0,469	81,000
7	3,750	10,843	0,950	6,500	105,625	30,166	7,124	7,843	0,438	85,000
8	4,000	11,945	1,000	6,600	106,000	33,000	7,335	8,000	0,472	87,000
9	4,125	12,510	1,050	6,700	106,188	32,882	7,482	7,787	0,483	91,000
10	4,250	13,083	1,100	7,000	106,375	32,821	7,783	7,594	0,473	96,000
11	4,375	13,664	1,200	7,500	106,563	30,276	8,244	6,961	0,446	98,000
12	7,000	27,654	2,350	15,100	110,500	33,405	15,852	5,141	0,316	99,333
13	7,500	30,669	2,550	15,750	111,250	34,989	16,600	5,044	0,329	101,000
14	8,000	33,786	2,900	17,750	112,000	33,340	18,563	4,582	0,303	110,000
15	8,250	35,383	3,150	19,500	112,375	31,445	20,238	4,239	0,275	110,000

Sumber: Hasil Analisis, 2016

##### 4.3. Analisis Teoritis untuk Bendung Bertangga

Bendung bertangga dengan anak tangga datar bersudut  $45^\circ$  pernah diteliti sebelumnya oleh Essery & Horner (1978); Stephenson (1991); Peyras, Royet, & Degoutte (1992); Kells (1993); Chinnarasri & Wongwises (2006); Dermawan (2011). Sedangkan anak tangga datar dengan sudut  $30^\circ$  pernah dilakukan oleh Ohtsu & Yasuda (1997); Boes & Hager (1998); Chinnarasri & Wongwises (2006). Hasil data yang didapatkan pada penelitian ini berupa hubungan antar parameter aliran pada tiap-tiap sudut hilir bendung. Kemudian hasil tersebut dibandingkan dengan peneliti sebelumnya yang memiliki batasan serupa.

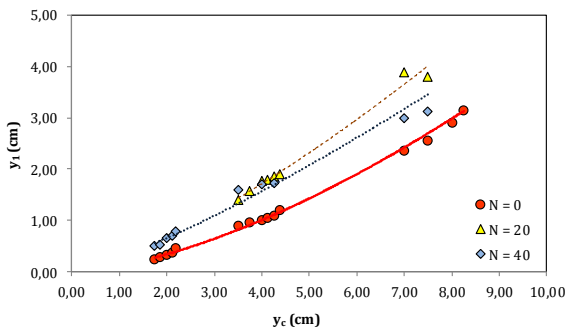
Regim aliran yang digunakan pada penelitian ini adalah aliran transisi dan tenggelam. Penentuan batas kedua regim tersebut dengan menggunakan dasar teori dari Rajaratnam (1990). Batasan rasio ( $y_c/h$ ) untuk aliran dinyatakan sebagai aliran tenggelam apabila  $y_c/h \geq 0,8$ . Sedangkan Peyras et al. (1992) memberikan batasan untuk awal terjadinya aliran tenggelam pada  $y_c/h > 0,62 - 0,74$ . Berdasar dari analisis yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, maka penelitian ini menggunakan batasan  $0,70 \leq y_c/h \leq 0,75$  untuk aliran transisi dan  $y_c/h \geq 0,80$  untuk aliran tenggelam.

Untuk data pengukuran  $y_1$ ,  $y_2$  dan  $L_j$  pada bendung bertangga dapat dilihat pada Tabel 4.

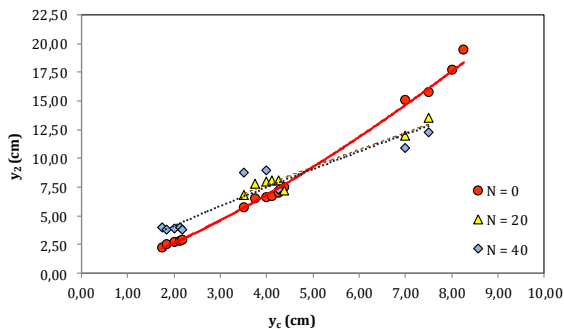
**Tabel 4** Hasil Data Pengukuran untuk Model Fisik Bendung Bertangga dengan  $\theta = 45^\circ$

No	$y_c$ (cm)	$h$ (cm)	$Q$ (l/det)	$y_1$ (cm)	$y_2$ (cm)	$E_0$	$E_1$	$E_2$	$Fr_1$	$Fr_2$	$Fr^*$	$L_j$ (cm)
$\theta = 45^\circ ; N = 40$ tangga												
1	1,750	2,500	3,457	0,500	3,720	102,63	11,219	3,914	6,548	0,323	1,117	9,400
2	1,850		3,757	0,520	3,800	102,775	12,228	4,019	6,710	0,340	1,214	10,608
3	2,000		4,223	0,560	3,940	103,000	13,315	4,198	6,749	0,362	1,364	17,000
4	2,125		4,625	0,600	4,067	103,188	13,927	4,357	6,665	0,378	1,494	26,267
5	2,187		4,829	0,613	4,075	103,281	14,554	4,390	6,747	0,393	1,560	28,300
6	3,500		9,777	1,225	7,000	105,250	15,511	7,438	4,829	0,354	3,159	30,760
7	4,000		11,945	1,400	7,175	106,000	17,727	7,797	4,829	0,416	3,859	85,880
8	4,250		13,083	1,650	7,250	106,375	15,748	7,980	4,134	0,449	4,227	93,400
9	7,000		27,654	2,400	13,000	110,500	32,174	14,015	4,981	0,395	8,935	95,500
10	7,500		30,669	2,500	13,083	111,250	36,250	14,316	5,196	0,434	9,909	99,300
$\theta = 45^\circ ; N = 20$ tangga												
1	3,500	5,000	9,777	1,240	7,900	105,250	15,182	8,243	4,742	0,295	1,117	62,740
2	3,750		10,843	1,333	8,060	105,625	16,165	8,466	4,717	0,317	1,239	83,220
3	4,000		11,945	1,460	8,300	106,000	16,472	8,765	4,535	0,335	1,364	86,400
4	4,125		12,510	1,540	7,700	106,188	16,338	8,292	4,384	0,392	1,429	92,000
5	4,250		13,083	1,400	7,450	106,375	20,983	8,142	5,289	0,431	1,494	95,500
6	4,375		13,664	1,430	7,820	106,563	21,905	8,505	5,351	0,418	1,561	104,900
7	7,000		27,654	2,600	11,260	110,500	27,970	12,613	4,418	0,490	3,159	109,500
8	7,500		30,669	2,800	12,900	111,250	29,705	14,168	4,384	0,443	3,503	116,500

Berdasar data tersebut di atas, hubungan parameter  $y_c$  terhadap  $y_1$ ,  $y_2$  dan  $L_j$  untuk pelimpah bertangga dengan sudut  $45^\circ$  dapat diplotkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 11.



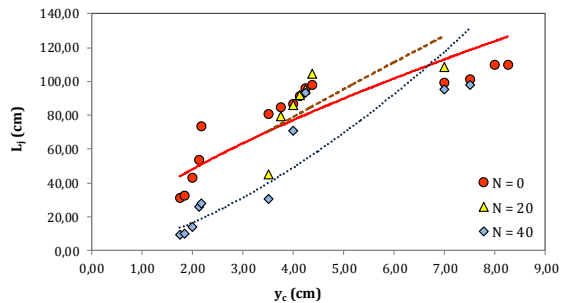
**Gambar 8** Hubungan Peningkatan  $y_c$  terhadap  $y_1$  pada Bendung Bertangga  $\theta = 45^\circ$



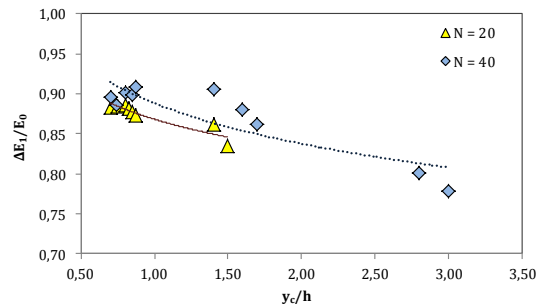
**Gambar 9** Hubungan Peningkatan  $y_c$  terhadap  $y_2$  pada Bendung Bertangga  $\theta = 45^\circ$

Pada Gambar 11, peningkatan rasio ( $y_c/h$ ) menyebabkan penurunan nilai kehilangan energi relatif ( $\Delta E_1/E_0$ ) untuk semua konfigurasi jumlah anak tangga pada kemiringan  $45^\circ$ . Untuk jumlah tangga 40 memiliki nilai kehilangan energi relatif ( $\Delta E_1/E_0$ ) lebih tinggi dibanding dengan jumlah

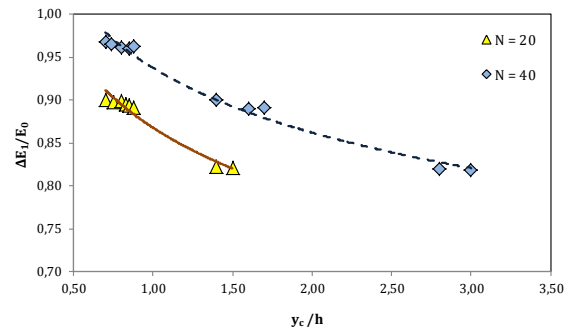
tangga 20. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah anak tangga maka kehilangan energi relatif akan semakin tinggi.



**Gambar 10** Hubungan Peningkatan  $y_c$  terhadap  $L_j$  pada Bendung Bertangga  $\theta = 45^\circ$



**Gambar 11** Hubungan Rasio  $y_c/h$  terhadap  $\Delta E_1/E_0$  pada Bendung Bertangga  $\theta = 45^\circ$



**Gambar 12** Hubungan Rasio  $y_c/h$  Terhadap  $\Delta E_1/E_0$  pada Bendung Bertangga  $\theta = 30^\circ$

Cara yang sama dilakukan pula untuk data pengukuran model fisik bendung bertangga dengan sudut  $30^\circ$  dengan jumlah tangga 20, dan 40. Kemudian diplotkan dalam Gambar 12 yang memiliki pola grafik yang sama dengan bendung bertangga pada sudut  $45^\circ$  (Gambar 11) yakni peningkatan nilai rasio ( $y_c/h$ ) mempengaruhi penurunan nilai kehilangan energi relatif ( $\Delta E_1/E_0$ ). Untuk jumlah tangga yang lebih banyak ( $N=40$ ) memberikan pengaruh kehilangan energi relatif yang lebih tinggi dibanding jumlah tangga 20.

#### 4.4. Pembahasan Hasil Pengujian Bendung Halus dan Bendung Bertangga

##### 1) Karakteristik Aliran

Rekapitulasi hasil perbandingan dari hasil uji model fisik hidraulik pelimpah bertangga terhadap pelimpah halus diberikan pada Tabel 5.

**Tabel 5** Nilai  $y_1$ ,  $y_2$ , dan  $L_j$  pada Model Bendung Bertangga terhadap Bendung Halus

No	Sudut Bendung	Bendung Bertangga		Rata-rata Tangga Datar
		N = 20	N = 40	
Perubahan $y_1$ (%)				
1	45°	24,354	18,198	13,370
2	30°	44,236	44,142	66,916
Rata-rata				40,143
Perubahan $y_2$ (%)				
3	45°	0,905	1,528	-9,404
4	30°	-11,411	-14,435	-12,173
Rata-rata				-10,788
Perubahan $L_j$ (%)				
5	45°	1,683	-28,956	-10,508
6	30°	-15,687	-60,144	-15,166
Rata-rata				-12,837

Sumber: Hasil Analisis, 2016

Hasil perbandingan antara pelimpah bertangga N=20 dan N=40 pada uji model fisik terhadap variabel  $y_1$ ,  $y_2$ , dan  $L_j$  menunjukkan bahwa:

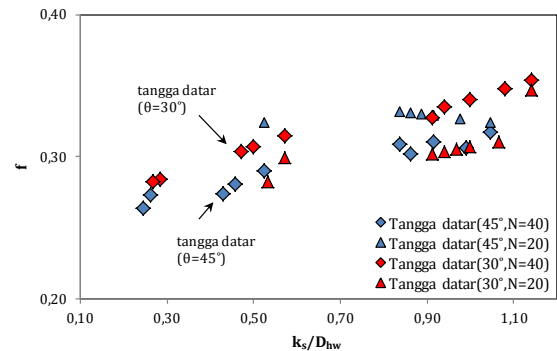
- bendung bertangga meningkatkan kedalaman aliran di kaki bendung ( $y_1$ ) sebesar 40,143% dibandingkan dengan bendung halus. Peningkatan  $y_1$  pada bendung bertangga diakibatkan karena faktor kekasaran permukaan untuk tangga lebih besar dibandingkan bendung halus.
- bendung bertangga tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada kedalaman aliran setelah loncatan ( $y_2$ ) dibandingkan pada bendung halus. Untuk bendung bertangga kedalaman aliran menjadi berkurang sebesar 10,788%. Hal ini bisa disebabkan karena turbulensi aliran sudah terjadi pada anak-anak tangga sehingga kedalaman aliran setelah loncatan hidraulik menjadi berkurang.
- bendung bertangga mampu memperpendek panjang loncatan hidraulik ( $L_j$ ) yang lebih baik sebesar 12,837% dibanding bendung halus.

Berdasarkan hasil pengukuran yang didapat pada bendung bertangga, maka beberapa perlakuan pemodelan yang dapat mempengaruhi besaran variabel  $y_1$ ,  $y_2$ , dan  $L_j$  adalah:

- jumlah anak tangga (N)
- sudut kemiringan ( $\theta$ ) =  $h/l$
- bentuk geometri anak tangga (h, l)
- debit per satuan lebar (q)

#### 2) Hambatan Aliran (*Flow Resistance*) pada Bendung Bertangga

Faktor gesekan Darcy Weisbach pada tangga datar untuk penelitian ini sebagai fungsi dari dimensi tinggi kekasaran anak tangga  $h \cos \theta / D_{hw}$  seperti ditampilkan pada Gambar 13.



**Gambar 13** Faktor Gesekan Darcy-Weisbach pada Bendung Bertangga

Untuk hasil perhitungan faktor gesekan pada model penelitian ditabulasikan pada Tabel 6.

**Tabel 6** Faktor Gesekan Darcy Weisbach pada Model Bendung Bertangga

No	Sudut Bendung	Jumlah Anak Tangga	Faktor Gesekan (f)	Rata-rata
				5
1	45°	40	0,293	0,308
		20	0,324	
Rata-rata			0,308	
2	30°	40	0,320	0,314
		20	0,307	
Rata-rata			0,314	0,311

Sumber: Hasil Analisis, 2016

Peningkatan sudut kemiringan ( $\theta$ ) bendung mempengaruhi kecepatan aliran yang melimpas pada permukaan tangga. Peningkatan kecepatan aliran akan mengurangi hambatan aliran yang berpengaruh terhadap berkurangnya faktor gesekan (f). Faktor gesekan yang berkurang akan mempengaruhi penurunan nilai kehilangan energi. Meskipun tidak terlalu signifikan perubahan faktor gesekan dari  $\theta = 30^\circ$  ke  $\theta = 45^\circ$ , namun  $\theta = 30^\circ$  memiliki  $f_{rata-rata}$  yang lebih tinggi dibanding  $\theta = 45^\circ$ .

Besarnya faktor gesekan secara tidak langsung akan mempengaruhi pula tingkat peredaman energi pada bendung bertangga. Semakin besar nilai faktor gesekan maka kehilangan energi akan semakin besar. Nilai (f) pada model bendung bertangga adalah 0.311 memberikan kehilangan

energi relatif yang lebih baik dibandingkan bendung tipe ogee/bendung halus yang memiliki nilai  $(f) = 0.18$  (Chanson, 2015). Perbedaan hasil nilai  $(f)$  pada penelitian ini dibandingkan dengan peneliti sebelumnya dipengaruhi karena perbedaan tinggi tangga  $(h)$ , lebar tangga  $(l)$ , kemiringan pelimpah  $(\theta)$ , konfigurasi kekasaran permukaan dan debit per satuan unit lebar  $(q)$ .

Lebar saluran  $(B)$  juga berpengaruh terhadap perkembangan sirkulasi aliran yang terjadi pada tiap anak tangga, untuk kemiringan bendung yang tajam  $(\theta > 20^\circ)$ , data Chamani & Rajaratnam (1999) serta Yasuda & Ohtsu (1999) menyarankan bahwa faktor gesekan akan lebih tinggi pada rasio  $(B/h \leq 10)$  dengan kondisi aliran dan kondisi geometri tertentu.

### 3) Kehilangan Energi Relatif di Kaki Bendung Bertangga

Kehilangan energi relatif yang terjadi di bendung bertangga, merupakan perbandingan antara kehilangan energi di kaki bendung terhadap energi total di hulu bendung bertangga  $(\Delta E_1/E_0)$ . Pada kaki bendung halus, energi yang terjadi secara teoritis dipengaruhi karena faktor gesekan akibat kekasaran saluran dasar bendung  $(\Delta E_1)$ . Sedangkan pada kaki bendung bertangga, energi yang terjadi dipengaruhi karena gesekan akibat kekasaran permukaan bendung yang berupa susunan anak tangga.

Berdasarkan data pengukuran di uji model fisik hidraulik dan hasil analisis dengan menggunakan prinsip energi, maka didapatkan nilai kehilangan energi relatif  $(\Delta E_1/E_0)$  seperti pada Tabel 7.

**Tabel 7** Kehilangan Energi Relatif pada Model Bendung Bertangga

No	Sudut Pelimpah Bendung	Nilai $(\Delta E_1/E_0)$ di Model Fisik (%)		
		Bendung Bertangga		Bendung Bertangga
		Bendung Halus	N = 20	
1	45°	67,388	80,796	82,675
2	30°	77,544	87,672	91,189

Kehilangan energi relatif pada bendung halus dari uji model fisik hidraulik pada dua kemiringan sudut memiliki nilai  $(\Delta E_1/E_0)$  yang lebih kecil dibandingkan bendung bertangga. Bendung bertangga dengan sudut 30° memiliki  $(\Delta E_1/E_0)$  yang lebih tinggi dibandingkan sudut 45°. Bertambahnya kemiringan saluran pada muka hilir bendung bertangga menyebabkan kecepatan aliran bertambah dan mengurangi nilai faktor gesekan permukaan, oleh karena itu, nilai  $(\Delta E_1/E_0)$  pada bendung bertangga  $\theta = 45^\circ$  lebih kecil dibandingkan  $\theta = 30^\circ$  dengan  $H_{\text{bendung}}$  yang sama.

Hal tersebut di atas, menunjukkan bahwa adanya udara dalam aliran mengurangi faktor gesekan pada aliran seragam teraerasi untuk kemiringan  $> 10^\circ$ . Pengurangan hambatan pada aliran mempengaruhi peredaman energi total di atas bendung dan efisiensi dari bendung bertangga untuk sudut kemiringan  $\theta > 30^\circ$ . Pada hasil yang didapat dari penelitian ini (Tabel 7) memiliki kesamaan karakteristik aliran dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Chanson (1993).

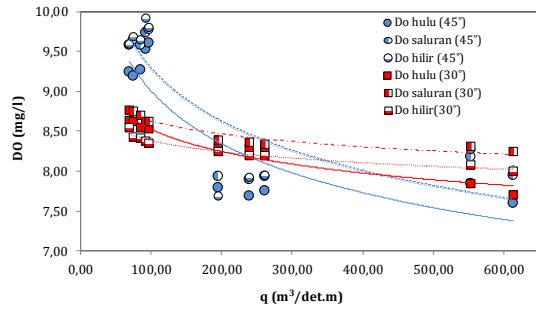
### 4) Perhitungan Kadar Oksigen Terlarut pada Bendung Bertangga

Bendung bertangga adalah sarana yang sangat efisien untuk menimbulkan aerasi karena pencampuran turbulen yang kuat, waktu yang lama dan pemasukan gelembung udara yang cukup besar. Proses aerasi, selain mempertebal kedalaman aliran juga meningkatkan jumlah kadar oksigen terlarut/*dissolved oxygen* (DO). Faktor-faktor yang mempengaruhi kadar DO pada bendung bertangga adalah suhu air, kualitas air, tinggi terjunan/tinggi tangga  $(h)$ , dan bentuk puncak bendung.

Seperti telah diketahui bahwa peredaman energi dan perpindahan oksigen pada bendung bertangga dalam regim aliran tenggelam meningkat karena terjadinya aerasi awal dan kecepatan aliran yang melambat dibandingkan dengan bendung halus. Berdasar pada penelitian yang dilakukan oleh Baylar, Bagatur, & Emiroglu, (2007), peningkatan jumlah tangga dan kemiringan pada muka hilir bendung akan berpengaruh terhadap meningkatnya aerasi aliran. Ini artinya peningkatan aerasi akan berkaitan dengan peningkatan kadar DO pada aliran.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa efisiensi aerasi meningkat pada saat debit per unit lebar  $(q)$  menurun, seperti pada Gambar 14. Debit menurun pada aliran tenggelam yang mengarah pada kondisi aliran transisi meningkatkan kadar oksigen terlarut dikarenakan berkembangnya pusaran air yang lebih meningkat dibawah aliran dasar semu.

Pada Gambar 14 menunjukkan bahwa pada  $q < 300 \text{ cm}^2/\text{det}$ , pelimpah bertangga sudut 45° memberikan tingkat aerasi yang lebih tinggi dibanding pelimpah bertangga  $\theta = 30^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada kemiringan yang lebih tinggi, konsentrasi udara cenderung meningkat sehingga berpengaruh terhadap peningkatan kadar oksigen terlarut.



**Gambar 14** Hubungan Penurunan Kadar DO sebagai Fungsi Debit per Unit Lebar ( $q$ ) pada Pelimpah Bertangga Datar ( $N = 40$ )

Namun pada saat  $q > 300 \text{ cm}^2/\text{det}$ , terjadi penurunan kadar oksigen terlarut pada pelimpah bertangga  $\theta = 45^\circ$ . Penurunan kadar oksigen terlarut dikarenakan debit yang meningkat menyebabkan energi kinetik aliran juga meningkat sehingga aliran yang melimpas pada pelimpah bertangga  $\theta = 45^\circ$  memiliki kecenderungan seperti aliran pada pelimpah halus. Aliran yang mengalir dengan cepat mempengaruhi aerasi di bawah aliran dasar semu, sehingga tingkat oksigen terlarut menjadi turun.

Sedangkan pada bendung  $\theta = 30^\circ$ , kadar oksigen terlarut cenderung konstan dibandingkan bendung bertangga  $\theta = 45^\circ$ . Konsentrasi udara pada bendung bertangga  $\theta = 30^\circ$  dipengaruhi pula oleh panjang anak tangga ( $l$ ) yang lebih besar dibanding  $\theta = 45^\circ$ . Panjang anak tangga yang lebih besar menyebabkan pusaran yang terjadi di bawah aliran dasar semu memiliki waktu tinggal yang lebih lama dibandingkan bendung bertangga  $\theta = 45^\circ$ . Hal ini yang mengakibatkan oksigen terlarut pada saat  $q > 300 \text{ cm}^2/\text{det}$  untuk bendung bertangga  $\theta = 30^\circ$  tidak berpengaruh besar terhadap penurunan kadar DO.

## V. KESIMPULAN

Faktor gesekan Darcy-Weisbach pada bendung bertangga ( $f$ ) = 0,311 mampu memberikan peredaman energi lebih baik dibanding bendung halus ( $f$ ) = 0,18. Peningkatan kemiringan pada muka hilir bendung juga akan meningkatkan aerasi dan berpengaruh terhadap kadar oksigen terlarut di dalam aliran. Peningkatan nilai kehilangan energi relatif tersebut akan berpengaruh terhadap panjang kolam olak di hilir bendung, oleh karena itu penggunaan bendung bertangga pada bangunan irigasi dapat menjadi alternatif untuk menekan biaya konstruksi pada tubuh bendung.

Untuk penelitian selanjutnya perlu adanya variasi pada sudut kemiringan ( $\theta$ ) dan jumlah tangga ( $N$ ) yang sama untuk mengkaji lebih dalam pengaruhnya terhadap kehilangan energi relatif

( $\Delta E_1/E_0$ ). Pengamatan lebih dalam terhadap semburan aliran dari hulu hingga kaki bendung juga diperlukan untuk perencanaan tinggi dinding pengarah aliran (*training wall*) yang lebih detil. Penggunaan bendung bertangga di lapangan harus diperhitungkan secara tepat analisis debit banjir yang melimpas di atas mercu bendung ( $Q_{\text{banjir}}$ ), tinggi bendung ( $H_{\text{dam}}$ ), dan kemiringan sudut bendung ( $\theta$ ).

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Ristek Dikti yang telah membiayai penelitian ini dalam program Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN) tahun anggaran 2013-2016.

## DAFTAR PUSTAKA

- Baylar, A., Bagatur, T., & Emiroglu, M. (2007). Prediction of oxygen content of nappe, transition, and skimming flow regime in stepped channel chutes. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 6(2), 201-208.
- Baylar, A., Emiroglu, M.E., & Bagatur, T. (2009). Influence of chute slope on oxygen content in stepped Waterways. *Gazi University Journal of Science*, 22(4), 325-332.
- Boes, R. M., & Hager, W. H. (1998). Fiber-optical experimentation in two-phase cascade flow. Dalam *Proc. Intl. RCC Dams Seminar*. Denver, Colorado: Schabel Engineering.
- Boes, R.M., & Hager, W.H. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.
- Chamani, M.R., & Rajaratnam, N. (1999). Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), 969-971.
- Chanson, H. (1989). Study of air entrainment and aerator devices. *Journal of Hydraulic Research*, 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>
- Chanson, H. (2001). *Experimental Investigation of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows Down a Stepped Chute* (Research Report No. CE 158). Australia: The University of Queensland.
- Chanson, H., Yasuda, Y., & Ohtsu, I. (2002). Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(6), 809-819. <https://doi.org/10.1139/102-083>
- Chanson, H. (2015). *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. London: CRC Press.

- Chaudhry, M.H. (2008). *Open-channel flow*. New York: Springer Science & Business Media.
- Chinnarasri, C., & Wongwises, S. (2006). Flow Patterns and Energy Dissipation over Various Stepped Chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1), 70-76. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:1\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:1(70))
- Dermawan, V. (2011). *Uji Model Fisik Hidraulik Perilaku Aliran dan Peredaman Energi pada Bangunan Pelimpah Bertangga*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Essery, T.S., & Horner, M.W. (1978). The Hydraulic Design of Stepped Spillways (CIRIA Report No. 33). London: Construction Industry Research and Information Association.
- Kells, J. (1993). Spatially varied flow over rockfill embankments. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(5), 820-827.
- Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203996980>
- Matos, J. (2000). Hydraulic Design of Stepped Spillways Over RCC Dams. Dalam *Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways* (hal. 187-194). Zurich, Switzerland: A.A. Balkema.
- Ohtsu, I., & Yasuda, Y. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. Dalam *Proc. 27th IAHR Congress* (hal. 583-588). San Francisco: ASCE.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Takahashi, M. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of hydraulic Engineering*, 130(9), 860-869.
- Otto, G.P. (2006). *Enhancement of Dissipation Energy on Stepped Spillway*. Tshwane: Tshwane University of Technology.
- Peyras, L. Royet, P., & Degoutte, G. (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339429)
- Stephenson, D. (1991). Energy dissipation down stepped spillways. *International Water Power & Dam Construction*, 43(9), 27-30.
- Toombes, L., & Chanson, H. (2000). Air-water flow and gas transfer at aeration cascades: A comparative study of smooth and stepped chutes. Dalam H. E. Minor & W. H. Hager (Ed.), *Hydraulics of Stepped Spillways* (Vol. 1, hal. 77-84). Rotterdam: A.A. Balkema.
- Yasuda, Y., & Ohtsu, I. (1999). Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Dalam *Proc. 28th IAHR World Congress*.
- Yuwono, N. (1994). *Perencanaan Model Hidraulik (Hydraulic Modelling)*. Yogyakarta: PAU Ilmu Teknik UGM.