

MODEL FISIK PENELUSURAN PELIMPAH BENDUNGAN BENER

Akmal¹, Ganta Dipayasa²

¹Dosen Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Aceh
email : akmal_arh@yahoo.com

²Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA
email : gantal_91@yahoo.co.id

ABSTRAK

Bendungan Bener ini akan dibangun di Kabupaten Purworejo, Provinsi Jawa Tengah. bendungan ini difungsikan untuk keperluan irigasi, penyediaan air baku dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Adapun pertimbangan pembuatan bendungan baru ini dicanangkan oleh Balai Besar Wilayah Sungai Serayu-Opak.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja hidraulik bangunan pelimpah (*Spillway*) sehingga mendapatkan gambaran mengenai keamanan hidraulik bendungan tersebut. Simulasi model ini dilakukan dengan banjir berbagai kala ulang, dan diharapkan banjir tersebut tidak melimpas dari badan bendungan. Secara keseluruhan simulasi model ini masih perlu dievaluasi untuk mengetahui apakah terdapat fenomena hidraulika lain yang terjadi

Dengan dibuatnya model fisik ini diharapkan untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas mengenai perilaku hidraulik serta fungsi *spillway* sebagai suatu kesatuan bagian dari Bendungan Bener. Dari hasil penelitian, didapat bahwa *spillway* berfungsi dengan baik didalam mengalirkan air dari hulu ke hilir dan tidak meluap ke tubuh bendungan. Adapun hasil yang didapat dari simulasi model bendungan bila dibandingkan dengan hasil model matematis atau teori tidak terlalu berbeda jauh.

Kata kunci: Simulasi, Model Fisik, dan *Spillway*

1. PENDAHULUAN

Rencana Waduk Bener berada di Sungai Bogowonto, yang masuk ke wilayah administrasi Kabupaten Purworejo, bendungan ini difungsikan untuk keperluan irigasi, penyediaan air baku dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Waduk Bener di kabupaten Purworejo ini dirancang untuk mencukupi kebutuhan air Daerah Irigasi Guntur, Daerah Irigasi Loning Kragilan, Daerah Irigasi Bandung, Daerah Irigasi Bandung Sudagaran, Daerah Irigasi Kedungputri, Daerah Irigasi Siwatu, dan Daerah Irigasi Boro.

Rencana Waduk Bener ini terletak di Desa Guntur Kecamatan Bener Kabupaten Purworejo, dengan lokasi bendungan (titik tengah terletak pada kordinat $7^{\circ}36'0''S$ $111^{\circ}1'14''E$. Perancangan detail waduk Bener sebelumnya sudah dilakukan oleh Konsultan PT. Indra Karya pada akhir tahun 2011.

Maksud dan tujuan penyelenggaraan Model fisik Waduk Bener ini secara umum adalah untuk mendapatkan gambaran yang jelas mengenai perilaku hidraulik pelimpah bendungan, khususnya bangunan kontrol saluran pelimpah. Gambaran tersebut kemudian dijadikan sebagai pedoman apakah bangunan bendungan betul-betul cukup aman untuk mengalirkan debit-debit rancangan yang diperhitungkan. Pembuatan model fisik Waduk

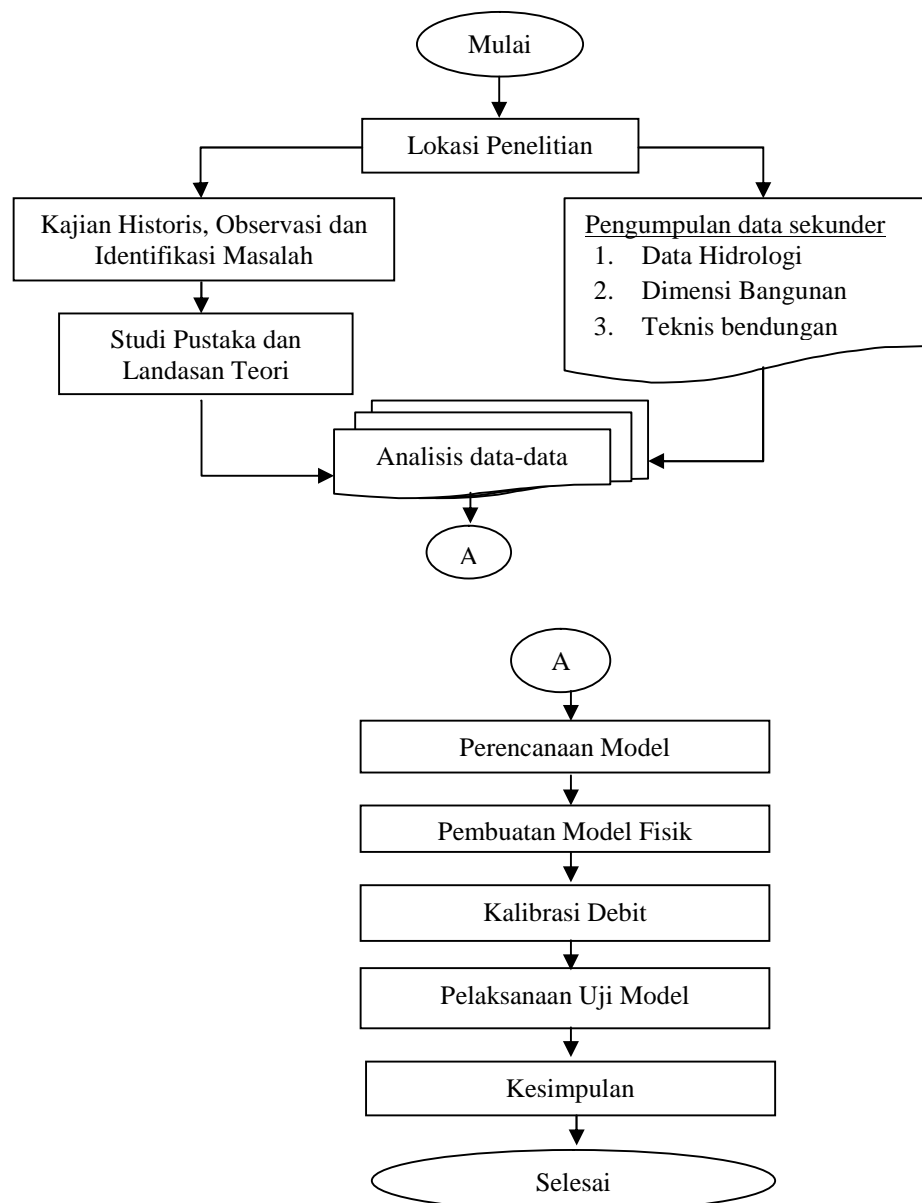
Bener ini merupakan suatu penyederhanaan dari kompleksitas yang *real* di lapangan.

Adapun informasi yang didapat dari penelitian ini adalah tinggi muka air yang meluap melalui mercu pelimpah model fisik Waduk Bener yang kemudian dibandingkan dengan hasil hitungan teoritis. Hal tersebut penting untuk menjelaskan apakah saluran pelimpah dapat bekerja dengan baik dan aman.

Lokasi Penelitian

Rencana Bendungan Bener terletak di Desa Guntur Kecamatan Bener Kabupaten Purworejo. Detail desain Bendungan telah dibuat pada tahun 2011, model bendungan dibangun dengan skala 1 : 100 di Laboratorium Hidraulika, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada dan menempati ruangan tertutup seluas + 15.00m x 12.00m.

Metodologi Penelitian



2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fungsi Waduk

Waduk adalah fasilitas tampungan yang dibuat untuk menampung air selama debit tinggi dan mengeluarkannya pada saat dibutuhkan (Sudjarwadi, 2008). Hal ini berarti bahwa waduk mempunyai tugas membuat modifikasi dari distribusi air menurut alam, dan menciptakan distribusi air buatan.

Sebuah bendungan mempunyai fungsi utama sebagai tempat penangkap/penampung air. Air ditampung untuk menjaga ketersediaan air ketika aliran sungai dari hulu kecil atau dengan kata lain sedang mengalami musim kemarau. Bendungan juga memiliki fungsi untuk menaikkan level/elevasi air sungai. Air yang ditampung dan dinaikkan level/elevasinya tersebut dapat dimanfaatkan untuk:

-) Irigasi / Irrigation
-) Hydropower
-) Suplai air untuk kebutuhan domestik dan industri
-) Sarana Transportasi Air / Inland Navigation
-) Pengontrol Banjir / Flood Control/Prevention
-) Daerah Reklamasi / Land Reclamation
-) Pengalihan Air / Water diversion
-) Rekreasi / Recreation

2.2. Karakteristik Waduk

Menurut Sudjarwadi (2008), bagian-bagian pokok karakter fisik suatu waduk adalah volume hidup (*active storage*), volume mati (*death storage*), tinggi muka air minimum, tinggi mercu bangunan pelimpah dan tinggi muka air maksimum.

Volume hidup (*active storage*) adalah bagian dari bendungan yang ditujukan untuk menampung sejumlah air yang diperhitungkan masih dapat digunakan untuk pemanfaatan. Volume mati (*death storage*) adalah bagian dari bendungan yang ditujukan sebagai penampung sedimen dalam jumlah/volume yang diperhitungkan mencukupi selama usia pakai bendungan.

2.3. Bangunan Pelimpah

Bangunan pelimpah merupakan salah satu komponen penting dari suatu waduk, yang berfungsi melepaskan kelebihan air dan sebagai saluran banjir, yang tidak dapat lagi ditampung di waduk tersebut (USBR, 1987). Adapun menurut Soedibyo, 2003, bangunan pelimpah adalah bangunan beserta instalasinya untuk mengalirkan air banjir yang masuk ke dalam waduk agar tidak membahayakan keamanan bendungan. Tujuan pelimpahan ini yaitu agar tidak terjadi *overtopping* pada bangunan utama bendungan, khususnya pada bendungan tipe urugan. Kapasitas yang dibutuhkan (laju aliran air keluar maksimum melalui pelimpah banjir) tergantung pada banjir rencana pelimpah itu (hidrograf aliran masuk ke waduk), kapasitas pengaliran dari bangunan-bangunan pelepasan, serta simpanan yang tersedia (Linsley, 1979).

3. DASAR TEORI

3.1. Persamaan Dasar Penelusuran Waduk

Menurut USBR (1987) dalam Legono (1997), penelusuran aliran masuk dan aliran keluar waduk dilakukan dengan menggunakan persamaan dasar penelusuran volume menurut Muskingum. Metode Muskingum ini hanya meninjau hukum kontinuitas dan tampungan dan tidak didasarkan kepada hukum hidraulika. Dengan memanfaatkan data aliran pada suatu titik control di daerah aliran sungai yang ditinjau yang menghasilkan suatu debit puncak atau hidrograf debit (hubungan antara debit dengan waktu). Dan pola alirannya bisa direncanakan sesuai dengan karakteristik tampungan waduk dan karakteristik bendungan yang ingin dibangun. Penelusuran banjir dengan Metode Muskingum ini hanya berlaku pada kondisi diantaranya tidak ada anak sungai yang masuk ke dalam bagian memanjang palung sungai yang ditinjau dan Penambahan dan kehilangan air oleh curah hujan, aliran masuk atau keluar air tanah dan evaporasi, kesemuanya ini diabaikan.

Akumulasi tampungan pada suatu waduk tergantung pada selisih antara laju aliran masuk dan aliran keluar dalam deskrit waktu t . Penelusuran banjir dalam metode ini dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut :

$$S = Q_i \cdot t - Q_o \cdot t \quad (1)$$

dengan :

S = Tampungan terakumulasi selama deskrit waktu t

Q_i = Aliran masuk rerata selama deskrit waktu t

Q_o = Aliran keluar rerata selama deskrit waktu t

Laju aliran masuk dalam fungsi waktu didapat dari hidrograf debit banjir rancangan. Laju aliran keluar didapat dari debit yang melimpah melalui bangunan pelimpah menurut fungsi elevasi muka air waduk. Kemudian besarnya tmpungan dipresentasikan oleh hubungan antara tampungan waduk dengan elevasi muka air waduk.

Untuk mempermudah pelaksanaan perhitungan didalam analisis data, rumus tersebut diatas diubah menjadi :

$$\frac{1}{2}(I_n + I_{n+1}) \cdot t = \frac{1}{2}(O_n + O_{n+1}) \cdot t + A \cdot H \quad (2)$$

dengan :

I_n = *Inflow* pada awal t ,

I_{n+1} = *Inflow* pada akhir t ,

O_n = *Outflow* pada awal t

O_{n+1} = *Outflow* pada akhir t ,

A = Luas permukaan air waduk pada saat yang ditinjau,

H = Perubahan elevasi waduk selama t .

Persamaan aliran keluar melalui pelimpah bendungan tipe Ogee ditulis ke dalam persamaan berikut (USBR,1987, Legono,1997) :

$$Q_{\text{pelimpah}} : C.B.H^{3/2} \quad (3)$$

dengan,

Q_{pelimpah} : Aliran melalui mercu pelimpah (m^3/detik),

C : Koefisien peluapan,

B : Lebar mercu pelimpah (m),

H : Tinggi air di hulu (m)

Nilai koefisien C dipengaruhi oleh tinggi mercu pelimpah serta tinggi peluapan H, dimana pada sistem “SI” (meter-kilogram-second), nilai C berkisar antara 2,0-2,25 (Legono, 1997).

3.2. Damping Efficiency

Nilai efisiensi peredaman (*damping efficiency*) banjir biasanya digunakan untuk mengetahui seberapa efektif suatu bendungan dapat menekan puncak banjir, yang dihitung dengan persamaan :

$$DE = (X/Y) \times 100\% \quad (4)$$

dengan,

DE = *dampinf efficiency* atau efisiensi peredaman

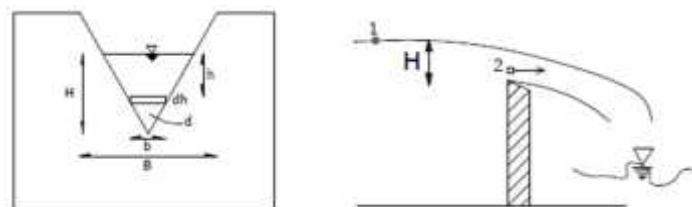
X = selisih antara puncak hidrograf *inflow* dengan puncak *outflow* (m^3/dtk)

Y = puncak hidrograf *inflow* (m^3/dtk)

Dasar pertimbangan kebagusan nilai efisiensi peredaman biasanya dihitung berdasarkan penelusuran banjir PMF (*Probable Mazimum Flood*).

3.3. Alat Ukur Debit

Pada ujicoba model ini, pengukuran aliran yang masuk dalam area model test dilakukan dengan menggunakan peluap ambang tajam berbentuk segitiga dengan sudut 90^0 yang sering disebut dengan peluap Thomson. Gambar dibawah menunjukkan skema aliran melalui ambang peluap Thomson.



Gambar 1. Skema Aliran Peluap Thomson

Persamaan debit melalui peluap ambang segitiga adalah :

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan \frac{r}{2} \sqrt{2g} H^{\frac{5}{2}} \quad (5)$$

dengan,

Q = debit aliran

Cd = perbandingan antara debit nyata dan debit teoritis

r = sudut peluap segitiga

H = tinggi peluapan

g = gravitasi

4. PEMBUATAN DAN PENGUJIAN MODEL FISIK BENDUNGAN BENER

4.1. Pembuatan Model Fisik

a. Skala Model

Penentuan skala model didasarkan pada kondisi dan ukuran laboratorium yang dapat dimanfaatkan serta fasilitas-fasilitas yang dapat digunakan (listrik, pompa, dll). Semakin besar skala yang digunakan semakin besar pula similaritas antara model dengan prototipe dan tingkat akurasi penelitian hidraulis. Skala model didasarkan pada kondisi angka Froude $F_r = u/\sqrt{gh}$ yang dijaga sama antara model dan prototipe (jika pada prototipe adalah aliran subkritik maka pada model diusahakan sama). Kemudian dilihat berbagai kemungkinan besaran nilai konversi di tiap skala model yang memungkinkan untuk dibuat.

Mempertimbangkan kondisi laboratorium Hidraulika di Jurusan Teknik Sipil, ketersediaan ruang dan fasilitas pendukung (pompa), maka ditetapkan skala model yang memungkinkan untuk dipakai adalah 1:100. Model yang digunakan adalah model tanpa distorsi (skala horizontal sama dengan skala vertikal).

Pembuatan model fisik terdiri dari kolam pengatur aliran masuk, bendungan utama, dan bangunan pelimpah (*spillway*), mulai dari saluran pengarah, mercu pelimpah, saluran transisi, saluran peluncur sampai peredam energi dan sebagian hilir peredam energi.

b. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan untuk pembuatan model fisik Waduk Bener dibagi menjadi tiga bagian yaitu :

1. Pelimpah Bendungan :

-) Acrylic, digunakan sebagai bahan dasar bangunan pelimpah peluap samping yang terdiri dari mercu peluap dengan tipe Ogee, saluran peluncur, kolam olak, serta bangunan peredam energi,
-) Lem Kaca, digunakan sebagai perekat acrylic.

2. Kolam Genangan Waduk, Hilir waduk dan Peluap :

-) Mal, menggunakan triplek besar yang digunakan sebagai poin-poin kontur yang akan dibuat,
-) Meteran, sebagai pengukuran,
-) Spidol, digunakan untuk membuat mal pada triplek,
-) Alat pemotong (cutter), digunakan untuk memotong mal yang sudah dibentuk alur konturnya,
-) Theodolit, digunakan untuk mengukur ketinggian ketika akan diplot,
-) Bahan bangunan, seperti semen, pasir, cetok, sangkul, dan air.

3. Instrumen Pengukur :

-) Model Kapasitan atau conductor, digunakan sebagai pengukur elevasi air,
-) Brinno (model kamera dengan pengambilan image secara otomatis), digunakan sebagai pengukur elevasi air secara visual.

c. Pelaksanaan

Langkah-langkah pembuatan model fisik Waduk Bener dibagi menjadi tiga bagian yaitu :

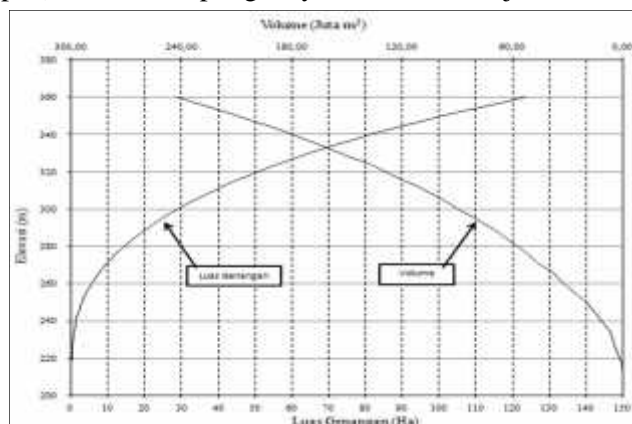
1. Pelimpah Bendungan :

- a. Pembuatan mal pelimpah bendungan,

- b. Pemotongan acrylic,
 - c. Membengkokkan model dinding pelimpah dengan oven,
 - d. Pembuatan model mercu pelimpah,
 - e. Pembuatan saluran peluncur.
2. Kolam Genangan Waduk, Hilir Waduk, dan Peluap :
 - a. Peta kontur dipersiapkan,
 - b. Data-data *cross section* dipersiapkan,
 - c. Daerah pada peta kontur yang akan dimodelkan diplotkan ke luas lahan untuk menentukan batasan-batasan dan titik acuan area,
 - d. Pembuatan mal kontur dari triplek, dari data-data *cross section* kontur, digambarkan ke triplek yang pada akhirnya akan dijadikan mal kontur,
 - e. Mal yang sudah jadi dipasang di area model sesuai dengan tempatnya,
 - f. Setelah terpasang semua, diurug pasir dan diratakan sesuai dengan permukaan mal kontur,
 - g. Bagian atas urugan diberi perkerasan dengan campuran semen : pasir = 1 : 12,
 - h. Setelah kering, lapisan perkerasan dikuas dengan air semen, yang dimaksudkan untuk menutup pori-pori dari air perkerasan tersebut agar air tidak merembes ke bawah.
3. Instrumen Pengukur :
 - a. Perakitan alat (model kapasitas atau conductor), dikarenakan kondisi aliran yang sangat spesifik (kecil dan memerlukan interval waktu pengamatan dengan durasi pendek dan kontinyu, maka peralatan pengukuran kedalaman aliran dilakukan dengan merakit secara khusus,
 - b. Pemasangan alat di titik-titik yang ditinjau.

4.2. Karakteristika Tampungan Waduk Bener

Karakteristika tampungan suatu waduk adalah suatu hubungan antara elevasi, luas permukaan dan volume tampungan. Kemampuan waduk dalam peredaman puncak banjir akan sangat bergantung pada karakteristik tampungan di mana lokasi bendungan tersebut dibangun. Selain karakteristik tampungan, geometri pelimpah juga akan mempengaruhi besarnya tingkat peredaman yang akan diperoleh. Berikut dapat dibuat suatu lengkung kapasitas tampungan Waduk Bener (gambar dibawah), dimana pada elevasi 365,00 m (elevasi mercu pelimpah) volume tampungannya sebesar ± 100 juta m^3



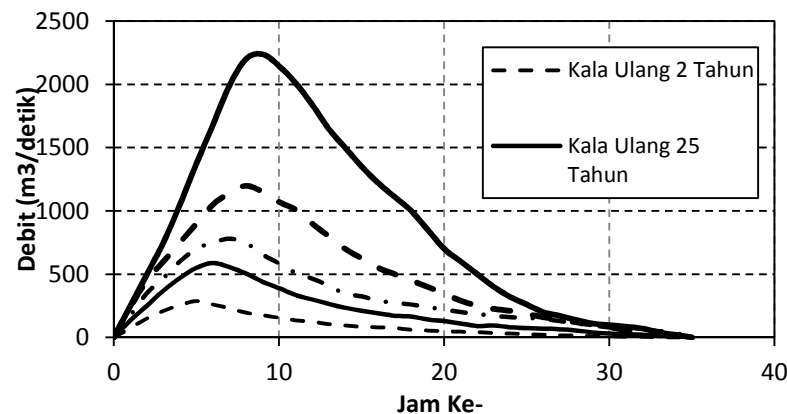
Gambar 2. Lengkung Kapasitas Bendungan Bener

4.3. Analisis Penghitungan Debit Pelimpah (Penelusuran Waduk)

Untuk mendapatkan tinggi air dari besarnya debit yang melimpah diatas *spillway* maka dilakukan penelusuran waduk (*reservoir routing*) yang didasarkan pada besarnya aliran masuk (*inflow*), aliran keluar (*outflow*), dan tampungan waduk dengan menggunakan persamaan 2 sebagai berikut :

$$\frac{1}{2}(I_n + I_{n+1}) \cdot t = \frac{1}{2}(O_n + O_{n+1}) \cdot t + A \cdot H$$

Aliran masuk (*inflow*) yang digunakan adalah hidrograf banjir kala ulang 2 tahun, 25 tahun, 100 tahun, 1000 tahun, dan PMF yang diperkirakan dari data debit banjir rencana maksimum tiap kala ulang. Hidrograf banjir tiap kala ulang disajikan pada gambar dibawah ini :



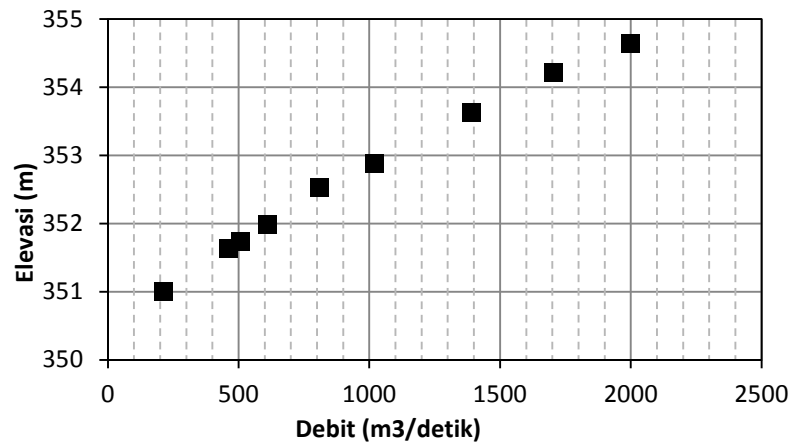
Gambar 3. Hidrograf Banjir Tiap Kala Ulang

Kemudian aliran keluar (*outflow*) merupakan debit keluar bangunan pelimpah yang menggunakan persamaan :

$$Q_{\text{pelimpah}} = C.B.H^{3/2}$$

Dengan data karakteristik Bangunan Pelimpah, antara lain :

- ┌ Lebar mercu pelimpah (B) = 80 m
- ┌ Elevasi mercu pelimpah = 350 m
- ┌ Koefisien pelimpah (C) = 2,63



Gambar 4. Grafik Hubungan Elevasi Muka Air dan Debit

Dengan menggunakan rumus $Q = C.B.H^{3/2}$ maka didapat hasil C.

Tabel 1. Hasil Perhitungan C

Q (m3/detik)	C	B (m)	H (m)
215,32	2,70	80	0,998267
461,17	2,76	80	1,632886
509,17	2,80	80	1,730691
613,87	2,74	80	1,985268
809,70	2,51	80	2,53006
1020,50	2,62	80	2,871908
1391,79	2,53	80	3,615542
1704,37	2,47	80	4,202944
1999,04	2,50	80	4,637821
Rata-rata	2,63		

Diperlukan juga lengkung kapasitas tampungan Waduk Bener untuk mendapatkan suatu persamaan karakteristik tampungan waduk yang akan digunakan didalam analisis penelusuran waduk. Persamaan tersebut didapatkan dari hasil regresi menggunakan fungsi power antara elevasi (dimulai dari +212,5m) dan volume tampungan. Dengan $y=0,0002093x^{2,6507359}$ dibuat suatu persamaan tampungan Waduk Bener :

$$S = (0,0002093.(E-212,5)^{2,6507}).1000000 \quad (6)$$

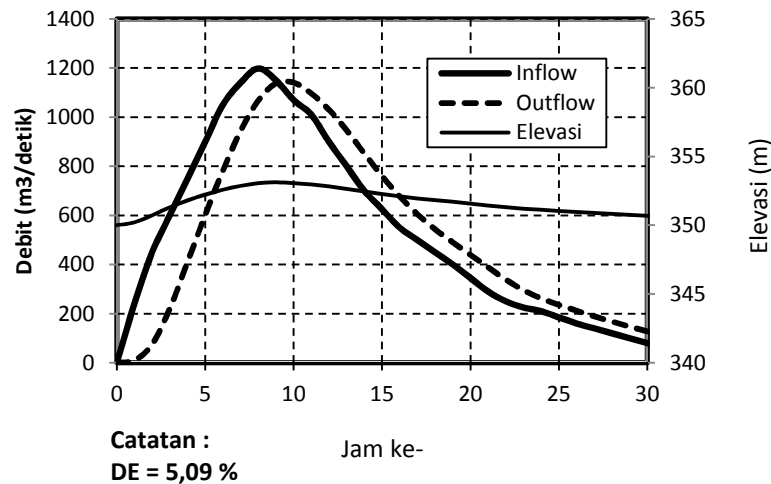
$$E = 212,5+(S/0,0002093/1000000)^{(1/2.6507)} \quad (7)$$

JURNAL TEKNIK SIPIL
Universitas Muhammadiyah Aceh
Volume 3 Nomor 1 (Januari 2014)

Tabel 2. Penelusuran Waduk (Debit Q_{1000th})

(1) t (jam ke)	(2) t (jam)	(3) Inflow (m ³ /det)	(4) Inflow rerata (m ³ /det)	(5) Volume masuk (m ³)	(6) Trial Elevasi (m)	(7) Outflow (m ³ /det)	(8) Outflow rerata (m ³ /det)	(9) Volume keluar (m ³)	(10) S (m ³)	(11) Tampungan (m ³)	(12) Elevasi (m)
						0,00				97.446.936,47	
0		0,00									
	1		120,00	432.000,00	350,21	20,26	10,13	36.472,63	395.527,37	97.842.463,85	350,21
1		240,00									
	1		345,00	1.242.000,00	350,72	129,68	74,97	269.896,86	972.103,14	98.814.566,98	350,72
2		450,00									
	1		525,00	1.890.000,00	351,30	311,79	220,74	794.650,54	1.095.349,46	99.909.916,44	351,30
3		600,00									
	1		675,00	2.430.000,00	351,80	507,50	409,65	1.474.728,12	955.271,88	100.865.188,32	351,80
4		750,00									
	1		825,00	2.970.000,00	352,22	694,63	601,06	2.163.832,42	806.167,58	101.671.355,89	352,22
5		900,00									
	1		975,00	3.510.000,00	352,58	869,84	782,23	2.816.044,67	693.955,33	102.365.311,23	352,58
6		1.050									
	1		1.095,00	3.942.000,00	352,86	1.016,32	943,08	3.395.097,17	546.902,83	102.912.214,05	352,86
7		1.140									
	1		1.169,10	4.208.742,00	353,05	1.118,33	1.067,33	3.842.377,24	366.364,76	103.278.578,81	353,05
8		1.198,2									
	1		1.174,10	4.226.742,00	353,12	1.156,06	1.137,19	4.093.896,36	132.845,64	103.411.424,45	353,12
9		1.150,0									
	1		1.110,00	3.996.000,00	353,06	1.124,88	1.140,47	4.105.685,27	-109.685,27	103.301.739,18	353,06
10		1.070,0									
	1		1.040,00	3.744.000,00	352,96	1.067,89	1.096,38	3.946.977,68	-202.977,68	103.098.761,50	352,96
11		1.010,0									
	1		955,00	3.438.000,00	352,82	993,05	1.030,47	3.709.693,16	-271.693,16	102.827.068,34	352,82
12		900,00									
	1		850,00	3.060.000,00	352,64	899,90	946,48	3.407.319,22	-347.319,22	102.479.749,12	352,64
13		800,00									
	1		750,00	2.700.000,00	352,45	804,44	852,17	3.067.811,70	-367.811,70	102.111.937,42	352,45
14		700,00									
	1		662,50	2.385.000,00	352,26	716,24	760,34	2.737.224,97	-352.224,97	101.759.712,45	352,26
15		625,00									
	1		587,50	2.115.000,00	352,10	638,24	677,24	2.438.071,63	-323.071,63	101.436.640,83	352,10
16		550,00									
	1		525,00	1.890.000,00	351,95	571,34	604,79	2.177.242,02	-287.242,02	101.149.398,81	351,95
17		500,00									
	1		475,00	1.710.000,00	351,82	515,77	543,55	1.956.787,01	-246.787,01	100.902.611,80	351,82
18		450,00									
	1		425,00	1.530.000,00	351,70	464,63	490,20	1.764.719,18	-234.719,18	100.667.892,63	351,70
19		400,00									
	1		372,50	1.341.000,00	351,57	414,03	439,33	1.581.581,94	-240.581,94	100.427.310,69	351,57
20		345,00									
	1		317,50	1.143.000,00	351,44	362,52	388,27	1.397.781,14	-254.781,14	100.172.529,55	351,44
21		290,00									
	1		270,00	972.000,00	351,31	314,73	338,63	1.219.052,67	-247.052,67	99.925.476,88	351,31
22		250,00									
	1		237,50	855.000,00	351,20	276,13	295,43	1.063.550,34	-208.550,34	99.716.926,54	351,20
23		225,00									
	1		217,50	783.000,00	351,12	247,67	261,90	942.847,46	-159.847,46	99.557.079,08	351,12
24		210,00									
	1		197,50	711.000,00	351,04	223,95	235,81	848.921,13	-137.921,13	99.419.157,95	351,04
25		185,00									
	1		172,50	621.000,00	350,97	200,26	212,10	763.574,62	-142.574,62	99.276.583,33	350,97
26		160,00									
	1		150,00	540.000,00	350,89	177,79	189,02	680.488,31	-140.488,31	99.136.095,02	350,89
27		140,00									
	1		130,00	468.000,00	350,82	157,09	167,44	602.778,39	-134.778,39	99.001.316,63	350,82
28		120,00									
	1		110,00	396.000,00	350,75	137,38	147,23	530.034,18	-134.034,18	98.867.282,45	350,75
29		100,00									
	1		90,00	324.000,00	350,68	118,29	127,83	460.200,93	-136.200,93	98.731.081,52	350,68
30		80,00									
	1		70,00	252.000,00	350,61	99,68	108,99	392.352,81	-140.352,81	98.590.728,71	350,61
31		60,00									
	1		55,00	198.000,00	350,54	83,32	91,50	329.401,61	-131.401,61	98.459.327,10	350,54
32		50,00									
	1		40,00	144.000,00	350,47	68,32	75,82	272.956,35	-128.956,35	98.330.370,75	350,47
33		30,00									
	1		20,00	72.000,00	350,40	52,67	60,50	217.790,07	-145.790,07	98.184.580,67	350,39
34		10,00									
	1		5,00	18.000,00	350,32	38,50	45,59	164.113,06	-146.113,06	98.038.467,61	350,31

Debit pelimpah dapat dilihat dari kolom (7) yang bernilai paling besar yaitu 1156,06 m³/detik.



Gambar 5. Penelusuran Waduk Melalui Pelimpah Pada Q_{1000th}

Hasil penelusuran waduk untuk debit pelimpah banjir lainnya dapat dilihat pada tabel dibawah :

Tabel 3. Debit Pelimpah

Keterangan	Q pelimpah (m3/detik)
Q 2th	229,5
Q 25th	524,31
Q100th	744,90
Q 1000th	1156,06
Q PMF	2141,46

4.4. Kalibrasi Alat Ukur

Sebelum pelaksanaan uji kerja model Waduk Bener dilaksanakan, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi pada peluap Thomson dan konduktor pengukur kedalaman. Debit yang ada di prototipe harus dikonversikan ke model yang dapat diketahui melalui ketinggian air di ambang peluap Thomson.

a. Kalibrasi Debit (Peluap Thomson)

Pada model Waduk Bener ini, pengukuran aliran yang masuk dalam area model test dilakukan dengan menggunakan peluap ambang tajam berbentuk segitiga dengan sudut 90°. Pengukuran aliran ini dimaksudkan untuk memperoleh besaran debit yang sesuai dengan perencanaan.

Kalibrasi peluap Thomson perlu dilakukan untuk mencari koefisien pelimpahan, yang dapat bervariasi karena ketidaksempurnaan pembuatan peluap tersebut ataupun karena pemasangannya. Pada Kalibrasi Peluap Thomson, diperoleh sejumlah sepuluh pasangan data hubungan antara H (tinggi peluapan - cm) dengan Q (Debit aliran - l/detik).

Dari hasil analisis kalibrasi terhadap sepuluh pasangan data dan dengan menggunakan rumus diatas didapat koefisien pelimpah C_d sebesar 0,634 dan dengan nilai r sebesar 90^0 .

b. Kalibrasi Alat Pengukur Kedalaman

Pengujian kinerja hidraulik Waduk Bener dilakukan dengan menggunakan empat buah alat pengukur kedalaman yang dirakit dalam bentuk khusus untuk mengukur nilai kapasitas atau *conductor*. Pencatatan hasil pengukuran kedalaman alat *conductor* ini menggunakan software pada komputer. Pembacaan kapasitas dalam satuan frekuensi, yang sebelumnya perlu dikalibrasi untuk mengetahui korelasinya dengan kedalaman. Hasil kalibrasi alat ukur kedalaman ditunjukkan pada gambar dibawah.

4.5. Skenario Pemodelan (Variasi Debit)

Variasi pemodelan/pengujian pada model fisik Waduk Bener ini hanya dilakukan terhadap debit aliran saja, sedangkan bentuk model tetap atau tidak divariasi. Variasi pengujian dilakukan dengan sembilan macam debit, dengan besaran aliran seperti yang disajikan pada tabel berikut. engan skala model yang ditetapkan 1 : 100 tanpa distorsi, maka untuk mengkonversikan besaran debit tersebut ke besaran debit pada prototipe perlu dikalikan dengan faktor skala debit, yaitu $n_Q = 100^{(5/2)} = 100000$.

Tabel 4. Debit Pengujian dan Konversi ke Nilai Prototipe

No.	Pembacaan Peluap Thomson (cm)	Debit Model		Debit Prototipe (m/detik)
		l/detik	m/detik	
Q1	7,3	2,153	0,002153	215,32
Q2	9,9	4,612	0,004612	461,17
Q3	10,3	5,092	0,005092	509,17
Q4	11,1	6,139	0,006139	613,87
Q5	12,4	8,097	0,008097	809,70
Q6	13,6	10,200	0,010200	1020,50
Q7	15,4	13,918	0,013918	1391,79
Q8	16,7	17,044	0,017044	1704,37
Q9	17,8	19,990	0,019990	1999,04

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Operasional Model Fisik

Model Waduk Bener ini dirancang sebagai model pengaliran tertutup, dimana diperlukan ketersediaan sejumlah air yang cukup untuk penyelenggaraan (*running*) dengan debit tetap selama jangka waktu yang diperlukan. Adapun sumber air yang digunakan dalam *running* model ini diambil dari kolam tampung air Laboratorium Hidraulika Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan dan air pompa. Model fisik Waduk Bener terdiri dari beberapa komponen, antara lain:

- Bangunan Kolam masuk (kolam *intake*) dan pengatur debit (peluap *Thomson*)
- Kolam tampungan waduk
- Bangunan dam atau bendungan
- Bangunan pelimpah (*spillway*)
- Bangunan hilir bendungan

Langkah-langkah pengoperasian model fisik Waduk Bener :

- 1) Air di kolam tampung air dipindahkan ke *sump tank* (tangki air) sesuai kebutuhan untuk *running* model,
- 2) Air yang ada di *sump tank* kemudian dipompa menuju tangki inlet model,
- 3) Didalam tangki inlet terdapat dua bak yang berfungsi untuk mengatur tekanan air dengan menggunakan asas ketinggian air pada bak 1 dan untuk kalibrasi debit pada bak 2.
- 4) Kemudian setelah air keluar dari model Waduk Bener selanjutnya dialirkan kembali ke *sump tank*. Proses ini kemudian berulang kembali selama proses *running* dilakukan.

5.2. Koefisien Debit Pelimpah

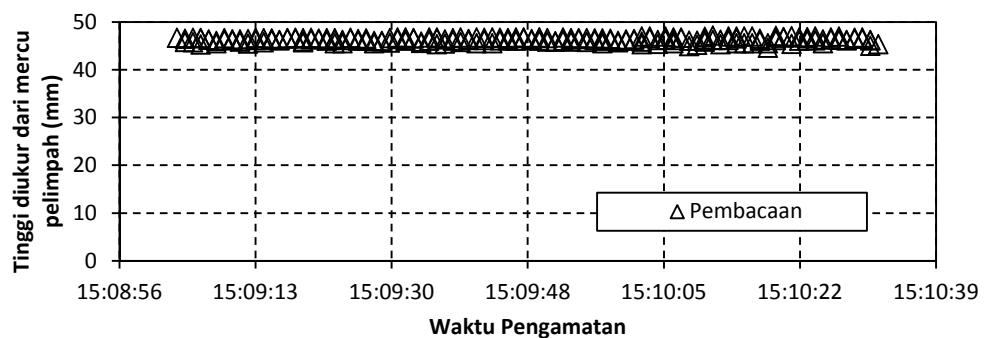
Nilai koefisien C dipengaruhi oleh tinggi mercu pelimpah serta tinggi peluapan H, dimana pada sistem “SI” (meter-kilogram-second), nilai C berkisar antara 2,0-2,25 (Legono, 1997). Pada pemodelan ini, nilai koefisien C yang didapat sebesar 2,63. Tabel perhitungan nilai koefisien debit C dapat dilihat pada tabel 4.7. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan nilai C yang biasa terdapat pada mercu pelimpah tipe *ogee* yaitu sebesar antara 2,0-2,25. Menurut penulis hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yaitu :

- a. Alat pengukur elevasi muka air didekat mercu pelimpah kurang baik ketelitiannya, sehingga kedalaman yang terukur pada alat pengukur terlalu kecil yang mengakibatkan nilai C membesar. Karena semakin kecil nilai tinggi peluapan semakin besar nilai C yang ada pada suatu debit yang tetap.
- b. Kolam tampungan waduk tidak dimodelkan hingga hulu atau hanya sebagian saja. Hal ini menyebabkan air yang masuk mempunyai kecepatan yang tinggi. Sehingga tinggi peluapan berkurang akibat adanya tinggi kecepatan energi yang besar (tinggi kecepatan energi = $\frac{V^2}{2g}$).
- c. Kekasaran permukaan model fisik lebih kecil, sehingga kecepatan juga semakin tinggi.

5.3. Peluapan Pelimpah Samping

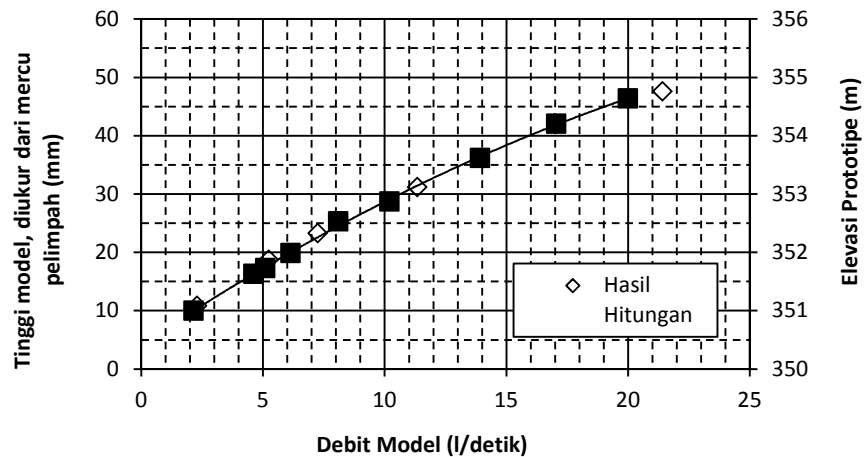
Waduk Bener menggunakan bangunan pelimpah tipe pelimpah samping, dimana pelimpah samping tersebut berada tepat disamping puncak bendungan. Aliran yang melewati mercu pelimpah melimpas ke saluran mirip seperti palung sempit (cekungan sempit), kemudian berbelok ke arah saluran peluncur.

Hasil pembacaan kedalaman aliran di hulu dekat bendungan untuk kondisi Q_{PMF} ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 6. Hasil Pembacaan pada Q_{PMF}

Pengamatan kedalaman aliran pada muka air hulu dekat bendungan untuk kesembilan debit menunjukkan konsistensi dari korelasi antara besaran debit dengan kedalaman aliran yang dihasilkan. Dari data yang diambil ditunjukkan bahwa kedalaman aliran minimum terjadi pada debit sebesar 2,15 l/detik dan kedalaman aliran sebesar ± 10 mm (dari elevasi mercu pelimpah). Kemudian dapat dilihat juga bahwa kenaikan kedalaman aliran untuk berbagai kondisi kenaikan debit tidak menunjukkan kenaikan elevasi muka air yang signifikan. Hasil pembacaan kedalaman air rata-rata di model yang kemudian dikonversi ke informasi elevasi muka air di dekat sebelah hulu bangunan pelimpah disajikan pada gambar di bawah ini :



Gambar 7. Analisis Kedalaman Aliran di Model dan Konversi ke Elevasi Muka Air Prototipe

Pada *running* model Waduk Bener ini kapasitas pelimpahan *spillway* mampu mengalirkan debit banjir dari hulu ke hilir bendungan dengan tinggi jagaan yang memadai. Sehingga air di hulu bendungan tidak melimpas melewati puncak bendungan yang dapat membahayakan tubuh bendungan dimana limpasan-limpasan tersebut dapat menyebabkan longsoran-longsoran pada lereng hilir yang dapat mengakibatkan jebolnya tubuh bendungan.

Berikut ini diberikan hasil perbandingan antara penghitungan model matematis dengan hasil *running* :

Tabel 5. Perbedaan Hitungan Teoritis dan Running Model

No	Jenis Banjir	Elevasi Muka Air Hulu dekat Bendungan		Perbedaan (%)
		Hitungan Teoritis (m)	Running Model (m)	
1	Q_{2th}	+351,08	+351	7,8
2	Q_{25th}	+351,87	+351,78	4,8
3	Q_{100th}	+352,33	+352,53	8,8
4	Q_{1000th}	+353,12	+352,87	7,9
5	Q_{PMF}	+354,76	+354,64	2,6

Kapasitas pelimpahan *spillway* mampu mengalirkan debit banjir Q_9 sebesar 19,990 l/detik di model atau 1.999 m³/detik di prototipe, setara dengan $Q_{PMF} = 2079,85$ m³/detik, dengan tinggi jagaan yang memadai. Ketinggian muka air di hulu *spillway* untuk debit dengan periode ulang 1000 tahun (Q_{1000th}) mencapai elevasi El. + 352,87 m, sedangkan untuk

Q_{PMF} mencapai elevasi El. +354,64 m. Dengan elevasi puncak bendungan pada El. +356 m, untuk Q_{1000th} tinggi jagaan yang ada sebesar 3,12m, sedangkan untuk Q_{PMF} sebesar 1,36 m.

Pada Tabel diatas dapat dilihat bahwa elevasi muka air hulu dekat bendungan yang didapat dari hitungan matematis (Prototipe) dengan hasil *running* model menunjukkan adanya perbedaan meskipun tidak terlalu besar. Perbedaan yang paling besar terdapat pada Q_{100th} yaitu 8,8%, dan yang terkecil terdapat pada Q_{PMF} sebesar 2,6%. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

- a. Debit yang dipakai pada pemodelan masih kurang pas dengan debit yang diinginkan. Hal ini disebabkan alat kontrol/pengatur debit terlalu besar sehingga cukup sulit untuk menyesuaikan debit yang diinginkan
- b. Alat pengukur kedalaman *conductor* masih kurang baik ketelitiannya.
- c. Kekurangtelitian peneliti didalam *running* pemodelan.

6. KESIMPULAN

Dari pengujian model fisik Waduk Bener yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut, yaitu :

1. Pengujian model fisik Waduk Bener ini menggunakan skala 1:100 (tanpa distorsi)
2. Debit prototipe atau debit yang ada di lapangan harus dikonversikan terlebih dahulu ke debit pemodelan dengan menggunakan peluap ambang Thomson
3. Dari hasil analisis kalibrasi peluap thomson dengan nilai Γ sebesar 90^0 , didapatkan koefisien Cd sebesar 0,634
4. Pengukuran elevasi dekat hulu mercu pelimpah menggunakan alat ukur kedalaman *conductor* yang mengkonversikan frekuensi alat hasil pengukuran di lapangan menjadi ketinggian.
5. Koefisien debit (C) = 2,63
6. *Spillway* yang berfungsi untuk mengalirkan air berlebih yang ada di tampungan waduk ke hilir waduk bekerja dengan baik. Hal ini dapat diketahui dari pengamatan bahwa kapasitas pelimpahan *Spillway* mampu mengalirkan Q_{PMF} dan Q_{1000th} dengan tinggi jagaan yang memadai, serta air yang berada di waduk tidak melimpas melalui mercu bendungan (*overtopping*). Ketinggian muka air di hulu *spillway* untuk debit dengan Q_{1000th} mencapai elevasi, El. +352,87 m, sedangkan untuk Q_{PMF} mencapai elevasi, El. +354,64 m. Dengan elevasi puncak bendungan pada El. +356 m, untuk Q_{1000th} , tinggi jagaan yang ada sebesar 3,12m, sedangkan untuk Q_{PMF} sebesar 1,36m.
7. Hasil penghitungan elevasi muka air dengan model matematis apabila dibandingkan dengan hasil *running* model menunjukkan adanya perbedaan meskipun tidak terlalu besar. Perbedaan yang paling besar terdapat pada Q_{100th} yaitu 8,8%, dan yang terkecil terdapat pada Q_{PMF} sebesar 2,6 %. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:
 - a. Debit yang dipakai pada pemodelan masih kurang pas dengan debit yang diinginkan. Hal ini disebabkan alat kontrol/pengatur debit terlalu besar sehingga cukup sulit untuk menyesuaikan debit yang diinginkan
 - b. Alat pengukur kedalaman *conductor* masih kurang baik ketelitiannya.
 - c. Kekurangtelitian peneliti didalam *running* pemodelan.

7. DAFTAR PUSTAKA

Soemarto 1986, *Hidrologi Teknik*. Bandung: ITB

Bambang Triatmodjo 2008, *Hidrologi Terapan*, Beta Offset, Yogyakarta

Sudjarwadi 2008, *Pengembangan Sumberdaya Air*, Biro Penerbit JTS FT UGM: UGM

The History of Dams , by Heloisa Yang, Matt Haynes, Stephen Winzenread, and Kevin Okada (1999) (web)

Patrick McCully, *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*

Anonim 1987, *Design of Small Dams*, US Army Corps of Engineer, Hydrologic Engineering Center, California

Ir. Suyono Sosrodarsono 1976, *Bendungan Type Urugan*, Pradnya Paramita, Jakarta