

**PENGARUH PEMASANGAN BANGUNAN PENINGGI MUKA AIR
(SUBWEIR) TERHADAP GERUSAN YANG TERJADI DI HILIR
BENDUNG
(INFLUENCE OF SUB WEIR INSTALLMENT TO THE DOWNSTREAM DAM
SCOURING)**

**Pudyono
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang
Jl. MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
E-mail : pakpud@yahoo.com**

ABSTRACT

This research used the dam model from the prototype of the Bakalan Dam in the Kecamatan Wagir Kabupaten Malang with the 1 : 30 scale as the case of the study. In this model research, in the dam downstream was formed as the moveable bed with the mixing of sand (50%) and the gravel (50% sieve 10 mm), with the three discharge variation $Q = 6$ liter/sec, 9 liter/sec and 12 liter/sec.

The aim of this research is finding out the minimum scouring depth occurrence in the downstream of the dam with the subweir installment. The height variation of the sub weir was $Z_0 = 0$; $Z_1 = 1,66$ cm; $Z_2 = 3,33$ cm; and $Z_3 = 5$ cm, and the variation of length sub weir installment range in the downstream of the dam was $L_1 = 60$ cm; $L_2 = 75$ cm; $L_3 = 90$ cm.

The result of this research was shown that the minimum downstream dam scouring was occurred for discharge variation range $Q_1 = 6$ liter/sec until $Q_2 = 9$ liter/sec with the variation of the length sub weir installment was 60 cm until 75 cm from the toe of the dam that used the 5 cm of the sub weir height. While for the discharge in the range of $Q_2 = 9$ liter/sec to $Q_3 = 12$ liter/sec with the all of the length of installment and the height of sub weir variation have not gave the significance influence for the depth of scouring. Its shown that that trend of the scouring depth was followed the trend of the discharge without the sub weir installment (Z_0). It is mean hat for the high discharge, installation of the sub weir was having not influence to decrease the scouring depth of the downstream dam.

Key words : sub weir, scouring, downstream dam.

PENDAHULUAN

Kebutuhan air tidak dapat lepas dari kehidupan sehari-hari. Sebagai komponen mutlak penopang kehidupan, maka manusia dengan berbagai macam upaya berusaha untuk memperoleh manfaat yang optimal dari penda-yanaannya serta berupaya mengendalikan untuk mencegah kerusakan dan kerugian yang mungkin ditimbulkan oleh air .

Pemanfaatan suatu sungai merupakan salah satu usaha untuk mencapai tujuan tersebut, dimana perlu dilakukan usaha-usaha pelestarian, pengendalian dan pengembangan wilayahnya. Pembangunan bendung atau bendungan

merupakan salah satu upaya pengembangan wilayah sungai dengan mendayagunakan air untuk keperluan irigasi (Sosrodarsono, 1985).

Telah banyak bangunan bendung yang sudah dibangun, namun banyak pula bangunan bendung yang mengalami kerusakan akibat terjadinya gerusan di bagian hilirnya. Walaupun di hilir bendung sudah dilengkapi dengan bronjong atau pasangan batu, namun dalam kenyataannya bronjong atau pasangan batu tersebut hilang akibat gerusan yang terjadi di hilir bendung.

Salah satu penyebab terjadinya gerusan di hilir bendung adalah akibat

banyaknya penambang pasir liar di hilir bendung. Dampak dari penambangan ini mengakibatkan penurunan elevasi dasar sungai, sehingga kemiringan dasar sungai akan semakin curam. Dengan curamnya kemiringan dasar sungai, maka akan merubah pula kecepatan alirannya dengan demikian kedalaman normal sungai menjadi semakin rendah dan kecepatan aliran di hilir bendung menjadi semakin besar. Pengaruh penambahan kecepatan ini akan mengakibatkan gerusan di dasar sungai yang secara perlahan akan bergerak ke hulu sampai pada kaki bendung (Priyantoro, 1987: 2).

Berdasarkan uraian di atas maka dipandang perlu dilakukan suatu penelitian dan analisis karena :

1. Adanya kondisi di lapangan berupa gerusan di hilir bendung akan mengakibatkan kerusakan terhadap tubuh bendung dalam periode waktu tertentu sehingga perlu dicari alternatif penanganan terhadap gerusan yang terjadi, dalam hal ini dipilih *subweir* sebagai solusi penanganan untuk mengurangi penambahan kecepatan yang mungkin terjadi.
2. Pada umumnya biaya operasi dan pemeliharaan (OP) bendung yang mengalami gerusan cukup besar, sehingga perlu dilakukan uji model fisik terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik aliran secara nyata sebagai pendekatan mencari solusi yang terbaik untuk menangani gerusan yang terjadi di hilir bendung (uji model fisik akan menghasilkan suatu grafik yang menyatakan hubungan antara tinggi gerusan dan model *subweir* yang efisien).

Identifikasi Masalah

Berubahnya kemiringan dasar sungai yang menjadi semakin curam akan menyebabkan kecepatan aliran semakin bertambah besar. Penambahan kecepatan tersebut akan mengakibatkan gerusan

yang terjadi di dasar sungai dan akan bergerak ke hulu sampai pada lantai peredam energi di hilir bendung. Akibat terjadinya gerusan di belakang lantai peredam energi maka dalam kurun waktu tertentu gerusan akan menjadi semakin dalam dan menyebabkan lantai peredam energi rusak/ runtuh. Dalam kondisi yang demikian bila terjadi banjir (Q besar), maka energi yang cukup besar akan timbul pada saat aliran masuk dalam sungai setelah air banjir melalui bendung. Energi yang besar tersebut akan mengakibatkan kerusakan lantai peredam energi pada dasar sungai bagian hilir bendung. Dengan rusaknya lantai peredam energi di hilir bendung, akan mengancam kestabilan bendung utama. Oleh karena itu perlu adanya penelitian untuk mendapatkan suatu bangunan pengaman di bagian hilir bendung untuk melindungi bendung utama yang terancam kestabilannya akibat gerusan yang terjadi di bagian hilirnya.

Salah satu alternatif pemecahannya adalah dengan jalan membangun anak bendung (*subweir*) sebagai bangunan peninggi muka air di bagian hilir *stilling basin*. Dengan demikian pada bagian hilir *stilling basin* dapat dipertahankan kondisi subkritis sehingga air yang keluar dari bendung tidak langsung menggerus dasar sungai karena adanya peredaman energi terlebih dahulu.

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa masalah-masalah yang berkaitan dengan topik penelitian ini dapat diidentifikasi sebagai berikut :

- a. Besarnya debit aliran (Q), mempengaruhi kedalaman gerusan (d) yang terjadi di hilir bendung.
- b. Pada kondisi tanpa *subweir* akan terjadi gerusan yang dapat membahayakan kestabilan bendung utama.
- c. Penempatan *subweir* (L) yang bervariasi akan memberikan kedalaman gerusan yang berbeda.

- d. Tinggi *subweir* (z) tertentu, akan memberikan kedalaman gerusan (d) yang minimum.

Untuk mendapatkan gambaran yang nyata di lapangan perlu diadakan studi uji model fisik bangunan peninggi muka air/ *subweir* agar diperoleh konstruksi yang baik untuk mengatasi gerusan yang terjadi di hilir bendung.

Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut

1. Adakah perbedaan kedalaman gerusan (d) yang terjadi sehubungan dengan berbedanya debit (Q) yang dialirkan pada kondisi tidak ada *subweir* ($z = 0$)
2. Adakah perbedaan kedalaman gerusan (d) yang terjadi sehubungan dengan berbedanya jarak penempatan *subweir* (L) dan berbedanya debit (Q) yang dialirkan ?
3. Adakah perbedaan kedalaman gerusan (d) yang terjadi sehubungan dengan berbedanya jarak penempatan *subweir* (L) dan berbedanya tinggi *subweir* (z) ?
4. Adakah perbedaan kedalaman gerusan (d) yang terjadi sehubungan dengan berbedanya tinggi *subweir* (z) dan berbedanya debit (Q) yang dialirkan?

Hipotesa

1. Terdapat perbedaan kedalaman gerusan (d) sehubungan dengan berbedanya debit (Q) pada kondisi tidak ada *subweir* ($z = 0$)
2. Terdapat perbedaan kedalaman gerusan (d) sehubungan dengan berbedanya jarak penempatan *subweir* (L) dan berbedanya debit (Q)
3. Terdapat perbedaan kedalaman gerusan (d) sehubungan dengan berbedanya jarak penempatan *subweir* (L) dan berbedanya tinggi *subweir* (z)
4. Terdapat perbedaan kedalaman gerusan (d) sehubungan dengan

berbedanya tinggi *subweir* (z) dan berbedanya debit (Q).

Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan model bendung yang ditempatkan pada saluran terbuka (*flume open channel*) penampang segi empat di Laboratorium Hidrolika Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Model fisik bendung dibuat menirukan prototipe dari bendung Bakalan yang terletak di Desa Bakalan Krajan Kecamatan Wagir Kabupaten Malang dengan skala 1 : 30.
- b. Untuk mengetahui kedalaman gerusan yang terjadi di hilir bendung diberi dasar berubah (*movable bed*) dari bahan pasir (50 %), dan dicampur kerikil lolos saringan 10 mm (50 %).
- c. Diameter butiran tidak diskala.
- d. Untuk keabsahan data dilakukan uji frekuensi dalam hal ini digunakan uji T dan uji Z pada taraf *significant* = 5 %
- e. Model bangunan peninggi muka air dibuat bentuk ambang lebar dengan tiga ukuran tinggi 1,66 cm, 3,3 cm dan 5 cm, sedang lebarnya 20 cm. Penempatannya pada tiga lokasi yaitu berjarak 60 cm, 75 cm dan 90 cm dari hilir bendung.
- f. Variasi debit ada tiga kondisi debit yaitu 6, 9 dan 12 l/dt.
- g. Untuk penyesuaian kurva dalam mengetahui hubungan antara peubah digunakan cara kuadrat terkecil dengan model geometrik.
- h. Tidak membahas tipe bangunan yang lain, sebagai alternatif penanganan, hal ini bertujuan untuk memfokuskan permasalahan dalam sebuah bangunan rencana secara optimal.

- i. Tidak membahas profil aliran dan gerusan yang terjadi di hilir *subweir*.

TUJUAN DAN MANFAAT

Tujuan dari penelitian adalah untuk mendapatkan kedalaman gerusan (d) yang minimum dengan memberikan perlakuan variasi debit (Q), variasi penempatan jarak *subweir* (L) serta variasi tinggi *subweir* (z) yang efisien untuk mengatasi gerusan yang terjadi di hilir bendung.

Sedangkan manfaat dari penelitian ini diharapkan hasil yang diperoleh bisa menjadi rujukan bagi para teknisi di bidang hidrolika dan dapat meningkatkan ketelitian perencanaan khususnya untuk perencanaan hidrolik bangunan *subweir*.

METODE

Lingkup Penelitian

Penelitian ini bersifat penelitian laboratorium, dengan demikian pemakaian alat dalam percobaan tentunya mempunyai perbedaan karakteristik fisik dengan bangunan yang sebenarnya di lapangan.

Data yang digunakan adalah data dari hasil uji fisik hidrolika yang dilakukan di Laboratorium Hidrolika Terapan Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Kesalahan maksimum data aktual terhadap teoritis ditetapkan sebesar 10 %. Data yang dihasilkan dari model fisik hidrolika akan dibandingkan dengan hasil hitungan teoritis dari rumusan para peneliti terdahulu dengan anggapan rumusan-rumusan tersebut sudah terbukti kebenarannya.

Sesuai dengan tujuan penelitian ini, maka percobaan dimaksudkan untuk mendapatkan jarak dan tinggi *subweir* yang paling efektif guna mengatasi terjadinya gerusan di hilir bendung dan selanjutnya menetapkan koefisien yang

sesuai dengan kondisi penempatan dan tinggi *subweir* di hilir bendung.

Peralatan percobaan

Penelitian ini menggunakan peralatan yang tersedia pada Laboratorium dan beberapa alat yang dibuat sendiri. Perlakuan pada model mengacu pada keterbatasan sarana di laboratorium, keterbatasan pompa maupun dimensi saluran. Sedangkan alat yang dibuat sendiri adalah model bangunan bendung dan *sub weir* dengan ketentuan sebagai berikut :

- a. Menggunakan model bendung standar dengan kemiringan hulu tegak, puncak tipe Ogee, dan kemiringan bagian hilir 1 : 1 *subweir* yang dibuat dari kayu dengan ukuran lebar 20 cm dan panjang 40 cm.
- b. Saluran terbuka dengan penampang segi empat lebar = 40 cm.
- c. Pemberian dasar yang bergerak (*moveable bed*) antara hilir bendung dan *subweir* menggunakan campuran pasir 50 % dengan kerikil 50 %
- e. Pompa dengan kapasitas tertentu (kapasitas pompa yang ada = 50 liter /dt) untuk menaikkan air dari tandon bawah ke tandon atas.
- f. Bak penampung air untuk mensuplai air ke model yang dilengkapi dengan kran pengatur air dan alat pengukur debit sehingga dapat diketahui debit yang mengalir adalah konstan.
- g. Meteran taraf (*point gauge*) untuk mengukur ketinggian muka air.
- h. Tabung pitot untuk mengukur kecepatan aliran.

Perencanaan Model Fisik

Model fisik bendung dibuat menirukan prototipe dari bendung Bakalan yang terletak di Desa Bakalan Krajan Kecamatan Wagir Kabupaten Malang. Pemilihan prototipe bangunan bendung tipe ini dianggap mewakili dari

tipe bendung yang umum dibuat di lapangan dan yang sering mengalami gerusan di bagian hilirnya.

Data teknis bendung Bakalan :

- Tinggi bendung : 9 m
- Lebar bendung : 12 m
- Tipe pelimpah : puncak pelimpah
- Tipe Ogee dengan kemiringan hulu tegak dan kemiringan hilir bersudut 45°
- Kedalaman banjir maksimum 1,75 m dari atas mercu pelimpah.

Model direncanakan dengan menggunakan perbandingan skala 1 : 30. Skala model vertikal sama dengan skala model horizontal (*Undistorted model*) dalam hal ini diharapkan tidak terjadi efek skala (parameter model harus sama dengan parameter prototipe). Apabila terjadi perbedaan, maka tidak boleh melebihi kesalahan maksimum yang diijinkan. Untuk itu dilakukan dengan memeriksa bilangan Froude (Priyantoro 1998: 35).

Skala model 1 : 30, maka skala panjang perbandingan antara model dan prototipe:

$$L_m / L_p = 1 / 30$$

Dengan berpedoman rumus di atas, maka diperoleh harga-harga perbandingan sebagai berikut :

$$\text{Panjang} : L_m = 1 / 30 \cdot L_p = 1 : 30$$

$$\text{Waktu} : T_m = (1 / 30)^{1/2}$$

$$T_p = 1 : 5,477$$

$$\text{Kecepatan} : V_m = (1 / 30)^{1/2}$$

$$V_p = 1 : 5,477$$

$$\text{Debit} : Q_m = (1 / 30)^{5/2}$$

$$Q_p = 1 : 4929,503$$

Dimensi model.

Tinggi pelimpah (P) = 30 cm, lebar saluran segi empat (B) = 40 cm (tanpa pilar), koefisien debit 2,19 dan kemiringan dasar saluran mendekati nol.

Debit rencana 6, 9 dan 12 l/det. Dasar berubah (*moveable bed*) bahan pasir dan

kerikil dengan perbandingan 50 % pasir dan 50 % kerikil, ditempatkan di hilir bendung dalam kotak sepanjang 1 m dengan kedalaman 30 cm. Profil model sesuai dengan prototipenya bendung Bakalan yaitu bendung standar dengan kemiringan hulu tegak, mercu pelimpah mengikuti persamaan $X^{1.85} = 2 H d^{0.85} Y$ dan kemiringan hilir 45°

Parameter dan Variabel Penelitian.

Pengkajian penelitian ini menyangkut banyak parameter dan variabel yang berpengaruh. Untuk mengatasi hal tersebut perlu dilakukan pengelompokan, meliputi :

1. Parameter merupakan kelompok yang ditetapkan dalam penelitian, dalam hal ini adalah :
 - a. Bentuk dan dimensi bendung (bentuk bendung standar dengan lebar 40 cm dan tinggi 30 cm).
 - b. Bentuk dan dimensi saluran (saluran segi empat dengan lebar 40 cm)
 - c. *Subweir* berbentuk pelimpah ambang lebar dengan lebar 20 cm.
 - d. Macam material untuk dasar berubah yaitu campuran 50 % pasir dan 50 % kerikil.
2. Variabel

Variabel merupakan faktor yang dapat dipengaruhi, dalam hal ini adalah :

- a. Variabel yang diatur : debit ($Q_1 = 6 \text{ l/dt}$, $Q_2 = 9 \text{ l/dt}$ dan $Q_3 = 12 \text{ l/dt}$), jarak *subweir* ($L_1 = 90 \text{ cm}$, $L_2 = 75 \text{ cm}$ dan $L_3 = 60 \text{ cm}$) dan ketinggian *subweir* ($Z_1 = 1,6 \text{ cm}$, $Z_2 = 3,3 \text{ cm}$ dan $Z_3 = 5 \text{ cm}$).
- b. Variabel tergantung : kedalaman gerusan (d)
- c. Variabel yang lain : percepatan gravitasi (g) (tetap)

Sehingga rancangan penelitian ini adalah model faktorial 3 x 3 x 3, dan dapat ditabelkan seperti **Tabel 1**.

Tabel 1. Rancangan Penelitian.

Q	Z	L		
		L1	L2	L3
Q1	Z1	d1	d2	d3
	Z2	d4	d5	d6
	Z3	d7	d8	d9
Q2	Z1	d10	d11	d12
	Z2	d13	d14	d15
	Z3	d16	d17	d18
Q3	Z1	d19	d20	d21
	Z2	d22	d23	d24
	Z3	d25	d26	d27

Dalam penelitian ini untuk menguji hipotesa dilakukan dengan uji statistik yakni uji T untuk signifikan parameter regresi dan uji Z untuk uji variansi secara keseluruhan dengan *level of significance* = 5%.

Sedangkan pengujian untuk kesesuaian kurva regresi diuji dengan koefisien determinasi (R^2) Dan keeratan hubungan antar variabel diuji dengan koefisien korelasi (r)

Pengambilan keputusan untuk uji T adalah :

- a. Jika $t_{hitung} < t_{tabel}$, hipotesa H_0 diterima
- b. Jika $t_{hitung} \geq t_{tabel}$, hipotesa H_0 ditolak

Pengambilan keputusan untuk uji Z adalah :

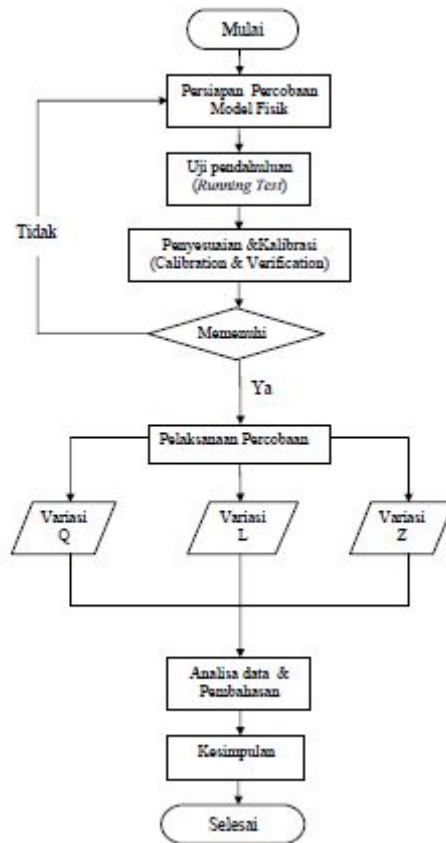
- c. Jika $Z_{hitung} < Z_{tabel}$, hipotesa H_0 diterima
- d. Jika $Z_{hitung} \geq F_{tabel}$, hipotesa H_0 ditolak

Langkah Penelitian

1. Perencanaan model fisik dan rancangan perlakuan penelitian.
2. Analisa ketinggian aliran air di pelimpah sesuai dengan debit yang akan dialirkan dengan menggunakan metode tahapan langsung didapatkan h_1 dihitung ketinggian air di hilir (h_2). Dihitung panjang loncatan air, kemudian dihitung pula kedalaman gerusannya.
3. Pembuatan model (*undistorted model*) dengan skala 1 : 30

4. Kalibrasi alat ukur debit dan alat ukur kecepatan
5. Pengambilan data
6. Analisa data

Adapun bagan alir penelitian digambarkan pada **Gambar 1** berikut.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi alat ukur

Sebelum dilakukan penelitian dengan serangkaian percobaan debit, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi terhadap alat ukur yang akan digunakan. Dilakukannya kalibrasi ini agar debit yang melewati masing-masing alat ukur yang digunakan dapat terukur dengan benar, tepat dan teliti sesuai dengan kondisi saluran serta peralatan yang digunakan dalam penelitian.

Kalibrasi alat ukur debit, mengacu pada hukum bejana berhubungan yaitu jika tinggi muka air dalam kondisi konstan, maka $Q_1 = Q_2 = Q_3$, dengan Q_1

= debit Rechbox, Q_2 = debit Thompson dan Q_3 = debit takar. Debit yang didapatkan dari hasil penakaran dianggap yang paling benar dan dipakai sebagai dasar dalam melakukan kalibrasi terhadap masing-masing alat ukur yang digunakan.

Proses perhitungan kalibrasi dilakukan dengan menghitung besarnya kesalahan relatif yang terjadi antara debit takar dengan debit pengukuran. Pembatasan kesalahan relatif diambil 5 %. Apabila kesalahan relatif rata-rata yang terjadi lebih kecil, maka kalibrasi hanya dilakukan dengan penyesuaian kurva dan sebaliknya apabila lebih besar, perlu dicari koefisien kalibrasi (Priyantoro dan Supriyanto 1998: 32).

Kalibrasi alat ukur debit Rehbock.

Diambil anggapan bahwa :

$$Q_{\text{aktual}} = K \cdot Q_{\text{hitung}}$$

dengan $Q_{\text{aktual}} = Q_{\text{takar}}$

$$Q_{\text{hitung}} = Q_{\text{Rehbock}}$$

$$K = \text{koefisien kalibrasi}$$

Dalam proses ini, debit yang didapatkan dari hasil penakaran digunakan sebagai dasar dalam melakukan kalibrasi terhadap alat ukur sehingga debit hasil penakaran digunakan sebagai pengendali dan paling benar. Hasil percobaan memberikan data sebagai berikut :

Tabel 2. Debit alat ukur Rehbock

Seri	h_{Rehbock} (m)	Q_{Rehbock} (l/dt)	Q_{takar} (l/dt)	Kesalahan relatif (%)
1	0,005			
2	0,007	0,807	0,814	0,860
3	0,008	1,242	1,304	4,755
4	0,010			
5	0,011	1,480	1,531	3,331
6	0,013			
7	0,014	1,996	2,210	9,683
8	0,017			
9	0,020	2,273	2,403	5,410
10	0,023	2,859	3,249	12,004
		3,168	3,316	4,463
		4,155	4,696	11,520
		5,227	6,272	16,661
		6,375	6,811	6,401
Rata-rata 7,509 %				

Tabel 3. Q kalibrasi pada alat ukur debit Rehbock.

h (m)	Q_{hitung} (l/dt)	$Q_{\text{kalibrasi}}$ (l/dt)
0.010	1.9964	2.014
0.012	2.5603	2.583
0.014	3.1681	3.197
0.016	3.8167	3.851
0.018	4.5036	4.544
0.020	5.2266	5.274
0.022	5.9839	6.038
0.024	6.7741	6.835
0.026	7.5955	7.664
0.028	8.4472	8.523
0.030	9.3279	9.412
0.032	10.2366	10.329
0.034	11.1726	11.273
0.036	12.1348	12.244
0.038	13.1227	13.241

Terlihat bahwa

1. Kesalahan relatif rata-rata alat ukur debit Rehbock = 7,509 %. Dan kesalahan relatif terkecil = 0,86 % pada ketinggian air = 0,05 (m).
2. Pada alat ukur debit Rehbock, kesalahan relatif membesar jika debit membesar. Walaupun demikian tidak dapat dikatakan jika debit mengecil maka hasil pengukuran lebih teliti. Pada kisaran debit tertentu, alat ukur tidak dapat mengukur secara memadai.
3. Kesalahan relatif merupakan kesalahan yang dihasilkan pada alat ukur yang bersangkutan pada waktu melakukan pengukuran pada debit tertentu.

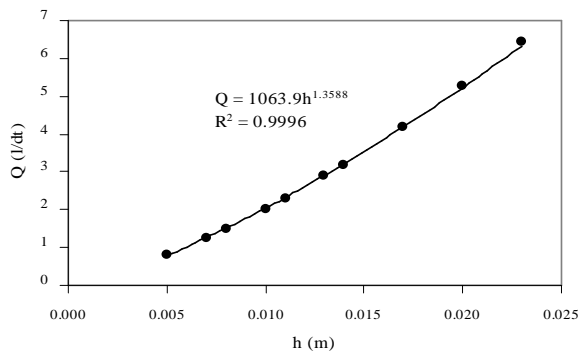
Uji statistik data pengukuran Q Rehbock (dapat dilihat pada Lampiran). Hasil uji menunjukkan bahwa : Pada uji Z didapat nilai Z score < Z tabel terlihat bahwa perbedaan rerata tidak nyata (Ho diterima) dan pada uji T, nilai T score < T tabel yang berarti data berasal dari populasi yang sama (Ho diterima).

Selanjutnya untuk perhitungan debit kalibrasi sebagai patokan diambil debit serie 1, dengan $Q_{\text{aktual}} = 0,814$ l/dt karena mempunyai kesalahan relatif terkecil yaitu sebesar 0,86 %. Dengan mengalikan koefisien kalibrasi (K) untuk setiap debit hitung akan didapat serie debit sebagai berikut :

$$K = Q_{\text{aktual}} / Q_{\text{hitung}} = 0,814 / 0,807 = 1,009$$

Serie debit: $Q_{\text{kalibrasi}} = 1,009 \times Q_{\text{Rehbock}}$
 Hasil seri debit kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari Tabel 3. dibuat gambar grafik hubungan Q Rehbock kalibrasi dan h :



Gambar 2. Grafik hubungan Q Rehbock kalibrasi dan h

Dari hasil analisa didapat persamaan Q Rehbock kalibrasi

$$Q = 1063.9 h^{1.3588} \text{ liter/dt}$$

h = kedalaman air di atas ambang Rehbock dalam meter.

$$R^2 = \text{koefisien determinasi} = 0.9996$$

$$r = \text{koefisien korelasi} = 0,9998$$

Terlihat bahwa : Harga koefisien korelasi = 0,9998 mendekati 1 artinya korelasi atau keeratan hubungan antara kedua variabel kuat.

Selanjutnya untuk mendapatkan debit model yang dikehendaki dilakukan interpolasi linear atau dengan melihat grafik hubungan h dan Q_{Rehbock} :

Interpolasi linier untuk debit $Q = 6$ l/dt

$$h = 0,020 + ((6 - 5,274) / (6,038 - 5,274)) \times (0,022 - 0,020) = 0,0219 \text{ m}$$

Dengan cara yang sama didapatkan untuk debit :

$$Q = 9 \text{ l/dt} \text{ didapatkan } h = 0,0291 \text{ m}$$

$$Q = 12 \text{ l/dt} \text{ didapatkan } h = 0,0355 \text{ m}$$

Kalibrasi Alat Ukur Debit Thompson.

Tabel 4. Debit alat ukur Thompson.

Se ri	Debit Thompson (l/dt)	Debit Takar (l/dt)	Kesalahan relatif (%)
1	0,809	0,814	0,567
2	1,363	1,304	4,491
3	1,600	1,531	4,512
4	2,041	2,210	7,640
5	2,174	2,403	9,527
6	2,993	3,249	7,873
7	3,169	3,316	4,432
8	4,194	4,696	10,699
9	5,237	6,272	16,500
10	6,424	6,811	5,685
			Rata-rata 7,193

Sumber : hasil perhitungan.

Terlihat bahwa :

1. Kesalahan relatif rata-rata = 7,193 % dan kesalahan relatif terkecil = 0,567 %.
2. Pada alat ukur debit Thompson, kesalahan relatif membesar jika debit membesar. Namun demikian tidak dapat dikatakan jika debit mengecil maka hasil pengukuran lebih teliti. Pada kisaran tertentu, alat ukur tidak dapat mengukur secara memadai.
3. Perlu dilakukan kalibrasi antara hasil pengukuran debit Thompson terhadap debit takar yang menjadi patokan yang dianggap benar.

Uji statistik data pengukuran Q Thompson (dapat dilihat pada Lampiran). Hasil uji menunjukkan bahwa : Pada uji Z didapat nilai Z score < Z tabel terlihat bahwa perbedaan rerata tidak nyata (Ho diterima) dan pada uji T, nilai T score < T tabel yang berarti data berasal dari populasi yang sama (Ho diterima).

Selanjutnya untuk perhitungan debit kalibrasi sebagai patokan diambil

debit serie 1, dengan $Q_{\text{aktual}} = 0,814 \text{ l/dt}$ karena mempunyai kesalahan relatif terkecil yaitu sebesar 0,567 %. Dengan mengalikan koefisien kalibrasi (K) untuk setiap debit hitung akan didapat serie debit sebagai berikut :

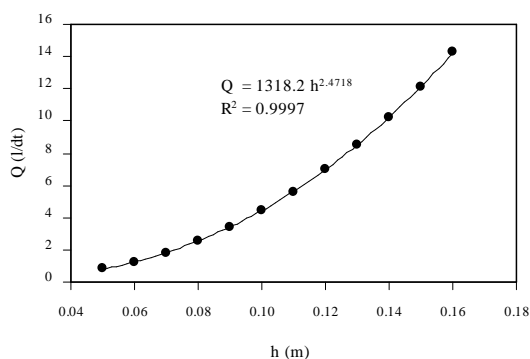
$$K = Q_{\text{aktual}} / Q_{\text{hitung}} = 0,814 / 0,809 = 1,006$$

Serie debit : $Q_{\text{kalibrasi}} = 1,006 \times Q_{\text{Thompson}}$
 Hasil seri debit kalibrasi dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 5. Q kalibrasi pada alat ukur debit Thompson.

h (m)	Q _{hitung} (l/dt)	Q _{kalibrasi} (l/dt)
0.050	0.802	0.806
0.060	1.252	1.260
0.070	1.829	1.840
0.080	2.540	2.556
0.090	3.397	3.418
0.100	4.409	4.435
0.110	5.583	5.616
0.120	6.929	6.970
0.130	8.454	8.505
0.140	10.168	10.229
0.150	12.079	12.151
0.160	14.193	14.279

Dari tabel di atas dibuat grafik hubungan Q Thompson kalibrasi dan h :



Gambar 3. Grafik hubungan Q Thompson kalibrasi dan h

Dari hasil analisa didapat persamaan Q Thompson kalibrasi :

$Q = 1318,2 h^{2,4718}$ liter/dt
 h = kedalaman air di atas ambang Thompson dalam meter.

$R^2 =$ koefisien determinasi = 0,9997
 $r =$ koefisien korelasi = 0,9998

Terlihat bahwa : Harga koefisien korelasi = 0,9998 artinya korelasi atau keeratan hubungan antara kedua variabel kuat.

Syarat Akurasi Model

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur tinggi muka air pada pelimpah. Sebagai pedoman kalibrasi dan keakuratan model, digunakan acuan ketinggian aliran air di atas mercu pelimpah (h kritis). Disyaratkan kesalahan maksimum antara tinggi air hasil uji model fisik dengan hitungan teoritis sebesar 10 %.

Perhitungan kesalahan relatif tinggi air pada model dan teoritis digunakan persamaan :

$$K_r = \left| \frac{H_m - H_t}{H_t} \right| \times 100\%$$

dengan :

H_t = tinggi air teoritis (cm)

H_m = tinggi air pada model hasil pengukuran (cm)

Tabel 6. Rekapitulasi Kesalahan Relatif Uji Fisik (K_r < 10 %)

Debit Q (l/dt)	H _t (cm)	H _m (cm)			Kesalahan Relatif (%)		
		Kiri	As	Kanan	Kiri	As	Kanan
12	4,51	4,59	4,52	4,50	1,79	0,23	0,21
9	3,72	3,79	3,72	3,69	1,81	0,07	0,87
6	2,84	3,01	2,97	2,91	5,95	4,54	2,43

Dari tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa beda tinggi air teoritis (H_t) dan tinggi air pengamatan (H_m) di atas pelimpah pada model, seluruhnya mempunyai kesalahan relatif (K_r) lebih kecil dari 10%, dengan demikian model dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya.

Perhitungan debit prototipe dan debit model

Debit prototipe dihitung berdasarkan data ke dalaman aliran di atas pelimpah pada saat terjadi banjir maksimum yang pernah terjadi pada bendung Bakalan Kecamatan Wagir Kabupaten Malang.

Hd = 1,75 m. (data dari gambar prototipe)

$$Q = C.L.H_e^{1.5}$$

Tinggi pelimpah 9 m > 1,33 Hd sehingga pengaruh tinggi kecepatan dapat diabaikan sehingga rumus debit menjadi

$$Q = C.L.H_d^{1.5}$$

$$C = 2,2 - 0,0416 (1,75/9)^{0,99} = 2,19$$

$$L_{eff} = 12 - 2(0 \times 0,01 + 0,1) \times 1,75 = 11,65 \text{ m}$$

$$Q_p = 2,19 \times 11,65 \times 1,75^{1.5} = 59,113 \text{ m}^3/\text{dt.}$$

$$Q_m = 59113 / 4929,503 = 11,99 \text{ } \neq 12 \text{ l/dt}$$

Perhitungan profil aliran teoritis di atas pelimpah :

Untuk mendapatkan kedalaman air Y1 (*initial depth*) di hilir pelimpah pada saluran yang prismatic menggunakan persamaan kekekalan energi Bernoulli, dengan anggapan bahwa tidak ada kehilangan energi dari puncak pelimpah sampai kaki pelimpah. Alur pengerjaan dengan menetapkan data-data sebagai berikut :

- Lebar saluran = 40 cm,
- Koefisien kekasaran Manning = 0,015
- Koefisien kecepatan = 1,15
- Debit dalam kondisi konstan dengan tiga variasi yaitu 12 l/dt, 9 l/dt dan 6 l/dt.

Cara perhitungan mengikuti langkah :

- (1) Nomor pias pembagian jarak pelimpah
- (2) Jarak antar pias pelimpah
- (3) Sudut tiap pias pelimpah
- (4) Cosinus sudut pias pelimpah
- (5) Elevasi titik pias pelimpah
- (6) Tinggi teoritis yang dihitung dengan coba-coba, dengan nilai h awal dari persamaan (2.7)

(7) Tinggi teoritis dikalikan $\cos \alpha$

(8) Luas penampang saluran ($A = Bx h$), h dari kolom (6)

(9) Kecepatan awal teoritis ($v = q/h$)

(10) Keliling basah ($P = B + 2h$)

(11) Jari-jari hidrolis ($R = A/P$)

(12) Energi ($E = h + \alpha.v^2/2g$)

(13) Kemiringan gesek dari persamaan (2.14)

(14) Kemiringan gesek rerata $(Sf_1 + Sf_2)/2$

(15) Kehilangan tinggi tekan tiap pias

(16) Kehilangan tinggi tekan total

(17) Referensi garis, $E_1 = E_2 + H_f$ total

Pada saat tepat di atas mercu pelimpah kondisi aliran adalah kritis (dijadikan titik acuan perhitungan), pada titik tinjau yang selanjutnya kondisi alirannya adalah super kritis. Perhitungan berakhir pada hilir pelimpah hingga didapatkan kedalam air h_1 .

Tinggi Subweir

Dalam menentukan ketinggian *subweir* maka dihitung terlebih dahulu ketinggian subweir untuk mendapatkan kedalaman kritis diatas ambang dengan menggunakan rumus 2.23

$$z_c = h_1 \left[1 + \frac{F_1^2}{2} - 1,5.F_1^{2/3} \right]$$

$$z_c = 2,589 \left(1 + \frac{2,299^2}{2} - 1,5 \times 2,299^{2/3} \right)$$

$$z_c = 2,668 \text{ cm.}$$

Untuk mendapatkan kedalaman air di hilir bendung dapat lebih tinggi, maka kedalaman subweir > z_c dalam hal ini ditentukan kedalaman $Z_{max} = 5 \text{ cm}$

KESIMPULAN

Dalam upaya untuk mengungkap pengaruh pemasangan *subweir* terhadap gerusan yang terjadi di hilir bendung, maka dalam penelitian ini digunakan tiga variasi debit (6 l/dt, 9 l/dt dan 12 l/dt), tiga variasi kedalaman *subweir* (1,6 cm, 3,3 cm dan 5 cm) dan tiga letak penempatan *subweir* (60 cm, 75 cm dan

90 cm). Dari hasil penelitian terungkap bahwa kedalaman gerusan yang terjadi terbukti dipengaruhi oleh variasi debit, ketinggian *subweir* maupun letak penempatannya.

Secara lebih rinci temuan hasil penelitian dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Dari hasil pengamatan didapatkan kondisi tanpa penambahan *subweir*, kedalaman gerusan mempunyai hubungan yang erat dengan penambahan besarnya debit. Hubungan nyata tersebut dalam penelitian ini bersifat linier, dimana apabila besarnya debit bertambah maka kedalaman gerusan akan semakin dalam juga.
2. Kedalaman gerusan yang terjadi terlihat nyata dengan adanya penambahan jarak penempatan *subweir* dan perbedaan debit yang dialirkan. Pada kondisi ini penambahan debit akan menghasilkan gerusan yang lebih dalam, akan tetapi jarak penempatan yang terlalu jauh dari tubuh bendung ($L \geq 75$ s/d 90 cm) tidak menghasilkan kedalaman gerusan yang lebih dangkal, akan tetapi gerusannya akan semakin dalam. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa penempatan *subweir* tersebut dapat mengurangi kedalaman gerusan pada jarak yang tidak terlalu jauh dari tubuh bendung ($60 \leq L < 75$ cm).
3. Terdapat perbedaan kedalaman gerusan yang terjadi akibat adanya perbedaan jarak penempatan *subweir* dan tingginya *subweir*. Gerusan tersebut akan semakin berkurang dengan adanya penambahan tinggi *subweir* sampai pada ketinggian maksimal ($Z = 5$ cm), sedangkan penambahan ketinggian itu akan mengurangi kedalaman gerusan pada jarak penempatan *subweir* yang bervariasi.
4. Kedalaman gerusan yang terjadi dengan adanya penambahan tinggi

subweir dan perbedaan debit yang dialirkan, akan memberikan hasil yang berbeda. Secara umum apabila debit membesar dan dibarengi dengan penambahan tinggi *subweir* akan menghasilkan gerusan yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan tanpa adanya *subweir* ataupun dengan penambahan *subweir* di bawah nilai maksimum.

5. Secara umum dapat dikatakan bahwa adanya penambahan *subweir* dan jarak penempatan *subweir* tersebut, akan berpengaruh terhadap kedalaman gerusan yang terjadi. Kedalaman gerusan yang terjadi akan dapat berkurang secara umum apabila ketinggian *subweir* berada pada tinggi maksimum (5 cm) dengan jarak penempatan 75 cm dari kaki bendung. Hal ini terjadi akibat adanya perubahan aliran dan pemecahan energi aliran yang terjadi di hilir bendung. Semakin tinggi *subweir* yang dipasang, daya pemecahan energinya pun akan semakin besar. Pemecahan energi ini akan tidak berarti apabila *subweir* tersebut diletakkan jauh dari kaki bendung, karena energi akibat turbulensi air yang terjadi akan mengakibatkan gerusan yang hampir serupa dalamnya apabila dibandingkan dengan tidak adanya penempatan *subweir*.
6. Dari hasil penelitian model hidrolis kasus bendungan Bakalan dengan skala model 1 : 30, maka diberikan rekomendasi untuk mengatasi gerusan yang terjadi di hilir bendung dapat dibuat *subweir* dengan dimensi sebagai berikut :
 - Tinggi *subweir*
 $= 5 \text{ cm} \times 30 = 1,5 \text{ m}$.
 - Lebar *subweir*
 $= 20 \text{ cm} \times 30 = 6 \text{ m}$
 - Jarak penempatan *subweir* dari hilir bendung = $75 \text{ cm} \times 30 = 22,5 \text{ m}$

Saran

1. Penelitian gerusan ini dapat lebih dikembangkan lagi dengan menambah variasi ketinggian dan penempatan jarak *subweir* serta penambahan debit yang lebih bervariasi agar kedalaman yang optimal dapat diketahui.
2. Bentuk pelimpah dapat dibuat lebih bervariasi agar hasil gerusan dari berbagai bentuk pelimpah tersebut dapat diketahui.
3. Penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhatikan variasi-variasi bentuk pelimpah, tinggi dan jarak penempatan ambang.
4. Hasil penelitian ini akan lebih optimal dan berhasil guna apabila variasi yang dilakukan semakin banyak sehingga kedalaman gerusan yang optimal dapat diketahui, walaupun akan memerlukan waktu dan biaya yang cukup besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggrahini. 1997. *Hidrolika Saluran Terbuka*. Penerbit CV. Citra Media, Surabaya.
- Anonim. 1986. *Standart Perencanaan Irigasi*, (KP 01-07). Direktorat Jendral Pengairan. Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta
- Anonim. 2000. *Buku Petunjuk Praktikum Hidrolika Terapan*. Laboratorium Hidrolika Terapan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (tidak diterbitkan), Malang
- Braja, M. Das. (1988) *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik)* Jilid I. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Chanson, H. and Montes, S. 1995 Characteristics of Undular Hydraulic Jumps: Experimental Apparatus and Flow Patterns *Journal of Hydraulic Engineering* 121, 129-144.
- Chow, V.T. 1985. Terjemahan Suyatman, Sugiharto, VFX. K. dan Rosalina, E.V.N. *Hidrolika Saluran Terbuka*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Priyantoro, D. 1987. *Teknik Pengangkutan Sedimen*. Edisi Pertama. Penerbit HMP. FT. Unibraw, Malang.
- Priyantoro, D. 1991. *Pengaruh Pemasangan Gigi Benturan (Baffle Block) Terhadap Panjang Lantai Peredam Energi Kolam Olakan Datar Tipe IV*. Hasil Penelitian (tidak diterbitkan), Malang.
- Raju, R.K.G. 1986. Terjemahan Pangaribuan, Y.P. *Aliran Melalui Saluran Terbuka*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Semaoen, M.I., dkk. 1999. *Pedoman Penulisan Tesis dan Disertasi*. Pasca Sarjana Universitas Brawijaya (tidak diterbitkan), Malang.
- Soetopo, W. dan Montarcih, L. 1999 *Statistika*. Bahan Kuliah Program Alih Tahun program Studi Teknik Sipil, Pasca Sarjana Universitas Brawijaya (tidak diterbitkan), Malang.
- Sosrodarsono, S dan Tominaga, M. 1985. *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*. Penerbit P.T. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Subramanya. 1982. *Flow in Open Channel*. Vol. 2, Mc Graw Hill Publishing Coy, New Delhi.
- Sudjana. 1989 *Metode Statistika* Edisi Ke 5. Penerbit Tarsito, Bandung.
- Suhardjono. 1999. *Metode Penelitian*. Bahan Kuliah Program Alih Tahun program Studi Teknik Sipil, Pasca Sarjana Universitas Brawijaya. (tidak diterbitkan) Malang.
- Triatmodjo, B. 1996. *Hidrolika II*. Penerbit Beta Offset, Yogyakarta.
- Wu, S and Rajaratnam, N. 1995. Effect of Baffles on Submerged Flows, *Journal of Hydraulic Engineering* 121, 644-652