



## Analisis Model Teoritis Rembesan Pada Bendungan (Studi Kasus Bendungan Margatiga Lampung)

Setia Prayitno<sup>a</sup>, Andius Dasa Putra<sup>b\*</sup>, Endro P Wahono<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Mahasiswa Magister Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

<sup>b</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

<sup>c</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

### HIGHLIGHTS

- Kegagalan dan kerusakan bendungan akibat erosi mengalirkan air melalui lubang-lubang pada pondasi (piping).
- Potensi rembesan (piping) bendungan menjadi salah satu penentu kinerja bendungan.

### INFO ARTIKEL

#### Kata kunci:

Rembesan;  
Bendungan Margatiga;  
Piping;  
Metode Flownet;  
Metode Creep line;

### ABSTRAK

Secara umum teori - teori masalah rembesan/seepage yang kita hadapi di lapangan dipecahkan dengan memakai cara-cara teoritis yang tepat tetapi untuk soal-soal dua dimensi dan keadaan tanah yang homogen/seragam kita dapat memperoleh pemecahan yang cukup tepat dengan memakai hand sketching/flownet atau juga garis freatik dan cara empiris seperti penggunaan metode line/creep line Penelitian ini menganalisa angka aman seepage/piping berapa besar debit rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan urugan dan juga pada pondasi bendungan spillway karena debit rembesan yang terjadi diijinkan 1% dari total Q sungainya. Untuk nilai piping pada pondasi bendungan urugan saat Muka Air Normal(MAN) tanpa cut off nilainya  $1,88 < 4$  dan saat Muka Air Banjir(MAB) nilainya  $2,58 < 4$  belum aman terhadap bahaya piping namun saat Muka Air Normal(MAN) dengan cut off nilainya  $2,97 < 4$  dan saat Muka Air Banjir(MAB) dengan cut off nilainya  $4,08 > 4$  Aman terhadap bahaya piping. Untuk nilai piping pada pondasi spillway saat Muka Air Normal(MAN) tanpa cut off nilainya  $1,79 < 4$  dan saat Muka Air Banjir(MAB) dengan cut off nilainya  $2,47 < 4$  belum aman terhadap bahaya piping namun saat Muka Air Normal(MAN) dengan cut off nilainya  $2,97 < 4$  dan saat Muka Air Banjir(MAB) dengan cut off nilainya  $4,06 > 4$  Aman terhadap bahaya piping

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

### 1. Pendahuluan

Bendungan Margatiga didesain menjadi kombinasi bendungan beton gravity dan urugan batu dengan inti tegak. [1]. Bendungan beton gravity berada dipalung sungai dan bendungan urugan dengan inti tegak berada di dataran banjir sungai [2].

\* Penulis koresponden.

Alamat E-mail: [andius.dasa@eng.unila.ac.id](mailto:andius.dasa@eng.unila.ac.id) (Andius).

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

Bendungan tipe urugan merupakan urugan berzonal yang terdiri atas inti vertikal, filter, transisi dan urugan batu [3-4]. Adapun kemiringan lereng udik adalah  $1 : 3,00$  dan lereng hilir  $1 : 2,00$ .

Salah satu kegagalan dan kerusakan pada bendungan adalah erosi akibat mengalirnya air melalui lubang - lubang pada pondasi (piping) [5]. Apabila air dari waduk merembes melalui tubuh atau pondasi bendungan urugan yang terdiri atas material tanah yang dipadatkan, maka tekanan hidrolisnya akan di distribusikan terhadap tegangan pori yang merupakan pengikat antar butiran material [6].

Pentingnya mengetahui potensi rembesan (piping) pada suatu bendungan sebagai salah satu penentu kinerja bendungan [7-8], maka diperlukan suatu metode analisis yang efisien dan tingkat akurasi yang lebih baik sesuai dengan kondisi yang ada pada Bendungan Margatiga Lampung.

**2. Metode Penelitian**

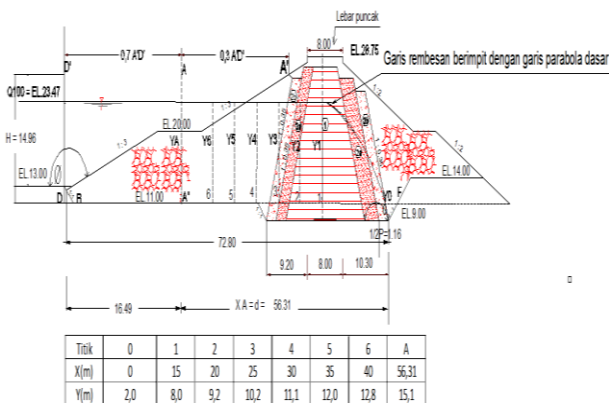
Penelitian ini dilakukan pada bendungan margatiga di desa Negeri Jemanten dan desa Tri Sinar kecamatan Margatiga kabupaten Lampung Timur. Data perencanaan awal seperti data bor log sudah dilakukan saat awal desain yaitu di tahun 2013 dan 2015 dan dilanjutkan saat memasuki tahap pekerjaan fisik dilakukan kembali uji bor log untuk mengetahui lebih detail lapisan tanah yang akan jadi pondasi struktur bendungannya. Langkah selanjutnya yaitu studi pustaka yaitu dengan mengumpulkan, mengidentifikasi serta mengetahui sistem kerja yang dapat digunakan mengenai teori-teori yang berkaitan dengan pokok permasalahan. Survey lapangan dilakukan untuk mendapatkan data primer dengan cara melakukan pengeboran langsung menggunakan alat bor. Selain itu agar mengetahui secara terperinci keadaan di lapangan seperti di area tumpuan kiri dan kanan dan area palung sungai yang akan dijadikan bendungan tersebut serta kontak kegiatan dan data yang diperoleh bersifat deskriptif dan faktual. Data sekunder berupa data perencana desain bendunagn tersebut juga bisa digunakan sebagai pembanding dengan data primernya. Setelah data semua terkumpul langkah selanjutnya adalah menganalisa debit rembesan yang terjadi.

**3. Hasil dan Pembahasan**

**3.1. Teori-teori yang digunakan pada rembesan**

- a. Teori garis freatik didapat nilai debit rembesan [9].
- b. Teori cara skerching (flownet) didapat nilai Fk-piping dan debit rembesan [10].
- c. Teori cara creep line didapat nilai minimal panjang rembesan yang disarankan.

Teori Garis Freatik



**Gambar 1.** Garis parabola dasar asumsi hitung debit rembesan pada bendungan urugan.

$$y_A^2 = 2 p x_A + p^2$$

$$\frac{-x_A \pm \sqrt{4x_A^2 + 4y_A^2}}{2} = -x_A + \sqrt{x_A^2 + y_A^2} = \frac{-d + \sqrt{H^2 + d^2}}{\sqrt{H^2 + d^2}}$$

$$\begin{aligned} XA &= d \\ &= FD - 0.7A'D' \\ &= 56,31 \\ YA &= H = 10,47 \end{aligned}$$

Titik A terletak pada parabola, maka

$$YA^2 = 2pXA + P^2$$

Apabila dicari dengan persamaan ABC, maka di dapat:

$$P = -XA + \sqrt{XA^2 + YA^2}$$

$$P = 0,97 \text{ m}$$

Bila harga P dimasukkan ke persamaan parabola dasar

$$YA^2 = 2P.XA + P^2$$

Tabel 1. Harga X antara 0 sampai dengan 56,31

Titik	0	1	2	3	4	5	6	A
X(m)	0	15	20	25	30	35	40	56,31
Y(m)	2,0	8,0	9,2	10,2	11,1	12,0	12,8	13,8

Garis rembesan berimpit dengan garis parabola dengan garis parabola dasar ( $\alpha = 180^\circ > 30^\circ$ )

$$\begin{aligned} d &= 56,31 \\ H &= 10,47 \end{aligned}$$

Dengan demikian, garis rembesan pada tanggul dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Menghitung debit rembesan yang terjadi (Q) untuk tiap m panjang dan nilai permeability ( $k = 9,15E-07 \text{ cm/det} = 9,15E-10 \text{ m/det}$ )

$$Q = k \cdot p$$

$$Q = 8,83E-10 \text{ m}^3/\text{det}$$

Untuk tanggul kiri sepanjang 100 meter, maka debit rembesannya:

$$Q = 8,83E-10 \times 100 = 8,83E-08 \text{ m}^3/\text{det}$$

Tanggul kanan panjang total 100 meter, maka debit rembesannya:

$$Q = 8,83E-10 \times 100 = 8,83E-08 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$Q \text{ 100 inflow} = 1304 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$Q \text{ 100 outflow} = 1173,6 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{Selisih } Q \text{ inflow \& outflow} = 131 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{Satu \% dari } Q \text{ inflow \& outflow} = 1,31 \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\text{Koefisien permeability} = 9,15E-07 \text{ cm/det (data bor log)}$$

$$= 9,15E-10 \text{ m/det}$$

syarat maksimal debit rembesan yang terjadi < 1% dari selisih Q inflow dan outflow  $(1,31 \times 1/100) = 0,0131 \text{ m}^3/\text{det} = 1,31\text{E-}02 \text{ m}^3/\text{det}$

Jadi debit rembesan yang terjadi pada bendungan urugan adalah  $8,83\text{E-}08 + 8,83\text{E-}08 = 1,78\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{det}$

Jadi Q rembesan pada tanggul kiri dan kanan :  $1,78\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{det} < 1,31\text{E-}02 \text{ m}^3/\text{det}$  (ok)

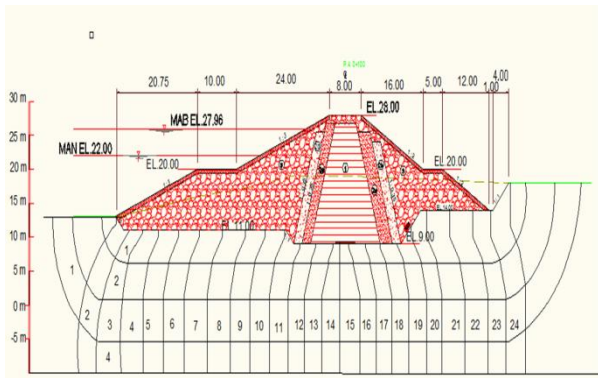
Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode garis freatik, debit rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan urugan (tanggul kiri dan kanan) adalah sebesar  $1,78\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{det}$ . Nilai ini menunjukkan bahwa intensitas rembesan yang melewati inti tegak bendungan sangat kecil dan masih berada jauh di bawah ambang batas yang diizinkan, yaitu 1% dari selisih debit inflow dan outflow  $1,31\text{E-}02 \text{ m}^3/\text{det}$ . Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan material inti dengan koefisien permeabilitas  $9,15\text{E-}10 \text{ m}/\text{det}$  sangat efektif dalam menahan laju air waduk, sehingga stabilitas tubuh bendungan terhadap bahaya erosi internal dapat terjaga dengan baik.

Flownet pada bendungan urugan tanpa cut off

Jumlah saluran aliran (Net flow)  $N_f = 4$

Jumlah penurunan energi (garis equipotensial)  $N_e = 24$

Tanpa Cut Off



Gambar 2. Flownet saat muka air normal tanpa cut off

Diket : Rapat Jenis / Specific Gravity (SG) = 2,50 ( $\rho/\rho_{air}$ )  
Angka pori (e) = 0,6 s/d 1,12

Gradien hidraulik kritis material

$$i_{cr} = \frac{(SG-1)}{(e+1)} = \frac{(2,5-1)}{(0,6+1)} = 0,94$$

Saat muka air normal (MAN) elev di hulu 22 - di hilir 10 = 12

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 4$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 24$

Gradien hidraulik exit debit :

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{12}{24} = 0,50$$

Fk piping  $\geq 4$

$$= \frac{i_{cr}}{i_e} = \frac{0,94}{0,50} = 1,88 \leq 4 \text{ Tidak aman}$$

Saat muka air banjir (MAB) elev di hulu 27,96 - di hilir 19,25 = 8,71 m

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 4$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 24$

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{8,71}{24} = 0,36$$

Fk piping  $\geq 4$

$$= \frac{0,94}{0,36} = 2,58 > 4 \text{ Tidak aman}$$

Koefisien permeability tanah di bawah bendungan urugan  $k = 9,49 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{det}$  (WTP)

Maka debit (Q) di bawah bendungan urugan jika asumsi  $N_e = 4$  ;  $N_f = 24$

$Q = k \times \Delta h \times (N_f/N_e) \times \text{panjang bendungan urugan}$  ( $\pm 200 \text{ m}$ )

$$= 0,000949 \text{ cm}/\text{det} \times 8,71 \text{ m} \times (4/24) \times 200 \text{ m}$$

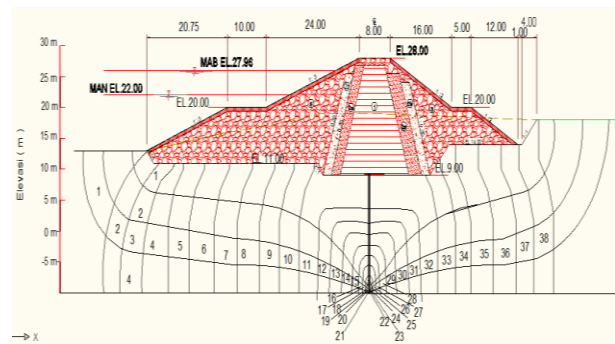
$$= 2,75 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Flownet pada bendungan urugan dengan cut off

Jumlah saluran aliran (Net flow)  $N_f = 4$

Jumlah penurunan energi (garis equipotensial)  $N_e = 38$

Dengan Cut Off



Gambar 3. Flownet saat muka air normal dengan cut off

Diket : Rapat Jenis/Specific Gravity (SG) = 2,50 ( $\rho/\rho_{air}$ )  
Angka pori (e) = 0,6 s/d 1,12

Gradien hidraulik kritis material

$$i_{cr} = \frac{(SG-1)}{(e+1)} = \frac{(2,5-1)}{(0,6+1)} = 0,94$$

Saat muka air normal (MAN) elev di hulu 22 - di hilir 10 = 12 m

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 4$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 38$

Gradien hidraulik exit debit :

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{12}{38} = 0,32$$

Fk piping  $\geq 4$

$$= \frac{i_{cr}}{i_e} = \frac{0,94}{0,32} = 2,97 \leq 4 \text{ Tidak aman}$$

Saat muka air banjir (MAB) elev di hulu 27,96 - di hilir 19,25 = 8.71 m

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 4$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 38$

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{8,71}{38} = 0,23$$

$$\begin{aligned}
 F_k \text{ piping} &\geq 4 \\
 &= 0,94/0,23 \\
 &= 4,08 > 4 \quad \text{Aman}
 \end{aligned}$$

Evaluasi terhadap keamanan pondasi menunjukkan perbedaan signifikan antara kondisi tanpa *cut-off* dan dengan *cut-off*. Pada kondisi awal (tanpa *cut-off*), nilai faktor keamanan ( $F_k$ ) terhadap bahaya *piping* pada pondasi bendungan urugan hanya mencapai 1,88 pada Muka Air Normal (MAN) dan 2,58 pada Muka Air Banjir (MAB). Nilai tersebut tidak memenuhi kriteria minimum keamanan  $F_k \geq 4$ , yang berarti gradien hidraulik *exit* pada ujung hilir terlalu tinggi sehingga berisiko mengangkat butiran tanah pondasi.

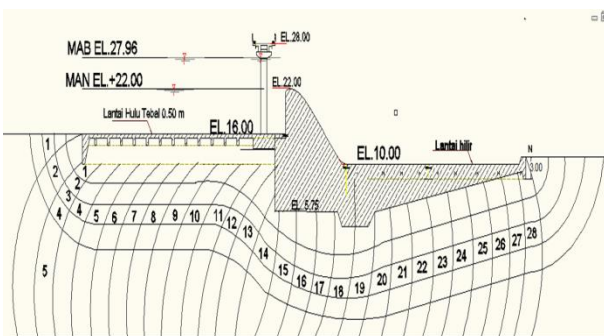
Penambahan struktur *cut-off* terbukti secara teoritis mampu meningkatkan keamanan pondasi secara drastis. Dengan adanya *cut-off*, jumlah garis penurunan energi ( $N_e$ ) pada diagram *flownet* meningkat dari 24 menjadi 38. Hal ini mengakibatkan penurunan gradien hidraulik *exit* ( $I_e$ ) menjadi 0,23 pada kondisi MAB, sehingga nilai  $F_k$  meningkat menjadi 4,08. Hasil ini menegaskan bahwa dinding halang rembesan (*cut-off*) sangat krusial untuk memperpanjang jalur rembesan (*flow path*) dan menurunkan tekanan pori di bawah struktur bendungan.

Koefisien permeability tanah di bawah bendungan urugan  $k = 9,49 \times 10^{-4}$  cm/det (WTP)  
 Maka debit ( $Q$ ) di bawah bendungan urugan jika asumsi  $N_e = 4$  ;  $N_f = 38$

$$\begin{aligned}
 Q &= k \times \Delta h \times (N_f/N_e) \times \text{panjang bendungan urugan} \\
 &\quad (\pm 200 \text{ m}) \\
 &= 0,000949 \text{ cm/det} \times 8,71 \text{ m} \times (4/38) \times 200 \text{ m} \\
 &= 1,74 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Flownet pada pondasi spillway tanpa *cut off*

Jumlah saluran aliran  $N_f = 5$   
 Jumlah penurunan energi (garis equipotensial)  $N_e = 28$   
 Tanpa *Cut Off*



**Gambar 4.** Flownet saat muka air normal & banjir (MAN) tanpa *cut off*

Diket :  
 Rapat Jenis / Specific Gravity (SG) = 2,50 ( $\rho/\rho_{air}$ )  
 Angka pori ( $e$ ) = 0,95  
 Gradien hidraulik kritis material  
 $I_{cr} = (SG-1)/(e + 1)$

$$\begin{aligned}
 &= (2,5-1)/(0,95+1) \\
 &= 0,77
 \end{aligned}$$

Beda tinggi elevasi ( $\Delta h$ ) saat muka air normal (MAN) di hulu elev 22 di hilir 10 = 12 m

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 5$   
 Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 28$   
 Gradien hidraulik exit debit :

$$\begin{aligned}
 I_e &= \Delta h/N_e \\
 &= 12/28 \\
 &= 0,43
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_k \text{ piping} &\geq 4 \\
 &= I_{cr}/I_e \\
 &= 0,77 / 0,43 \\
 &= 1,79 < 4 \quad \text{Tidak aman}
 \end{aligned}$$

Saat muka air banjir (MAB) elev di hulu 27,96 – di hilir 19,25 = 8,71 m

$$\begin{aligned}
 I_e &= \Delta h/N_e \\
 &= 8,71/28 \\
 &= 0,31
 \end{aligned}$$

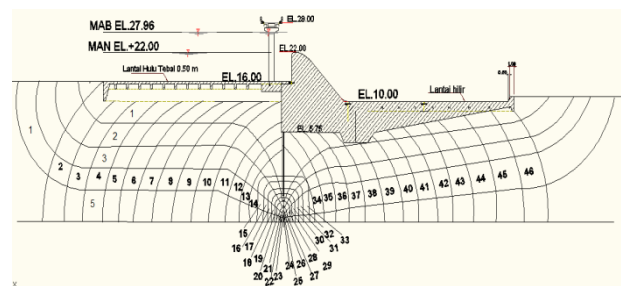
$$\begin{aligned}
 F_k \text{ piping} &\geq 4 \\
 &= I_{cr}/I_e \\
 &= 0,77/0,31 \\
 &= 2,47 > 4 \quad \text{Tidak Aman}
 \end{aligned}$$

Koefisien permeability tanah di bawah bendungan spillway  $k = 1.0 \times 10^{-4}$  cm/det (WTP)  
 Maka debit di bawah bendungan urugan jika asumsi  $N_e = 5$  ;  $N_f = 28$

$$\begin{aligned}
 Q &= k \times \Delta h \times (N_f/N_e) \times \text{panjang spillway+pintu} \\
 &= 0,001 \text{ cm/det} \times 8,71 \text{ m} \times (5/28) \times 120 \text{ m} \\
 &= 1,86 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Flownet pada pondasi spillway dengan *cut off*

Jumlah saluran aliran  $N_f = 5$   
 Jumlah penurunan energi (garis equipotensial)  $N_e = 46$   
 Dengan *Cut Off*



**Gambar 5.** Flownet saat muka air Normal & Banjir (MAN & MAB) dengan *cut off*.

Diket :  
 Rapat Jenis / Specific Gravity (SG) = 2,50 ( $\rho/\rho_{air}$ )  
 Angka pori ( $e$ ) = 0,95  
 Gradien hidraulik kritis material :  
 $I_{cr} = (SG-1)/(e + 1)$   
 $= (2,5-1)/(0,95+1)$   
 $= 0,77$

Beda tinggi elevasi ( $\Delta h$ ) saat muka air normal (MAN) di hulu Elv 22,00 – di hilir Elv 10,00 = 12,00 m  
 Jumlah saluran air / parit  $N_f = 5$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 46$

Gradien hidraulik exit debit :

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{12}{46} = 0,26$$

Fk piping  $\geq 4$

$$= \frac{i_{cr}}{i_e} = \frac{0,77}{0,26} = 2,95 \text{ Tidak aman}$$

Saat muka air banjir (MAB) elev di hulu 27,96 - di hilir 19,25 = 8,71 m

Jumlah saluran air / parit  $N_f = 5$

Jumlah garis penurunan energi  $N_e = 46$

Gradien hidraulik exit debit :

$$i_e = \frac{\Delta h}{N_e} = \frac{8,71}{46} = 0,19$$

Fk piping  $\geq 4$

$$= \frac{i_{cr}}{i_e} = \frac{0,77}{0,19} = 4,06 > 4 \text{ Aman}$$

Koefisien permeability tanah di bawah bendungan spillway

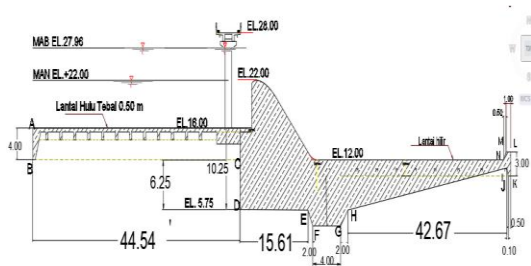
$k = 1,0 \times 10^{-4}$  cm/det (WTP)

Maka debit di bawah bendungan urugan jika asumsi

$N_e = 5$  ;  $N_f = 46$

$$Q = k \times \Delta h \times \left(\frac{N_f}{N_e}\right) \times \text{panjang spillway+pintu} \\ = 0,001 \text{ cm/det} \times 8,71 \text{ m} \times \left(\frac{5}{46}\right) \times 120 \text{ m} \\ = 1,14 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{det}$$

### 3.2. Analisis bahaya piping terhadap debit rembesan yang terjadi dengan metode line (Creep Line)



Gambar 6. Potongan melintang spillway (sumber : data perencanaan bendungan Margatiga)

Tabel 2. Panjang Rembesan pada pondasi spillway dan pintu tanpa cut off

No	Ti Titik	LV	LH	1/3 LH
1	A - B	4,00		
2	B - C		44,54	14,85
3	C - D	6,25		
4	D - E		15,61	5,20
5	E - F	2,00		
6	F - G		4,00	1,33
7	G - H	2,00		
8	H - I		42,67	14,22
9	I - J	1,00		
10	J - K		0,50	0,17
11	K - L	3,00		
12	Jumlah	18,25		35,77

Keterangan :

LV = Panjang Rembesan arah vertikal

LH + Panjang Rembesan arah horisontal

Perhitungan Seepage

$$L_w = \sum LV + \sum \frac{1}{3} LH > C_{pasir} \times \Delta H$$

$$C_w = \frac{L_w}{\Delta H} > C_{Pasir}$$

Keterangan :

$L_w$  : Panjang rembesan (m)

$L_v$  : Panjang rembesan arah vertikal (m)

$L_H$  : Panjang rembesan arah horisontal (m)

$C$  : Creep rasio (koefisien menurut Lane dan Bligh)

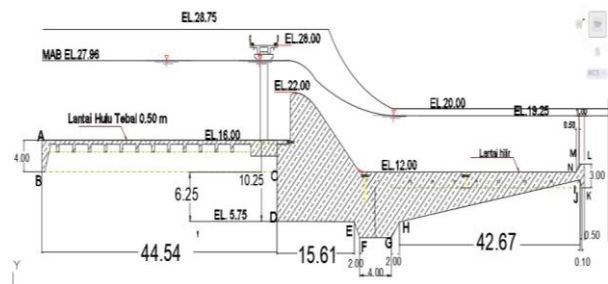
$\Delta H$  : Selisih muka air banjir hulu dan hilir

Perhitungan seepage dinyatakan aman, apabila nilai  $L_w >$  nilai  $C_{pasir} \times \Delta H$

Tabel 4. Harga harga minimum angka rembesan Lane (Cl)

No.	Jenis Tanah	Angka rembesan
1	Pasir sangat halus atau lanau	8,5
2	Pasir halus	7,0
3	Pasir sedang	6,0
4	Pasir kasar	5,0
5	Kerikil halus	4,0
6	Kerikil sedang	3,5
7	Kerikil kasar termasuk berangkal	3,0
8	Bongkah dengan sedikit berangkal dan kerikil	2,5
9	Lempung lunak	3,0
10	Lempung sedang	2,0
11	Lempung keras	1,8
12	Lempung sangat keras	1,6

(Sumber: Dirjen Pengairan DPU KP - 06, 1986)



Gambar 7. Potongan melintang spillway (sumber : data perencanaan bendungan margatiga)

1) Kondisi air banjir (sesuai model test)

Elevasi Hulu 27,96

Elevasi Hilir 19,25 (-)

$$\Delta H = 8,71$$

Panjang total rembesan vertikal dan horisontal

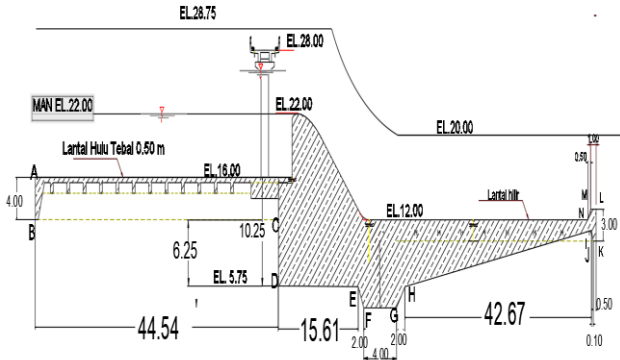
$$L_w (18,25+35,77)$$

$$L_w = 54,02$$

$$C_{pasir} \times \text{selisih beda tinggi } (\Delta H) \text{ saat air banjir}$$

$C \times \Delta H = 60,97$  TIDAK AMAN  
 $C_w = L_w / \Delta H > C_{pasir}$  (lihat table)  
 $C_w = 6,20$   
 $C_{pasir} = 7,00$  TIDAK AMAN

Perhitungan seepage dinyatakan aman, apabila nilai  $L_w >$  nilai  $C_{pasir} \times \Delta H$

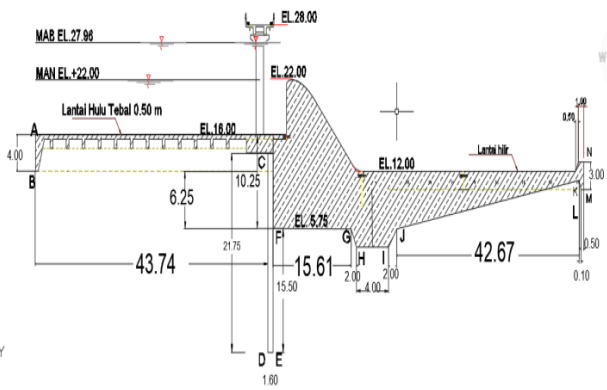


Gambar 8. Potongan melintang spillway (sumber : BBWS - MS)

2) Kondisi air normal  
 Elevasi Hulu 22  
 Elevasi Hilir 10 (-)  
 $\Delta H = 12$

$L_w = 54,02$   
 $C_{pasir} \times \text{selisih beda tinggi } (\Delta H) \text{ saat air normal}$   
 $C_{pasir} \times \Delta H = 84,00$  TIDAK AMAN  
 $C_w = L_w / \Delta H > C_{pasir}$   
 $C_w = 4,50$   
 $C_{pasir} = 7,00$  TIDAK AMAN

Berdasarkan perhitungan seepage pada kondisi banjir dan normal, diketahui bahwa nilai  $L_w <$  nilai  $C_{pasir} \times \Delta H$ , sehingga dinyatakan tidak aman dan diperlukan perkuatan dengan penambahan secant pile sebagai dinding halang rembesan.



Gambar 8. Potongan melintang spillway (sumber : BBWS - MS)

Tabel 4. Panjang rembesan pada pondasi spillway dan area pintu yang menggunakan Cut off

No. Titik	Batas	LV	LH	1/3 LH	Lx	Lw	$\Delta H$
A					0,00	85,29	12,00
B	A - B	4,00			4,00	85,29	12,00
C	B - C		43,7 4	14,58	18,58	85,29	12,00
D	C - D	21,75			40,33	85,29	12,00
E	D - E	1,60	0,53		40,86	85,29	12,00
F	E - F	15,50			56,36	85,29	12,00
G	F - G		15,6 1	5,20	61,57	85,29	12,00
H	G - H	2,00			63,57	85,29	12,00
I	H - I		4,00	1,33	64,90	85,29	12,00
J	I - J	2,00			66,90	85,29	12,00
K	J - K		42,6 7	14,22	81,12	85,29	12,00
L	K - L	1,00			82,12	85,29	12,00
M	L - M		0,50	0,17	82,29	85,29	12,00
N	M - N	3,00			85,29	85,29	12,00
			49,2 5	36,04	85,29		

$L_w = 49,25 + 36,04 = 85,29$   
 $C \times \Delta H = 84,00$   
 $7 \times 12 = 84,00$   
 Syarat  $L_w > C \times \Delta H$  (Aman)  
 $C_w = L_w / \Delta H > C_{pasir}$  (lihat table)  
 $C_{pasir} = 7,00$   
 $C_w = 85,29 / 12 = 7,11$  (Aman)

Perhitungan seepage dinyatakan aman, apabila nilai  $L_w >$  nilai  $C_{pasir} \times \Delta H$

Analisis empiris menggunakan metode *Creep Line* (Lane) memperkuat temuan pada analisis *flownet*. Tanpa adanya perkuatan, panjang rembesan total ( $L_w$ ) hanya sebesar 54,02 m, yang mana lebih kecil dari syarat minimum ( $C_{pasir} \times \Delta H = 84,00$ ) untuk kondisi air normal. Ketidakcukupan panjang rembesan ini menciptakan risiko tinggi terjadinya fenomena *piping* di bawah lantai *spillway*.

Melalui penambahan *secant pile* sebagai dinding halang, panjang rembesan vertikal ( $L_v$ ) meningkat menjadi 49,25 m, sehingga total panjang rembesan ( $L_w$ ) menjadi 85,29 m. Dengan nilai ini, syarat  $L_w > C \times \Delta H$  ( $85,29 > 84,00$ ) terpenuhi dengan nilai *Creep Ratio* sebesar 7,11. Integrasi antara metode teoritis (*flownet*) dan empiris (*creep line*) dalam penelitian ini menunjukkan konsistensi hasil bahwa Bendungan Margatiga memerlukan struktur halang rembesan tambahan untuk menjamin keamanan operasional jangka panjang.

#### 4. Simpulan

- a. Hasil Investigasi untuk tubuh bendunganurugan pada Borrow area A, B dan C diambil pada borrow area C pertimbangan pengambilan borrow area C karena lokasi borrow area C berada pada lokasi genangan sementara Borrow area A dan B dekat dengan area tumpuan kiri dan kanan as bendungan yang dikawatirkan mengganggu tumpuan Bendungan dan sifat-sifat seperti sifat swelling dan sifat dispersif tidak terjadi pada borrow area C tersebut.
- b. Analisis nilai Rembesan di tubuh bendungan urugan dengan cara garis freatik (coferdam kiri dan kanan) tidak lebih dari 1% ( $0,0131 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dari nilai Q sungai yaitu  $1,31 \text{ m}^3/\text{s}$  yaitu berkisar  $1,78 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} < 1,30 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ .
- c. Analisis diagram flownet saat muka air normal didapat nilai debit rembesan pada tumpuan kiri dan kanan  $Q=1,74 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  dan debit rembesan pada pondasi spillway  $Q=1,14 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .
- d. Analisis Empiris dengan metode Creep Line rembesan/seepage pada kondisi air banjir dan normal, diketahui bahwa nilai  $L_w < \text{nilai } C_{\text{pasir}} \times \Delta H$ , sehingga dinyatakan tidak aman dan diperlukan perkuatan dengan penambahan Cut off/secant pile sebagai dinding halang rembesan

- [9] Ardiansyah RH, Sobriyah S, Wahyudi AH. Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Debit Rembesan Menggunakan Model SEEP/W (Studi Kasus Di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali). Matriks Teknik Sipil. 2014 Sep 18;2(3).
- [10] Fauzi DA, Marsudi S, Cahya EN. Analisa Rembesan Terhadap Terjadinya Piping pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor Provinsi Jawa Barat. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air. 2023 May 15;3(2):151-64.

#### Daftar Pustaka

- [1] Hartomo S. Pengaruh Penambahan Agregat Pasir Terhadap Index Plastisitas Dan Permeabilitas Pada Tanah Timbunan Zona Inti. InSeminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP) 2021 Dec 12 (Vol. 1, No. 1).
- [2] Setyawati, H: Analisis Rembesan pada Perencanaan Pembangunan Bendung Logung Kabupaten Kudus Jawa Tengah, Universitas Diponegoro, Jawa Tengah, 2008.
- [3] Siswanto S, Suprpto S, Sachro SS. Hubungan Antara Elevasi Muka Air Waduk Dan Panjang Lintasan Rembesan Terhadap Debit Rembesan Pada Bendungan Urugan Batu Inti Tegak (Studi Kasus Bendungan Jatibarang). Jurnal Teknik Hidraulik. 2019 Dec 31;10(2).
- [4] Laksono RS. Analisa Stabilitas Lereng Dan Rembesan Bendungan Tipe Urugan Pada Bendungan Teritip Balikpapan. KURVA MAHASISWA. 2021 Jan 4;11(1):245-60.
- [5] Surendro, B: Mekanika Tanah, Teori Soal dan Penyelesaian, 2014.
- [6] Buldan R, Suharyanto S, Sriyana S. Penilaian Risiko Kegagalan Bendungan Kedungombo Sebagai Dasar Prioritas Pemeliharaan Bendungan. JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil. 2021 Aug 5:557-70.
- [7] Pranantya PA, Sukiyah E, Utomo EP. Korelasi Nilai Sondir Terhadap Parameter Geoteknik Dan Rembesan Pada Pondasi Tanggul Fase E, Kalibaru, Jakarta Utara. Jurnal Sumber Daya Air. 2018 Dec 13;14(2):73-86.
- [8] Suprpto RE, Japarussidik J, Sriyana S, Sadono KW. Penilaian Risiko Bendungan Pelaparado Berbasis Metode Modifikasi ICOLD dan Metode Indeks Risiko. Teknik. 2021;42(2):226-35.