

STUDI REHABILITASI KERUSAKAN BENDUNG JAMUAN DI DESA SAWANG KABUPATEN ACEH UTARA

Achmad Arief

Dosen Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Islam Malang
Jl.MT.Haryono 193 Malang

ABSTRAK

Bendung Jamuan terletak di Desa Sawang Kecamatan Sawang Kabupaten Aceh Utara Propinsi Aceh, yang mengairi areal seluas 4.300 Ha. Pada saat ini Downstream bendung tersebut sudah terjadi degradasi yang sangat besar yaitu sudah mencapai 3 meter lebih. Elevasi dasar kolam olak +27.203 m sedangkan elevasi hilir kolam olak akibat degradasi menjadi +23.50 m. Akibat degradasi tersebut, kondisi pondasi revertment kiri-kanan sudah menggantung dan rusaknya lantai hilir bendung. Jika masalah tersebut dibiarkan terlalu lama maka dikhawatirkan akan terjadi penggulingan tubuh bendung. Penyebab utama terjadinya degradasi karena adanya pengambilan galian C secara besar-besaran di hilir bendung oleh pihak yang tidak bertanggung jawab, serta bentuk kolam olak tipe Bak Pusaran (Roller Bucket Type) dianggap ikut mempengaruhi kerusakan yang terjadi. Penelitian ini dilakukan untuk memberi solusi terhadap permasalahan tersebut dengan menggunakan parameter utama *Bilangan Froude* sebagai fungsi kecepatan aliran dan tinggi muka air sekaligus sebagai parameter penentu besarnya olakan akibat aliran air dan besarnya daya rusak air. Data hidraulik, topografi dan geologi diukur langsung di lapangan, sedangkan data yang lain diperoleh dari dinas terkait. Debit banjir Rancangan yang digunakan adalah Q-100th, dengan nilai 762.73 m³/dt. Perencanaan dilakukan dengan menimbun cekungan kolam olak lama, menambah saluran transisi berbentuk miring 45° di hilirnya, dan menambah kolam olakan baru dibelakangnya dengan kolam olak type datar (Type USBR). Dari hasil analisis hidraulik, Bilangan Froude tertinggi adalah = 4,42, sehingga sesuai kriteria, maka digunakan kolam olak USBR Type IV, dengan panjang kolam olak 14 meter dan tinggi endsill 1.7 meter. Untuk melindungi kolam olak, maka 70 meter dibelakang kolam olak dipasang Groundsill pertama dengan elevasi puncak +28.20 dan tinggi 4 meter, dan untuk melindungi dari degradasi di hilir bangunan, maka dipasang Groundsill kedua dengan elevasi puncak +27.20, tinggi 3 meter berjarak 40 meter di belakang Groundsill pertama. Biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan seluruh konstruksi tersebut adalah sebesar Rp. 8,109,696,000,- (Delapan Milyar Seratus Sembilan Juta Enam Ratus Sembilan Puluh Enam Ribu Rupiah).

Kata kunci : Bendung, Bilangan Froude (*Fr*), Kolam Olak, Groundsill

PENDAHULUAN

Bendung Jamuan terletak di Desa Sawang Kecamatan Sawang Kabupaten Aceh Utara. Lokasi tersebut kurang lebih 300 Km dari Ibu kota Banda Aceh, dapat ditempuh melalui jalur darat sekitar 6 jam dengan menggunakan kendaraan roda empat. Kecamatan Sawang terletak di sebelah Barat Daya Kabupaten Aceh Utara, berbatasan dengan Kabupaten Bireun disebelah baratnya dan Kabupaten Aceh Tengah disebelah selatannya.

Bendung Jamuan mempunyai lebar 60 meter, terletak di Krueng Sawang yang

mengalir ke utara melewati Kecamatan Muara Batu dan bermuara di Selat malaka, mengairi areal seluas 4.300 Ha

Pada saat ini Downstream bendung mengalami degradasi yang sangat besar sehingga mencapai 3 meter lebih. Elevasi dasar kolam olak +27.203 m sedangkan elevasi hilir kolam olak akibat degradasi menjadi +23.50 m. Akibat degradasi tersebut, kondisi pondasi revertment kiri-kanan sudah menggantung dan rusaknya lantai hilir bendung. Jika masalah tersebut dibiarkan terlalu lama, dikhawatirkan tubuh bendung akan terguling. Penyebab utama

terjadinya degradasi adalah pengambilan galian-C secara besar-besaran di hilir bendung oleh pihak yang tidak bertanggung jawab, serta bentuk kolam olak tipe Bak Pusran (Roller Bucket Type) dianggap ikut mempengaruhi kerusakan yang terjadi.



Gambar 1 : Foto kondisi Olakan Air di Downstream Bendung pada Banjir terbesar yang Terjadi tanggal 22 Mei 2011

Rumusan Masalah

1. Bagaimana proses dan penyebab terjadinya kerusakan di hilir Bendung Jamuan?
2. Bagaimana solusi untuk memperbaiki kerusakan yang ada dan perencanaan bangunan penunjangnya agar aman menghadapi banjir?
3. Bagaimana analisis hidrologi dilakukan agar didapat besaran banjir rancangan yang benar dan bisa digunakan sebagai dasar analisis hidraulik?
4. Bagaimana analisis hidraulik menggunakan model matematik dilakukan agar diperoleh informasi untuk dasar perencanaan yang benar dan aman?
5. Bagaimana perencanaan dibuat agar stabilitas bangunan aman dari guling, geser dan degradasi di dasar sungai?
6. Bagaimana perhitungan besar biaya yang diperlukan untuk rehabilitasi kerusakan yang terjadi di Bendung Jamuan?

Hipotesis

1. Adanya pengambilan galian-C secara besar-besaran di hilir bendung, serta bentuk kolam olak tipe Bak Pusran

(Roller Bucket Type) ikut mempengaruhi kerusakan yang terjadi.

2. Perencanaan untuk memperbaiki kerusakan dilakukan dengan menimbun cekungan kolam olak lama, menambah saluran transisi berbentuk miring 45° di hilirnya, dan menambah kolam olakan baru dibelakangnya dengan kolam olak type datar (Type USBR), serta penambahan Groundsill di hilir kolam olak untuk menjaga agar tidak terjadi degradasi di dasar sungai.
3. Analisis Debit Banjir Rancangan menggunakan Metode Rasional, HSS Nakayasu dan HSS Gama I, dan dipilih nilai yang tertinggi untuk pertimbangan keandalan. Kala ulang diperoleh dengan mengkalibrasi menggunakan data banjir terbesar yang pernah terjadi.
4. analisis hidraulik dengan model matematik menggunakan Software Hydraulic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS), akan memberikan informasi besaran Bilangan Froude dan tinggi muka air pada tiap ruas yang ditinjau, sehingga bisa digunakan sebagai dasar perencanaan yang benar dan aman.
5. Penambahan pondasi di hilir Bendung, pondasi dibawah lantai kolam olak, pondasi dibawah endsill kolam olak agar aman dari guling dan geser, serta penambahan Groundsill di hilir kolam olak agar aman dari degradasi dasar sungai.
6. Menghitung biaya persiapan, biaya konstruksi dan biaya pekerjaan pendukungnya, meliputi biaya alat, bahan, tenaga kerja dan pajak.

Lingkup Penelitian

1. Penelitian ini hanya dilakukan di bendung Jamuan yang terletak di Kabupaten Aceh Utara.
2. Parameter penelitian adalah bilangan Froude sebagai fungsi dari kecepatan aliran (V) dan tinggi muka air (H), sekaligus sebagai parameter daya rusak air.
3. Penelitian di lapangan dilakukan dengan kegiatan utama melakukan pengukuran topografi secara langsung, data geologi

dan mekanika tanah dan pengumpulan data penunjang pada instansi terkait.

4. Analisis yang dilakukan adalah analisis hidrologi, analisis dan simulasi hidraulik, perencanaan bangunan, analisis stabilitas bangunan, serta analisis bahan dan tenaga kerja untuk dasar perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB).
5. Analisis hidraulik dilakukan dengan model matematik menggunakan Software Hydraulic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS).

Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan penyebab terjadinya kerusakan di Bendung Jamuan.
2. Memperoleh rencana konstruksi untuk rehabilitasi Bendung Jamuan, agar nantinya bisa beroperasi dengan baik dan aman.
3. Mendapatkan rencana anggaran biaya untuk pembangunannya.

Manfaat Penelitian

1. Mengetahui penyebab terjadinya kerusakan di Bendung Jamuan.
2. Tersedianya rencana konstruksi untuk rehabilitasi Bendung Jamuan, agar nantinya bisa beroperasi dengan baik dan aman.
3. Diketuainya rencana anggaran biaya untuk pembangunannya.
4. Sebagai bahan acuan penelitian lebih lanjut di bidang Sumberdaya Air, khususnya pada kasus rehabilitasi bendung.

TINJAUAN PUSTAKA

Analisis Hidrologi

a. Analisis Curah Hujan Rancangan

Analisis Curah Hujan Rancangan dihitung menggunakan metode E.J. Gumbel dan metode Log Pearson Type III.

• Metode E.J. Gumbel

Persamaan umum yang digunakan adalah :

$$XT = \bar{X} + K \cdot S_x$$

Dimana:

XT = curah hujan rancangan untuk

periode ulang pada T tahun (mm)

X = rerata dari curah hujan (mm)

Sx = standar deviasi

K = Faktor frekuensi yang merupakan fungsi dari periode ulang (return periode) dan tipe distribusi frekuensi.

• Metode Log Pearson Type III

Persamaan umum yang digunakan adalah :

$$\text{Log } X_t = \overline{\text{Log } X} + K \cdot S_1$$

$$\overline{\text{Log } X} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Log } X_i}{n}$$

$$S_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\text{Log } X_i} - \overline{\text{Log } X})^2}{n-1}$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\text{Log } X_i} - \overline{\text{Log } X})^3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (S_1)^3}$$

Dimana :

Xt = Curah hujan rancangan periode ulang t tahun (mm)

S1 = Simpangan baku

Cs = Koefisien kepengcengan (skewness koefisien)

Koefisien frekuensi merupakan fungsi dari kala ulang (return periode) dan nilai koefisien kepengcengan (Cs)

b. Uji Kesesuaian Distribusi

Pemeriksaan uji kesesuaian distribusi dalam studi ini memakai dua metode uji yaitu uji Smirnov Kolmogorov dan uji Chi-Square.

c. Distribusi Hujan Harian

Prosentase distribusi hujan yang terjadi dapat dihitung dengan rumus Mononobe (Suyono, 1981:35)

$$RT = R_{24} / t \cdot (t/T)^{2/3}$$

Dimana :

RT = intensitas hujan rata-rata dalam T jam

R24 = curah hujan efektif dalam 1 hari (24 jam)

t = waktu konsentrasi hujan yang nilainya identik dengan lama hujan perhari (5-6 jam)

T = waktu mulai hujan
Sedangkan nisbah hujan jam-jaman ditentukan t jam :

$$R_T = t * R_T - (t - 1) * (R_{T-1})$$

Dimana :

R_T = Prosentase intensitas hujan rerata dalam t jam

R_{T-1} = intensitas hujan dalam t jam

d. Koefisien pengaliran

Dr. Kawakami menyusun sebuah rumus yang mengemukakan bahwa untuk sungai-sungai tertentu, koefisien itu tidak tetap, tetapi berbeda-beda tergantung dari curah hujan.

$$f = 1 - \frac{15.7}{R_t^{3/4}}$$

Dimana :

f = koefisien pengaliran

R_t = jumlah curah hujan (mm)

e. Hujan netto

Dengan menganggap bahwa proses tranformasi hujan menjadi limpasan langsung mengikuti proses linier dan tidak berubah oleh waktu, maka hujan netto (R_n) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$R_n = C \times R$$

Dimana :

C = koefisien limpasan

R = Intensitas curah hujan

f. Debit Banjir Rancangan

Untuk merencanakan suatu bangunan pengendali banjir, diperlukan analisis nilai debit banjir yang mungkin terjadi di lokasi tersebut. Untuk mengetahui keadaan pola banjir diperlukan periode pengamatan, agar estimasi mendekati keadaan yang sebenarnya.

• **Metode Rasional**

Persamaan umum dari metode ini adalah sebagai berikut :

$$Q_{\max} = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Dimana :

C = Runoff coefficient

i = Intensitas Maksimum selama waktu konsentrasi (mm/jam)

A = Luas daerah pengaliran (km²)

• **Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu**

Hidrograf Satuan Daerah Tangkapan Hujan untuk simulasi dan analisa debit keluaran (release flow) retarding basin akan dipergunakan metoda Nakayasu, dimana dari pendekatan tersebut disesuaikan dengan karakteristik banjir di Kr. Daroy bagian hulu.

Rumus dari hidrograf satuan Nakayasu adalah :

$$Q_p = \frac{C \cdot A \cdot R_0}{3.6(0.3T_p + T_{0.3})}$$

Dimana:

Q_p = Debit puncak banjir (m³/det)

R_0 = Hujan satuan (mm)

T_p = Tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0.3}$ = Waktu penurunan debit debit puncak sampai menjadi 30% dari debit puncak.

• **Hidrograf Satuan Sintetik GAMA I**

Kajian sifat dasar hidrograf satuan sintetik GAMA I adalah hasil penelitian 30 buah daerah aliran sungai di Pulau Jawa.

Rumus-rumus yang digunakan dalam metode HSS GAMA I adalah sebagai berikut:

$$B = 1,5518 N^{-0,14991} A^{-0,2725} SIM^{-0,0259} S^{-0,0733}$$

dimana :

N = Jumlah stasiun hujan ada

A = Luas DAS, dalam km²

SIM = Faktor simetri, tidak berdimensi

S = Landai sungai rata-rata, tidak berdimensi

B = koefiesiensi reduksi, tidak berdimensi.

$$TR = 0.43 (L/100 SF)^3 + 1.0665 SIM + 1.277$$

Dimana:

TR = waktu naik, dalam jam

L = Panjang sungai induk, dalam km

SF = Faktor sumber, tidak berdimensi
SIM= Faktor simetri, tidak berdimensi

$$QP = 0,1836 A^{0,5884} JN^{0,2381} TR^{-0,4008}$$

Dimana:

QP = Debit puncak, dalam m3/det
JN = Jumlah pertemuan sungai

$$TB = 27,4132 TR^{0,1457} S^{-0,0986} SN^{0,7344} RUA^{0,2574}$$

Dimana :

TB = waktu dasar, dalam jam
TR = Waktu naik, dalam jam
S = Landai sungai rata-rata, tidak berdimensi
SN = frekuensi sumber, tidak berdimensi
RUA = Luas relatif DAS sebelah hulu, dalam km2

$$K = 0,5671 A^{0,1798} S^{-0,1446} SF^{-1,0897} D^{0,0452}$$

Dimana :

K = Koefisien tumpukan, dalam jam
A = Luas DAS, dalam km2
S = Landai sungai rata-rata, tidak berdimensi.
SF = Faktor sumber, tidak berdimensi
D = Kerapatan jaringan kuras, dalam km/km2

$$QB = 0,4751 A^{0,6444} D^{0,9430}$$

Dimana :

QB = Aliran dasar, dalam m3/det
A = Luas DAS, dalam km2
D = Kerapatan jaringan kuras, dalam km/km2

Pemodelan Matematik Hidrolika

a. Software Pemodelan HEC-RAS

Software pemodelan HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center - River Analysis System) adalah suatu software yang bersifat freeware, adalah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan perhitungan aliran steady dan unsteady satu dimensi pada hidrolika sungai, model sedimen transport dasar sungai, dan analisa temperatur air.

software HEC-RAS dibuat di Hydrologic Engineering Center (HEC), yang merupakan bagian dari the Institute for Water Resources (IWR), U.S. Army Corps of Engineers. Software ini di design oleh Mr. Gary W. Brunner, pimpinan dari HEC-RAS development team.

Versi yang pertama HEC-RAS (versi 1.0) dikeluarkan pada bulan Juli 1995, dan saat ini telah tersedia versi 4.4. (2012).

b. Dasar Teori Pemodelan HEC-RAS

Profil muka air dihitung dari suatu penampang dengan Persamaan Energi melalui prosedur iterative yang disebut dengan Standard Step Method. Persamaan Energi tersebut adalah :

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e$$

Dimana :

Y1,Y2 = tinggi muka air pada penampang melintang 1 & 2

Z1,Z2 = garis datum persamaan pada penampang melintang 1 & 2

V1,V2 = kecepatan rata-rata pada penampang melintang 1 & 2

α_1, α_2 = koefisien Coriolis

g = percepatan gravitasi

he = kehilangan tinggi energi

Kehilangan tinggi energi antara dua penampang akibat pelebaran atau penyempitan saluran adalah sebagai berikut :

$$h_c = L \cdot \overline{S_f} + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Dimana :

L = panjang penampang

$\overline{S_f}$ = kemiringan garis energi (friction slope) antara dua penampang

C = koefisien kehilangan akibat pelebaran atau penyempitan alur

Panjang sungai rata-rata L, dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Dimana :

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = panjang melintang penampang sungai kiri, utama dan kanan

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ = rata-rata debit penampang sungai kiri, utama dan kanan

c. Perhitungan Debit Penampang Sungai

Perhitungan debit pada penampang sungai dilakukan dengan membagi penampang menjadi beberapa bagian, dimana kecepatan terdistribusi secara merata. Pendekatan yang dilakukan HEC-RAS adalah membagi beberapa penampang yang bergantung pada input penampang dan nilai n Manning's. Besarnya debit dihitung per-bagian penampang sungai dengan mengacu pada persamaan Manning's berikut :

$$Q = K S_f^{1/2}$$

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3}$$

Dimana :

K = faktor penampang tiap pias
 S_f = Slope
 n = koefisien kekasaran Manning's
 A = luas penampang (m²)
 R = jari-jari hidrolis (m)

d. Tahapan Operasi Pemodelan HEC-RAS

Tahapan pemodelan atau simulasi aliran permanen (steady flow) menggunakan HEC-RAS adalah sebagai berikut :

- Tahapan Pemasukan Data Geometri
- Tahapan Pemasukan Data Aliran dan Kondisi Batas
- Tahapan Perhitungan Hidraulik
- Tahapan Penyusunan Keluaran (Output) Program.

Hasil pemodelan dalam kondisi eksisting maupun desain rencana adalah sebagai berikut :

- Gambar muka air pada setiap potongan melintang (cross section)

- Gambar profile memanjang muka air (long section)

- Tabel (summary output) yang memberikan informasi debit, elevasi muka air, kecepatan arus, kemiringan saluran dan lain-lain.

Bendung

Bendung adalah bangunan yang dibangun melintang di sungai. Fungsi utamanya adalah menaikkan elevasi muka air pada kondisi aliran sungai normal agar mampu mengairi sawah yang tertinggi dan terjauh. Untuk mendapatkan sejumlah debit bagi kebutuhan air irigasi, maka diperlukan bangunan pengambilan (*intake*).

Debit yang melalui mercu bendung dapat dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut : (Chow, 1985 : 358)

$$Q = c \cdot L_{eff} \cdot H_d^{3/2}$$

dimana :

Q = debit yang lewat di atas bendung (m³/dt)

c = koefisien limpasan

L_{eff} = lebar efektif mercu bendung (m)

H_d = tinggi air di atas mercu (m)

Koefisien pengaliran (c) dari Tipe standard suatu bendung dapat diperoleh dengan rumus Rehbock (Chow, 1985 : 358) :

$$c = 3.27 + 0.40 \frac{H}{h}$$

dimana :

c = koefisien pengaliran

H = tinggi air di atas mercu bendung (m)

h = tinggi bendung (m)

Rumus yang digunakan untuk menghitung lebar efektif bendung menggunakan (Chow, 1985 :358) :

$$L_{eff} = L' - 0.1 N.H$$

dimana:

L' = lebar bendung sesungguhnya (m)

N = Banyaknya penyempitan.

Untuk penyempitan dua sisi, $N=2$;

untuk penyempitan satu sisi, $N=1$;

bila tidak ada penyempitan, $N=0$.

H = tinggi air di atas mercu bendung (m)

Persamaan aliran yang lewat bendung dan saluran peluncur didasarkan pada persamaan energi. Untuk menentukan

$$V_z = \sqrt{2g(z + Hd - Y_z)}$$

tinggi muka air pada ambang pelimpah dipergunakan rumus (Chow, 1985 :378) :

$$\frac{Q}{L} = V_z \cdot Y_z$$

$$F_z = \frac{V_z}{\sqrt{g \cdot Y_z}}$$

METODE PENELITIAN

Penelitian di Lokasi Bendung

Penelitian yang dilakukan di lokasi bendung adalah :

- Dokumentasi dan inventarisasi data bendung dan bangunan pendukungnya, serta data kerusakan yang terjadi.
- Melakukan pengukuran topografi untuk mengetahui profil muka tanah dan dasar sungai serta dimensi bendung.
- Wawancara dengan tokoh masyarakat di sekitar bendung.

Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder yang diperlukan untuk studi ini adalah :

- Data curah hujan harian.
- Peta RBI Bakosurtanal Sheet 0520-54 dan 0521-22.
- Data geologi dan mekanika tanah dari pengukuran terdahulu.
- Laporan studi terdahulu terdahulu.

Analisis Data Hasil Penelitian

Langkah-langkah analisis data adalah sebagai berikut:

- Melakukan analisis kerusakan konstruksi, untuk mengetahui sebab kerusakan yang terjadi.
- Menyiapkan konsep penyelesaian masalah.
- Analisis luas Daerah Aliran Sungai (DAS) Bendung Jamuan dan panjang aliran sungai utama, menggunakan Peta RBI Bakosurtanal.
- Analisis Hidrologi untuk mendapatkan besar Banjir Rancangan.
- Analisis Hidraulik dengan simulasi menggunakan model matematik HEC-RAS untuk mendapatkan konstruksi yang baik dan aman.

- Analisis stabilitas konstruksi, untuk mengetahui stabilitas bangunan dari guling dan geser.
- Analisis saluran pengelak, untuk mengalihkan aliran sungai sementara, ketika konstruksi sedang dikerjakan.

Analisis Biaya

Analisis Biaya diperlukan untuk mengetahui besarnya biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan konstruksi, sehingga bangunan bisa berfungsi dengan benar dan aman. Tahapan analisisnya adalah :

- Analisis Bill of Quantity (BOQ), untuk memperoleh volume pekerjaan,
- Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP), untuk mengetahui harga satuan tiap item pekerjaan,
- Analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk mendapatkan biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan konstruksinya.

Pengelompokan jenis pekerjaan untuk analisis Rencana Anggaran Biaya adalah sebagai berikut :

- Pekerjaan Persiapan
- Pekerjaan Beton
- Pekerjaan Batu
- Pekerjaan Tanah (Galian/Timbunan)
- Pekerjaan Lain-Lain

ANALISIS DATA

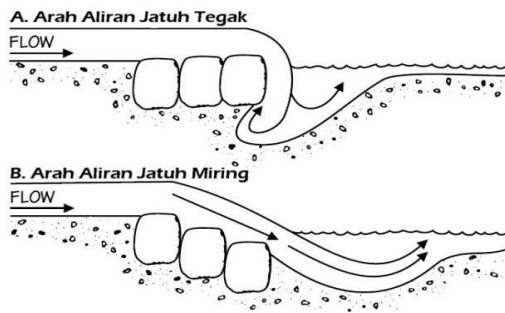
Analisis Kerusakan Konstruksi

- Pengambilan galian C di hilir bendung

Pengambilan galian C di badan sungai yang terletak di hilir bendung yang dilakukan oleh penduduk sekitar, menjadi salah satu sebab utama dasar sungai mengalami penurunan setinggi 3 meter lebih.

- Tergerusnya (Scouring) hilir kolam olak

Bentuk dan akibat gerusan atau Scouring sangat dipengaruhi oleh arah aliran jatuh pada dasar sungai, dapat diilustrasikan dengan gambar sebagai berikut :

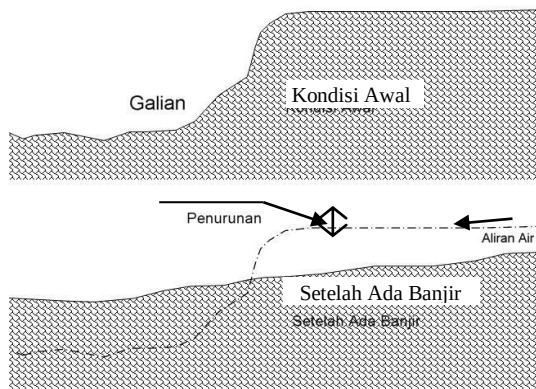


Gambar 2 : Ilustrasi Proses Terjadinya Penggerusan (Scouring)

Pada kondisi di bendung Jamuan, kolam olak type Flip Buckett menyebabkan air yang melewati endsill dari kolam olak akan jatuh dengan arah vertikal. Hal ini yang menjelaskan terjadinya scouring yang parah di hilir kolam olak, sehingga saat ini kedalaman scouring tersebut sudah lebih dari 4 meter.

c. Penurunan dasar sungai di hilir bendung

Peristiwa penurunan dasar sungai tersebut bisa diilustrasikan dengan gambar sebagai berikut :



Gambar 3 : Ilustrasi Mekanisme Penurunan Dasar Sungai

d. Analisis Kolam Olak Eksisting

Data teknis yang didapat dari perencanaan bendung tersebut adalah; Tipe kolam olak Bucket Type (tipe bak) dengan Jari-jari 7.0 meter.

Berdasarkan Buku Bendungan Type Urugan pada hal. 214-215, dijelaskan bahwa untuk tipe Bak Pusaran (Roller Bucket Type), radius lengkungan yang ditetapkan adalah antara 10-15 meter. Perbedaan ini sangat mempengaruhi

karakteristik loncatan air yang terjadi di kolam olak.

Peredam energi tipe Bak Pusaran (Roller Bucket Type) biasanya dibuat untuk sungai-sungai yang dangkal dengan dasar alur yang kukuh. Biayanya cukup rendah tetapi efektifitas kerjanya lebih rendah dibandingkan dengan type-type yang lain dan biasanya menimbulkan olakan-olakan pada aliran di hilirnya.

Sehubungan dengan itu, pondasi dasar bangunan peredam energi type ini harus terdiri dari batuan masif dan kukuh, demikian pula alur sungai pada tempat terjunan air serta daerah sekitar jangkauan gelombang yang ditimbulkan oleh terjunan tersebut haruslah terdiri batuan yang kukuh pula.

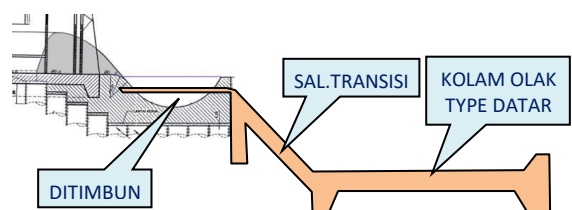
Konsep Penyelesaian

Penyimpulan dari hasil konsultasi dan diskusi khususnya dengan dinas terkait, didapatkan konsep desain dan penyelesaian sebagai berikut :

a. Modifikasi Konstruksi Kolam Olak

Konstruksi Kolam olak yang ada saat ini tidak mungkin untuk dimodifikasi dengan memotong bagian belakangnya, karena pembongkaran konstruksinya dikhawatirkan akan merusak stabilitas tubuh bendung.

Oleh karena itu, alternatif yang ada adalah melakukan penimbunan pada kolam olak, dan ditambah konstruksi baru dibelakangnya dengan saluran transisi dan kolam olak tipe datar, yang berfungsi sebagai peredam energi.



Gambar 4 : Sketsa Konstruksi Perbaikan Kolam Olak

b. Perbaikan Dasar Sungai

Dasar sungai yang ada saat ini sudah turun lebih dari 3 meter dari aslinya.

Untuk melindungi dasar sungai, perlu bangunan pengendali berupa Groundsill. Ada 2 (dua) Groundsill yang diperlukan, yang semuanya dipasang di hilir bendung. Yang terletak di depan berfungsi menjaga dasar sungai agar tidak terjadi penurunan yang bisa merusak kolam olak, sedang yang terletak di belakang berfungsi menjaga agar apabila terjadi degradasi dari arah hilir, tetap bisa menjaga elevasi di hulunya.



Gambar 5 : Sketsa Posisi Groundsill

c. Pengalihan Aliran Air Sungai

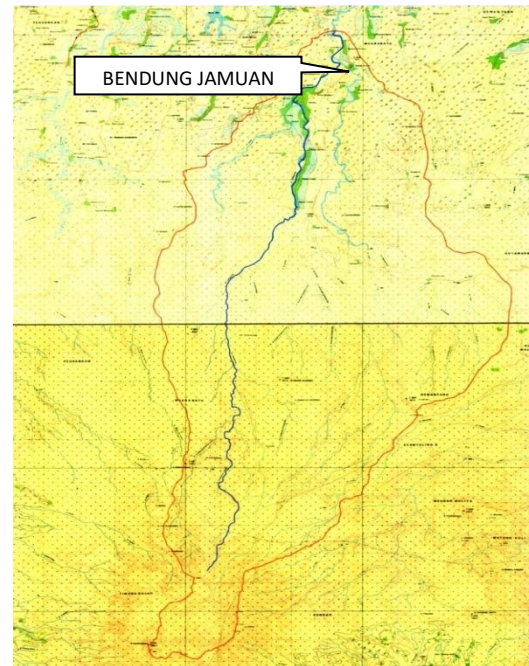
Pada saat pelaksanaan perbaikan, maka kondisi aliran sungai harus dalam keadaan kering. Oleh karena itu, aliran sungai yang ada harus dialihkan. Untungnya, beberapa ratus meter didepan bendung, terdapat saluran lama yang saat ini tidak berfungsi lagi, sehingga aliran air sungai bisa dialihkan kesana.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Hidrologi

Stasiun hujan yang ada yang terdekat dari lokasi bendung adalah Stasiun Hujan Malikussaleh dengan data pencatatan selama 15 tahun, mulai tahun 1998 sampai dengan tahun 2012.

DAS Bendung Jamuan terletak di Kecamatan Sawang. Lokasi tersebut terletak pada peta Bakosurtanal Sheet 0520-54 dan 0521-22, dengan luas DAS $\pm 413.342 \text{ Km}^2$ dan panjang sungai utama $\pm 42.4784 \text{ Km}$.



Gambar 6 : Peta Daerah Aliran Sungai (DAS) Bendung Jamuan

Analisis curah hujan rancangan dilakukan dengan metode E.J. Gumbel dan Log Pearson Type III, dengan hasil :

Tabel 1 : Perhitungan Curah Hujan Rancangan Metode E.J Gumbel

No	Tr	Ytr	K	Xt
1	1	-1.5293	-2.0009	16.3016
2	2	0.36651	-0.1433	98.5224
3	5	1.49994	0.96722	147.678
4	10	2.25037	1.7025	180.223
5	25	3.19853	2.63152	221.344
6	50	3.90194	3.32073	251.849
7	100	4.60015	4.00485	282.13

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 2 : Perhitungan Curah Hujan Rancangan Metode Log Pearson Tipe III

No	Tr	G Tabel	Xt (mm)
1	1	-2.451	33.77
2	2	0.028	97.66
3	5	0.849	138.80
4	10	1.262	165.65
5	25	1.691	199.07
6	50	1.961	223.54
7	100	2.200	247.60

Sumber : Hasil Perhitungan

Sedangkan hasil uji distribusi frekuensi adalah :

Tabel 3 : Hasil Uji Distribusi Frekuensi

Uji Distribusi	Log Pearson Tipe III	E.J Gumbel
Uji Chi Square		
X ² hitung	2.524	3.000
X ² kritis	5.991	5.991
Hipotesa	Diterima	Diterima
Uji Smirnov Kolmogorov		
Δ max	0.069	1.345
Δ kritis	0.34	0.34
Hipotesa	Diterima	Tidak Diterima

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari hasil uji tersebut diatas, distribusi Log Pearson Type III yang diterima, sehingga dalam analisa selanjutnya digunakan hasil dari perhitungan curah hujan rancangan metode Log Pearson Type III.

Hasil perhitungan debit banjir rancangan menggunakan Metode Rasional, HSS Nakayasu dan HSS Gamma I, diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 4 : Rekapitulasi Debit Banjir Rancangan

No	Kala Ulang	Debit Banjir Rancangan (m ³ /dt)		
		Metode Rasional	HSS Nakayasu	HSS Gama I
1	1	119.44	129.98	127.12
2	2	312.84	324.26	316.83
3	5	433.98	445.95	435.71
4	10	512.33	524.66	512.52
5	25	609.31	622.08	607.56
6	50	680.01	693.10	677.08
7	100	749.32	762.73	744.99

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari hasil perhitungan debit banjir rancangan tersebut diatas, dalam analisa selanjutnya digunakan hasil dari HSS Nakayasu.

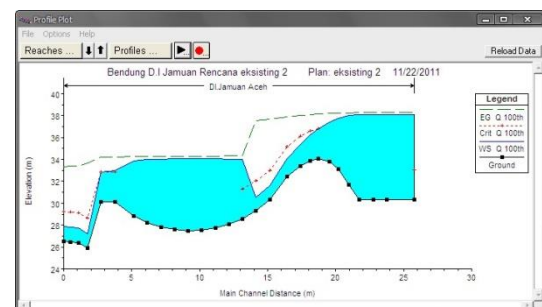
Analisis Hidraulik

Analisis hidraulik diperlukan untuk mengetahui karakteristik aliran air, khususnya pada perilaku yang berpotensi mempunyai daya rusak yang tinggi, sehingga bisa direncanakan bangunan pengendalinya. analisis ini menggunakan model matematik, yang dalam pekerjaan ini

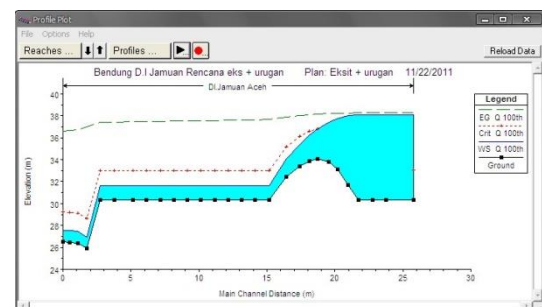
digunakan software HEC-RAS. Analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

- Analisis Hidraulik Kondisi Awal
- Analisis Hidraulik Kondisi Saat Ini
- Analisis Hidraulik Kolam Ditimbun

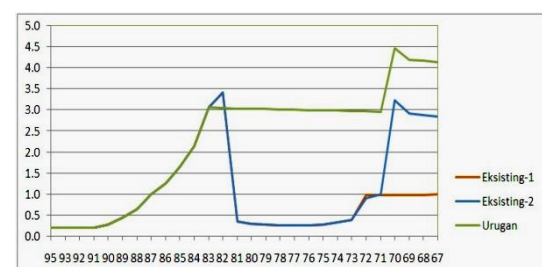
Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka sangat tampak bahwa ketika kolam olak ditimbun, yang terjadi adalah aliran air yang sangat cepat dan sepanjang aliran selepas mercu bendung adalah aliran Super-Kritis, sehingga daya rusaknya menjadi semakin tinggi, dengan nilai Bilangan Froude tertinggi = 4,42 (Sta. 70).



Gambar 7 : Profil Muka Air Hasil Model Matematik Kondisi Saat Ini



Gambar 8 : Profil Muka Air Kondisi Kolam Olak Ditimbun



Gambar 9 : Perbandingan Bilangan Froude dari Hasil 3 Analisis

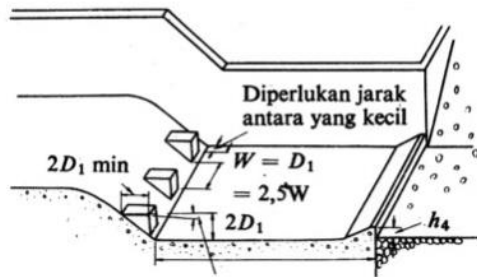
a. Perencanaan Kolam Olak

Perencanaan kolam olak, memerlukan nilai Bilangan Froude tertinggi yang terjadi pada saluran peluncur sebagai dasar perhitungannya. Oleh karena itu, analisis hidraulik di saluran peluncur diperlukan untuk mendapatkan nilai

Bilangan Froude tertinggi, sebagai dasar perencanaan kolam olak.

Berdasarkan analisis tersebut, didapatkan besaran Bilangan Froude tertinggi adalah = 4,42 (Sta. 65). Sesuai kriteria pemilihan kolam olak dari USBR, maka untuk nilai Bilangan Froude 2,5 – 4,5, ditentukan untuk menggunakan kolam olak USBR Type IV.

**Bentuk kolam olakan datar type IV
(Bilangan Froude antara 2,5 s/d 4,5).**



Gambar 10 : Kolam Olak USBR Type IV

b. Perhitungan Dimensi Kolam Olak

Dimensi kolam olak dihitung menggunakan beberapa kriteria, agar bisa diperoleh hasil perencanaan yang lebih baik. Kriteria tersebut adalah :

- Dari Perencanaan Teknis bendung Pengendali Dasar Sungai, berdasarkan Keputusan Menteri Kimpraswil, Nomor : 360/KPTS/M/2004, Tanggal : 1 Oktober 2004.
- Standar Perencanaan Irigasi, Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama (KP – 02).
- Buku Bendungan Type Urugan, editor : Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda, Penerbit : PT. Pradnya Paramita.

Berdasarkan perhitungan, didapat hasil awal perencanaan kolam olak sebagai berikut :

- Type Kolam Olak : USBR Type IV
- Panjang Kolam Olak
 1. Rumus Hidraulik : 14,0 meter
 2. Rumus Empiris : 15,3 meter
 3. Rumus USBR : 19,0 meter
 4. Rumus KP-02 : 23,7 meter
- Tinggi End Sill
 1. Rumus Hidraulik : 7,0 meter
 2. Rumus Empiris : 1,31 meter
 3. Rumus USBR : 1,26 meter

Hasil perhitungan dari berbagai sumber menghasilkan perbedaan nilai yang mencolok, sehingga sulit untuk langsung dipilih salah satunya untuk digunakan dalam perencanaan selanjutnya.

Oleh karena itu, seluruh alternatif yang ada akan diuji melalui model matematik menggunakan HEC-RAS, dan nilai yang secara hidraulik memenuhi kriteria perencanaan, akan digunakan.

c. Simulasi Perletakan Bangunan

Simulasi ini diperlukan untuk mendapatkan perletakan bangunan yang paling ideal, baik ditinjau dari karakteristik hidraulik, stabilitas maupun biaya. Alternatif yang akan disimulasikan adalah sebagai berikut :

1. Tinggi jatuh diminimkan sehingga saluran transisi menjadi lebih pendek dan daya rusak air menjadi lebih kecil, dengan resiko perlu banyak penimbunan, kolom pondasi kolam olak menjadi lebih panjang dan Groundsill lebih tinggi.
2. Kolam olak diletakkan pada dasar sungai yang ada pada saat ini, dengan resiko tinggi jatuh air lebih tinggi, memperpanjang saluran transisi dan daya rusak airnya menjadi lebih besar. Alternatif ini masih memerlukan penimbunan antara kolam olak dengan Groundsill pertama.
3. Kolam olak diletakkan dibawah dasar sungai yang ada pada saat ini, dengan resiko tinggi jatuh air lebih tinggi lagi, lebih memperpanjang saluran transisi dan daya rusak airnya menjadi lebih besar. Alternatif ini memperkecil penimbunan antara kolam olak dengan Groundsill pertama, dan beda tinggi endsill kolam olak tidak terlalu jauh dari muka dasar sungai saat ini.

d. Hasil Perencanaan Perletakan Bangunan

Hasil simulasi perletakan bangunan dengan pertimbangan karakteristik hidraulik dan komponen biaya adalah sebagai berikut :

1. Saluran peluncur direncanakan dengan kemiringan 45°, disamakan

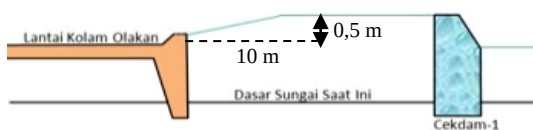
dengan kemiringan tubuh bendung bagian belakang.

2. Beda tinggi lantai kolam olak baru dari lantai rencana urugan kolam olak lama sebesar 4,3 m atau 8,05 m dari puncak bendung.
3. Panjang lantai kolam olak disesuaikan dengan hasil simulasi hidraulik.
4. Groundsill pertama diletakkan 50 m dari endsill kolam olak dengan tinggi 4,5 m.
5. Groundsill kedua diletakkan 70 m dibelakang Groundsill pertama dengan tinggi 3,0 m.
6. Disimulasikan 10 m dibelakang Endsill dibuat miring keatas dengan beda elevasi 0,5 m dari elevasi Endsill, untuk membantu meredam olakan.

e. Simulasi dan Analisis Hidraulik Konstruksi Rencana

Setelah seluruh perencanaan bangunan kolam olak diselesaikan, diperlukan analisis karakteristik aliran sesuai dengan konstruksi yang telah ditentukan. Analisis ini diperlukan untuk mengetahui karakteristik hidraulik diseluruh titik sepanjang bangunan yang telah direncanakan, sehingga keamanan bangunan bisa dipertanggung-jawabkan dengan baik.

3 (tiga) komponen utama yang sangat berpengaruh yang digunakan pada simulasi hidraulik dari konstruksi rencana adalah Panjang Kolam Olak, tinggi End Sill dan kemiringan saluran setelah Endsill.



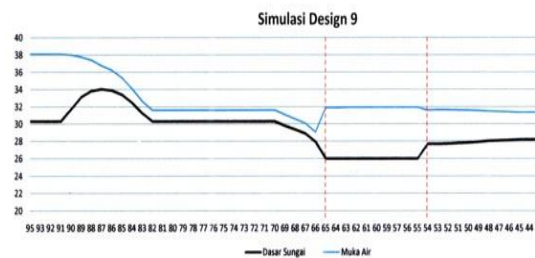
Gambar 11 : Sketsa Posisi Kemiringan Saluran untuk Simulasi

Ada 9 (sembilan) simulasi yang dilakukan, dengan perubahan parameter desain, terutama panjang kolam olak, tinggi endsill dan kemiringan dibelakang endsill.

f. Kesimpulan Hasil Simulasi Design

Hasil kesimpulan yang digunakan sebagai dasar perencanaan konstruksi adalah sebagai berikut :

1. Panjang kolam olak = 14 meter.
2. Tinggi Endsill = 1,7 meter.
3. Saluran sepanjang 10 meter dibelakang Endsill dibuat miring keatas dengan beda tinggi 0,5 meter.
4. Ditambahkan saluran pengarah ditengah-tengah sungai, dengan lebar 6 meter dan tinggi 0.5 meter, dengan elevasi dasar = elevasi Endsill.



Gambar 12 : Profil Muka Air Hasil Simulasi Design-9

Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng yang dilakukan adalah Analisis Stabilitas Lereng Tegak, Analisis Stabilitas Lereng Miring, Analisis Stabilitas GroundSill -1 dan 2.

Seluruh analisis stabilitas yang dilakukan dengan meninjau Stabilitas Terhadap Guling dan Stabilitas Terhadap Geser, diperoleh hasil **AMAN**.

Perencanaan Saluran Pengelak

Dimensi saluran pengelak hasil perencanaan adalah; Lebar 54 meter, Tinggi 7.35 meter dan Panjang galian 15 meter.

Saluran pengelak dibuat pada elevasi +39.50. dengan dasar saluran pada elevasi +32.15, tinggi galian adalah 5.45 meter, dan muka air pada saat Q-5th adalah +33.88 atau setinggi 1.73 m dari dasar saluran.

Analisis Volume Pekerjaan

Perhitungan volume pekerjaan atau Bill of Quantity (BOQ) pada pekerjaan ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu :

1. Pekerjaan Persiapan
2. Pekerjaan Beton
3. Pekerjaan Batu
4. Pekerjaan Tanah (Galian/Timbunan)
5. Pekerjaan Lain-Lain

Berdasarkan hasil analisis, maka volume pekerjaan adalah sebagai berikut :

Tabel 5 : Rekapitulasi Volume Pekerjaan

NO.	PEKERJAAN	SUB-PEKERJAAN	VOLUME TOTAL	SATUAN
A	Pekerjaan Beton	1 Beton K-275	1,166.50	m3
		2 Beton Cyclope	283.50	m3
		3 Lantai Kerja	212.11	m3
		4 Pembesian (ulir) - kg	82,948.14	kg
		5 Pembesian (polos) - kg	11,825.29	kg
		6 Bekisting	2,014.00	m2
		7 Plesteran t=15 mm (1 PC : 2 Ps)	2,346.70	m2
B	Pekerjaan Batu	1 Pasangan Batu Kali	360.00	m3
		2 Pasangan Batu Boulder (kosong)	1,143.00	m3
		3 Pasangan Bronjong	2,066.76	m3
C	Pekerjaan Galian/Timbunan	1 Galian	5,500.04	m3
		2 Timbunan	3,004.61	m3
		3 Pemadatan	1,502.30	m3
D	Pekerjaan lain-lain	1 Pasangan Geotextile	1,338.00	m2
		2 Pasangan Drain Hole	280.00	bh
		3 Dewatering	1.00	LS
E	Pekerjaan Persiapan	1 Persiapan Awal	1.00	LS
		2 Persiapan Akhir	1.00	LS

Sumber : Hasil Perhitungan

Analisis Harga Satuan Pekerjaan

Hasil Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) ini secara ringkas adalah sebagai berikut :

Tabel 6 : Rekapitulasi Analisa Harga Satuan Pekerjaan

No. Analisa	Jenis Pekerjaan	Satuan	Harga Satuan (Rp)
A. PEKERJAAN BETON			
A.01	Beton K-275	m3	1,462,400
A.02	Beton K-125 (1Pc : 2,5Ps : 5Kr)	m3	1,196,200
A.03	Beton K-100 (1Pc : 3Ps : 6Kr)	m3	948,200
A.04	Tulangan Beton Ulir	ton	20,888,900
A.05	Tulangan Beton Polos	ton	15,421,900
A.06	Bekisting (termasuk pembongkaran)	m2	196,300
A.07	Plesteran t=15 mm (1 PC : 2 Ps)	m2	22,547
B. PEKERJAAN BATU			
B.01	Pasangan Batu Kali	m3	512,489
B.02	Pasangan Batu Boulder Kosong	m3	356,483
B.03	Pasangan Bronjong	m3	835,680
C. PEKERJAAN TANAH			
C.01	Galian Tanah	m3	15,952
C.02	Timbunan	m3	13,789
C.03	Pemadatan	m3	14,122
D. PEKERJAAN LAIN-LAIN			
D.01	Pemasangan Geotextile	m2	56,855
D.02	Drain Hole	bh	19,400

Sumber : Hasil Perhitungan

Analisis Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) Rehabilitasi Bendung Jamuan adalah sebagai berikut :

Tabel 7 : Perhitungan Rencana Anggaran Biaya

NO.	PEKERJAAN	SUB-PEKERJAAN	SATUAN	VOLUME TOTAL	BIAYA	BIAYA TOTAL	
A	Pekerjaan Beton	1 Beton K-275	m3	1,166.50	1,462,400	1,705,888,430	
		2 Beton Cyclope	m3	283.50	1,196,200	339,122,700	
		3 Lantai Kerja	m3	212.11	948,200	201,122,792	
		4 Pembesian (ulir) - kg	kg	82,948.14	20,889	1,732,695,350	
		5 Pembesian (polos) - kg	kg	11,825.29	15,422	182,368,425	
		6 Bekisting	m2	2,014.00	196,300	395,348,200	
		7 Plesteran t=15 mm (1 PC : 2 Ps)	m2	2,346.70	22,547	52,911,632	
B	Pekerjaan Batu	1 Pasangan Batu Kali	m3	360.00	512,489	184,496,004	
		2 Pasangan Batu Boulder (kosong)	m3	1,143.00	356,483	407,460,516	
		3 Pasangan Bronjong	m3	2,066.76	835,680	1,727,150,169	
C	Pekerjaan Galian/Timbunan	1 Galian	m3	5,500.04	15,952	87,736,075	
		2 Timbunan	m3	3,004.61	13,789	41,430,090	
		3 Pemadatan	m3	1,502.30	14,122	21,215,786	
D	Pekerjaan lain-lain	1 Pasangan Geotextile	m2	1,338.00	56,855	76,072,580	
		2 Pasangan Drain Hole	bh	280.00	19,400	5,432,124	
		3 Dewatering	LS	1.00	12,000,000	12,000,000	
E	Pekerjaan Persiapan	1 Persiapan Awal	LS	1.00	150,000,000	150,000,000	
		2 Persiapan Akhir	LS	1.00	50,000,000	50,000,000	
		TOTAL BIAYA KONSTRUKSI					7,372,450,782
		PPN 10%					737,245,078
		TOTAL BIAYA POYOK					8,109,695,860
		DIBULATKAN					8,109,696,000
TERBILANG : Delapan Milyar Seratus Sembilan Juta enam ratus sembilan puluh enam ribu rupiah							

Sumber : Hasil Perhitungan

KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

- Kondisi Downstream Bendung Jamuan sudah sangat kritis, khususnya terhadap guling apabila terjadi banjir yang besar, sehingga perlu penanganan segera.
- Penanganan yang dilakukan adalah dengan menimbun kolam olak lama sehingga datar, dan menambah kolam olak baru di hilir bendung yang dihubungkan dengan saluran transisi miring 45°.
- Dimensi kolam olak yang baru adalah USBR Type IV dengan panjang 14 meter dan Tinggi Endsill 1.7 meter.
- Untuk menjaga stabilitas dasar sungai di hilir kolam olak, maka dibuat 2 (dua) buah Groundsill, dengan tinggi 4.5 meter dan 3 meter, dimana fungsi Groundsill pertama mengamankan bangunan dihilunya, sementara Groundsill yang kedua berfungsi menjaga penurunan dasar sungai di hilir.
- Diperlukan saluran pengelak di hulu bendung, dengan elevasi dasar +32.15 dan lebar saluran pengelak sebesar 54 meter.
- Biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan konstruksi tersebut adalah sebesar Rp. 8,109,696,000,- (Delapan Milyar Seratus Sembilan Juta Enam Ratus Sembilan Puluh Enam Ribu Rupiah).

SARAN

Saran yang dikemukakan dari hasil penelitian ini adalah:

- Pada saat pelaksanaan konstruksi, perlu dilakukan pekerjaan pengukuran topografi ulang, karena dikhawatirkan permukaan dasar sungai sudah turun lagi dari design.
- Perlu dilakukan pekerjaan Mekanika Tanah, khususnya pada lokasi pondasi kolam olak tambahan (baru), pondasi perkuatan tebing setelah kolam olak dan pondasi Groundsill. Pekerjaan Mekanika Tanah yang diperlukan adalah sondir dan bor tangan (Hand Auger), dengan kedalaman minimal 4 meter dari dasar sungai.
- Tanah urugan yang digunakan pada perkuatan tebing diusahakan menggunakan tanah liat, sehingga

ketika hujan dan tanah basah, tidak mengganggu stabilitas perkuatan tebing.

- d. Perlu pendekatan yang baik kepada masyarakat sekitar, khususnya terkait penggunaan saluran lama menjadi saluran pengelak, karena pada alur saluran pengelak tersebut dimanfaatkan oleh penduduk untuk mengambil galian-C.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- , 1986, *Standar Perencanaan Irigasi, Kriteria Perencanaan Bagian Bangunan Utama, KP – 02*, Keputusan Dir.Jenderal Pengairan, Nomor : 185/KPTS/A/1986,
- , 2004, *Perencanaan Teknis bendung Pengendali Dasar Sungai*, Keputusan Menteri Kimpraswil, Nomor : 360/KPTS/M/2004, Tanggal : 1 Oktober 2004.
- , 1993, *RIVER HYDRAULICS Engineering and Design*, DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000
- Chaudhry, M.H., 1993, *Open-Channel Flow*, Englewood Clift, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Chow, Ven Te, 1959, *Open Channel Hydraulics*, New York : McGraw-Hill, Inc.
- Mukomoko, YA., 1985, *Dasar Penyusunan Anggaran Biaya Bangunan*, Penerbit CV. Gaya Media Pratama
- Subramanya, K., 1982, *Flow in Open Channels*, McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Soemarto, CD., 1987, *Hidrologi Teknik*, Surabaya : Penerbit Usaha Nasional.
- Suyono Sosrodarsono, Masateru Tominaga, 1994, *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*, Penerbit Pradnya Paramita.
- Suyono Sosrodarsono, Kensaku Takeda, 1981, *Bendungan Type Urugan*, Penerbit Pradnya Paramita