

Analisis Rembesan Terhadap Bahaya *Piping* Pada Bendungan Way Sekampung

Rio Aditomo M. Putra^{1,*}, Andius D. Putra², Endro P. Wahono²

Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Teknokrat Indonesia, Bandar Lampung¹, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung²

Koresponden*, Email: rioaditomo@teknokrat.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	27 Desember 2021	<p><i>Piping due to internal erosion can lead to structural failure of the embankment dam. The initial piping which is formed at downstream-toe side of the dam is influenced by the critical gradient of the material (I_c) and the exit gradient (I_e). Piping will start to form if the ratio of these two parameters exceeds a certain limit. In addition, to reduce the risk of piping formation, the allowable seepage discharge is not more than 1% of the annual average discharge of water entering the dam. Based on these conditions, this research discussed on related matters namely seepage discharge and piping safety factor at downstream-toe side of the dam in condition of both with and without foundation improvement. The Geostudio Seep/W software was used as an analysis tool based on design of Way Sekampung Dam. Several cases of simulations have been identified based on the combination of typical cross-sections and different foundation improvement methods (curtain grouting and upstream blanket). The result of the analysis has exhibit that all cases have met the requirements of seepage discharge and piping safety factors.</i></p>
Diperbaiki	16 Juni 2022	
Disetujui	14 November 2022	

Keywords: seepage, piping, embankment dam, curtain grouting, upstream blanket

Abstrak
Piping akibat erosi internal dapat menyebabkan kegagalan struktur pada bendungan urugan. Pembentukan piping yang dimulai pada bagian hilir kaki bendungan dipengaruhi oleh gradien kritis material (I_c) dan gradien hidrolik keluaran (I_e). Nilai perbandingan kedua parameter tersebut apabila melampaui batas tertentu dapat memicu terbentuknya piping. Selain itu, untuk mengurangi risiko terbentuknya piping maka debit rembesan yang diizinkan adalah tidak lebih dari 1% rerata tahunan debit air sungai yang masuk ke bendungan. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengkaji nilai debit rembesan dan nilai faktor keamanan piping di bagian hilir kaki bendungan pada kondisi fondasi tanpa perbaikan dan dengan perbaikan. Perangkat lunak Geostudio Seep/W digunakan sebagai alat analisis dengan merujuk pada desain Bendungan Way Sekampung. Beberapa skenario yang disimulasikan merupakan kombinasi dari segmen tipikal penampang melintang dan metode perbaikan fondasi yang berbeda (curtain grouting dan upstream blanket). Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh skenario telah memenuhi persyaratan debit rembesan dan faktor keamanan piping.

Kata kunci: rembesan, piping, bendungan urugan, curtain grouting, upstream blanket

1. Pendahuluan

Bendungan memiliki struktur yang unik karena selain dari skala ukuran dan berbagai macam tipenya, bendungan juga memiliki keterkaitan yang spesifik terhadap aspek hidrologi dan geologi di lapangan. Salah satu penyebab utama kegagalan bendungan adalah erosi internal pada timbunan atau fondasinya [1], [2]. Aliran rembesan dalam hal tertentu dapat diizinkan terjadi pada bendungan, namun pada kondisi tertentu dapat menimbulkan terjadinya erosi internal yang menginisiasi terbentuknya *piping*. Berdasarkan kondisi tersebut maka penelitian ini mengkaji hal terkait seperti nilai debit rembesan dan nilai faktor keamanan *piping* di bagian hilir kaki bendungan pada kondisi fondasi tanpa perbaikan dan dengan perbaikan. Penelitian ini dilaksanakan ketika bendungan belum beroperasi yaitu pada saat bendungan masih dalam masa konstruksi. Skenario pemodelan

bendungan disimulasikan menggunakan *software Geostudio Seep/W* untuk mendapatkan prediksi pola aliran rembesan.

Fenomena *Piping*

Erosi internal merupakan peristiwa terpisahnya partikel butiran di dalam massa tanah akibat energi dari aliran air tanah sehingga partikel butiran tersebut berpindah tempat [3]. Erosi internal yang terjadi secara bertahap dapat menyebabkan terbentuknya *piping* atau lubang besar pada tubuh bendungan maupun fondasi bendungan. Data statistik yang diberikan oleh ICOLD (*International Commission on Large Dams*) menunjukkan bahwa *piping* merupakan penyebab dari 46% bendungan yang mengalami kegagalan [1].

Apabila ditinjau dari proses awal pembentukan maka erosi internal dapat berupa *suffusion*, *concentrated leak* dan

backward erosion. Suffusion merupakan fenomena berpindahnya butiran kecil akibat aliran rembesan secara bertahap melalui rongga pori di antara butiran yang lebih besar, sehingga butiran kecil atau halus tersebut meninggalkan matriks tanah semula [4]. *Piping* yang terbentuk dari fenomena *concentrated leak* disebabkan oleh keberadaan lubang atau retakan yang sudah ada sebelumnya [5]. Lubang atau retakan tersebut dapat disebabkan oleh adanya perbedaan tingkat penurunan massa tanah akibat pemadatan yang kurang baik ataupun berasal dari galian hewan pengerat dan pertumbuhan akar pohon. Area batas antara bangunan penunjang (terowongan, saluran pipa, dan lain lain) dengan massa tanah berpotensi menimbulkan retakan dan membentuk mekanisme *concentrated leak*. Awal pembentukan *backward erosion* terjadi pada permukaan bebas di hilir kaki bendungan kemudian berlanjut ke arah berlawanan aliran rembesan menuju bagian hulu melalui area fondasi bendungan [6]. Dibutuhkan metode yang berbeda untuk meneliti masing-masing mekanisme pembentukan awal *piping*. Berdasarkan perbedaan mekanisme awal pembentukan *piping* dan batasan *input* yang diberikan oleh software *Geostudio Seep/W*, maka pembahasan pada penelitian ini akan berkaitan dengan mekanisme *backward erosion* (**Gambar 1**).

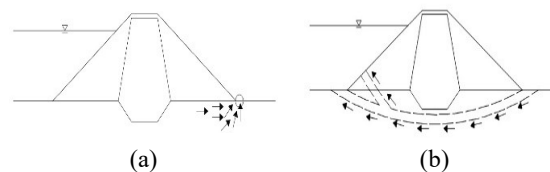
Opini tentang inisiasi pembentukan *piping* yang berkembang pada akhir abad lalu yaitu merupakan hubungan antara nilai gradien kritis material (I_c) dan nilai gradien hidrolis keluaran (I_e) di posisi tertentu. Namun hubungan tersebut memiliki kondisi syarat atau parameter lain yang harus terpenuhi. Parameter yang berpengaruh tersebut seperti tegangan efektif [7], [8]; distribusi ukuran material [9], [10]; sudut rembesan, derajat kepadatan, dan tingkat kecepatan rembesan [11]. Mekanisme terjadinya *piping* sangat kompleks, tidak mudah terlihat sehingga tidak mudah untuk diartikan [12]. *Piping* tidak akan terjadi terkecuali jika ada titik keluaran dimana air dapat keluar melalui titik tersebut dan meninggalkan massa tanah yang dilaluinya kemudian ikut membawa partikel tanah yang dilalui sebelumnya.

Terlepas dari penjelasan tersebut, penelitian ini akan mengacu pada peraturan “Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan” [13]. Peraturan tersebut menyebutkan bahwa pembentukan *piping* yang dimulai pada bagian hilir kaki bendungan dapat terjadi apabila perbandingan gradien kritis material (I_c) dan gradien hidrolis keluaran (I_e) nilainya $<$ (kurang dari) 4 (empat). Selain itu, mengacu pada “Pedoman *Grouting* untuk Bendungan” [14] maka besar debit rembesan bendungan yang diizinkan adalah tidak boleh lebih dari 1% rerata tahunan debit air sungai yang masuk ke bendungan.

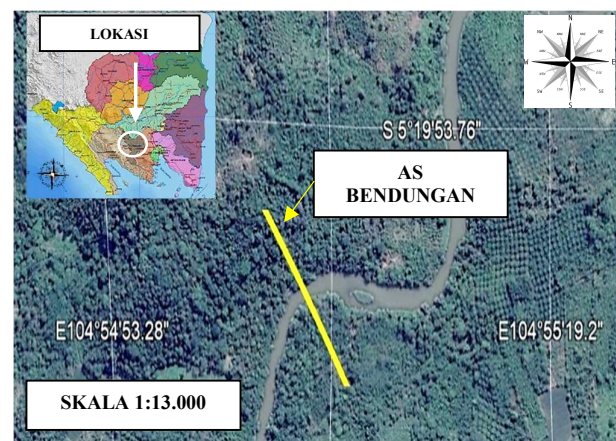
Karakteristik Objek Penelitian

Objek penelitian ini menggunakan model Bendungan Way Sekampung yang berada di Kabupaten Pringsewu, Provinsi Lampung. Bendungan tersebut termasuk tipe bendungan urugan batu zonal dengan inti kedap tegak, tinggi elevasi puncak = 55.0 m dari elevasi dasar, dan tinggi statis air yang direncanakan = 49.0 m. Bendungan Way Sekampung dibangun dengan tujuan agar *inflow* dari DAS Way Sekampung di hilir Bendungan Batutegi dapat dimanfaatkan secara optimal untuk penyediaan air irigasi seluas 72.707 ha, penyediaan air baku sebesar 2.282 l/det, PLTM dengan kapasitas terpasang sebesar 2,7 MW, serta pengembangan pariwisata [16].

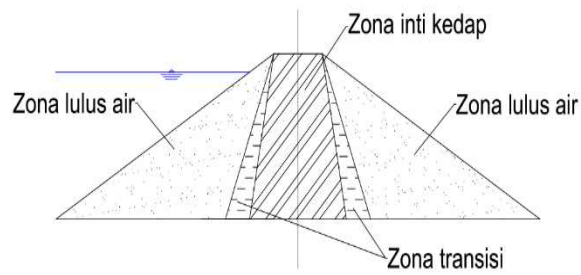
Hasil uji di lapangan menunjukkan fondasi Bendungan Way Sekampung yang berupa lapisan batupasir tuff, breksi, dan kuarsit secara umum memiliki nilai kelulusan air berkisar antara 10 sampai 20 Lugeon [16]. Apabila hasil uji kelulusan air di lapangan menunjukkan nilai $<$ (kurang dari) 1 Lugeon, maka tidak diperlukan perbaikan fondasi [17]. Berdasarkan hasil tersebut maka diperlukan perbaikan pada fondasi bendungan untuk mengurangi kemungkinan terbentuknya *piping* serta kemungkinan terjadinya debit rembesan yang berlebihan.



Gambar 1. *Backward erosion piping* [15]: (a) Aliran rembesan (arah panah) ke arah hilir memicu awal pembentukan *piping* di kaki hilir; (b) Proses *piping* (arah panah) berlanjut dari bagian hilir ke hulu.



Gambar 2. Lokasi penelitian



Gambar 3. Bendungan urugan zonal inti tegak [17].

Alternatif Penanganan Fondasi Bendungan

Alternatif penanganan fondasi pada penelitian ini dilakukan dengan metode *curtain grouting* dan metode *upstream blanket*. Pemilihan metode *curtain grouting* dimaksudkan untuk menyesuaikan kondisi aktual yang diterapkan pada Bendungan Way Sekampung. Sedangkan pemilihan metode *upstream blanket* adalah berdasarkan pertimbangan unsur kemudahan aplikasi di lapangan serta kecenderungan kebutuhan biaya konstruksi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan metode *curtain grouting*. Efektivitas *grouting* akan sangat bergantung pada kondisi geologi dan metode pelaksanaan. Hasil observasi pada efektivitas pelaksanaan metode *curtain grouting* pada Bendungan *Three Gorges* di China, menunjukkan bahwa gaya angkat pada bagian hilir bendungan berkurang setelah aliran air melalui konstruksi *curtain grout* [18]. Hal ini berarti *curtain grout* berpengaruh terhadap debit rembesan di bawah tubuh bendungan.

Keberhasilan metode *upstream blanket* bergantung pada panjang, tebal, dan koefisien permeabilitas material *blanket*, serta stratifikasi dan koefisien permeabilitas lapisan fondasi dimana material *blanket* diterapkan. Pada penelitian dengan menggunakan pemodelan *Artificial Neural Networks (ANN)*, tebal optimal material *blanket* yang disarankan yaitu sekitar 0.5 m sampai dengan 1 m, dan panjang optimal sebesar empat kali tinggi *total head* [19]. Hasil penelitian di Bendungan Shiwashok Kurdistan Iraq, menunjukkan bahwa tebal optimal *blanket* yaitu 1 m sampai dengan 1.5 m dan panjang optimal sebesar empat kali tinggi *total head* [20]. Hasil penelitian pada Bendungan Shiwashok juga menemukan bahwa ketebalan *blanket* lebih dari 1.5 m sudah tidak efektif untuk mengurangi rembesan dan tekanan air pori. Peneliti lain juga menyarankan tebal optimal *blanket* antara 0.5 m sampai dengan 1.0 m dan menyebutkan bahwa panjang *blanket* kurang dari empat kali tinggi *total head* memiliki pengaruh yang signifikan, namun panjang lebih dari itu pengaruhnya tidak terlalu efektif [21].

2. Metode

Persamaan Dasar

Persamaan Darcy dianggap sebagai salah satu persamaan dalam hubungan antara aliran air dan tanah. Hukum ini meninjau aliran air yang melalui filter atau saringan pasir sehingga memiliki formula seperti Persamaan 1.

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2)$$

Keterangan:

- v = kecepatan air rembesan (cm/s)
- i = gradien hidrolis (*dimensionless*)
- k = koefisien permeabilitas (cm/s)
- Δh = selisih tinggi energi total kedua titik (hulu dan hilir) (m)
- L = jarak antara kedua titik (hulu dan hilir) (m)

Kehilangan tekanan yang terjadi pada percobaan Darcy adalah sebagai akibat perbedaan tinggi energi total (Δh) pada titik a dan b (**Gambar 4**). Pada titik a dan b, tegangan air ditentukan dengan mengukur ketinggian air di dalam pipa yang dipasang pada kedua titik tersebut. Ketinggian ini disebut tinggi energi total (h). Tinggi energi total terdiri atas dua bagian, yaitu tinggi energi elevasi (h_p) ditambah tinggi energi tekanan (h_e). Persamaan tinggi energi dapat ditulis seperti pada persamaan 3.

$$h = y + \frac{p}{\gamma} \quad (3)$$

Keterangan:

- h = tinggi energi total (*total head*) (m)
- y = ketinggian titik terhadap suatu datum (m)
- p = tekanan air pori di titik y (kN/m²)
- γ = berat volume air (kN/m³)

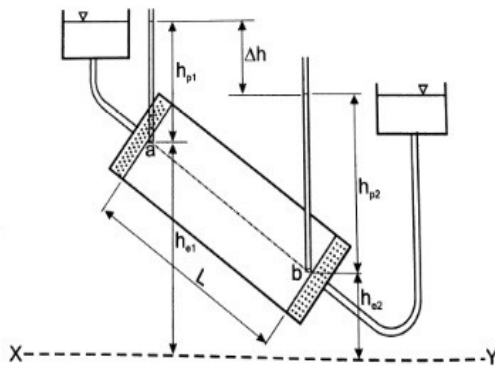
Faktor keamanan terhadap bahaya *piping* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4 \quad (4)$$

$$I_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (5)$$

Keterangan:

- FK = faktor keamanan *piping* (*dimensionless*)
- I_c = gradien kritis material fondasi (*dimensionless*)
- I_e = gradien hidrolis keluaran (*dimensionless*)
- G_s = berat jenis (*dimensionless*)
- e = angka pori (*dimensionless*)



Gambar 4. Ilustrasi aliran rembesan air akibat kehilangan tinggi tekan (Δh) [22].

Nilai gradien hidrolik yang menjadi fokus penelitian ini adalah pada titik keluaran rembesan (*exit gradient*) di bagian hilir kaki bendungan. *Exit gradient* (I_e) adalah nilai gradien hidrolik yang menggambarkan perbedaan tinggi energi total pada zona permukaan di kaki hilir dekat lereng hilir bendungan yang memiliki potensi untuk merembeskan air keluar ke permukaan terbuka [23]. Faktor keamanan minimum untuk desain diambil minimal 4 (empat) untuk mencegah hal yang tidak diperhitungkan dalam tahap desain, misalnya pengaruh heterogenitas tanah, penurunan kualitas tanah yang merupakan fungsi dari waktu [24].

Analisis rembesan dapat dilakukan dengan memodelkan aliran air tanah sebagai aliran tunak. Aliran tunak dapat diperoleh bila pemodelan aliran diberikan batasan tertentu seperti tanah jenuh penuh, gradien tekanan tidak berubah, massa tanah dan tingkat aliran itu sendiri juga konstan. Aliran rembesan melalui material tanah homogen dan isotropis pada kondisi tunak dapat direpresentasikan melalui Persamaan Laplace pada persamaan 6 [22].

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

Pemodelan 2-D dengan metode elemen hingga pada *software Geostudio Seep/W* dapat digunakan untuk menyelesaikan Persamaan Laplace. Dengan memberikan sifat fisis tubuh maupun fondasi bendungan dan kondisi batas tertentu, pemodelan ini dapat digunakan untuk menentukan gradien hidrolik dan jumlah debit rembesan.

Penentuan Segmen Penampang

Fondasi Bendungan Way Sekampung bertumpu pada batuan batupasir tuff, breksi, dan kuarsit (**Gambar 5**). Penelitian ini menggunakan segmen penampang tipikal

Bendungan Way Sekampung yaitu pada penampang melintang BD-3 (**Gambar 6**). Penampang BD-3 memiliki elevasi dasar 75.00 m yang berada pada batuan kuarsit.

Parameter Dasar Pemodelan

Parameter dasar yang digunakan merupakan hasil analisis data sekunder berupa koefisien permeabilitas (k), berat jenis (G_s), kadar air jenuh (w_s), dan angka pori (e).

Tabel 1. Parameter tubuh dan fondasi bendungan

Material	k (cm/s)	w_s (%)	G_s	e
Inti	1×10^{-6}	34.0	-	-
Filter Halus	5×10^{-3}	6.5	-	-
Filter Kasar	1×10^{-2}	4.0	-	-
Batu	1×10^{-1}	4.0	-	-
Rip-Rap	1×10^{-1}	5.6	-	-
Tuff	5×10^{-4}	21.28	2.555	1.17
Breksi	5×10^{-5}	29.41	2.289	1.04
Kuarsit	5×10^{-4}	22.35	2.671	0.69
Schist	5×10^{-5}	6.88	2.671	0.2

Parameter Metode Perbaikan Fondasi

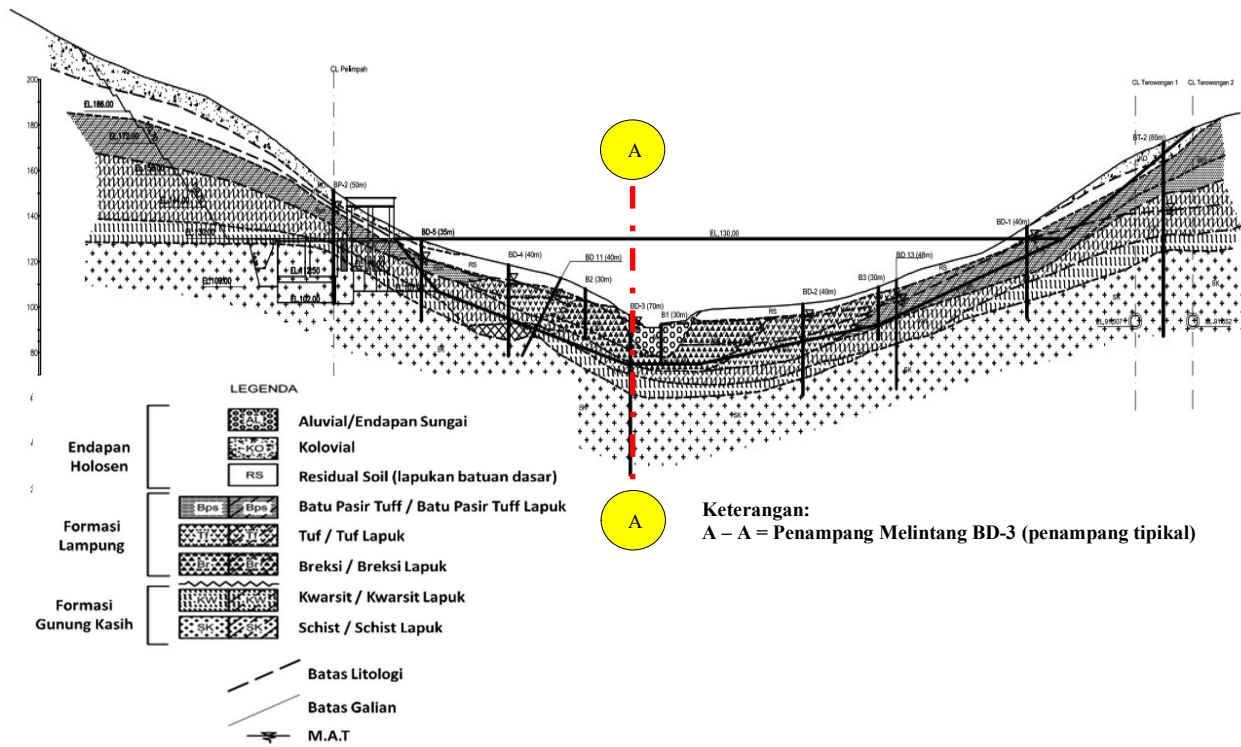
Curtain grout atau tirai sementasi pada calon Bendungan Way Sekampung dibuat tepat di bawah alas zona kedap air tubuh bendungan. Pengelola Bendungan Way Sekampung telah menetapkan kedalaman lubang bor *curtain grouting* bervariasi dari 30 meter sampai dengan 35 meter. Sebagai perkiraan yang sangat umum, untuk menentukan kedalaman *curtain grout* [17] dapat digunakan Persamaan 7.

$$d = \frac{1}{3} h + c \quad (7)$$

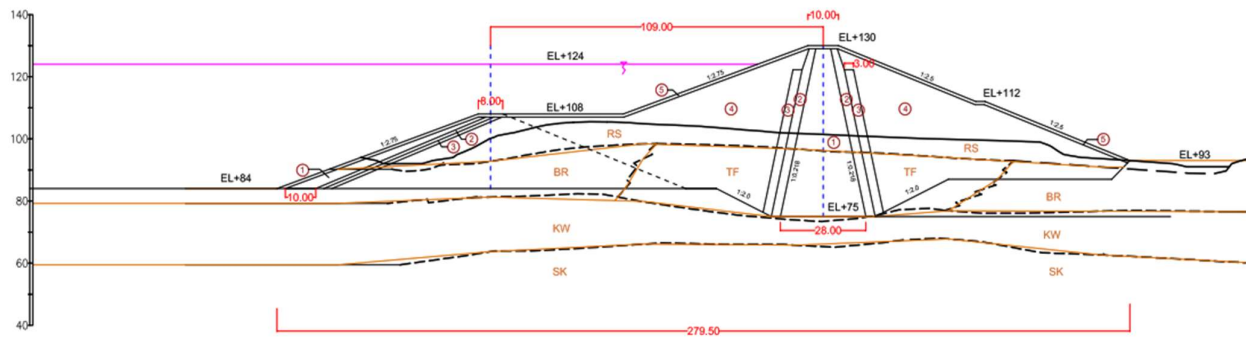
Keterangan:

d = kedalaman *curtain grout* (m); h = ketinggian statis air (m); c = koefisien (8 sampai dengan 20)

Dengan menggunakan Persamaan 7, maka perkiraan kedalaman *curtain grout* yang efektif di Bendungan Way Sekampung secara teori empiris adalah 25.0 m (c min. = 8) sampai dengan 37.0 m (c maks. = 20). Pada penelitian ini ditetapkan tiga parameter ukuran kedalaman *curtain grout* yang akan digunakan pada pemodelan yaitu: (1) Ukuran minimal secara teori empiris = 25.0 m; (2) Ukuran minimal riil pada Bendungan Way Sekampung = 30.0 m; dan (3) Ukuran maksimal riil pada Bendungan Way Sekampung = 35.0 m. Parameter kedalaman 25.0 m ditetapkan menggunakan teori empiris dengan nilai $c = 8$ (minimal). Sedangkan untuk parameter kedalaman 30.0 m dan 35.0 m ditetapkan berdasarkan kedalaman riil minimal dan maksimal di lapangan.



Gambar 5. Penampang geologi memanjang as bendungan [16].



Keterangan: 1 = Inti kedap; 2 = Filter halus; 3 = Filter kasar; 4 = Urugan batu; 5 = Rip-rap; TF = Tuff; BR = Breksi; KW = Kuarsit; SK = Schist

Gambar 6. Penampang melintang BD-3 sebagai penampang tipikal.

Pada hakikatnya perbaikan fondasi dengan metode *curtain grouting* mempunyai kelemahan-kelemahan, bahkan pelaksanaan perbaikan fondasi tersebut hasilnya tak dapat diketahui secara pasti, sehingga seberapa jauh jangkauan suatu sementasi pada perbaikan fondasi tak dapat diukur

secara pasti. Peningkatan kedekatan air pada metode *curtain grout* akan berbeda pada setiap lapisan karena permeabilitas dan ketebalan dari setiap lapisan mempunyai nilai yang berbeda

Berdasarkan penilaian subjektif dan kualitatif maka efektivitas *grouting* dapat digolongkan sesuai **Tabel 2**. Berdasarkan tabel tersebut maka nilai efektivitas *grouting* pada penelitian ini diasumsikan sebesar 90% (baik), sehingga dengan menggunakan Persamaan 8 dari “Pedoman *Grouting* untuk Bendungan” [14], maka permeabilitas batuan fondasi setelah *grouting* dapat dilihat pada **Tabel 3**. Nilai tersebut digunakan sebagai nilai koefisien permeabilitas *curtain grouting* pada pemodelan di penelitian ini.

$$k_g = \frac{(100-Efs) \cdot k}{100} \tag{8}$$

Keterangan:

- Efs* = Efektivitas *grouting* dalam persen (%)
- k_g* = Kelulusan air sesudah *grouting* (cm/s)
- k* = Kelulusan air sebelum *grouting* (cm/s)

Pada kondisi dimana lapisan batuan yang kedap air terlalu dalam sehingga aplikasi metode *curtain grouting* akan lebih sulit dan membutuhkan biaya konstruksi yang lebih besar, maka metode *upstream blanket* dapat dipertimbangkan. Bahan yang digunakan untuk material *upstream blanket* pada penelitian ini direncanakan sama dengan material pada zona inti kedap tubuh bendungan, sehingga memiliki nilai koefisien permeabilitas 1×10^{-6} cm/s.

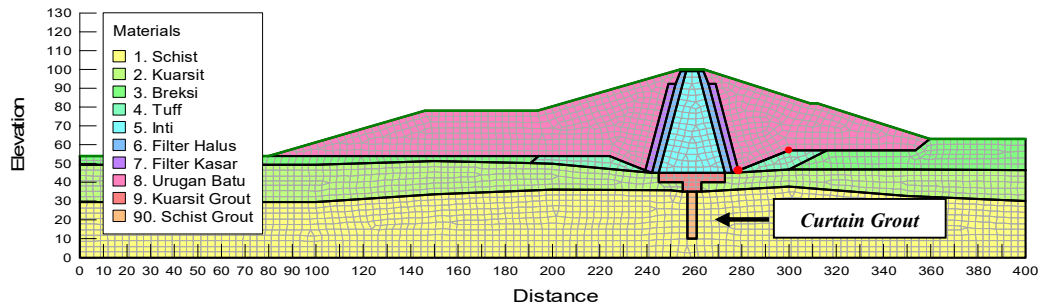
Berdasarkan kajian literatur pada penelitian terdahulu [19]–[21] maka parameter tebal *blanket* yang digunakan pada penelitian ini yaitu 1.0 m, dengan variasi dimensi panjang: (1) 110 m, yaitu < empat kali tinggi *total head*; (2) 160 m, yaitu = empat kali tinggi *total head*; dan (3) 210 m, yaitu > empat kali tinggi *total head*.

Tabel 2. Efektivitas *Grouting* [25]

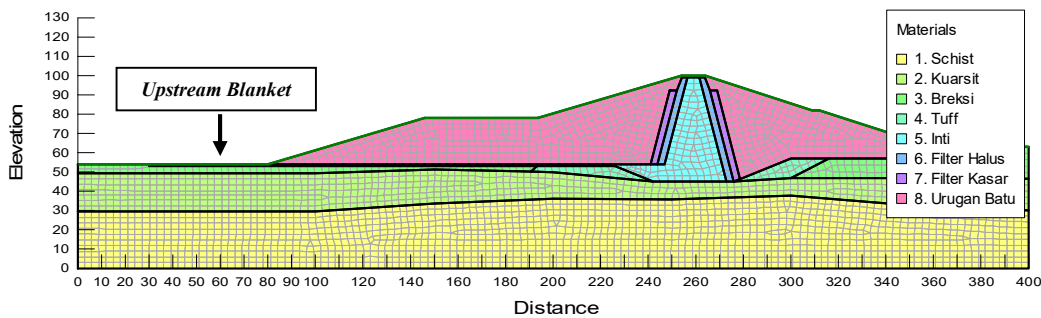
Efektivitas <i>Grouting</i> (%)	Pengaruh <i>Grouting</i>
>90	Sangat Baik
60-90	Baik
30-60	Sedang
10-30	Kurang
<10	Buruk

Tabel 3. Permeabilitas fondasi sebelum dan setelah *grouting*

Material	Permeabilitas sebelum <i>grouting</i>	Permeabilitas setelah <i>grouting</i>
	<i>k</i> (cm/s)	<i>k</i> (cm/s)
Tuff	5×10^{-4}	5×10^{-5}
Breksi	5×10^{-5}	5×10^{-6}
Kuarsit	5×10^{-4}	5×10^{-5}
Schist	5×10^{-5}	5×10^{-6}



(a) Skenario 4; metode *curtain grouting* kedalaman 35.0 m



(b) Skenario 7; metode *upstream blanket* panjang 210.0 m

Gambar 7. Visualisasi pemodelan tubuh dan fondasi bendungan menggunakan *Geostudio Seep/W*

Kombinasi Skenario Pemodelan

Berdasarkan kombinasi dari penampang tipikal dan alternatif metode perbaikan fondasi yang berbeda (*curtain grouting dan upstream blanket*) maka dihasilkan sejumlah tujuh skenario pemodelan (**Tabel 4**). Seluruh skenario pemodelan tersebut disimulasikan menggunakan *Geostudio/Seep W* dengan memberikan kondisi batas tertentu. **Gambar 7a.** merupakan visualisasi skenario pemodelan perbaikan fondasi pada penampang tipikal Bendungan Way Sekampung dengan ukuran kedalaman *curtain grouting* 35.0 m. Sedangkan **Gambar 7b.** merupakan visualisasi skenario pemodelan perbaikan fondasi dengan ukuran panjang *upstream blanket* 210.0 m.

Tabel 4. Kombinasi skenario pemodelan

Perbaikan Fondasi	Parameter Perbaikan	Pemodelan
Tidak ada	Tidak ada	Skenario 1
<i>Curtain Grouting</i> ; Lebar 4.0 m	Kedalaman 25 m	Skenario 2
	Kedalaman 30 m	Skenario 3
	Kedalaman 35 m	Skenario 4
<i>Upstream Blanket</i> ; Tebal 1.0 m	Panjang 110 m	Skenario 5
	Panjang 160 m	Skenario 6
	Panjang 210 m	Skenario 7

3. Hasil dan Pembahasan

Debit Rembesan

Output pada *Geostudio Seep/W* berupa debit rembesan per meter lebar (debit *flux* = q_f) yang melalui bagian tubuh dan fondasi bendungan. Sehingga untuk mengetahui total debit rembesan (Q_r) dapat digunakan Persamaan 9 dan 10.

$$Q_r = q_f \times B_{Ek} \tag{9}$$

$$B_{Ek} = \frac{A}{H} \tag{10}$$

Keterangan:

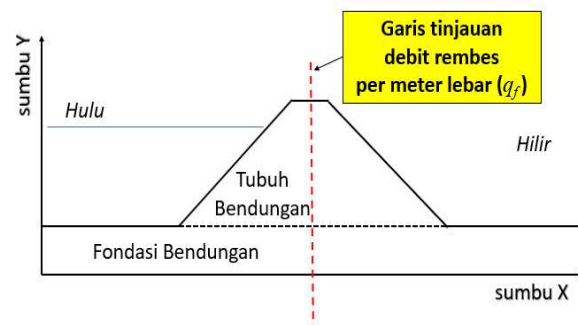
- Q_r = Total debit rembesan (m^3/s)
- q_f = Debit rembesan *flux* (m^3/s per meter lebar)
- B_{Ek} = Lebar ekuivalen penampang bendungan
- A = Luas penampang memanjang bendungan
= $12,855m^2$ (data sekunder)
- H = Tinggi bendungan (m)

Langkah awal perhitungan debit rembesan adalah dengan menentukan nilai debit rembesan per meter lebar (debit *flux* = q_f) pada sebuah garis tinjauan seperti ditunjukkan pada **Gambar 8**, selanjutnya dapat digunakan Persamaan 9. Debit *inflow* rata-rata tahunan Bendungan Way Sekampung adalah (Q_i) $9.5 m^3/s$. Besarnya debit rembesan yang melalui

bendungan (Q_r) harus lebih kecil dari 1% dari debit *inflow* rata-rata tahunan yang masuk ke waduk (Q_i), sehingga $Q_r < 0.01Q_i$; $0.01 Q_i = 0.095 m^3/s$.

Analisis debit rembesan menggunakan pemodelan elemen hingga merupakan pendekatan praktis terhadap keadaan sebenarnya oleh karena itu nilai yang didapat bukan merupakan nilai aktual yang persis dengan keadaan di lapangan. Hasil analisis debit rembesan masing-masing skenario ditunjukkan pada **Tabel 5**. Dari tabel tersebut terlihat bahwa debit rembesan terkecil terjadi pada **Skenario 4** (metode *curtain grouting*; parameter kedalaman 35.0 m), dengan nilai $0.0039968 m^3/s$ dan persentase penurunan sebesar 65.03 %.

Berdasarkan hasil analisis pada **Tabel 5**, seluruh skenario pemodelan telah memenuhi persyaratan debit rembesan maksimum yang diizinkan yaitu $Q_r < 1\% Q_i$ ($0.095 m^3/s$), termasuk penampang melintang tanpa perbaikan fondasi. Namun demikian, “Pedoman *Grouting* untuk Bendungan” [14] juga mensyaratkan perbaikan dengan metode *grouting* untuk calon fondasi bendungan yang memiliki nilai kelulusan air > 1 Lugeon (**Tabel 6**). Berdasarkan hal tersebut maka pada keadaan riil di lapangan pelaksana proyek bendungan tetap melakukan perbaikan fondasi metode *curtain grouting* untuk menjamin kualitas fondasi.



Gambar 8. Garis tinjauan debit rembesan

Tabel 5. Hasil perhitungan debit rembesan

Skenario	q_f ($m^3/s/m$)	Q_r (m^3/s)	Persentase penurunan (Q_r) (%)
1	4.89×10^{-5}	11.43×10^{-3}	0.00
2	1.79×10^{-5}	4.18×10^{-3}	63.39
3	1.75×10^{-5}	4.09×10^{-3}	64.21
4	1.71×10^{-5}	3.99×10^{-3}	65.03
5	1.93×10^{-5}	4.51×10^{-3}	60.53
6	1.84×10^{-5}	4.30×10^{-3}	62.37
7	1.8×10^{-5}	4.20×10^{-3}	63.19

Tabel 6. Hubungan nilai Lugeon dan keperluan *grouting* [14]

Nilai Lugeon	Deskripsi
1	Derajat permeabilitas pada fondasi yang ketat (<i>tight</i>) dan hampir tidak perlu di- <i>grout</i> .
3	Fondasi perlu sedikit di- <i>grout</i> , apabila ditempati bendungan beton, air waduknya sangat berharga, atau memiliki kecenderungan terbentuk <i>piping</i> .
5	Perlu dijamin dengan <i>grouting</i> yang ekstensif untuk bendungan beton atau <i>grouting</i> regional untuk bendungan urugan tanah atau batu.
10	Perlu dijamin dengan <i>grouting</i> untuk semua tipe bendungan.
20	Tapak yang sangat berkekar-kekar dengan bukaan kekar relatif kecil.
100	Tapak yang sangat berkekar-kekar dengan bukaan kekar relatif kasar. Dapat pula pada fondasi dengan kekar jarang, namun bukaannya sangat lebar.

Faktor Keamanan *Piping*

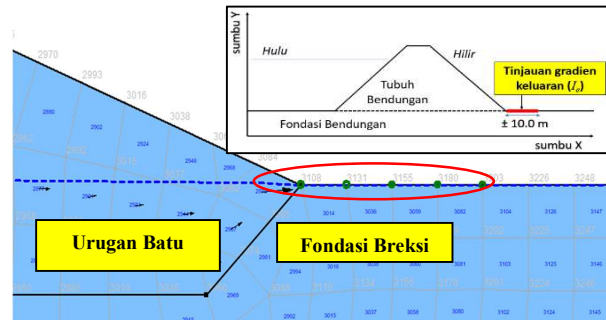
Fokus penelitian ini adalah bahaya *piping* yang dapat terjadi pada fondasi bendungan melalui mekanisme *backward erosion*. Pada permulaannya, *backward erosion piping* didahului oleh proses *boil* (pendidihan) pada permukaan zona hilir kaki bendungan sebagai penanda erosi internal yang sedang berlangsung [9], [15], [23], [26]. Berdasarkan hal tersebut maka nilai gradien hidrolis yang ditinjau hanya pada area tertentu pada zona titik keluaran rembesan yaitu pada jarak ± 10.0 m ke arah hilir dari lereng hilir bendungan.

Ilustrasi zona titik keluaran rembesan di hilir kaki bendungan dapat dilihat pada **Gambar 9**. Nilai gradien hidrolis yang digunakan yaitu nilai maksimum pada arah sumbu *Y* dan *XY* (**Tabel 7**). Dengan menggunakan Persamaan 5, maka nilai gradien kritis material (I_c) fondasi breksi adalah 0.631, sehingga berdasarkan Persamaan 4 nilai *FK piping* **Skenario 1** adalah:

$$FK = \frac{I_c}{I_e} = \frac{0.631}{0.0416} = 15.17 \geq 4 \dots\dots \text{ok!}$$

Hasil perhitungan *FK piping* pada seluruh skenario lainnya dapat dilihat pada **Tabel 8**. Nilai *FK piping* pada fondasi tanpa perbaikan telah memenuhi syarat ($FK > 4$) sehingga perbaikan yang dilakukan akan semakin menurunkan risiko terbentuknya *piping* pada fondasi. Berdasarkan hasil analisis tersebut, seluruh skenario pemodelan telah memenuhi persyaratan faktor keamanan

terhadap *piping*. *FK piping* terbesar terjadi pada **Skenario 7** (metode *upstream blanket*; parameter panjang *blanket* 210.0 m) dengan nilai 36.01 dan persentase peningkatan sebesar 137.37 %.

**Gambar 9** Tinjauan gradien keluaran **Skenario 1****Tabel 7** Gradien keluaran (I_e) maksimum **Skenario 1**

Nodal	Jarak (m)	XY-Gradien	Y-Gradien	Gradien Maksimum (I_e)
3108	0.0000	0.0416	0.0275	
3131	2.8929	0.0338	0.0338	
3155	5.7857	0.0328	0.0328	0.0416
3180	8.6786	0.0320	0.0320	
3203	11.571	0.0313	0.0313	

Tabel 8 Hasil perhitungan faktor keamanan *piping*

Skenario	I_e maksimum	FK <i>piping</i>	Persentase peningkatan (FK) (%)
1	0.0416	15.17	0.00
2	0.0201	31.35	106.64
3	0.0194	32.53	114.40
4	0.0186	33.88	123.32
5	0.0186	33.91	123.54
6	0.0179	35.22	132.17
7	0.0175	36.01	137.37

4. Simpulan

Pada kondisi riil di lapangan, pengelola Bendungan Way Sekampung telah menerapkan metode *curtain grouting* untuk mengurangi kemungkinan terbentuknya *piping* serta kemungkinan terjadinya debit rembesan yang berlebihan. Skenario yang disimulasikan pada penelitian ini menghasilkan prediksi persentase penurunan debit rembesan (Q_r) dan peningkatan faktor keamanan *piping* setelah dilakukan perbaikan fondasi. Semakin besar persentase penurunan debit rembesan dan persentase peningkatan faktor

keamanan *piping* maka akan semakin memperkecil risiko terbentuknya *piping*.

Hasil analisis terhadap skenario perbaikan fondasi menunjukkan hal sebagai berikut:

1. Metode *curtain grouting* (Skenario 2, 3, dan 4)
 - Nilai debit rembesan (Q_r) terkecil terjadi pada Skenario 4, dengan persentase penurunan debit rembesan sebesar 65.03 %.
 - Nilai FK *piping* terbesar terjadi pada Skenario 4, dengan persentase peningkatan FK *piping* sebesar 123.32 %.
2. Metode *upstream blanket* (Skenario 5, 6, dan 7)
 - Nilai debit rembesan (Q_r) terkecil terjadi pada Skenario 7, dengan persentase penurunan debit rembesan sebesar 63.19 %.
 - Nilai FK *piping* terbesar terjadi pada Skenario 7, dengan persentase peningkatan FK *piping* sebesar 137.37 %.

Metode *upstream blanket* dapat dipertimbangkan dalam perencanaan awal berdasarkan kelebihan yang dimilikinya apabila material inti kedap sebagai bahan konstruksi *blanket* tersedia berlimpah dan mudah diperoleh di lapangan. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan analisis untuk penyempurnaan konstruksi serta dapat pula dijadikan acuan perbandingan untuk tipe bendungan yang sejenis.

Daftar Pustaka

- [1] M. Foster, R. Fell, and M. Spannagle, "The statistics of embankment dam failures and accidents," *Can. Geotech. J.*, vol. 37, no. 5, pp. 1000–1024, Oct. 2000, doi: 10.1139/t00-030.
- [2] M. A. H. Pramudawati, "PENILAIAN RISIKO KEAMANAN BENDUNGAN DI JAWA TIMUR," *J. Tek. Hidraul.*, vol. 11, no. 2, pp. 93–102, Dec. 2020, doi: 10.32679/jth.v11i2.631.
- [3] R. Fell and J. J. Fry, "The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations.," in *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*, R. Fell and J. J. Fry, Eds. London: CRC Press, 2007, pp. 9–32.
- [4] L. Ke and A. Takahashi, "Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow," *Soils Found.*, vol. 52, no. 4, pp. 698–711, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.sandf.2012.07.010.
- [5] S. Bonelli and F. Nicot, "Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees," in *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 2013, pp. 193–269.
- [6] V. Van Beek, A. Bezuijen, and H. Sellmeijer, "Backward Erosion Piping," in *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 2013, pp. 193–269.
- [7] P. Ming, J. Lu, X. Cai, M. Liu, and X. Chen, "Multi-Particle Model of the Critical Hydraulic Gradient for Dike Piping," *Soil Mech. Found. Eng.*, vol. 57, no. 3, pp. 200–210, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11204-020-09656-1.
- [8] R. Moffat, R. J. Fannin, and S. J. Garner, "Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil," *Can. Geotech. J.*, vol. 48, no. 3, pp. 399–412, Mar. 2011, doi: 10.1139/T10-071.
- [9] W.-J. Dirks, R. Beek, and M. Bierkens, "The Influence of Grain Size Distribution on the Hydraulic Gradient for Initiating Backward Erosion," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2644, Sep. 2020, doi: 10.3390/w12092644.
- [10] M. Maknoon and T.-F. Mahdi, "Experimental investigation into embankment external suffusion," *Nat. Hazards*, vol. 54, no. 3, pp. 749–763, Sep. 2010, doi: 10.1007/s11069-010-9501-1.
- [11] K. S. Richards and K. R. Reddy, "Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils," *Géotechnique*, vol. 62, no. 10, pp. 933–942, Oct. 2012, doi: 10.1680/geot.11.P.058.
- [12] D. J. Hagerty, "Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 117, no. 8, pp. 991–1008, Aug. 1991, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:8(991).
- [13] SNI 8065, *Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2016.
- [14] Departemen Pekerjaan Umum, *Pedoman Grouting Untuk Bendungan*. Jakarta: Jakarta: Direktorat Sungai Danau dan Waduk, 2005.
- [15] M. Foster, "The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping," The University of New South Wales, 1999.
- [16] BBWS Mesuji Sekampung, *Laporan Ringkas: Penyempurnaan Desain Regulating Dam Way Sekampung*. Jakarta: PT. Indra Karya – Consulting Engineers, 2015.
- [17] S. Sosrodarsono and K. Takeda, *Bendungan Tipe Urugan*, 6th ed. Jakarta: Jakarta: Balai Pustaka, 2016.
- [18] X. Yang and Y. Li, "Construction and Quality Analysis of Curtain Grouting in Foundation of Dam for Yangtze Three Gorges Project," in *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and*

- Rehabilitation*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 790–796.
- [19] F. Salmasi and M. Nouri, “Effect of upstream semi-impervious blanket of embankment dams on seepage,” *ISH J. Hydraul. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 143–152, May 2019, doi: 10.1080/09715010.2017.1381862.
- [20] K. M-Gharrib Noori, H. Hashim Ibrahim, and D. A. Mohammed Hasan, “Influence of Upstream Blanket on Earth Dam Seepage,” in *IEC2018 Proceedings Book*, 2018, pp. 178–188, doi: 10.23918/iec2018.14.
- [21] A. Ghanbari and S. Zaryabi, “A simple method for calculating the seepage at the foundation of embankment dams with blanket and clay trench,” *J. Geoengin.*, vol. 9, no. 1, pp. 21–32, 2014, doi: 10.6310/jog.2014.9(1).3.
- [22] L. D. Wesley, *Mekanika Tanah*, 2nd ed. Yogyakarta: Yogyakarta: ANDI, 2017.
- [23] D. V. Griffiths and G. A. Fenton, “Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil,” *Géotechnique*, vol. 43, no. 4, pp. 577–587, Dec. 1993, doi: 10.1680/geot.1993.43.4.577.
- [24] Kementerian PUPR, *Modul Analisa Stabilitas Bendungan: Perhitungan Rembesan*. Bandung: Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017.
- [25] H. R. Cedergren, *Seepage, Drainage, and Flow Nets*. New Jersey: John Wiley and Sons. Inc. Publication, 1967.
- [26] J. B. Sellmeijer, “Numerical computation of seepage erosion below dams (piping),” in *Proceedings 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3)*, 2006, pp. 596–601.