

**KAJIAN GARIS FREATIS PADA TUBUH BENDUNGAN URUGAN UNTUK
MENGATASI REMBESAN BERDASARKAN KEPADATAN TANAH DENGAN
MENGUNAKAN APLIKASI *GEOSTUDIO SEEP/W 2012***

Muhammad Aswin¹, Dian Chandrasasi², Very Dermawan².

¹Mahasiswa Program Sarjana Teknik Jurusan Pengairan Universitas Brawijaya

²Dosen Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jurusan Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan MT. Haryono 167 Malang 65145-Telp (0341) 567886
Email:udho160593@gmail.com

ABSTRAK: Keamanan terhadap kegagalan karena rembesan merupakan kriteria penting dalam desain bendungan urugan. Dalam penelitian ini menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W 2012* dan metode empiris *Dupuit*, *Schaffernak* dan *Cassagrande*. Pada aplikasi, model fisik berbentuk trapesium dengan dimensi panjang 180 cm, tinggi 50 cm, lebar puncak bendung 10 cm, kemiringan hulu 1:2, dan kemiringan hilir 1:1,4. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah. Kesimpulan dari penelitian ini berdasarkan sistem klasifikasi *USCS (Unified Soil Classification System)* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transporting Official)* adalah bahwa tanah lempung yang digunakan dapat diklasifikasikan sebagai tanah *CL* yang memiliki karakteristik yang baik sebagai bahan bendungan urugan dengan konduktivitas hidrolik yang rendah ($k=2,70325 \times 10^{-7}$ cm/dt). Semakin tinggi muka air hulu maka semakin tinggi rembesan yang dihasilkan. Untuk perhitungan empiris, pada penelitian ini analisis dari *Geostudio Seep/W 2012* memiliki hasil yang terbaik untuk menghitung tingkat rembesan pada model ini dibandingkan metode lainnya (*Dupuit*, *Schaffernak* dan *Cassagrande*). Adapun perhitungan debit ditinjau berdasarkan ketinggian muka air hulu 30cm, 40cm dan 50cm dengan kepadatan saat kondisi *optimum moisture content (OMC)* dengan kadar air sebesar 23,13% adalah sebagai berikut: Perhitungan dengan analisis *software Geostudio Seep/W 2012* menghasilkan debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30cm, 40cm dan 50cm masing-masing sebesar $7,3281 \times 10^{-7}$ cm³/dt, $1,0727 \times 10^{-6}$ cm³/dt dan $2,387 \times 10^{-6}$ cm³/dt. Sedangkan perhitungan analitis menggunakan metode *Dupuit* menghasilkan debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30cm, 40cm dan 50cm masing-masing sebesar $2,387 \times 10^{-6}$ cm³/dt, $1,816 \times 10^{-6}$ cm³/dt dan $2,561 \times 10^{-6}$ cm³/dt. Perhitungan analitis menggunakan metode *Schaffernak* menghasilkan debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30cm, 40cm dan 50cm masing-masing sebesar $1,032 \times 10^{-6}$ cm³/dt, $2,276 \times 10^{-6}$ cm³/dt dan $5,223 \times 10^{-6}$ cm³/dt. Perhitungan analitis menggunakan metode *Cassagrande* menghasilkan debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30cm, 40cm dan 50cm masing-masing sebesar $8,275 \times 10^{-7}$ cm³/dt, $1,756 \times 10^{-6}$ cm³/dt dan $3,566 \times 10^{-6}$ cm³/dt.

Kata Kunci: Garis Freatis, Rembesan, Bendungan Urugan, *Dupuit*, *Schaffernak*, *Cassagrande*, *Geostudio Seep/W 2012*.

ABSTRACT: Safety against failure due to seepage is an important criterion in the design of the dam. In this study using the *Geostudio Seep / W 2012* application and the empirical methods of *Dupuit*, *Schaffernak* and *Cassagrande*. In the application, the physical model is in the form of a trapezoid with dimensions of length 180 cm, height 50 cm, peak width of weir 10 cm, tilt upstream 1: 2, and downstream slope 1: 1.4. The land used in this study is. The conclusion of this study based on the classification system of *USCS (Unified Soil Classification System)* and *AASHTO (American Association of State Highway and Transporting Official)* is that the clay used can be classified as *CL* soil which has good characteristics as a material for low-density hydraulic dam ($k = 2,70325 \times 10^{-7}$ cm / s). The higher the upstream water level, the higher the seepage produced. For empirical

calculations, in this study the analysis from *Geostudio Seep / W 2012* has the best results to calculate the seepage rate on this model compared to other methods (Dupuit, Schaffernak and Cassagrande). The discharge calculation is reviewed based on the upstream water level of 30cm, 40cm and 50cm with the density when optimum moisture content conditions (OMC) with a moisture content of 23.13% are as follows: Calculation with the *Geostudio Seep / W 2012* software analysis produces outflow generated from each height of 30cm, 40cm and 50cm respectively $7.3281 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $1.0727 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$ and $2.387 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$. While the analytical calculation using the Dupuit method produces outflow discharges generated from each height of 30cm, 40cm and 50cm, each of which is $2.387 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{s}$, $1.816 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{s}$ and $2.561 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{s}$. Analytical calculations using the Schaffernak method produce outflow discharges generated from each height of 30cm, 40cm and 50cm, respectively $1.032 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $2.276 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$ and $5.223 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$. Analytical calculations using the Cassagrande method produce outflow discharges generated from each height of 30cm, 40cm and 50cm respectively $8.275 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / \text{sec}$, $1.756 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$ and $3.566 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{sec}$.

Keywords: Phreatic Line, Seepage, Earthfill Dam, Dupuit, Schaffernak, Cassagrande, *Geostudio Seep/W 2012*

PENDAHULUAN

Erosi internal dan *piping* pada *main dam* merupakan penyebab kegagalan bendungan kedua setelah aliran yang melewati puncak bendungan. Volume rembesan yang terlalu besar mengakibatkan pengoperasian bendungan menjadi terganggu. Dalam perencanaan bendungan tentu diperhitungkan keamanan bendungan terhadap rembesan air yang mengalir melalui celah-celah diantara butir tanah pembentuk tubuh bendungan. Untuk mengetahui bagaimana aliran air itu terjadi, maka perlu kajian mengenai garis freatis atau garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh tanah timbunan. Kajian ini melihat dari tiap-tiap ketinggian muka air serta kapasitas debit yang mengalir melalui tubuh timbunan.

Tujuan dilakukannya studi ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik tanah lempung sebagai material timbunan pada bendungan urugan.
2. Melaksanakan simulasi dan mengetahui pola aliran garis freatis dan debit rembesan pada tubuh bendungan.
3. Melakukan perbandingan debit rembesan dengan *software Geostudio Seep/W 2012* dengan pendekatan Cassagrande, Schaffernak dan Dupuit.

LANDASAN TEORI

Terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang sering digunakan, yaitu *USCS (Unified Soil Classification System)* dan *AASHTO*

(*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Sistem-sistem ini menggunakan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas. Klasifikasi tanah dari sistem *USCS* pertama kali diusulkan oleh Cassagrande (1942), kemudian direvisi oleh kelompok teknisi dari *USBR (United State Bureau of Reclamation)*. Dalam bentuk yang sekarang, sistem ini banyak digunakan oleh berbagai konsultan geoteknik (Hardiyatmo, 2010, p.63).

Bendungan Type Urugan

Definisi bendungan menurut SNI 03-1731 adalah setiap penahanan buatan, jenis urugan atau jenis lainnya yang menampung air atau dapat menampung air baik secara alamiah maupun buatan, termasuk fondasi, ebatmen, bangunan perlengkap dan peralatannya. Sedangkan bendungan yang terbuat dari bahan urugan dari *borrow area* yang dipadatkan dengan menggunakan *vibrator roller* atau alat pemadat lainnya pada setian hamparan dengan tebal tertentu kemudian disebut sebagai bendungan tipe urugan.

Permeabilitas

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berongga yang memungkinkan air atau cairan lainnya untuk menembus atau merembes melalui hubungan antar pori. Bahan yang mempunyai pori-pori kontinu disebut dapat tembus (*permeable*).

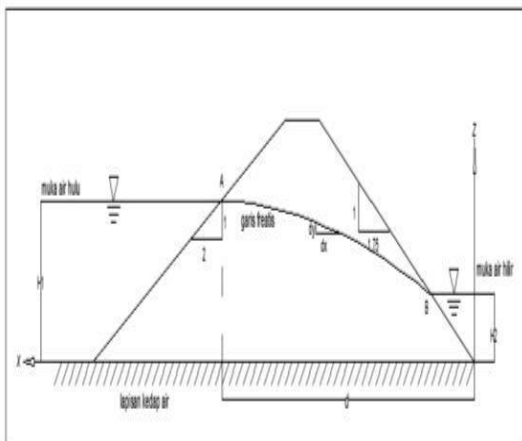
Garis Freatis Dan Perhitungan Debit Rembesan

Garis freatis (parabola rembesan) sebagai garis batas kejenuhan pada struktur tubuh bendungan. Garis freatisakan memisahkan daerah yang mengalami rembesan dengan daerah yang tidak mengalami rembesan. Garis ini dihubungkan oleh dua titik kritis, titik yang pertama adalah titik pertemuan antara muka air banjir (MAB) dengan sisi hulu bendungan, sedangkan titik yang kedua adalah titik setinggi garis miring yang disebut titik a yang terletak dibagian hilir bendungan.

Metode Dupuit (1863)

Dupuit berasumsi bahwa *gradient* hidrolik i sebanding dengan ke-miringan (*slope*) permukaan bebas dan selalu konstan pada setiap kedalaman: $i = (dy/dx)$. Dihitung dengan persamaan berikut:

$$q = \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \dots \dots \dots (1)$$



Gambar 1. Perhitungan Metode Dupuit
Sumber: Hardiyatmo. (2010, p.268)

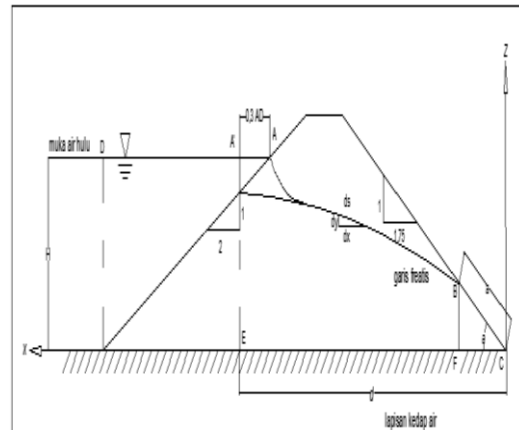
Metode Schaffernak (1917)

Schaffernak menyatakan bahwa muka freatik membentuk garis ab pada gambar berikut ini, dimana ab memotong hilir berjarak l dari dasar impermeabel. Rembesan metode Schaffernak terlebih dahulu diketahui panjang zona basah (a) yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}\right)} \dots \dots \dots (2)$$

Setelah nilai a diketahui, debit rembesan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$q = ka \sin \alpha \tan \alpha \dots \dots \dots (3)$$



Gambar 2. Perhitungan Metode Schaffernak
Sumber: Hardiyatmo. (2010, p.269)

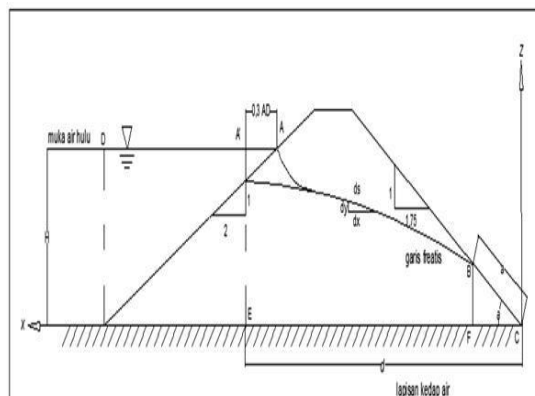
Metode Cassagrande

Menurut Cassagrande, bahwa asumsi Dupuit harga ($i = dy/dx$) merupakan pendekatan dari keadaan sebenarnya di lapangan. Namun pada kenyataannya, menurut Cassagrande ($i = dy/ds$) untuk lereng *downstream* yang lebih besar dari 30° , asumsi dari Dupuit akan menghasilkan kesalahan yang relatif besar sehingga untuk $\alpha \geq 30^\circ$, maka metode Cassagrande lebih akurat digunakan. Panjang zona basah pada perhitungan rembesan metode Cassagrande dihitung dengan persamaan berikut:

$$a = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} \dots \dots \dots (4)$$

Setelah nilai a diketahui, debit rembesan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$q = ka \sin^2 \alpha \dots \dots \dots (5)$$



Gambar 3. Perhitungan Metode Cassagrande
Sumber: Hardiyatmo. (2010, p.271)

Software Geostudio Seep/W 2012

Software Geostudio Seep/W merupakan program yang digunakan dalam menganalisa rembesan air dalam tanah dan tekanan air rembesan, yang membuat material menyerap air seperti tanah dan batu.

Penelitian ini hanya akan mengaplikasikan penggunaan *Seep/w*. Dari hasil akhir program *Seep/w* dapat diketahui arah /vektor aliran, garis rembesan, pola aliran (*flow net*) dan debit rembesan yang diduga terjadi pada tubuh bendungan.

METODOLOGI

Tempat Dan Waktu Penelitian

Keseluruhan rangkaian penelitian dilakukan di Laboratorium Tanah dan Air Tanah Jurusan Teknik Pengairan untuk pengujian *water content*, *specific gravity*, *mechanical grain size*, *hydrometer* dan *proctor test*. Sedangkan untuk pengujian *atterberg limit* dan uji permeabilitas tanah dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.

Material Dasar

Material yang digunakan dalam penelitian ini berupa tanah lempung berasal dari Desa Sumberejo, kecamatan Dau, Kota Malang.

Peralatan Pengujian

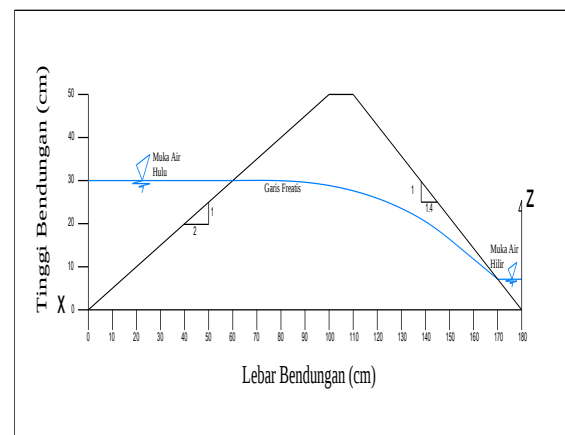
Peralatan yang digunakan guna menunjang penelitian adalah sebagai berikut:

1. Untuk pengujian sifat fisik tanah berupa gradasi butiran menggunakan metode *wetsieve analysis* dan hydrometer untuk pengujian konsistensi tanah menggunakan serangkaian metode *atterberg limit test* dan untuk *specific gravity* menggunakan metode perbandingan massa tanah dengan berat air.
2. Untuk pengujian pematatan di laboratorium, material tanah akan dipadatkan dengan serangkaian *standard proctor test*.
3. Untuk Pengujian harga koefisien permeabilitas tanah digunakan metode *falling head test*.
4. Untuk analisa debit rembesan menggunakan aplikasi Geoslope Seep/W 2012 dan metode *Dupuit*, *Schaffernak* dan *Cassagrande*. Keseluruhan rangkaian dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir **gambar 4**.



Gambar 4. Diagram Alir Perhitungan

Untuk gambar dan ukuran bendungan yang digunakan dalam analisa Geostudio Seep/W 2012 dapat dilihat pada **gambar 5**.



Gambar 5. Desain Bendungan.

Sumber: Data

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat Fisik Tanah

Dari Serangkaian pengujian sifat fisik tanah dapat dilihat pada Tabel 1 tentang karakter fisik tanah lempung.

Tabel 1. karakter Fisik Tanah Lempung

Karakteristik	Metode yang digunakan	Nilai
Kadar Air	Tes <i>proctor</i> standar	OMC = 23,13 %
Kepadatan tanah kering	Tes <i>proctor</i> standar	0,645 gr/cm ³
Berat jenis tanah	<i>picnometer</i>	2,5748 gr/cm ³
Distribusi ukuran butiran	Analisa ayakan dan hidrometer	<i>Sand Coarse to medium</i> = 0,83% <i>Sand Fine</i> = 11,56 % <i>Silt</i> = 56,74 %s <i>Clay</i> = 30,87 %
Batas Susut	Air raksa	19,9 %
Batas Cair	<i>Casagrande exp</i>	31,33 %
Batas Plastis	<i>Rolling 3 mm thread</i>	22,04 %
Indeks Plastisitas	LL - PL	9,287 %
Koefisien permeabilitas	<i>Falling head test</i>	$2,70325 \times 10^{-7}$ cm/dt
Jenis Tanah	USCS dan AASHTO	CL (Lempung dengan Plastisitas Rendah)

Sumber: Hasil Perhitungan.

Karakteristik Tanah Lempung sebagai Timbunan pada Bendungan Urugan

Menurut SNI tentang perencanaan bendungan urugan dan dari Ir. Suyono Sosrodarsono (1981), berdasarkan tabel 1 tentang karakter-istik tanah lempung, tanah jenis ini termasuk jenis tanah *CL (clay low plasticity)* yang memiliki nilai sebagai bahan timbunan yang stabil sehingga dapat dipergunakan untuk inti dan lapisan kedap air. Ditinjau dari koefisien perme-abilitasnya ($k=2,70325 \times 10^{-7}$ cm/dt) dan berat jenis maksimal 2,5748 gr/cm³, maka tanah ini memiliki daya dukung pondasi yang kurang baik karena memiliki nilai baik-jelek, sedangkan perannya dalam mengatasi rem-besan air, tanah lempung memiliki nilai karakteristik yang baik karena tidak memerlukan drainase di hilir bendungan maupun sistem pencegah lainnya.

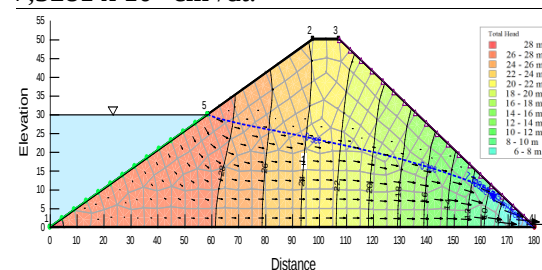
Analisis Hasil Penelitian

Analisis yang digunakan dalam menghitung debit dan menggambar garis freatis pada aplikasi *Geostudio Seep/W 2012* ini adalah *steady state analysis* untuk mengetahui besarnya debit outflow, peng-

gambaran dari pola aliran garis freatis pada bendungan dan arah aliran yang terjadi.

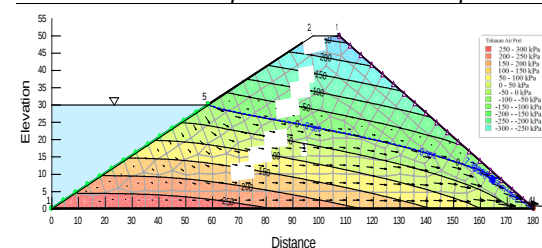
Hasil Perhitungan Debit Rembesan pada H = 30 cm

Perhitungan debit rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W 2012* pada H = 30 menghasilkan debit sebesar $7,3281 \times 10^{-7}$ cm³/dt.



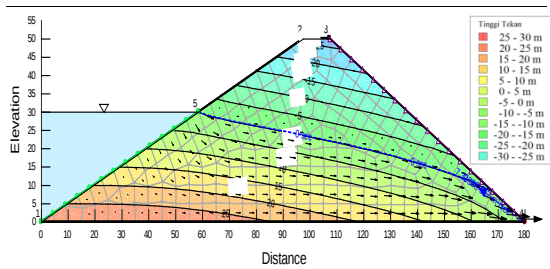
Gambar 6. Total Head pada H = 30 cm

Sumber: Analisis Software *Geostudio Seep/w2012*



Gambar 7. Tekanan Air Pori pada H = 30 cm

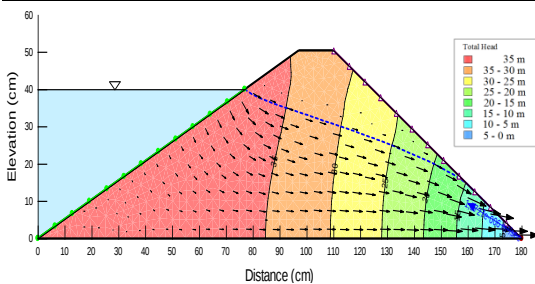
Sumber: Analisis Software *Geostudio Seep/w 2012*



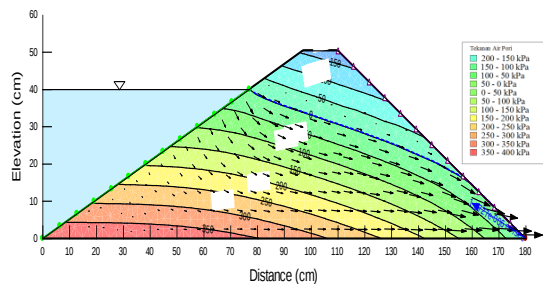
Gambar 8. Tinggi Tekan pada H = 30 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w 2012

Hasil Perhitungan Debit Rembesan pada H = 40 cm

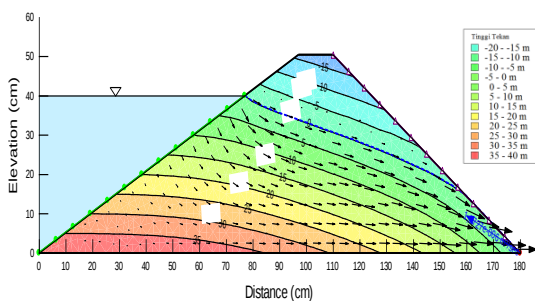
Perhitungan debit rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W 2012* pada H = 40 menghasilkan debit sebesar $1,0727 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$.



Gambar 9. Total Head pada H = 40 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w2012



Gambar10. Tekanan Air Pori pada H = 40 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w2012

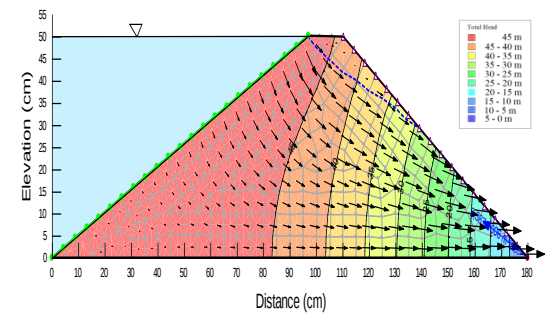


Gambar11. Tinggi Tekan pada H = 40 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w 2012

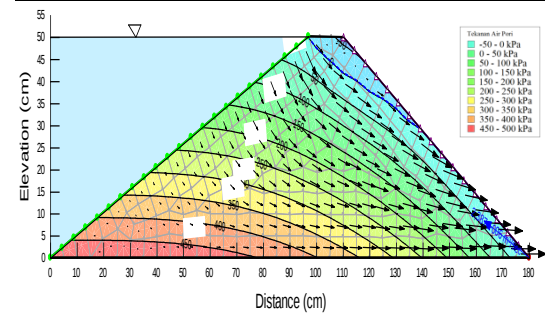
Hasil Perhitungan Debit Rembesan pada H = 50 cm

Perhitungan debit rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W 2012*

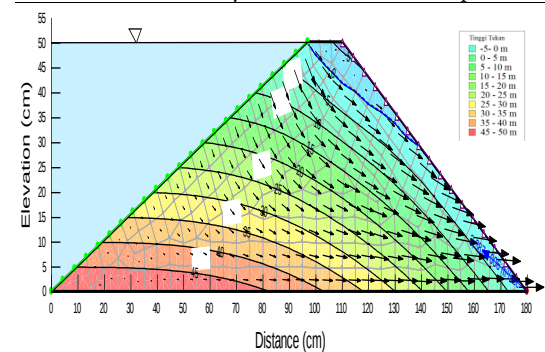
pada H=50 menghasilkan debit sebesar $1,0727 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dt}$.



Gambar 12. Total Head pada H = 50 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w 2012



Gambar 13. Tekanan Air Pori pada H=50 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w 2012



Gambar 14. Tinggi Tekan pada H = 50 cm
Sumber: Analisis Software Geostudio Seep/w 2012

Hasil Perhitungan Debit Rembesan Metode Dupuit

Perhitungan pada H = 30 cm.
Diketahui:

$$\begin{aligned} H_{\text{hulu}} &= 30 \text{ cm} \\ H_{\text{hulu}}^2 &= 900 \text{ cm} \\ H_{\text{hilir}} &= 8,4 \text{ cm} \\ H_{\text{hilir}}^2 &= 70,56 \text{ cm} \\ k &= 2,7032 \times 10^{-7} \text{ cm/dt} \\ d &= 121,48 \text{ cm} \\ k/(2d) &= 1,473 \times 10^{-9} \\ q &= \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \\ &= 1,473 \times 10^{-9} (900 - 70,56) \\ &= 9,23 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dt}. \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Debit Rembesan Metode *Dupuit*

H_{hulu} (cm)	H_{hulu}^2 (cm ²)	k (cm/dt)	d (cm)	H_{hilir} (cm)	H_{hilir}^2 (cm ²)	k/(2d)	q (cm ³ /dtk)
30	900	2,7033E-07	121,48	8,4	70,56	1,11E-09	9,23E-07
40	1600	2,7033E-07	103	14,7	216,09	1,31E-09	1,82E-06
50	2500	2,7033E-07	83	30,45	927,20	1,63E-09	2,56E-06

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil Perhitungan Debit Rembesan Metode Schaffernak

Perhitungan pada pada H = 30 cm.

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{hulu}} &= 30 \text{ cm} & H_{\text{hulu}}^2 &= 900 \text{ cm}^2 \\
 \alpha &= 36^\circ & \tan \alpha &= 0,72 \\
 \cos \alpha &= 0,809 & \cos^2 \alpha &= 0,655 \\
 \sin \alpha &= 0,588 & \sin^2 \alpha &= 0,345 \\
 k &= 2,7033 \times 10^{-7} \text{ cm/dt} \\
 d &= 121,48 \text{ cm} \\
 d^2 &= 14757,39 \text{ cm}^2 \\
 d/\cos \alpha &= 150,158
 \end{aligned}$$

$$\sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} = \sqrt{\frac{87^2}{\cos^2 36} - \frac{16^2}{\sin^2 36}} = 141,217$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}} \\
 &= 150,158 - 141,217 \\
 &= 8,940 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q &= k \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha \\
 &= 2,7033 \times 10^{-7} \times 8,940 \times 0,588 \times 0,727 \\
 &= 1,0321 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Debit Rembesan Metode *Schaffernak*

H_{hulu} (cm)	H_{hulu}^2 (cm ²)	α	$\cos \alpha$	$\cos^2 \alpha$	$\sin \alpha$	$\sin^2 \alpha$	$\tan \alpha$	k (cm/dt)	d (cm)	d ² (cm ²)	d/Cos α	$\sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}}$	a (cm)	Q (cm ³ /dtk)
30	900	36	0,809	0,655	0,588	0,345	0,727	2,7033E-07	121,480	14757,390	150,158	141,217	8,940	1,0321E-06
40	1600	36	0,809	0,655	0,588	0,345	0,727	2,7033E-07	103,000	10609,000	127,315	107,601	19,714	2,2758E-06
50	2500	36	0,809	0,655	0,588	0,345	0,727	2,7033E-07	83,000	6889,000	102,594	57,353	45,240	5,2227E-06

Sumber: Hasil Perhitungan

Hasil Perhitungan Debit Rembesan Metode Cassagrande

Perhitungan pada pada H = 30 cm.

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 H_{\text{hulu}} &= 30 \text{ cm} \\
 H_{\text{hulu}}^2 &= 900 \text{ cm}^2 \\
 \alpha &= 36^\circ \\
 \tan \alpha &= 0,727 \\
 \cot^2 \alpha &= 1,376 \\
 k &= 2,7033 \times 10^{-7} \text{ cm/dt} \\
 \sin \alpha &= 0,588 \\
 \sin^2 \alpha &= 0,345 \\
 d &= 121,480 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$d^2 = 14757,390 \text{ cm}^2$$

$$\sqrt{(d^2 + H^2)} = 125,129$$

$$\sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} = 116,270$$

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)} \\
 &= 8,860 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q &= k a \sin^2 \alpha \\
 &= 2,7033 \times 10^{-7} \times 8,860 \times 0,345 \\
 &= 8,275 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dt}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Debit Rembesan Metode *Cassagrande*

H_{hulu} (cm)	H_{hulu}^2 (cm ²)	α	$\sin^2 \alpha$	$\cot^2 \alpha$	k (cm/dt)	d (cm)	d ² (cm ²)	$\sqrt{(d^2 + H^2)}$	$\sqrt{(d^2 - H^2 \cot^2 \alpha)}$	a (cm)	Q (cm ³ /dtk)
30	900	36	0,345	1,376	2,7033E-07	121,480	14757,390	125,129	116,270	8,860	8,275E-07
40	1600	36	0,345	1,376	2,7033E-07	103,000	10609,000	110,494	91,689	18,806	1,756E-06
50	2500	36	0,345	1,376	2,7033E-07	83,000	6889,000	96,897	58,720	38,177	3,566E-06

Sumber: Hasil Perhitungan

Hubungan Ketinggian Muka Air terhadap Debit Rembesan

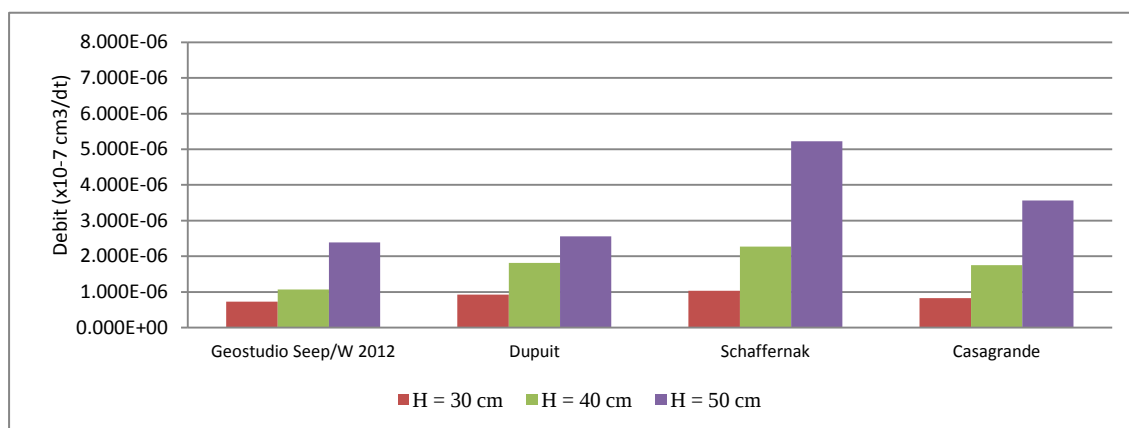
Dari hasil penelitian menggunakan berbagai metode, yaitu aplikasi *Geoslope Seep/W 2012*, metode *Dupuit*, *Schaffernak*

dan *Cassagrande* memiliki hasil yang berbeda-beda. Adapun rekapitulasi perhitungan debit dapat dilihat pada tabel 5 dan gambar 15.

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Debit Rembesan

Ketinggian Pada	Debit dari Aplikasi	Debit Rumus Empirik		
	<i>Geostudio Seep/W 2012</i> (cm ³ /dtk)	<i>Dupuit</i> (cm ³ /dtk)	<i>Schaffernak</i> (cm ³ /dtk)	<i>Cassagrande</i> (cm ³ /dtk)
H = 30 cm	7,328E-07	9,229E-07	1,032E-06	8,275E-07
H = 40 cm	1,073E-06	1,816E-06	2,276E-06	1,756E-06
H = 50 cm	2,387E-06	2,561E-06	5,223E-06	3,566E-06
Rerata	4,193E-06	5,300E-06	8,531E-06	6,149E-06

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar15. Grafik Rekapitulasi Debit Rembesan

Sumber: Hasil Perhitungan

Pada tabel dan grafik di atas dengan kepadatan kondisi *optimum moisture content* atau *OMC* (kadar air 23,13%) dapat dilihat bahwa pada ketinggian muka air 30 cm untuk semua kondisi kepadatan memiliki nilai debit yang paling kecil daripada ketinggian 40 cm dan pada ketinggian 50 cm. Perhitungan metode menggunakan *Geostudio Seep/w 2012* menghasilkan debit sebesar $7,328 \times 10^{-7}$ cm³/dt, dimana hasil tersebut mendekati perhitungan metode *Cassagrande* dengan nilai debit $8,275 \times 10^{-7}$ cm³/dt. Pada ketinggian muka air 40 cm, perhitungan dengan metode *Geostudio Seep/w 2012* memiliki nilai debit sebesar $1,073 \times 10^{-6}$ cm³/dt, nilai ini mendekati debit pada metode *Dupuit* dengan debit sebesar $1,816 \times 10^{-6}$ cm³/dt. Sedangkan debit paling besar terjadi pada ketinggian 50 cm sebesar $2,387 \times 10^{-6}$ cm³/dt, dimana nilai debit ini lebih kecil dari metode *Dupuit* dengan debit sebesar $2,561 \times 10^{-6}$ cm³/dt,

Cassagrande sebesar $3,566 \times 10^{-6}$ cm³/dt dan *Schaffernak* sebesar $5,223 \times 10^{-6}$ cm³/dt.

Secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 4.14 bahwa dari semua metode, metode *Cassagrande* memiliki nilai debit yang paling kecil diantara metode lainnya, sedangkan metode *Schaffernak* memiliki nilai debit yang paling besar pada tiap ketinggian dibandingkan dengan metode perhitungan lainnya. Untuk debit pada masing-masing ketinggian, debit pada pada ketinggian muka air 30 cm memiliki nilai debit yang paling kecil dari pada debit pada ketinggian muka air 40 cm dan 50 cm. Sedangkan pada ketinggian muka air 50 cm memiliki nilai debit paling besar bila dibandingkan dengan ketinggian 30 cm dan 40 cm untuk semua metode yang digunakan.

Sedangkan pada perhitungan debit menggunakan metode *Geostudio Seep/w 2012*, debit yang dihasilkan memiliki nilai debit yang berbeda-beda tiap ketinggian dan

kondisi kepadatan. Hal ini karena metode *Geostudio Seep/w* 2012 mem-perhitungan nilai koefisien permeabilitas, ketinggian muka air hulu dan hilir, nilai konsistensi batas cair dan nilai gradasi butiran. Selain itu metode *Geostudio Seep/w* 2012 lebih dinilai mampu menggambarkan garis freatis yang lebih akurat. Oleh karena itu, perhitungan dengan metode *Geostudio Seep/w* 2012 di-nilai paling sesuai dalam menganalisis debit rembesan dan garis freatis.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan uraian yang telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini :

1. Berdasarkan klasifikasi *USCS (Unified Soil Classification System)* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)*, tanah yang di-gunakan termasuk dalam jenis tanah lempung dengan plastistas rendah (*CL*) dengan karakteristik memiliki kemampuan yang baik sebagai timbunan pada bendungan uru-gan karena sifatnya yang kedap dengan koefisien permeabilitas $2,70325 \times 10^{-7} \text{ cm/dt}$ dan berat isi kering maksimum sebesar $0,645 \text{ gr/cm}^3$.
2. Debit yang dihasilkan dari perhitungan memiliki hasil yang berbeda sesuai dengan komponen yang diperhitungkan dalam rumus yang digunakan. Adapun perhitungan debit ditinjau berdasarkan ketinggian muka air hulu 30 cm, 40 cm dan 50 cm dengan kepadatan saat kondisi *optimum moisture content (OMC)* dengan kadar air sebesar 23,13% adalah sebagai berikut:
 - a. Perhitungan dengan analisis *software Geostudio Seep/W* 2012 menghasilkan debit sebesar:
 - Debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30 cm, 40 cm dan 50 cm masing-masing sebesar $7,3281 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dt}$, $1,0727 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$ dan $2,387 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$.
 - b. Perhitungan analitis menggunakan metode *Dupuit* adalah:
 - Debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30 cm, 40 cm dan 50 cm masing-

masing sebesar $2,387 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$, $1,816 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$ dan $2,561 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$.

- c. Perhitungan analitis menggunakan metode *Schaffernak* adalah:
 - Debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30 cm, 40 cm dan 50 cm masing-masing sebesar $1,032 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$, $2,276 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$ dan $5,223 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$.
- d. Perhitungan analitis menggunakan metode *Cassagrande* adalah:
 - Debit *outflow* yang dihasilkan dari masing-masing ketinggian 30 cm, 40 cm dan 50 cm masing-masing sebesar $8,275 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{dt}$, $1,756 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$ dan $3,566 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{dt}$.
- e. Tinggi muka air di hulu berbanding lurus dengan debit *outflow*. Semakin tinggi muka air pada hulu maka semakin besar debit *outflow*, begitu pula sebaliknya.
3. Ditinjau dari penggunaan *software Geostudio Seep/w* 2012 dalam menggambarkan pola aliran garis freatis pada bendungan urugan di setiap ketinggian (30 cm, 40 cm dan 50 cm) kondisi *optimum moisture content (OMC)* dengan kadar air sebesar 23,13% pada penelitian ini dapat tergambar dengan baik garis freatis yang terjadi. Penggunaan *software Geostudio Seep/w* 2012 dalam menggambarkan garis freatis dianggap lebih mendekati kondisi aktual karena telah memperhitungkan faktor-faktor yang lebih kompleks, seperti: gradasi butiran, kadar air tanah dan koefisien permeabilitas tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmeri, Rizalihadi, M., & Yanita, I. (2013). *Observasi Garis Freatis pada Model Bendungan Berdasarkan Kepadatan Tanah Melalui Model Fisik*. Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, Vol 20:1.
- Budi, Gogot Setyo. (2011). *Penguji Tanah di Laboratorium (Penjelasan dan Panduan)*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Das, Braja M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik) Jilid 1*. Malang: Erlangga.

- Das, Braja M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid2*. Malang: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary Christady. (2010). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Rahardjo, Endro. (1992). *Simulasi Garis Depresi Debit Rembesan Bendungan Homogen dengan Model Fisik*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brauwijaya.
- Soedarmo, G. Djatmiko&Purnomo, S. J. Edy.(1993). *Mekanika Tanah 1*. Malang: Kanisius.
- Sosrodarsono, Suyono. (1977). *Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Standarisasi Nasional Indonesia.(2002). *RSNI T-01-2002: Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- Sukirman, Sarino, Hakki, H. (2014). *Analisis Rembesan pada Benduung Tipe Urugan melalui Uji Hidrolik di Laboratorium Hidro FT Unsri*. Jurnal Teoritis Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Sriwijaya, Vol 2:2.

