

## STUDI PENGARUH TINGGI MUKA AIR PADA MODEL FISIK BENDUNGAN TANAH TERHADAP BENTUK *SEEPAGE LINE*

Tina Fitriani<sup>1</sup>, Muhammad Amin<sup>2</sup>, Arrizka Yanuar Adipradana<sup>3</sup>

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar  
Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, Jawa Tengah 56116

E-mail: [tinafitriani68@gmail.com](mailto:tinafitriani68@gmail.com), [muhammadamin@untidar.ac.id](mailto:muhammadamin@untidar.ac.id), [arrizka.yanuar@untidar.ac.id](mailto:arrizka.yanuar@untidar.ac.id)

### ABSTRAK

Permasalahan bendungan yang diakibatkan oleh rembesan menjadi penyebab kegagalan pada tubuh bendungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati pola garis aliran (*Seepage line*) yang terjadi pada tubuh bendungan dan menghitung debit rembesan. Tahapan penelitian dengan mencari kepadatan tanah laboratorium, kepadatan tanah lapangan, koefisien permeabilitas dan uji model fisik bendungan. Pada penelitian ini, kepadatan tanah yang digunakan yaitu 75,20%, 84,58% dan 92,42% dengan variasi tinggi muka air  $H_{15}$ ,  $H_{20}$  dan  $H_{25}$ . Pola aliran rembesan ini dianalisis dengan menggunakan teori *Schaffernak* dan *Cassagrande*.

Garis rembesan hasil observasi terletak dibawah garis rembesan teoritis. Hal ini dikarenakan tinggi tekanan yang terjadi dimasing-masing titik pengamatan lebih rendah dari tinggi tekanan hasil perhitungan teoritis. Kecepatan rembesan dipengaruhi oleh tinggi muka air, semakin tinggi muka air di hulu bendungan, semakin pendek waktu yang diperlukan untuk rembesan yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik.

Untuk debit rembesan terbesar menurut observasi atau teoritis yaitu pada kepadatan 75,20% dengan tinggi muka air 25 cm. Dan debit terkecil didapat pada kepadatan tanah 94,42% dengan tinggi muka air 15 cm. Perbedaan debit dari hasil observasi dan hasil teoritis menunjukkan kalibrasi permodelan belum sempurna. Nilai error rata-rata adalah 0,4045 hal ini memberikan informasi bahwa akurasi penelitian sebagai faktor kerapatan tanah, permeabilitas tanah, dan lama waktu pengamatan diperkirakan sebesar 0,5955.

**Kata kunci :** *Seepage line*, Debit rembesan, Kepadatan tanah.

### ABSTRACT

*Dam problems caused by seepage are the cause of failure of the dam body. The purpose of this study was to observe the flow line pattern (Seepage line) that occurs in the body of the dam and calculate the seepage discharge. The research stages are looking for laboratory soil density, field soil density, permeability coefficient and testing the physical model of the dam. In this study, the density of the soil used was 75.20%, 84.58% and 92.42% with variations in water level  $H_{15}$ ,  $H_{20}$  and  $H_{25}$ . This seepage flow pattern was analyzed using the theory of Schaffernak and Cassagrande.*

*The observed seepage line is located below the theoretical seepage line. This is because the high pressure that occurs at each observation point is lower than the pressure height of the theoretical calculation. Seepage speed is influenced by water level, the higher the water level upstream of the dam, the shorter the time required for seepage caused by hydrostatic pressure.*

*The largest seepage discharge according to observation or theoretical is at a density of 75.20% with a water level of 25 cm. And the smallest discharge is obtained at a soil density of 94.42% with a water level of 15 cm. The difference in discharge from the observation and theoretical results shows that the model calibration is not perfect. The average error value is 0.4045, this provides information that the accuracy of the study as a factor of soil density, soil permeability, and length of time of observation is estimated at 0.5955.*

**Keyword:** *Seepage line*, *Seepage discharge*, *Soil density*.

## 1. PENDAHULUAN

Masalah yang dapat terjadi pada bendungan adalah rembesan. Masalah bendungan akibat rembesan menduduki peringkat pertama dalam penilaian kategori risiko kerusakan bendungan. Air rembesan yang mengalir pada tubuh bendungan melalui lapisan agregat halus. Di waktu yang lama, proses dapat menyumbat ruang pori dan dapat terjadi *pipings*.

*Piping* yaitu kondisi rembesan yang ada di bagian bendungan tidak terkontrol dan membawa material yang mungkin akan terjadinya pipa-pipa air yang semakin lama semakin besar, kalau pipa-pipa air semakin membesar maka tanah yang berada di atasnya akan terjadi penurunan. Jika rembesan mengalir dibagian hilir bendungan dan terjadi pengerusan tanah secara terus menerus maka akan mengakibatkan kelongsoaran pada bendungan.

Contoh keruntuhan bendungan di Indonesia yaitu Bendungan Alam Way Ela yang runtuh pada Juli 2013 dan Bendungan Sempor, di Jawa Tengah pada 8 Agustus 2014. Menyebabkan banjir yang diakibatkan jebolnya *coffer dam* dan (*overtopping*) di atas puncak *coffer dam*-nya. Pada penelitian ini penulis menganalisis terhadap pola rembesan dan debit rembesan pada tubuh bendungan. Untuk mengetahui fenomena *seepage line* pada badan bendungan, dengan dimodelkan baik secara fisik maupun secara empiris.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

### a. Permeabilitas tanah

Koefisien permeabilitas terutama bergantung pada ukuran pori rata-rata, yang dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel dan struktur partikel. Secara garis besar, semakin kecil ukuran partikelnya, semakin kecil ukuran pori-porinya, dan semakin rendah koefisien permeabilitasnya (Sipil et al., 1981).

### b. Rembesan

Hukum *Darcy* dapat digunakan untuk menghitung debit rembesan yang melalui struktur bendungan :

$$Q = k i A \dots \dots \dots (1)$$

Dimana,

$K$  = Koefisien rembesan (*Coefficient of permeability*)

$i$  = Gradien hidrolik

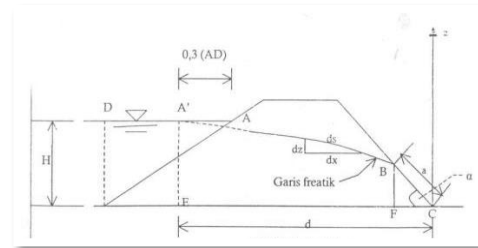
Ada beberapa metode menghitung debit rembesan yang melewati badan bendungan yang

dibangun dari tanah urugan homogen diantaranya yaitu :

### 1. Metode *Cassagrande* (1937)

*Cassagrande* (1973) dari Hardiyatmo (1992) mengusulkan metode penghitungan rembesan melalui bendungan berdasarkan pengujian model. Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung volume rembesan:

$$q = k a \sin^2 \alpha \dots \dots \dots (2)$$



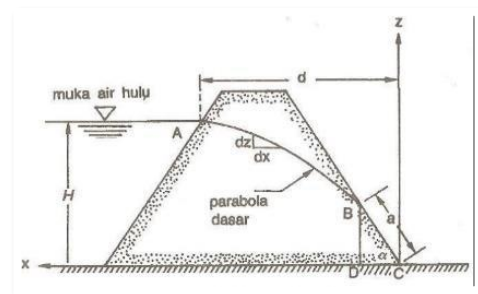
Gambar 1. Garis rembesan dalam metode *Cassagrande*

Sumber : Azmeri et al., 2013

### 1. Metode *Schaffernak* (1917)

Menurut metode *Schaffernak* (1917) dalam Hardiyatmo HC (2012), Panjang rembesan bendungan dapat ditentukan dengan mempertimbangkan BCD berbentuk segitiga. Perpindahan permeasi dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$q = k a \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (3)$$



Gambar 2. Perhitungan dengan metode *Schaffernak* (1917)

sumber : Azmeri et al., 2013

### c. Standar error dan absolut error

Berikut ini rumus untuk menghitung standar error dan absolut error pada permodelan bendungan :

Rata-rata data hasil pengukuran ( $\bar{o}$ ) =  $\frac{\sum o_i}{n}$

$$\overline{e_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}$$

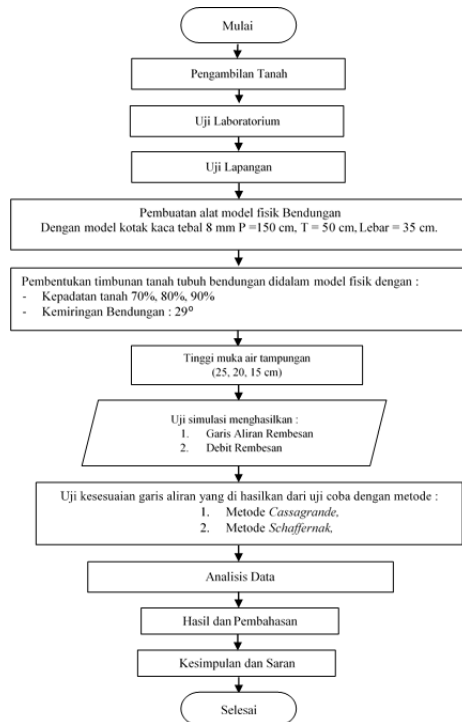
$$\text{Standar Error} = \frac{\sqrt{\overline{e_i^2}}}{\bar{o}}$$

d. Tekanan Hidrostatik

Menurut HC. Hardiyatmo (2006) tekanan hidrostatik yaitu tekanan pada kedalaman tertentu yang bergantung pada kedalaman zona tekanan. Besarnya tekanan ini tergantung pada ketinggian, kepadatan dan percepatan gravitasi cairan. Tekanan pada dasar wadah berisi air sama dengan berat zat cair yang menekannya.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Berikut bagan alir penelitian :



Gambar 3. Alir perencanaan tugas akhir

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Sipil, Universitas Tidar.

a. Tahap penelitian

Berikut ini tahapan penelitian sebagai berikut :

1. Uji Kepadatan di Laboratorium  
Uji pemadatan tanah dengan standar proctor dilakukan sebanyak 6 kali percobaan pada masing-masing setiap variabel.
2. Uji Kepadatan di Lapangan  
Pengujian pemadatan lapangan dilakukan berdasarkan kepadatan tanah yang menghasilkan ( $\gamma_k$ ) maksimum dan ( $w$ ) optimum. Pengukuran kepadatan tanah dengan sand cone bertujuan untuk memeriksa kepadatan lapisan tanah yang dipadatkan atau lapisan perkerasan di lokasi. Pengujian dibatasi pada ukuran

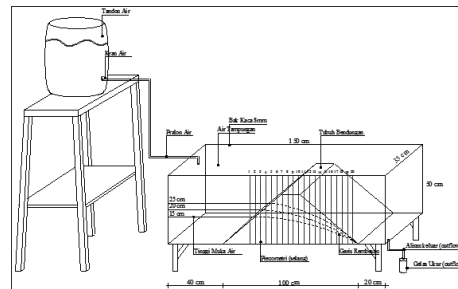
partikel tanah dan batuan yang berdiameter tidak melebihi 5 cm.

3. Pengujian permeabilitas

Uji permeabilitas dilakukan untuk menentukan besarnya nilai koefisien permeabilitas pada sampel tanah homogen.

4. Permodelan bendungan dalam bak uji

Konsep dasar permodelan fisik bendungan adalah membentuk kembali bendungan dengan ukuran yang lebih kecil, sehingga fenomena yang terjadi dimodel akan mirip dengan yang ada diprototip.



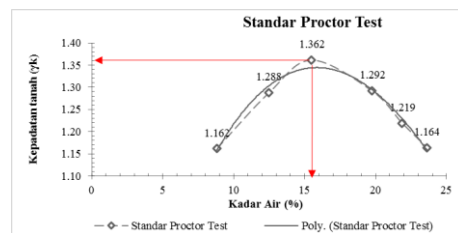
Gambar 4. Sketsa permodelan bendungan

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari tahap penelitian yang dilakukan maka dihasilkan beberapa point sebagai berikut:

#### Hasil perbandingan uji Laboratorium dengan uji Lapangan

Berdasarkan Gambar 5. dapat diketahui bahwa dengan didapat ( $W_{\text{optimum}} = 15,494\%$ ) dan menghasilkan kepadatan maksimum ( $\gamma_{k\text{maksimum}}$  sebesar = 1,362 gram/cm<sup>3</sup>).



Gambar 5. Grafik hubungan kadar air ( $w$ ) dengan kepadatan tanah ( $\gamma_k$ )

Untuk hasil perbandingan kepadatan tanah dapat ditunjukkan pada Tabel 5.:

Tabel 1. Hasil perbandingan kepadatan

| Tanah Lempung     | Jumlah Lintasan | Kepadatan Test Lapangan ( $\gamma_k$ ) (gram/cm <sup>3</sup> ) | Rata-rata Kepadatan Lapangan ( $\gamma_k$ ) (gram/cm <sup>3</sup> ) | Kepadatan Test Laboratorium ( $\gamma_k$ maksimum) (gram/cm <sup>3</sup> ) | Hasil Perbandingan ( $\gamma_k$ Lapangan/ $\gamma_k$ laboratorium) (%) |
|-------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Variasi 1 (A,B,C) | 25 x            | 1,253                                                          | 1,259                                                               | 1,362                                                                      | 92,42%                                                                 |
|                   | 25 x            | 1,271                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |
|                   | 25 x            | 1,252                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |
| Variasi 2 (A,B,C) | 18 x            | 1,145                                                          | 1,152                                                               | 1,362                                                                      | 84,58%                                                                 |
|                   | 18 x            | 1,147                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |
|                   | 18 x            | 1,163                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |
| Variasi 3 (A,B,C) | 15 x            | 1,020                                                          | 1,024                                                               | 1,362                                                                      | 75,20%                                                                 |
|                   | 15 x            | 1,044                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |
|                   | 15 x            | 1,009                                                          |                                                                     |                                                                            |                                                                        |

## Hasil Uji Permeabilitas Tanah

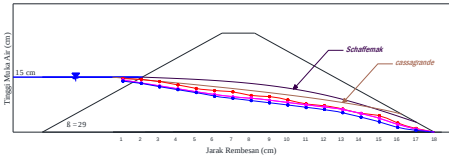
Berikut ini hasil uji permeabilitas tanah :

Tabel 2. Hasil uji permeabilitas tanah

| No | Kepadatan Tanah | Nilai Permeabilitas             |
|----|-----------------|---------------------------------|
| 1  | 92,42%          | $1,709 \times 10^{-4}$ cm/detik |
| 2  | 84,58%          | $2,433 \times 10^{-4}$ cm/detik |
| 3  | 75,20%          | $3,521 \times 10^{-4}$ cm/detik |

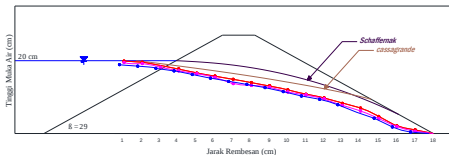
## Hasil Permodelan Pola Rembesan

a. Tinggi muka air 15 cm



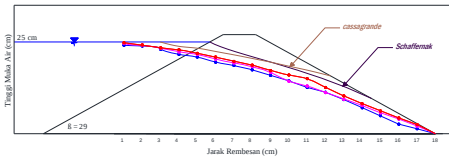
Gambar 6. Hubungan *seepage line* berdasarkan pengamatan dan teoritis

b. Tinggi muka air 20 cm



Gambar 7. Hubungan *seepage line* berdasarkan pengamatan dan teoritis

c. Tinggi muka air 25 cm



Gambar 8. Hubungan *seepage line* berdasarkan pengamatan dan teoritis

Keterangan gambar :

- Kepadatan tanah 74,20%
- Kepadatan tanah 84,58%
- Kepadatan tanah 92,42%

## Hasil Debit Rembesan

Hasil pengukuran debit rembesan yang telah dilakukan dapat ditunjukkan pada Tabel 3 :

Tabel 3. Debit pengamatan langsung berdasarkan kepadatan tanah

| Ketinggian Muka Air cm | Debit Observasi    |                    |                    |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                        | 75,20%<br>ml/detik | 84,58%<br>ml/detik | 92,42%<br>ml/detik |
| 15                     | 0,00106            | 0,000760           | 0,000609           |
| 20                     | 0,00135            | 0,001060           | 0,000850           |
| 25                     | 0,00185            | 0,001650           | 0,001300           |

Hasil perhitungan debit rembesan dengan teori Cassagrande dan Schaffernak

Untuk perhitungan debit rembesan menurut teori *Cassagrande* dan teori *Schaffernak* dijabarkan menurut kepadatan tanah sebagai berikut:

### 1. Kepadatan tanah 75,20%

a. Debit rembesan dengan metode *Cassagrande*

Tabel 4. Debit rembesan pada H 15 cm

| $H_{hu}$<br>cm | $H_{hu}^2$<br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\cos \alpha$ | $\cos^2 \alpha$ | $\sin \alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\tan \alpha$ | k<br>cm/detik          |
|----------------|-------------------------------|----------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------------------|
| 15             | 225                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $3,521 \times 10^{-4}$ |
| 20             | 400                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $3,521 \times 10^{-4}$ |
| 25             | 625                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $3,521 \times 10^{-4}$ |

Lanjutan Tabel 4. Debit rembesan pada H 15 cm

| d<br>cm | d <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> | $\frac{d}{\cos \alpha}$ | $\sqrt{\left(\frac{d^2}{\cos^2 \alpha}\right) - \left(\frac{H^2}{\sin^2 \alpha}\right)}$ | a<br>cm | Q =<br>$k \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$<br>cm <sup>3</sup> /detik |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 87,89   | 7724,65                           | 100,5                   | 95,61                                                                                    | 4,882   | $4,620 \times 10^{-4}$                                                           |
| 81,52   | 6645,51                           | 93,21                   | 83,58                                                                                    | 9,627   | $9,110 \times 10^{-3}$                                                           |
| 75,15   | 5647,52                           | 85,92                   | 68,73                                                                                    | 17,194  | $1,627 \times 10^{-3}$                                                           |

b. Debit rembesan dengan metode *Schaffernak*

Tabel 5. Debit rembesan pada H 15 cm

| $H_{hu}$<br>cm | $H_{hu}^2$<br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\cot^2 \alpha$ | k<br>cm/detik          | d<br>cm | d <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> |
|----------------|-------------------------------|----------|-----------------|-----------------|------------------------|---------|-----------------------------------|
| 15             | 225                           | 29       | 0,235           | 3,253           | $3,521 \times 10^{-4}$ | 87,89   | 7724,65                           |
| 20             | 400                           | 29       | 0,235           | 3,253           | $3,521 \times 10^{-4}$ | 81,52   | 6645,51                           |
| 25             | 625                           | 29       | 0,235           | 3,253           | $3,521 \times 10^{-4}$ | 75,15   | 5647,52                           |

Lanjutan Tabel 5. Debit rembesan pada H 15 cm

| $\sqrt{(d^2 + H^2)}$ | $\sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)}$ | a<br>cm | Q = $k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha$<br>cm <sup>3</sup> /detik |
|----------------------|------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------|
| 89,161               | 83,620                             | 5,540   | $4,586 \times 10^{-4}$                                        |
| 83,938               | 73,100                             | 10,837  | $8,970 \times 10^{-3}$                                        |
| 19,199               | 60,112                             | 19,088  | $1,580 \times 10^{-3}$                                        |

### 2. Kepadatan Tanah 84,58%

a. Debit rembesan dengan metode *Cassagrande*

Tabel 6. Debit rembesan pada H 15 cm

| $H_{hu}$<br>cm | $H_{hu}^2$<br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\cos \alpha$ | $\cos^2 \alpha$ | $\sin \alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\tan \alpha$ | k<br>cm/detik          |
|----------------|-------------------------------|----------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------------------|
| 15             | 225                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $2,433 \times 10^{-4}$ |
| 20             | 400                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $2,433 \times 10^{-4}$ |
| 25             | 625                           | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $2,433 \times 10^{-4}$ |

Lanjutan Tabel 6. Debit rembesan pada H 15 cm

| d<br>cm | d <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> | $\frac{d}{\cos \alpha}$ | $\sqrt{\left(\frac{d^2}{\cos^2 \alpha}\right) - \left(\frac{H^2}{\sin^2 \alpha}\right)}$ | a<br>cm | Q = $k \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$<br>cm <sup>3</sup> /detik |
|---------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 87,89   | 7724,65                           | 100,49                  | 95,61                                                                                    | 4,882   | $3,192 \times 10^{-4}$                                                        |
| 81,52   | 6645,51                           | 93,21                   | 83,58                                                                                    | 9,627   | $6,294 \times 10^{-4}$                                                        |
| 75,17   | 5647,52                           | 85,92                   | 68,73                                                                                    | 17,194  | $1,124 \times 10^{-3}$                                                        |

b. Debit rembesan dengan metode *Schaffernak*

Tabel 7. Debit rembesan pada H 15 cm

| $H_{hu}$<br>cm | $H_{hu}^2$<br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\cot^2 \alpha$ | k<br>cm/detik          | d<br>cm | d <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> |
|----------------|-------------------------------|----------|-----------------|-----------------|------------------------|---------|-----------------------------------|
| 15             | 225                           | 29       | 0,235           | 3,255           | $2,433 \times 10^{-4}$ | 87,89   | 7724,65                           |
| 20             | 400                           | 29       | 0,235           | 3,255           | $2,433 \times 10^{-4}$ | 81,52   | 6645,51                           |
| 25             | 625                           | 29       | 0,235           | 3,255           | $2,433 \times 10^{-4}$ | 75,17   | 5647,52                           |

Lanjutan Tabel 7. Debit rembesan pada H 15 cm

| $\sqrt{(d^2 + H^2)}$ | $\sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)}$ | a      | $Q = k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha$ |
|----------------------|------------------------------------|--------|-------------------------------------|
| cm                   |                                    | cm     | cm <sup>3</sup> /detik              |
| 89,161               | 83,620                             | 5,540  | $3,168 \times 10^{-4}$              |
| 83,938               | 73,100                             | 10,837 | $6,197 \times 10^{-4}$              |
| 79,199               | 60,112                             | 19,088 | $1,092 \times 10^{-3}$              |

### 3. Kepadatan tanah 92,42%

- a. Debit rembesan dengan metode *Cassagrande*

Tabel 8. Debit rembesan pada H 15 cm

| H <sub>hulu</sub><br>cm | H <sub>hulu</sub> <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\cos \alpha$ | $\cos^2 \alpha$ | $\sin \alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\tan \alpha$ | k<br>cm/detik         |
|-------------------------|---------------------------------------------------|----------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| 15                      | 225                                               | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $1,71 \times 10^{-4}$ |
| 20                      | 400                                               | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $1,71 \times 10^{-4}$ |
| 25                      | 625                                               | 29       | 0,875         | 0,765           | 0,485         | 0,235           | 0,554         | $1,71 \times 10^{-4}$ |

Lanjutan Tabel 8. Debit rembesan pada H 15 cm

| d     | d <sup>2</sup>  | $\frac{d}{\cos \alpha}$ | $\sqrt{\left(\frac{d^2}{\cos^2 \alpha}\right) - \left(\frac{H^2}{\sin^2 \alpha}\right)}$ | a      | $Q = k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha \tan \alpha$ |
|-------|-----------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|
| cm    | cm <sup>2</sup> |                         |                                                                                          | cm     | cm <sup>3</sup> /detik                          |
| 87,89 | 7724,65         | 100,49                  | 95,61                                                                                    | 4,882  | $2,243 \times 10^{-4}$                          |
| 81,52 | 6645,51         | 93,21                   | 83,21                                                                                    | 9,627  | $4,422 \times 10^{-4}$                          |
| 75,17 | 5647,52         | 85,92                   | 68,73                                                                                    | 17,194 | $7,899 \times 10^{-4}$                          |

- b. Hasil perhitungan debit rembesan dengan metode *Schaffernak*

Tabel 9. Debit rembesan pada H 15 cm

| H <sub>hulu</sub><br>cm | H <sub>hulu</sub> <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> | $\alpha$ | $\sin^2 \alpha$ | $\cot^2 \alpha$ | k<br>cm/detik          | d<br>cm | d <sup>2</sup><br>cm <sup>2</sup> |
|-------------------------|---------------------------------------------------|----------|-----------------|-----------------|------------------------|---------|-----------------------------------|
| 15                      | 225                                               | 29       | 0,235           | 3,255           | $1,709 \times 10^{-4}$ | 87,89   | 7724,65                           |
| 20                      | 400                                               | 29       | 0,235           | 3,255           | $1,709 \times 10^{-4}$ | 81,52   | 6645,51                           |
| 25                      | 625                                               | 29       | 0,235           | 3,255           | $1,709 \times 10^{-4}$ | 75,17   | 5647,52                           |

Lanjutan Tabel 9. Debit rembesan pada H 15 cm

| $\sqrt{(d^2 + H^2)}$ | $\sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)}$ | a      | $Q = k \cdot a \cdot \sin^2 \alpha$ |
|----------------------|------------------------------------|--------|-------------------------------------|
| cm                   |                                    | cm     | cm <sup>3</sup> /detik              |
| 89,161               | 83,620                             | 5,540  | $2,226 \times 10^{-4}$              |
| 83,938               | 73,100                             | 10,837 | $4,354 \times 10^{-4}$              |
| 79,199               | 60,112                             | 19,088 | $7,669 \times 10^{-4}$              |

Dari hasil perhitungan yang ada antara debit observasi dan debit teoritis, rekapitulasi debit rembesan ditunjukkan dalam bentuk Tabel sebagai berikut:

Tabel 10. Debit dengan kepadatan 75,20%

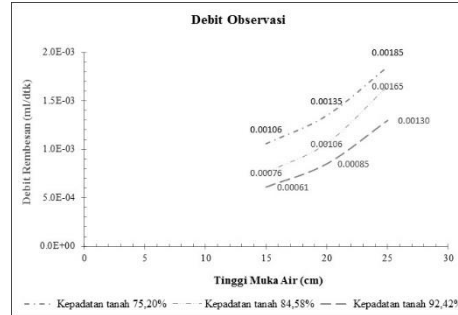
| Ketinggian muka air | Debit observasi                            | Rumus debit teoritis                  |                                       |
|---------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                     | $Q_{pengamatan}$<br>cm <sup>3</sup> /detik | Schaffernak<br>cm <sup>3</sup> /detik | Cassagrande<br>cm <sup>3</sup> /detik |
| cm                  |                                            |                                       |                                       |
| 15                  | 0,00106                                    | 0,000459                              | 0,000462                              |
| 20                  | 0,00135                                    | 0,000897                              | 0,000911                              |
| 25                  | 0,00185                                    | 0,001580                              | 0,001627                              |

Tabel 11. Debit dengan kepadatan 84,58%

| Ketinggian muka air | Debit observasi                            | Rumus debit teoritis                  |                                       |
|---------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                     | $Q_{pengamatan}$<br>cm <sup>3</sup> /detik | Schaffernak<br>cm <sup>3</sup> /detik | Cassagrande<br>cm <sup>3</sup> /detik |
| cm                  |                                            |                                       |                                       |
| 15                  | 0,00076                                    | 0,000317                              | 0,000319                              |
| 20                  | 0,00106                                    | 0,000620                              | 0,000629                              |
| 25                  | 0,00165                                    | 0,001092                              | 0,001124                              |

Tabel 12. Debit dengan kepadatan 92,42%

| Ketinggian muka air | Debit observasi                            | Rumus debit teoritis                  |                                       |
|---------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                     | $Q_{pengamatan}$<br>cm <sup>3</sup> /detik | Schaffernak<br>cm <sup>3</sup> /detik | Cassagrande<br>cm <sup>3</sup> /detik |
| cm                  |                                            |                                       |                                       |
| 15                  | 0,00061                                    | 0,000223                              | 0,000224                              |
| 20                  | 0,00085                                    | 0,000435                              | 0,000442                              |
| 25                  | 0,00130                                    | 0,000767                              | 0,000790                              |



Gambar 9. Grafik hubungan debit rembesan dengan tinggi muka air

### Kecepatan rembesan

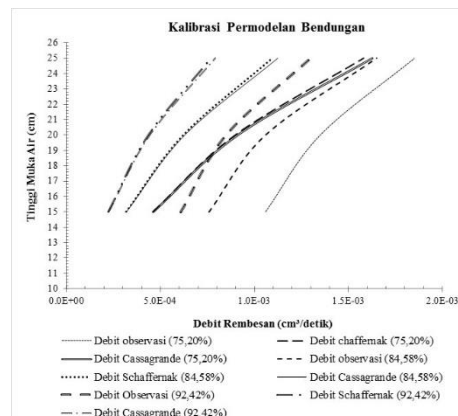
Berdasarkan Tabel 13. Menunjukkan bahwa besar kecepatan rembesan dengan kepadatan tanah 75,20% > kepadatan tanah 84,58% > kepadatan tanah 92,42%. Semakin tinggi tingkat kepadatan tanah, maka semakin rendah kecepatan yang terjadi itu dikarenakan nilai koefisien permeabilitas tanah kecil.

Tabel 13. Kecepatan rembesan berdasarkan kepadatan tanah dan tinggi muka air

| $\gamma_k$ | Tinggi muka air | S (Jarak) | Waktu mulai (Jam) | Waktu selesai (Jam) | Selisih Waktu (Jam) | Detik | $V = \frac{s}{t}$ (cm/s) | Rata-rata (cm/s) |
|------------|-----------------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|-------|--------------------------|------------------|
| 75,20%     | H15             | 85        | 08:08             | 14:27               | 06:19               | 22740 | 0,00374                  | 0,00439          |
|            | H20             | 85        | 07:53             | 13:42               | 05:49               | 20940 | 0,00406                  |                  |
|            | H25             | 85        | 08:00             | 12:23               | 04:23               | 15780 | 0,00539                  |                  |
| 84,58%     | H15             | 85        | 08:18             | 15:07               | 06:49               | 24540 | 0,00346                  | 0,00390          |
|            | H20             | 85        | 08:02             | 14:23               | 06:21               | 22860 | 0,00372                  |                  |
|            | H25             | 85        | 08:00             | 13:13               | 05:13               | 18780 | 0,00453                  |                  |
| 92,42%     | H15             | 85        | 08:22             | 15:48               | 07:26               | 26760 | 0,00318                  | 0,00356          |
|            | H20             | 85        | 08:11             | 15:03               | 06:52               | 24720 | 0,00344                  |                  |
|            | H25             | 85        | 08:05             | 13:54               | 05:49               | 20940 | 0,00406                  |                  |

### Analisis Debit Rembesan

Pada gambar kalibrasi permodelan debit rembesan menjelaskan, debit rembesan observasi melalui uji permodelan lebih besar daripada debit rembesan hasil teoritis



Gambar 10. Kalibrasi debit rembesan

### Standar Error

Hasil dari grafik kemudian dihitung standar error yang terjadi:

1. Kepadatan tanah 75,20%

Tabel 14. Standar error antara debit observasi dengan debit Schaffernak

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00106                   | 0,000459                    | 0,000601      | $3,62 \times 10^{-7}$ | 0,567                   |
| 2        | 20              | 0,00135                   | 0,000897                    | 0,000453      | $2,05 \times 10^{-7}$ | 0,237                   |
| 3        | 25              | 0,00185                   | 0,001580                    | 0,000270      | $7,30 \times 10^{-8}$ | 0,084                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,00426                   | 0,002935                    | 0,001325      | $6,40 \times 10^{-7}$ | 0,325                   |

Tabel 15. Standar error antara debit observasi dengan debit Cassagrande

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar Error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00106                   | 0,000462                    | 0,000598      | $3,58 \times 10^{-7}$ | 0,564                   |
| 2        | 20              | 0,00135                   | 0,000911                    | 0,000439      | $1,93 \times 10^{-7}$ | 0,230                   |
| 3        | 25              | 0,00185                   | 0,001627                    | 0,000223      | $4,97 \times 10^{-8}$ | 0,070                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,00426                   | 0,00300                     | 0,001260      | $6,00 \times 10^{-7}$ | 0,315                   |

2. Kepadatan tanah 84,58%

Tabel 16. Standar error antara debit observasi dengan debit Schaffernak

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar Error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00076                   | 0,000317                    | 0,000443      | $1,96 \times 10^{-7}$ | 0,583                   |
| 2        | 20              | 0,00106                   | 0,000620                    | 0,000440      | $1,94 \times 10^{-7}$ | 0,294                   |
| 3        | 25              | 0,00165                   | 0,001092                    | 0,000558      | $3,12 \times 10^{-7}$ | 0,195                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,00347                   | 0,002030                    | 0,001440      | $7,02 \times 10^{-7}$ | 0,418                   |

Tabel 17. Standar error antara debit observasi dengan debit Cassagrande

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar Error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00076                   | 0,000319                    | 0,000441      | $1,94 \times 10^{-7}$ | 0,580                   |
| 2        | 20              | 0,00106                   | 0,000629                    | 0,000431      | $1,85 \times 10^{-7}$ | 0,287                   |
| 3        | 25              | 0,00165                   | 0,001124                    | 0,000526      | $2,76 \times 10^{-7}$ | 0,184                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,00347                   | 0,002073                    | 0,001397      | $6,56 \times 10^{-7}$ | 0,404                   |

3. Kepadatan tanah 92,42%

Tabel 18. Standar error antara debit observasi dengan debit Schaffernak

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar Error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00061                   | 0,000223                    | 0,000386      | $1,49 \times 10^{-7}$ | 0,634                   |
| 2        | 20              | 0,00085                   | 0,000435                    | 0,000415      | $1,72 \times 10^{-7}$ | 0,345                   |
| 3        | 25              | 0,00130                   | 0,000767                    | 0,000533      | $2,84 \times 10^{-7}$ | 0,237                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,002759                  | 0,001425                    | 0,001334      | $6,05 \times 10^{-7}$ | 0,488                   |

Tabel 19. Standar error antara debit observasi dengan debit Cassagrande

| No       | Tinggi Muka Air | Debit Observasi ( $o_i$ ) | Teori Schaffernak ( $e_i$ ) | $(o_i - e_i)$ | $(o_i - e_i)^2$       | Standar Error ( $S_e$ ) |
|----------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 1        | 15              | 0,00061                   | 0,000224                    | 0,000385      | $1,48 \times 10^{-7}$ | 0,632                   |
| 2        | 20              | 0,00085                   | 0,000442                    | 0,000408      | $1,66 \times 10^{-7}$ | 0,339                   |
| 3        | 25              | 0,00130                   | 0,000790                    | 0,000510      | $2,60 \times 10^{-7}$ | 0,227                   |
| $\Sigma$ |                 | 0,00276                   | 0,001456                    | 0,001303      | $5,74 \times 10^{-7}$ | 0,476                   |

## PEMBAHASAN

### Nilai debit berdasarkan pola garis rembesan

Berdasarkan Gambar 6; 7 dan Gambar 8. garis rembesan hasil penelitian terletak dibawah garis rembesan teoritis. Hal ini dikarenakan tinggi tekanan yang terjadi dimasing-masing titik pengamatan lebih rendah dari tinggi tekanan hasil perhitungan teoritis. Berdasarkan gambar garis rembesan tersebut dapat diketahui bahwa untuk kepadatan yang lebih besar menghasilkan

debit rembesan yang lebih kecil. Akan tetapi jika dibandingkan dengan debit hasil perhitungan teoritis masih lebih kecil.

### Kecepatan rembesan

Tabel 13. menunjukkan bahwa setiap kali ketinggian air meningkat, tekanan rembesan akan meningkat. Semakin tinggi muka air bagian hulu bendungan, semakin cepat waktu yang diperlukan untuk rembesan yang dikarenakan oleh tekanan hidrostatik. Semakin rendah tekanan hidrostatik hulu bendungan, semakin lama waktu yang dibutuhkan air untuk merembas.

### Kalibrasi permodelan

Dapat dilihat pada Gambar 4.16 bahwa aliran yang diamati lebih besar dari hasil teoritis. Hal ini dikarenakan kepadatan tanah, permeabilitas tanah dan lamanya waktu pengamatan. Tapi pola aliran dan debit rembesan yang dihasilkan sejalan dengan trend teoritis. Uji kecocokan digunakan untuk menguji kesesuaian antara data observasi dan data teoritis, dan nilai error rata-rata adalah 0,4045. Hal ini memberikan informasi bahwa akurasi penelitian sebagai faktor kerapatan tanah, permeabilitas tanah, dan lama waktu pengamatan diperkirakan sebesar 0,5955.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Didapatkan kesimpulan dan saran diantaranya sebagai berikut:

1. Parameter yang berpengaruh terhadap pola garis rembesan, debit rembesan dan kecepatan rembesan adalah kepadatan tanah, tinggi muka air, kemiringan bendungan dan koefisien permeabilitas tanah.
2. Garis rembesan dengan kepadatan yang lebih tinggi menunjukkan garis rembesan pada kedudukan yang lebih rendah dengan debit rembesan yang terjadi kecil. Dan sebaliknya, jika garis rembesan dengan kepadatan yang rendah menunjukkan pola garis rembesan pada kedudukan yang lebih tinggi dengan debit rembesan yang terjadi besar.
3. Hasil debit rembesan observasi lebih besar daripada debit rembesan hasil teoritis, hal ini disebabkan karena adanya tinggi tekanan yang terjadi dimasing-masing titik

pengamatan lebih rendah dari tinggi tekanan hasil perhitungan teoritis.

## 5.2 Saran

Saran yang diberikan sebagai berikut:

1. Penelitian tentang garis rembesan pada tubuh bendungan urugan tanah ini perlu dikembangkan lagi dengan variasi sudut bendungan yang bervariasi.
2. Eksperimen yang lebih lama dilakukan untuk mendapatkan hasil eksperimen yang lebih baik.

## Daftar Pustaka

- Ardiansyah, R. H., & Wahyudi, A. H. (2014). Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Debit Rembesan Menggunakan Model Seep/ W ( Studi Kasus di Bendungan Benel , Kabupaten Jembrana , Bali ). *Jurnal Matriks Teknik Sipil, September*, 471–476.
- Azmeri, A., Rizalihadi, M., & Yanita, I. (2013). Observasi Garis Freatis pada Model Bendungan Berdasarkan Kepadatan Tanah Melalui Model Fisik. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 47. <https://doi.org/10.5614/jts.2013.20.1.6>
- Huda, A. L., Wardani, S. P. R., & Suharyanto, S. (2019). Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 4(2), 26. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v4i2.1372>
- Nanda, T. N. F., & Hamdhan, I. N. (2016). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Bajulmati dengan Metode Elemen Hingga Model 2D dan 3D. *Reka Racana*, 2 No.4 Des(4), 1–12.
- Setyaningtyas, A., Sipil, J. T., Teknik, F., & Surabaya, U. N. (n.d.). *ANALISA REMBESAN PADA BENDUNGAN TIPE URUGAN HOMOGEN DENGAN KEMIRINGAN 30 DERAJAT MELALUI PEMODELAN FISIKA* Kusnan Abstrak

