

ANALISA REMBESAN BENDUNGAN BAJULMATI TERHADAP BAHAYA PIPING UNTUK PERENCANAAN PERBAIKAN PONDASI

Yuli Astuti¹, Aniek Masrevaniah², Suwanto Marsudi²

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang

²Dosen Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya Malang

Abstrak: Kondisi geologi pondasi rencana bendungan Bajulmati yang lulus air (*permeable*) mengharuskan untuk dilakukan perbaikan pondasi agar rembesan yang terjadi tidak membahayakan keamanan bendungan. Dalam studi ini akan dianalisa pola aliran dan debit rembesan untuk beberapa alternatif perbaikan pondasi dengan menggunakan analisa numerik elemen hingga (*software Seep/W*) pada kondisi *steady state*, waduk pada kondisi muka air tinggi. Penyusunan hasil analisa dilakukan dalam 2 tahap, tahap pertama analisa dilakukan terhadap kondisi tanpa adanya perbaikan pondasi dan analisa tahap kedua terhadap beberapa alternatif perbaikan pondasi yaitu sementasi tirai (*grouting*), *cutoff wall*, alas kedap air hulu (*upstream blanket*).

Hasil analisa pada kondisi tanpa perbaikan pondasi adalah sebagai berikut faktor keamanan terhadap piping $2,113 < 4$. Lokasi yang diindikasikan berbahaya terhadap piping adalah pada dasar inti dan dasar lereng hilir timbunan bendungan. Berdasarkan pola aliran yang terjadi, maka debit rembesan diperiksa terhadap beberapa lokasi yaitu Q_1 (dibawah lereng hulu), Q_2 (di bawah inti), Q_3 (di bawah lereng hilir), Q_4 (kaki bendungan hilir). Kuantitas debit rembesan $Q_1 = 0,021 \text{ m}^3/\text{det}$, $Q_2 = 0,277 \text{ m}^3/\text{det}$, $Q_3 = 6,423 \text{ m}^3/\text{det}$, $Q_4 = 0,023 \text{ m}^3/\text{det}$ lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan (Q_{ijin}) yaitu $0,022 \text{ m}^3/\text{det}$. Hasil analisa pada kondisi dengan perbaikan pondasi dijelaskan pada penjelasan di bawah ini. Alternatif 1, perbaikan pondasi dengan sementasi tirai (*curtaingrouting*), faktor keamanan terhadap piping adalah $10,6 > 4$, kuantitas debit rembesan pada Q_1 , Q_2 dan $Q_3 > Q_{ijin}$, tetapi $Q_4 < Q_{ijin}$, namun terjadi penurunan $68,00\%$ s/d $94,73\%$ dari Q tanpa perbaikan. Alternatif 2, perbaikan pondasi dengan *cutoff wall*, faktor keamanan terhadap piping adalah $10,6 > 4$, kuantitas debit rembesan Q_1 , Q_2 , dan $Q_4 < Q_{ijin}$, tetapi pada $Q_3 > Q_{ijin}$, namun terjadi penurunan $94,87\%$ s/d $99,39\%$ dari Q tanpa perbaikan. Alternatif 3, perbaikan pondasi dengan alas kedap air hulu (*upstream blanket*), faktor keamanan terhadap piping adalah $2,65 > 4$, kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi (Q_1 , Q_2 , Q_4) $> Q_{ijin}$ tetapi $Q_3 < Q_{ijin}$, namun terjadi penurunan $0,45\%$ s/d $0,71\%$ dari Q tanpa perbaikan.

Dari beberapa alternatif perbaikan pondasi di atas, maka alternatif 2 merupakan alternatif yang paling efektif untuk mencegah bocoran dari waduk dan mengurangi bahaya piping.

Kata kunci: *permeable*, *Seep/W*, perbaikan pondasi, debit rembesan, piping

Abstract: A geological condition of Bajulmati Dam foundation of which permeable requires to be done foundation improvement so as the seepage that occurs does not endanger the safety of the dam. This study will analyze the flow pattern and seepage discharge for several alternative foundation improvements by using a numerical element analysis (*software SEEP/W*) at *steady state* conditions, the reservoir at high water level conditions. Preparation of the analysis is carried out in two stages, first stage the analysis is carried out in the conditions without foundation improvement and the second stage is analysis of several alternatives of foundation improvement namely *grouting*, *cutoff wall*, *upstream blanket*.

The result of analysis on the condition without foundation improvement as follows, safety factor against piping $2,113 < 4$. A hazardous location indicated against piping is, at the base of core and the base of downstream slope of embankment. Based on the flow pattern that occurs, then the seepage discharge is checked at several locations: Q_1 (under the upstream slopes), Q_2 (under the core), Q_3 (under the downstream slope), Q_4 (foot of downstream dam). Quantity of seepage discharge $Q_1 = 0,021 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_2 = 0,277 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_3 = 6,423 \text{ m}^3/\text{sec}$, $Q_4 = 0,023 \text{ m}^3/\text{sec}$ is greater than the allowable quantity of seepage discharge (Q_{allow}) is $0,022 \text{ m}^3/\text{sec}$.

The result of analysis on the condition of the foundation improvements is described in the explanation below. Alternative 1, foundation improvements with curtain grouting, safety factor against piping is $10,6 > 4$, the quantity of seepage discharge in Q_1 , Q_2 and $Q_3 > Q_{allow}$, but $Q_4 < Q_{allow}$, but there is a decline of $68,00\%$ up to $94,73\%$ of Q without improvement. Alternative 2, foundation improvement

with a cutoff wall the safety factor against piping is $10.6 > 4$, the quantity of seepage discharge Q_1, Q_2 and $Q_4 < Q_{allow}$, but in $Q_3 > Q_{allow}$, but there is a decline of 94,87% up to 99,39% of Q without improvement. Alternative 3, the foundation improvement with upstream blanket safety factor against piping is $2.65 > 4$, the quantity of seepage discharge on the basis of the foundation (Q_1, Q_2, Q_4) $> Q_{allow}$, but $Q_4 < Q_{allow}$, but there is a decline of 0.45% up to 0.71% of Q without improvement.

From several alternatives of foundation improvement as mentioned above, the alternative 2 is the most effective alternative to prevent leaks from the reservoir and reduce piping hazard.

Key Words: permeable, Seep/W, foundation improvement, seepage discharge, piping

Bendungan sebagai penampung air harus direncanakan dengan bahan pembentuk tubuh bendungan yang baik dan berdiri diatas pondasi yang stabil. Pondasi bendungan sebagai penopang tubuh bendungan harus memenuhi persyaratan tertentu. Namun, apabila pondasi bendungan tidak memenuhi persyaratan bisa dilakukan perbaikan pada pondasi sepanjang perbaikan tersebut layak dari segi teknis dan ekonomis. Persyaratan pondasi agar bendungan stabil salah satunya adalah stabil terhadap erosi akibat rembesan. Disamping persyaratan yang lain yaitu mempunyai daya dukung dan kuat geser yang cukup serta kedap air (Masrevaniah, 2010).

Rembesan pada bendungan dan pondasi merupakan faktor penting dalam stabilitas bendungan. Rembesan merupakan aliran yang secara terus menerus mengalir dari hulu menuju hilir. Aliran air ini merupakan aliran dari air waduk melalui material yang lulus air (*permeable*), baik melalui tubuh bendungan maupun pondasi. Untuk itu, maka pola aliran dan debit rembesan yang keluar melalui tubuh bendungan dan pondasi sangat penting dan perlu untuk diperhatikan (Yong *et. al* , 2009)

Bendungan Bajulmati terletak di desa Wongso-rejo Kabupaten Banyuwangi. Kapasitas tampungan kotor bendungan $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ berfungsi untuk memenuhi kebutuhan air minum dan pembangkit listrik dengan kapasitas 340 kW. Pelaksanaan pembangunan pada saat ini menemui kendala yaitu kondisi geologi pondasi rencana bendungan Bajulmati yang lulus air (*permeable*) mengharuskan untuk dilakukan perbaikan pondasi agar rembesan yang terjadi tidak membahayakan keamanan bendungan. Dalam studi ini akan dianalisa pola aliran dan debit rembesan untuk beberapa alternatif perbaikan pondasi dengan menggunakan analisa numerik elemen hingga (*software Seep/W*).

METODOLOGI PENELITIAN

Tinjauan Pustaka

Dasar teori untuk persamaan perhitungan rembesan adalah dengan menggunakan rumus Darcy sebagai berikut:

$$Q = A \cdot K \cdot i \quad (1)$$

$$V = K \cdot i \quad (2)$$

dimana:

A = luas penampang basah

K = Koefisien permeabilitas

i = Gradien hidrolis

= h/L

h = Beda tinggi tekan

L = Panjang trayektori rembasan

V = Kecepatan air rembesan

Analisa rembesan yang mengindikasikan terjadinya piping, ditentukan berdasarkan faktor keamanan terhadap piping sebagai berikut:

$$Fk_{\text{piping}} = \frac{I_{cr}}{I_n} \quad (3)$$

dengan:

$$Fk_{\text{piping}} \text{ min} = 4$$

I_n = gradien hidraulik debit

I_{cr} = gradien hidraulik dari material timbunan atau pondasi

$$I_{cr} = \frac{SG - 1}{1 - e} \quad (4)$$

SG = berat jenis material, *specific gravity*

e = angka porositas

Analisa rembesan pada bendungan umumnya dimodelkan baik secara fisik maupun secara empiris untuk mengetahui fenomena pola aliran dari rembesan. Dengan memberikan kondisi batas tertentu dan sifat fisik material tanah maupun pondasi, pemodelan ini dapat digunakan untuk menentukan tekanan hidraulik, pola aliran, serta jumlah debit rembesan. Persamaan Laplace merupakan dasar persamaan matematika untuk beberapa model dan metode yang digunakan dalam analisa rembesan.

Persamaan Laplace (5) digunakan sebagai dasar untuk pemodelan aliran rembesan dalam kasus aliran tanah keadaan *steady*

$$\frac{2}{x^2} - \frac{2}{y^2} - \frac{2}{z^2} = 0 \tag{5}$$

Deskripsi Wilayah Studi

Lokasi bendungan Bajulmati tertera pada gambar 1, sedangkan potongan melintang dan kondisi geologi bendungan tertera pada Gambar 2.

Pemodelan dan Metode Analisa Rembesan

Analisa rembesan pada studi ini menggunakan program bantuan Program Seep/W. Program tersebut merupakan bagian dari Program Geo Slope yang dibuat oleh Geo Slope International, Ltd.

Analisa rembesan dilakukan terhadap 3 alternatif tipikal bendungan sebagai berikut:

1. Alternatif 1 : Tipikal bendungan dengan perbaikan pondasi sementasi tirai (*curtaingrouting*)
2. Alternatif 2 : Tipikal bendungan dengan perbaikan pondasi dinding diapraghma (*cutoff wall*)
- Alternatif 3 : Tipikal bendungan dengan perbaikan pondasi alas kedap air hulu (*upstream blanket*)

Dari masing-masing alternatif rembesan pada bendungan dan pondasi dianalisa terhadap kondisi muka air banjir.

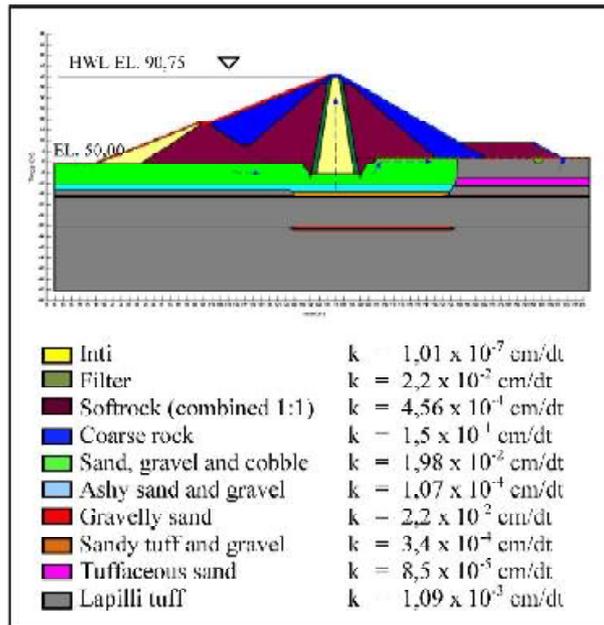
Debit rembesan yang didapatkan dari hasil pemodelan dengan Seep/W dianalisa terhadap debit rembesan yang diijinkan. Debit rembesan yang diijinkan yaitu kurang dari 1% limpasan tahunan rata-rata.

Faktor keamanan terhadap *piping* dianalisa berdasarkan persamaan (3) dan (4), sedangkan nilai kemiringan hidraulik aliran dan material pondasi didapatkan hasil dari pemodelan dan data-data penyelidikan dan pengujian tanah.



Sumber: Anonim, 2010

Gambar 1. Lokasi Penelitian



Sumber: Anonim, 2010 dan Anonim 2011

Gambar 2. Potongan melintang pondasi bendungan kondisi tanpa perbaikan

HASIL ANALISA

a. Analisa Rembesan Kondisi Tanpa Perbaikan

Analisa rembesan pada kondisi tanpa perbaikan pondasi dilakukan untuk mengetahui pola aliran yang terjadi pada pondasi serta besarnya debit rembesan pada pondasi dan kaki lereng hilir bendungan.

Hasil analisa pola aliran pada kondisi tanpa perbaikan dengan menggunakan program Seep/W disajikan pada gambar 3. Berdasarkan gambar 3, aliran rembesan yang terjadi pada pondasi diindikasikan akan menyebabkan erosi (*piping*) pada dasar lereng hilir bendungan.

Indikasi bahaya *piping* diperiksa dengan menggunakan persamaan (3) dan (4) untuk mengetahui faktor keamanan terhadap *piping*.

Besarnya kemiringan hidraulik debit “i_n” yang terjadi pada dasar pondasi di bawah inti didapatkan dari hasil analisa Seep/W adalah sebesar 0,5 seperti tertera pada gambar 4, sedangkan besarnya kemiringan hidraulik kritis dengan menggunakan persamaan (4) adalah sbb:

$$I_{cr} = \frac{SG}{1 + e} = \frac{2,681}{1 + 0,591} = \frac{1,681}{1,591} = 1,06$$

Faktor keamanan terhadap bahaya piping pada dasar pondasi untuk alternatif tanpa perbaikan pondasi adalah:

$$Fk_{\text{piping}} = \frac{1,06}{0,5} = 2,113 < 4, \text{ Tidak Aman}$$

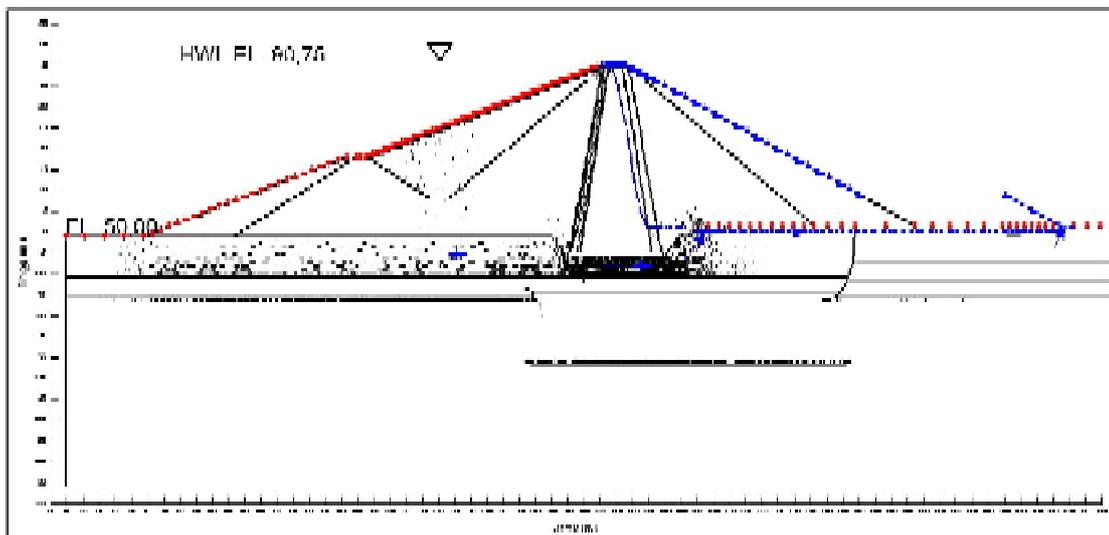
Dari hasil analisa di atas, maka diindikasikan terjadi piping pada dasar pondasi bendungan di bawah inti yang akan menyebabkan erosi pada dasar lereng hilir timbunan bendungan.

Hasil analisa kuantitas debit rembesan pada pondasi tertera pada tabel 1. Berdasarkan tabel 1, kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, maka

diperlukan perbaikan pondasi untuk memperkecil kuantitas debit rembesan. Hal yang perlu diperhatikan, kuantitas debit rembesan pada dasar lereng hilir timbunan “Q₃” sangat besar namun pada kaki bendungan hilir “Q₄” mengecil, sehingga dikhawatirkan kehilangan air yang cukup besar dari waduk tidak *terdeteksi* apabila pengukuran debit dilakukan pada kaki bendungan hilir.

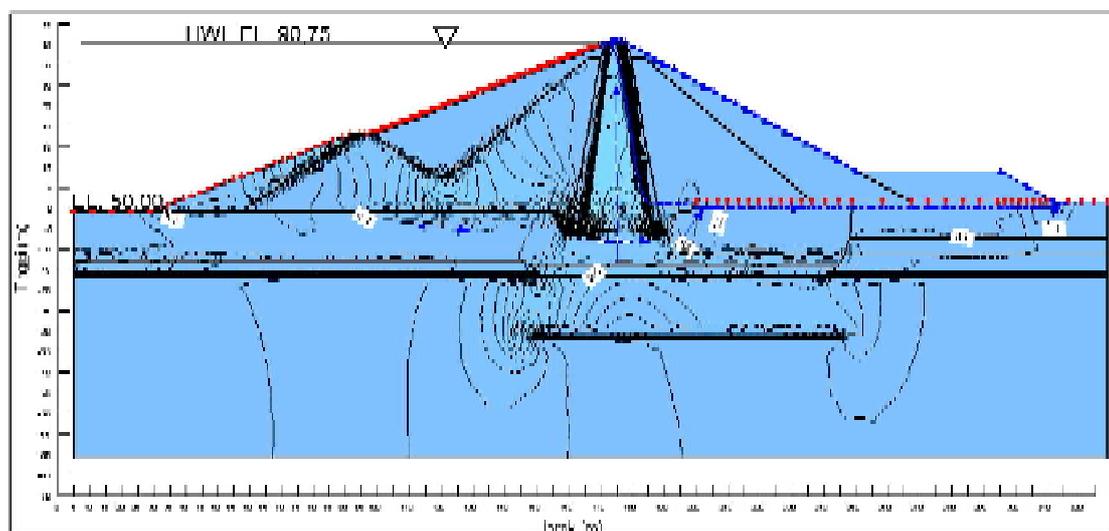
- b. Alternatif 1, Analisa Rembesan Dengan Perbaikan Pondasi Sementasi Tirai (*Curtain Grouting*)

Analisa rembesan pada pondasi bendungan dengan perbaikan pondasi sementasi tirai dilakukan terhadap variasi kedalaman sementasi tirai yang terletak



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 3. Pola aliran dan debit rembesan kondisi tanpa perbaikan



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 4. Kontur kemiringan hidraulik (*i_h*) pada kondisi tanpa perbaikan

pada dasar inti bendungan. Kedalaman sementasi tirai yang dianalisa yaitu 25 m, 30 m, 35 m, 40 m, 45 m, dan 50 m. Penentuan variasi kedalaman sementasi tirai berdasarkan perhitungan kedalaman sementasi tirai secara empiris sebagai berikut,

$$D = 1/3 h + c \tag{6}$$

dimana:

- D = kedalaman sementasi tirai
- H = tinggi bendungan, EL.92,80 – EL.45,00 = 47,80m
- C = koefisien yang bervariasi antara 8 s/d 20

Hasil perhitungan kedalaman dengan beberapa nilai koefisien disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Kedalaman Sementasi Tirai Untuk Beberapa Nilai koefisien

c	d (m)
8	23.933
10	25.033
15	30.933
20	35.933

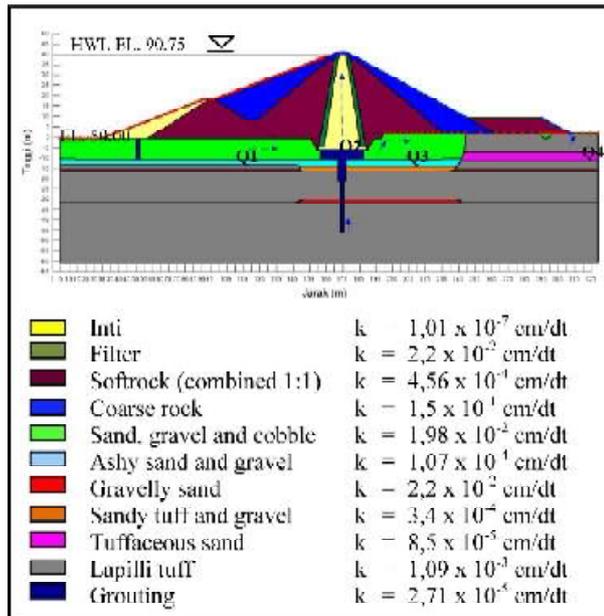
Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil analisa, kuantitas debit rembesan pada sementasi tirai dengan kedalaman 35,0m masih lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, maka variasi kedalaman sementasi tirai ditentukan sampai kedalaman 50,0 m.

Potongan melintang bendungan untuk alternatif 1 disajikan pada gambar 5. Berdasarkan gambar 6, pola aliran sudah tidak terkonsentrasi pada dasar inti dan dasar lereng hilir timbunan bendungan, yang menunjukkan dengan adanya sementasi tirai air filtrasi mengalir melalui ujung bawah sementasi tirai sehingga trayektori aliran menjadi lebih panjang. Trayektori aliran yang bertambah panjang mengakibatkan debit rembesan yang mengalir keluar bendungan menjadi berkurang, disamping itu akan mengurangi pula gaya ke atas pada dasar bendungan.

Analisa terhadap *piping* pada alternatif 1, dilakukan dengan pemeriksaan faktor keamanan terhadap bahaya piping. Berdasarkan gambar 7, kemiringan hidraulik aliran (i_p) pada dasar lereng hilir timbunan bendungan adalah 0,1; untuk lapisan pondasi *gravelly sand* nilai kemiringan hidraulik kritis (i_{cr}) adalah 1,06 maka faktor keamanan terhadap piping adalah:

$$Fk_{piping} = \frac{1,06}{0,1} = 10,60 > 4, \text{ Aman} \tag{3}$$



Sumber: Anonim, 2010 dan Anonim 2011

Gambar 5. Potongan melintang pondasi bendungan alternatif 1

Berdasarkan hasil di atas, maka dengan alternatif perbaikan pondasi alternatif 1 dengan kedalaman 40 m aman terhadap bahaya piping. Hasil analisa debit rembesan untuk masing-masing variasi panjang sementasi tirai disajikan pada tabel 3.

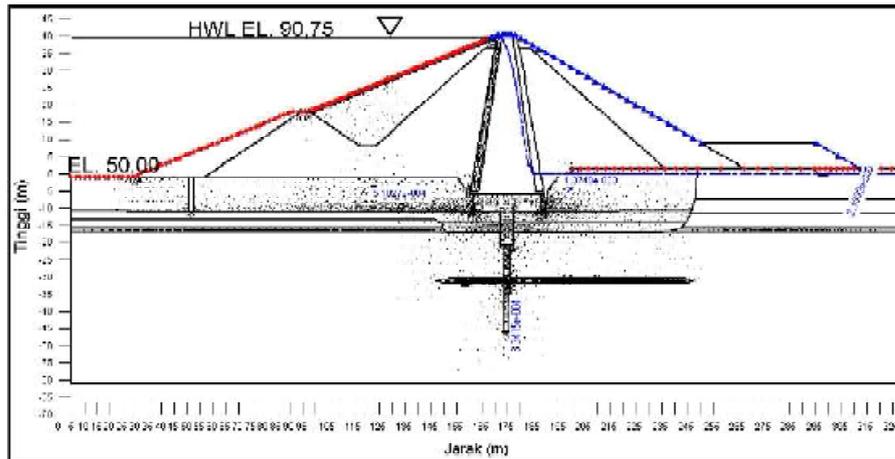
Berdasarkan tabel 3, secara keseluruhan kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi masih lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, tetapi pada debit “Q4” kuantitas debit aliran filtrasi lebih kecil dari debit yang diijinkan. Hal ini disebabkan oleh struktur lapisan pondasi yang berlapis lapis dengan nilai koefisien permeabilitas yang berbeda. Pada dasar lereng hilir, terdapat lapisan pondasi *lapilli tuff* ($k = 1,09 \times 10^{-4}$ cm/dt) dan *tuffaceous sand* ($k = 8,5 \times 10^{-5}$ cm/dt) yang dapat menghambat aliran air filtrasi dari lapisan pondasi *gravelly sand* ($k = 2,2 \times 10^{-2}$ cm/dt) sehingga kuantitas debit rembesan yang keluar pada kaki bendungan sebelah hilir lebih kecil. Untuk kuantitas debit Q_1 , Q_2 dan Q_3 , yang masih lebih besar dari kuantitas debit yang diijinkan, disebabkan oleh nilai koefisien permeabilitas dari material sementasi tirai yang masih relatif tinggi yaitu $2,71 \times 10^{-5}$ cm/dt.

Tabel 3. Hasil Analisa Debit Rembesan Alternatif 1

Kedalaman (D) (m)	Q1 m ³ /det	Q2 m ³ /det	Q3 m ³ /det	Q4 m ³ /det	Qmaks ijin m ³ /det
25	0.21274	0.28334	0.25943	0.00552	0.022
30	0.12972	0.36580	0.24059	0.00593	
35	0.22745	0.07077	0.24210	0.00524	
40	0.22650	0.08281	0.24061	0.00521	
45	0.12572	0.07003	0.23915	0.00517	
50	0.12609	0.07620	0.23828	0.00515	

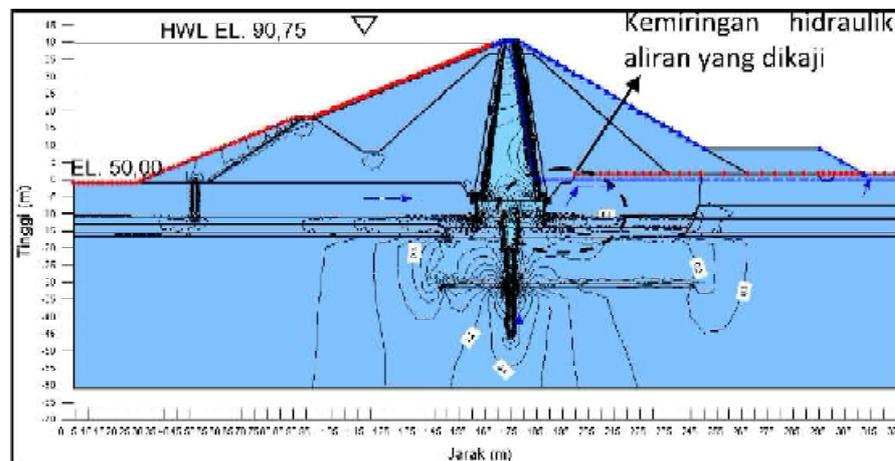
Q1 - Q4

Sumber: Hasil Perhitungan



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 6. Pola aliran dan debit rembesan alternatif 1, D = 40,0 m



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 7. Kontur kemiringan hidraulik (i_n) alternatif 1, D = 40,0 m

Tabel 4. Prosentase kuantitas debit rembesan yang terjadi terhadap kuantitas debit rembesan tanpa perbaikan pondasi pada alternatif 1

Kedalaman (D) [m]	0/1 %	10 %	15 %	20 %
25	543.44%	82.30%	84.41%	68.00%
30	513.81%	82.72%	84.60%	68.00%
35	504.95%	78.42%	84.67%	68.30%
40	500.49%	74.06%	84.70%	68.00%
45	491.53%	74.35%	84.72%	68.00%
50	484.47%	74.47%	84.74%	68.00%

Sumber: Hasil Perhitungan

c. Alternatif 2, Analisa Rembesan Dengan Perbaikan Pondasi *Cutoff Wall*

Analisa rembesan untuk alternatif 2 dilakukan terhadap variasi kedalaman cutoff wall yang diletakkan di bawah material inti. Koefisien permeabilitas cutoff wall yang digunakan untuk analisa ini berda-

sarkan *Engineering Manual EM 1110-2-1901, USAE*. Kedalaman cutoff wall yang dianalisa yaitu 20 m, 25 m, 30 m, 35 m, 40 m dan 45 m. Potongan melintang bendungan untuk alternatif 2 ini disajikan pada gambar 8.

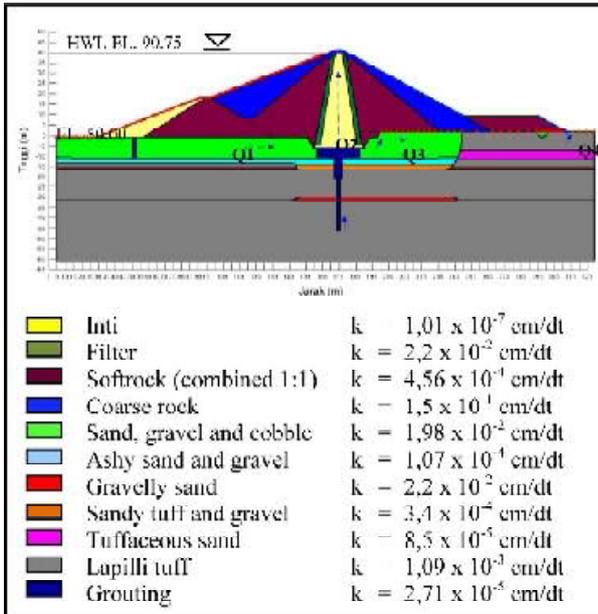
Hasil analisa rembesan alternatif 2 seperti tertera pada gambar 9, sedangkan kontur kemiringan hidraulik i_n alternatif 2 tertera pada gambar 10. Berdasarkan gambar 9, aliran filtrasi pada pondasi juga sudah tidak terkonsentrasi pada dasar inti dan dasar lereng hilir bendungan seperti halnya pada alternatif 1.

Analisa terhadap *pipng* pada alternatif 2, dilakukan dengan pemeriksaan faktor keamanan terhadap bahaya pipng. Berdasarkan gambar 10, kemiringan hidraulik aliran (i_n) pada dasar lereng hilir timbunan bendungan adalah 0,1; untuk lapisan pondasi *gravelly sand* nilai kemiringan hidraulik kritis (i_{cr})

adalah 1,06 maka faktor keamanan terhadap piping adalah:

$$Fk_{\text{piping}} = \frac{1,06}{0,1} = 10,60 > 4, \text{ Aman}$$

Hasil analisa debit rembesan untuk masing- masing alternatif disajikan pada tabel 5.



Sumber: Anonim, 2010 dan Anonim 2011

Gambar 8. Potongan melintang pondasi bendungan alternatif 2, D = 25,0 m

Berdasarkan tabel 5, secara umum kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi lebih kecil dari debit rembesan yang diijinkan, namun pada Q₃ kuantitas debit rembesan masih lebih besar dari debit rembesan

Tabel 5. Hasil Analisa Debit Rembesan dengan Alternatif 2

Kedalaman (D) (m)	Q1 m ³ /det	Q2 m ³ /det	Q3 m ³ /det	Q4 m ³ /det	Qmaks ijin m ³ /det
25	0.13533	0.13563	0.35921	0.00552	0.022
30	0.12972	0.13580	0.34659	0.00533	
35	0.12744	0.07077	0.34240	0.00524	
40	0.12650	0.08284	0.34061	0.00521	
45	0.12572	0.07067	0.33935	0.00517	
50	0.12604	0.04620	0.33826	0.00515	

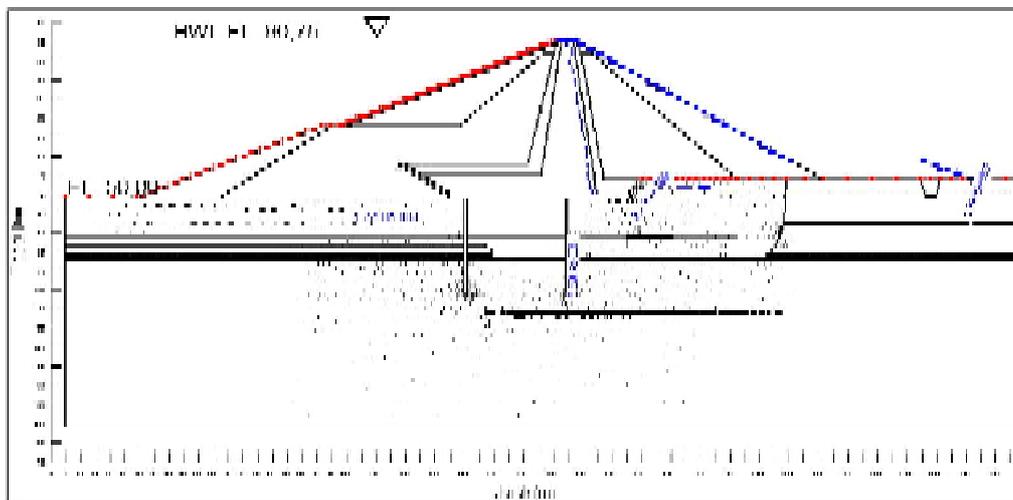
Sumber: Hasil Perhitungan

yang diijinkan. Perbaikan pondasi alternatif 2 ini cukup efektif untuk menahan aliran air filtrasi dari hulu (Q₁) sehingga debit rembesan Q₂ menjadi lebih kecil, namun terjadi peningkatan debit pada Q₃ tetapi kemudian menurun lagi pada debit Q₄ (gambar 4.26). Peningkatan debit rembesan pada Q₃, disebabkan oleh aliran air filtrasi yang masih mengalir melalui lapisan pondasi yang lulus air dibawah *cut offwall* menuju lapisan *gravelly sand* pada lokasi debit Q₃, sedangkan pada debit rembesan Q₄ aliran air filtrasi ditahan oleh lapisan pondasi *lapilli tuff* dan *tuffaceous sand* pada dasar lereng hilir. Prosentase kenaikan debit pada Q₃ dan penurunan debit Q₁, Q₂, Q₃ terhadap debit rembesan seperti tertera pada tabel 6.

Tabel 6. Prosentase kuantitas debit rembesan yang terjadi terhadap kuantitas debit rembesan yang diijinkan pada alternatif 2

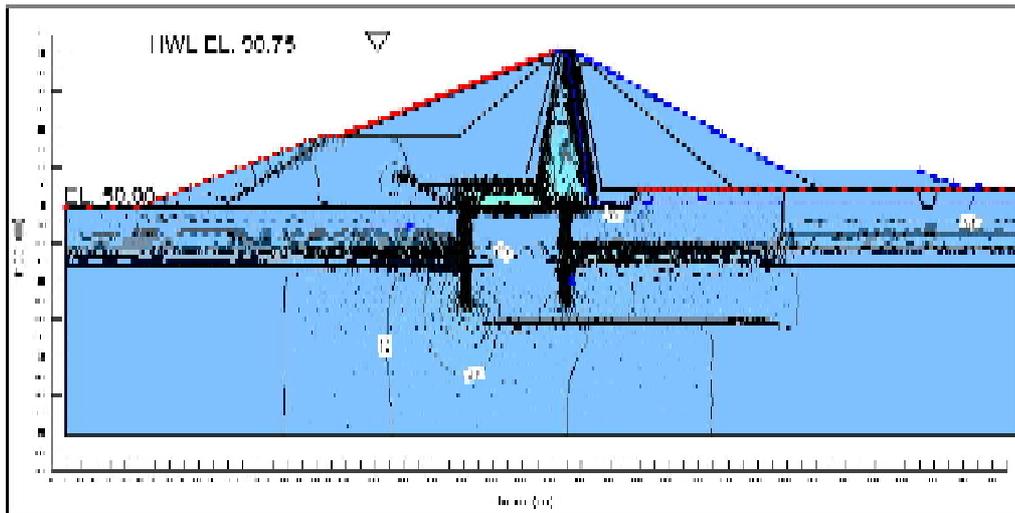
Kedalaman (D) (m)	Q1 %	Q2 %	Q3 %	Q4 %
25	256.55%	-21.18%	-24.87%	-49.55%
30	211.66%	-28.32%	-28.87%	-25.14%
35	177.41%	-28.93%	-26.88%	-25.66%
40	61.44%	-99.40%	-97.97%	-97.90%
45	87.10%	99.14%	99.17%	97.94%
50	7.04%	-22.33%	-24.17%	-25.22%

Sumber: Hasil Perhitungan



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 9. Pola aliran dan debit rembesan alternatif 2, D = 25,0 m



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 10. Kontur kemiringan hidraulik (i_n) alternatif 2, $D = 25,0$ m

- d. Alternatif 3, Analisa Rembesan Dengan Perbaikan Pondasi Alas Kedad Air Hulu (*Upstream Blanket*)

Analisa rembesan untuk alternatif perbaikan pondasi dengan alas kedad air hulu dilakukan terhadap variasi panjang alas kedad air. Panjang upstream blanket yang dianalisa yaitu 80 m, 100 m, 120 m, 140 m, 160 m, 180 m dan 200 m. Parameter fisik material untuk upstream blanket sama dengan material inti, sehingga koefisien permeabilitasnya juga sama, sedangkan tebal lapisan kedad air adalah 1,0 m.

Potongan melintang bendungan untuk alternatif 3 ini disajikan pada gambar 11. Perhitungan panjang efektif upstream blanket secara empiris berdasarkan persamaan (7) adalah 306,76 m; menunjukkan panjang dari upstream blanket tidak dapat diaplikasikan di lapangan karena terlalu panjang. Maka untuk alternatif perbaikan pondasi alternatif 3, variasi panjang upstream blanket ditentukan seperti di atas.

Hasil perhitungan panjang upstream blanket secara empiris adalah sebagai berikut:

$$a \sqrt{\frac{K_b}{Z_b \cdot K_f \cdot Z_f}} = 0,0046 \quad (7)$$

Z_b = ketebalan alas kedad air (m) = 1

K_b = koefisien K dari alas kedad air (m/dt) = $1,01 \times 10^{-9}$

K_f = koefisien K dari pondasi (m/dt) = $1,98 \times 10^{-4}$

Z_f = kedalaman lapisan lulus air pada pondasi (m) = 24

Dengan harga $aX = \sqrt{2}$ berdasarkan referensi dari *Bharat Sigh, 1976, Earth and Rockfill Dams, h. 106* maka, $X = 306,76$ m

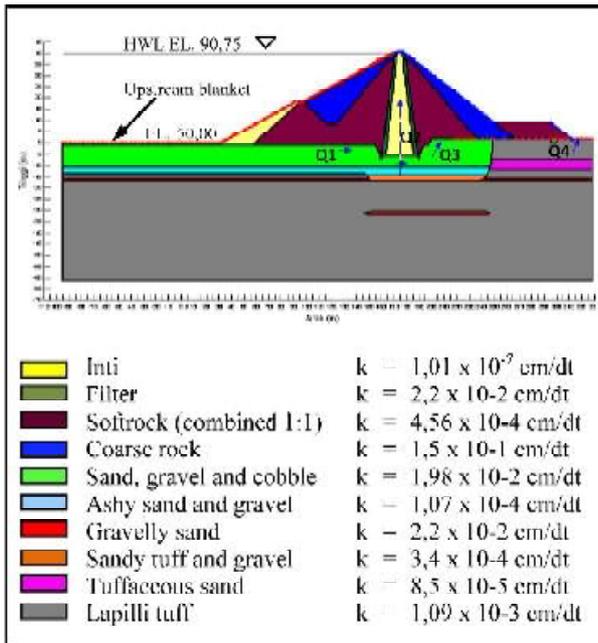
Pola aliran rembesan untuk alternatif 3 pada dasar pondasi tertera pada gambar 12, sedangkan kontur kemiringan hidraulik tertera pada gambar 13. Berdasarkan gambar 12, pola aliran masih terkonsentrasi pada dasar inti dan dasar timbunan lereng hilir, maka diindikasikan akan terjadi *piping* pada daerah ini yang dapat membahayakan timbunan lereng hilir.

Analisa *piping* pada alternatif 3, dilakukan dengan pemeriksaan faktor keamanan terhadap bahaya *piping*. Berdasarkan gambar 13, kemiringan hidraulik aliran (i_n) pada dasar lereng hilir timbunan bendungan adalah 0,4; untuk lapisan pondasi *gravelly sand* nilai kemiringan hidraulik kritis (i_{cr}) adalah 1,06 maka faktor keamanan terhadap *piping* adalah:

$$Fk_{piping} = \frac{1,06}{0,4} = 2,65 > 4, \text{ Tidak Aman}$$

Berdasarkan hasil di atas, maka dengan alternatif perbaikan pondasi alternatif 3 dengan panjang 100,0 m tidak aman terhadap bahaya *piping*.

Analisa debit rembesan untuk masing-masing alternatif disajikan pada tabel 7. Berdasarkan tabel 7, secara umum kuantitas debit rembesan yang terjadi pada dasar pondasi masih lebih besar dari debit rembesan yang diijinkan, namun tidak demikian pada debit Q_4 yang lebih kecil dari debit rembesan yang diijinkan. Perbaikan pondasi pada alternatif 3 ini belum efektif untuk menahan aliran alir filtrasi dan bahaya *piping*. Prosentase kuantitas debit rembesan yang terjadi terhadap debit rembesan yang diijinkan tertera pada Tabel 8.



Sumber: Anonim, 2010 dan Anonim 2011

Gambar 11. Potongan melintang pondasi bendungan dan pondasi alternatif 3

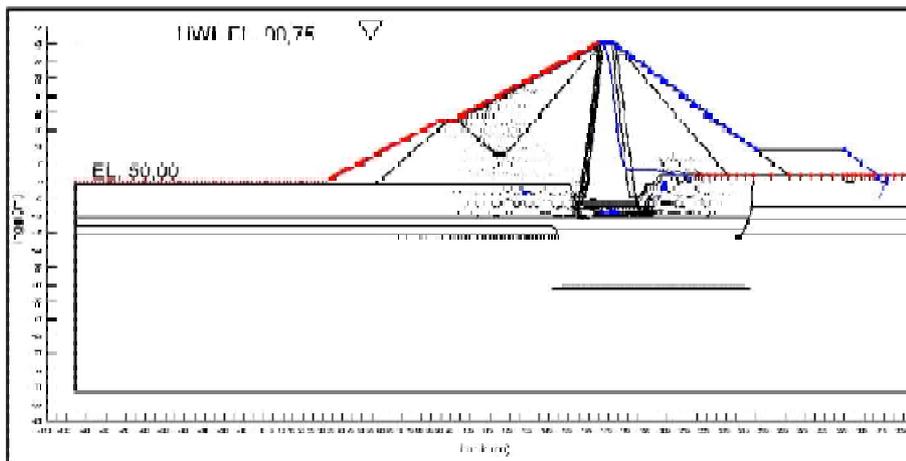
Tabel 7. Hasil Analisa Debit Rembesan Alternatif 3

Panjang (l) (m)	Q1 m ³ /det	Q2 m ³ /det	Q3 m ³ /det	Q4 m ³ /det	Qmaks ijin m ³ /det
80	0.74467	10.57116	1.86111	0.01256	0.022
100	0.82067	10.57170	2.53726	0.01256	
120	0.93840	10.56034	2.26043	0.01252	
140	0.95756	10.55885	3.49165	0.01253	
160	0.73483	10.57046	2.72541	0.01253	
180	0.72932	10.56575	2.18199	0.01254	
200	0.78896	10.56773	2.62322	0.01256	

Tabel 8. Prosentase kuantitas debit rembesan yang terjadi terhadap kuantitas debit rembesan yang diijinkan pada alternatif 3

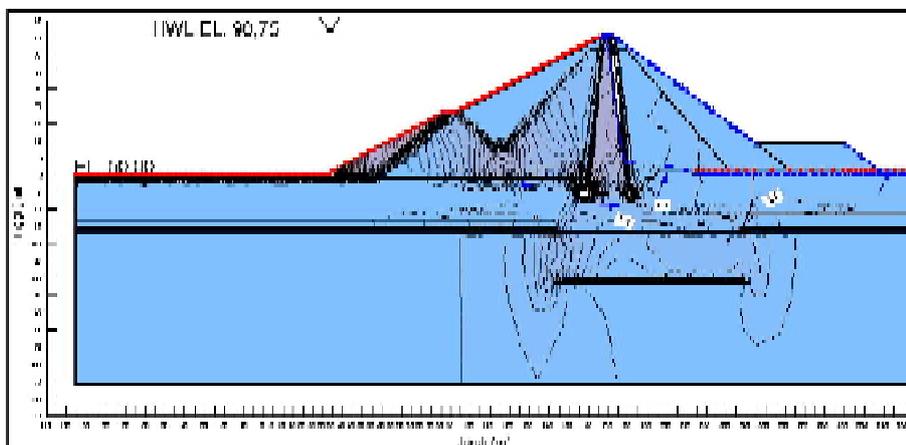
Panjang (l) (m)	Q1 %	Q2 %	Q3 %	Q4 %
80	34.32	57.22	9.72	0.48
100	41.38	57.21	9.82	0.48
120	46.22	57.27	9.82	0.48
140	44.42	57.19	9.48	0.48
160	48.48	57.21	9.38	0.48
180	33.22	57.19	9.82	0.48
200	35.37	57.20	9.57	0.48

Sumber: Hasil Perhitungan



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 12. Pola aliran dan debit rembesan alternatif 3, L = 100,00 m



Sumber: Hasil analisa dengan program Seep/W

Gambar 13. Kontur kemiringan hidraulik (i_v) alternatif 3, L = 100,00 m

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Stabilitas bendungan Bajulmati tanpa perbaikan pondasi terhadap debit rembesan yang diijinkan dan bahaya piping adalah sebagai berikut:

- Stabilitas bendungan tidak aman terhadap bahaya *piping*, faktor keamanan terhadap *piping* adalah $2,11 < 4$. Lokasi yang diindikasikan berbahaya terhadap *piping* adalah pada dasar inti dan dasar lereng hilir timbunan bendungan.
- Kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan

Stabilitas bendungan Bajulmati dengan perbaikan pondasi terhadap debit rembesan yang diijinkan dan bahaya piping adalah sebagai berikut :

- Alternatif 1, perbaikan pondasi dengan sementasi tirai (*curtaingrouting*)
 - Stabilitas bendungan aman terhadap bahaya *piping*, faktor keamanan terhadap piping adalah $10,60 > 4$.
 - Kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, tetapi pada kaki bendungan hilir (Q_4) lebih kecil dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan.
- Alternatif 2, perbaikan pondasi dengan *cutoff wall*
 - Stabilitas bendungan aman terhadap bahaya piping, faktor keamanan terhadap piping adalah $10,60 > 4$.
 - Kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi (Q_1, Q_2, Q_4) lebih kecil dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, tetapi pada dasar lereng hilir timbunan bendungan (Q_3) lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan.

- Alternatif 3, perbaikan pondasi dengan alas kedap air hulu (*upstream blanket*) adalah sebagai berikut:
 - Stabilitas bendungan belum aman terhadap bahaya piping, faktor keamanan terhadap piping adalah $2,65 > 4$.
 - Kuantitas debit rembesan pada dasar pondasi (Q_1, Q_2, Q_4) lebih besar dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan, tetapi pada kaki lereng hilir timbunan bendungan (Q_4) lebih kecil dari kuantitas debit rembesan yang diijinkan.

Dari beberapa alternatif perbaikan pondasi di atas, maka alternatif 2 merupakan alternatif yang paling efektif untuk mencegah bocoran dari waduk dan mengurangi bahaya piping yang diindikasikan terjadi pada dasar inti dan dasar lereng hilir timbunan bendungan. Hal tersebut ditunjukkan dengan prosentase pengurangan debit rembesan yang terjadi terhadap debit rembesan tanpa perbaikan

DAFTAR PUSTAKA

- Aniek, M. 2010. *Konstruksi Bendungan Urugan Volume 1*. Malang: CV. Asrori.
- Anonim. 2010. *Laporan Revisi Desain Perbaikan Pondasi Tubuh Bendungan dan Daerah Genangan*. PT. Indra Karya Wilayah – I Jawa Timur, Juli 2010.
- Anonim. 2011. *Laporan Executive Summary Perbaikan Pondasi Tubuh Bendungan dan Daerah Genangan*. PT. Indra Karya Wilayah – I Jawa Timur, Juli 2010.
- HAN Yong, KE Chuanfang. *Study on Anti-seepage Effect of Xiongjiagang Earth-Rock Dam Based on Cut-off Wall Scheme*. Publishing China Three Gorges University, Yichang, Hubei P. R.China, 443002
- Krahn, J. 2004. *Seepage Modelling with SEEP/W*, Calgary, Alberta, Canada.
- Sabar H. 2006. *Rekayasa Bendungan J*. Teknologi dan Energi 6 (2)
- Singh, B., H.D. Sharma. 1976. *Earth and Rockfill Dams*. India: Sarita Prakashan Nauchandi Meerut.
- Sosrodarsono, S., Kensaku, T. 1989. *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: PT.Pradya Paramita.