

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Observasi Garis Freatis pada Model Bendungan Berdasarkan Kepadatan Tanah Melalui Model Fisik

Azmeri

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111, E-mail: azmeri73@yahoo.com

Maimun Rizalihadi

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111, E-mail: dilamalia@hotmail.com

Irma Yanita

Alumni Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, E-mail: sii.ojosh@yahoo.com

Abstrak

Kestabilan tubuh bendung tergantung pada besar kecilnya rembesan yang terjadi. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat dan mengamati pola aliran garis freatis yang terjadi pada tubuh bendungan serta menghitung debit rembesan yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan model tubuh bendungan yang terbuat dari tanah lempung kekuning-kuningan dengan memvariasikan tingkat kepadatan tanah sebesar 60%, 65%, dan 70%. Penelitian uji model menggunakan bejana kaca setebal 10 mm dengan panjang 180 cm, lebar 44 cm, dan tinggi 68 cm dengan skala 1 : 25 dari prototipenya. Penelitian ini memiliki 3 variasi tinggi air tampungan, yaitu 35 cm, 45 cm, dan 55 cm. Pola aliran rembesan ini dianalisis dengan menggunakan teori perhitungan aliran yaitu metode Dupuit, metode Schaffernak, dan metode Cassagrande. Pada penelitian ini, pada kondisi kepadatan tanah 60%, 65%, dan 70% hanya pada kondisi air tampungan 55 cm yang dapat memenuhi metode Cassagrande. Besar debit yang dihasilkan menurut perhitungan dan penelitian masing-masing untuk kepadatan 60%, 65%, 70% adalah $6,015 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ dan $8,07 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$, $5,806 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ dan $7,80 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$, $5,372 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ dan $7,21 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$. Perbedaan debit dari hasil perhitungan dan penelitian menunjukkan kalibrasi pemodelan belum sempurna. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat kepadatan tanah pada tubuh bendungan maka semakin kecil debit rembesan yang dihasilkan.

Kata-kata Kunci: Pola aliran garis freatis, debit rembesan, bendungan, kepadatan tanah.

Abstract

Stability of dam depends on the size of the seepage that occurs. The purpose of this study was to see and observe flow pattern of phreatic line occurred on dam body and calculate the resulting seepage discharge. This study used a model dam body made of yellowish clay with varying soil density 60%, 65%, and 70%. Model test study used 10 mm thick glass vessel with a length of 180 cm, width of 44 cm, height of 68 cm with a 1:25 scale of prototype. This study had three height variations of water level, which is 35 cm, 45 cm, and 55 cm. Seepage flow pattern was analyzed by using flow computation theories, namely Dupuit, Schaffernak, and Cassagrande method. The discharge resulting from the calculation and physical modelling each soil density are for 60%, 65%, 70% was $6,015 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ and $8,07 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$, $5,806 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ and $7,80 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$, $5,372 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$ and $7,21 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{det}$. Differences in discharge from the calculation and studies indicated that the calibration models were not perfect. The results obtained show that the higher the density of the soil on the dam body, the smaller the resulting seepage discharges.

Keywords: Flow pattern of phreatic line, seepage discharge, dam, soil density.

1. Pendahuluan

Kapasitas tampungan bendungan yang besar dan elevasi muka air yang tinggi, dapat mengatur besar aliran ke sebelah hilirnya menjadi lebih merata sepanjang tahun. Bendungan/waduk juga dapat berfungsi sebagai sarana

pengendali banjir yang efektif, dapat menggerakkan turbin PLTA, keperluan lain seperti air baku, kebutuhan irigasi, perikanan, dan pariwisata.

Dalam merencanakan sebuah bendungan, perlu diperhatikan stabilitasnya terhadap bahaya longsor, erosi lereng, dan kehilangan air akibat rembesan melalui

tubuh bendungan. Setiap bendungan pasti mengalami rembesan air, namun bagaimana pengaruh rembesan air terhadap bendungan sangat tergantung pada bentuk dan jenis bahan timbunan bendungan. Volume rembesan air yang terlalu besar, mengakibatkan pengoperasian bendungan menjadi terganggu, hingga rawan terjadi longsor bahkan keruntuhan.

Keruntuhan bendungan homogen tanah kemungkinan besar terjadi diakibatkan oleh timbulnya gaya-gaya yang terdapat pada perilaku rembesan air. Penelitian ini bertujuan untuk mengamati pola aliran garis freatis pada tubuh bendungan dan menghitung debit rembesan yang terjadi. Pemodelan tubuh bendungan ini divariasikan berdasarkan kepadatan tanah dengan tipe bendungan urugan homogen, dimana jenis tanah yang digunakan adalah tanah lempung kekuning-kuningan. Model tubuh bendungan berbentuk trapesium dengan variasi kepadatan tanah sebesar 60%, 65%, dan 70% yang didapat dari hasil perbandingan antara Uji Standar Proctor dan Sand Cone Test. Gejala pengaruh garis depresi (tekanan) air rembesan dianalisis dengan menggunakan teori aliran Dupuit, Schaffernak, A. Casagrande.

2. Karakteristik Tanah dan Rembesan

Pemilihan tanah dalam kelompok atau subkelompok yang menunjukkan sifat yang sama akan sangat membantu dalam penelitian. Klasifikasi tanah didasarkan atas ukuran partikel yang diperoleh dari analisis saringan (Das, 1995) dan analisis mineralogi serta plastisitas tanah (Chen, and Baladi, 1985).

Menurut Wesley (2012), permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga pori. Koefisien permeabilitas (*coefficient of permeability, k*) tergantung dari beberapa faktor, yaitu: kekentalan cairan, distribusi ukuran pori, distribusi ukuran butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah, dan derajat kejenuhan tanah. Harga koefisien permeabilitas untuk tiap-tiap tanah bernilai variasi. Tanah termasuk bahan yang *permeable* sehingga air dapat mengalir melalui pori-pori tanah. Uji permeabilitas dengan tinggi energi turun (*falling-head*) lebih cocok untuk tanah berbutir halus.

Pada pembuatan tubuh bendungan tipe urugan homogen, tanah dipadatkan untuk meningkatkan berat volumenya. Pemasakan berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tanah, mengurangi besarnya rembesan air yang terjadi, mengurangi besarnya penurunan tanah yang tidak diinginkan, dan meningkatkan kemantapan lereng timbunan. Pada perencanaan, kepadatan tanah lapangan diambil sebesar 90-95% kepadatan tanah laboratorium. Berat volume kering maksimum didapat dari hasil percobaan dengan uji Proctor atau dimodifikasi di laboratorium (Bowles, 1993).

Erosi internal dan piping pada main-dam merupakan penyebab kegagalan bendungan kedua setelah aliran yang melewati puncak bendungan (*overtopping flow*). Untuk bendungan baru, potensi erosi internal dan piping dapat dikontrol dengan desain yang baik dan pembangunan bendungan dan penyediaan filter untuk mencegah rembesan melalui main-dam. Namun banyak bendungan yang ada tidak dilengkapi dengan filter dan rentan terhadap kegagalan erosi internal, dengan kemungkinan yang meningkat umur bendungan (Anonim, 2011).

Kemiringan rata-rata lereng waduk (sebelah hulu dan hilir) adalah perbandingan antara panjang garis vertikal yang melalui tumit masing-masing lereng. Kemiringan lereng urugan harus ditentukan sedemikian rupa agar stabil terhadap longsor. Hal ini sangat tergantung pada jenis material urugan seperti yang diberikan pada **Tabel 1**. Kestabilan urugan harus diperhitungkan terhadap frekuensi naik turunnya muka air, rembesan, dan tahanan terhadap gempa.

Metode penelusuran garis freatis dapat diamati dengan menggunakan model fisik bendungan maupun dengan metode elemen hingga. Noori dan Khaleel (2011) melakukan evaluasi rembesan dan stabilitas bendungan Duhok pada Sungai Rubar dengan menggunakan metode elemen hingga melalui program komputer bernama SEEP2D. Hasil yang diperoleh yaitu jalur rembesan permukaan bebas, jumlah rembesan melalui bendungan, distribusi tekanan air pori, head total pengukuran dan efek anisotropi bahan inti bendungan urugan Duhok.

A. Casagrande memberikan metode perhitungan rembesan yang melewati tubuh bendungan yang didasarkan pada pengujian model (Hardiyatmo, 2006:257). Parabola AB berawal dari titik A' dengan $A'A = 0,3 (AD)$ yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Garis freatis atau garis depresi sebagai garis batas kejenuhan pada struktur tubuh bendungan. Garis freatis akan 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 di bagian hilir bendungan. Cassagrande memberikan formula untuk mendapatkan nilai *a* sebagai berikut:

$$a = \sqrt{d^2 + H^2} \sqrt{d^2 - H^2 ct g^2 \theta} \quad (1)$$

dengan :

- a* = tinggi garis kemiringan hilir dari dasar bendungan (m);
- d* = jarak lintasan rembesan di dasar bendungan, jarak E-C (m);
- H* = tinggi muka air banjir MAB (m); dan
- α = sudut kemiringan lereng hilir bendungan ($^\circ$).

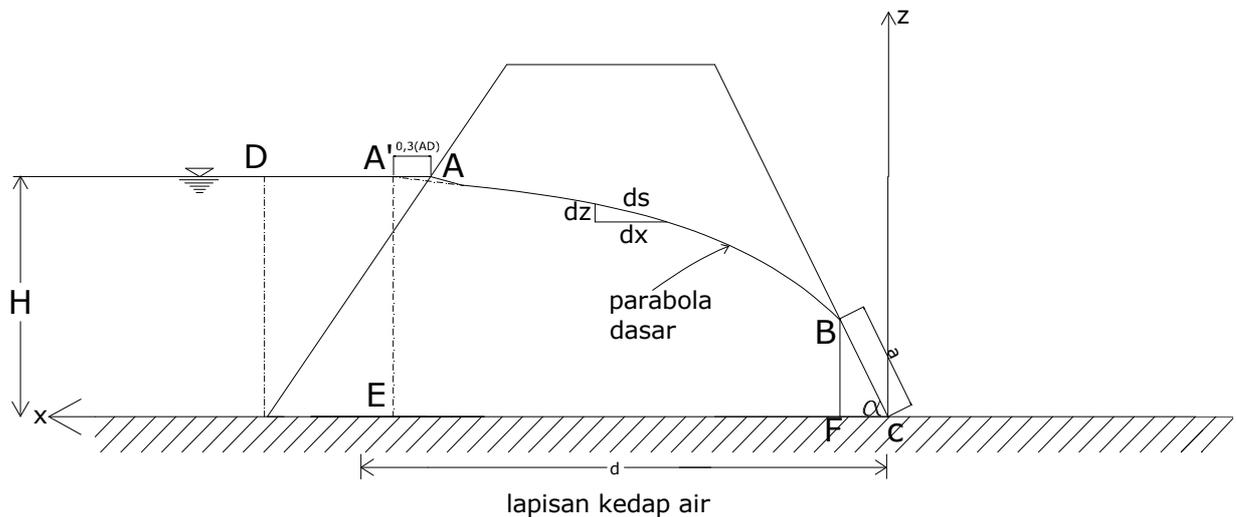
Tabel 1. Kemiringan lereng berdasarkan jenis material

Material Urugan	Material Utama	Kemiringan Lereng	
		Vertikal : Horizontal Hulu	Horizontal Hilir
a. Urugan Homogen	CH CL SC GC GM SM	1 : 3	1 : 2,25
b. Urugan Majemuk			
1. Urugan batu dengan inti lempung atau dinding diafragma	Pecahan batu	1 : 1,5	1 : 1,25
2. Kerikil dengan inti lempung atau dinding diafragma	Kerikil	1 : 2,5	1 : 1,75

Sumber: (Hardiyatmo, 2006)

Keterangan:

- CH = Lempung inorganik dengan plastisitas tinggi;
- CL = Lempung inorganik dengan plastisitas rendah-sedang, lempung lanauan, pasiran, dan kerikilan;
- SC = Kerikil lempungan, campuran pasir;
- GC = Kerikil lempungan, campuran kerikil;
- GM = Kerikil lanauan; dan
- SM = Pasir lanauan.



Gambar 1. Perhitungan rembesan metode cassagrande

Sumber: Hardiyatmo (2006)

Darcy mengusulkan hubungan antara kecepatan dan gradien hidrolik sebagai berikut:

$$v = ki \quad (2)$$

Debit rembesan (q) dinyatakan dalam persamaan:

$$q = kiA \quad (3)$$

dengan :

- v = kecepatan air (cm/det);
- q = debit rembesan (cm³/dt);
- i = gradien hidrolik;
- k = koefisien permeabilitas (cm/det); dan
- A = luas penampang aliran.

Beberapa metode diberikan untuk menentukan besarnya rembesan yang melewati bendungan dengan urugan tanah homogen.

2.1 Metode dupuit

Dupuit menganggap bahwa gradien hidrolik (i) adalah sama dengan kemiringan permukaan freatis dan besarnya konstan dengan kedalamannya, yaitu $i = dz/dx$, sehingga didapatkan persamaan:

$$q = \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \quad (4)$$

dengan :

- H₁ = tinggi muka air di hulu bendungan (m); dan
- H₂ = tinggi muka air di hilir bendungan (m).

2.2 Metode schaffernak

Schaffernak menganggap bahwa permukaan freatis merupakan garis yang memotong garis kemiringan

hilir pada jarak a dari dasar lapisan kedap air. Dari anggapan Dupuit, gradient hidrolis $i = dz/dx = tg \alpha$. Maka didapatkan persamaan:

$$q = kz \frac{dz}{dx} = k a \sin \alpha tg \alpha \quad (5)$$

2.3 Metode Sassagrande

Casagrande mengusulkan cara untuk menghitung rembesan lewat tubuh bendungan yang didasarkan pada pengujian model. Besarnya debit rembesan dapat ditentukan dengan persamaan

$$q = ka \sin^2 \alpha \quad (6)$$

3. Kalibrasi Pemodelan

Menurut Adidarma (2004) untuk menilai kedekatan atau kecocokan data hasil pemodelan dengan data hasil pengamatan, dilakukan uji kecocokan dengan menggunakan fungsi objektif atau fungsi kesalahan yang merupakan persamaan dari perhitungan dan pengamatan menggunakan Kesalahan Absolute Rata-rata (KAR). Persamaan untuk menghitung KAR menggunakan persamaan berikut:

$$KAR = \frac{1}{n} \sum \frac{abs(Q_{comp} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \quad (7)$$

dengan:

- Qcomp = debit hasil perhitungan;
- Qobs = debit hasil pengamatan; dan
- N = banyak data pengamatan.

4. Skenario Pemodelan

Penelitian ini dimulai dengan pekerjaan persiapan uji laboratorium, pembuatan model, dan *running* pemodelan di laboratorium. Analisa data dilakukan setelah semua pengukuran selesai dikerjakan. Data yang dianalisis berupa pengamatan garis freatis yang terjadi pada tubuh bendungan yaitu pola aliran rembesan dan gradien hidrolis aliran, data debit rembesan, dan kalibrasi pemodelan. Selengkapnya metode penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2**. Pada penelitian ini dilakukan uji laboratorium yaitu uji pemadatan tanah dan uji permeabilitas, serta dilanjutkan dengan pembuatan model.

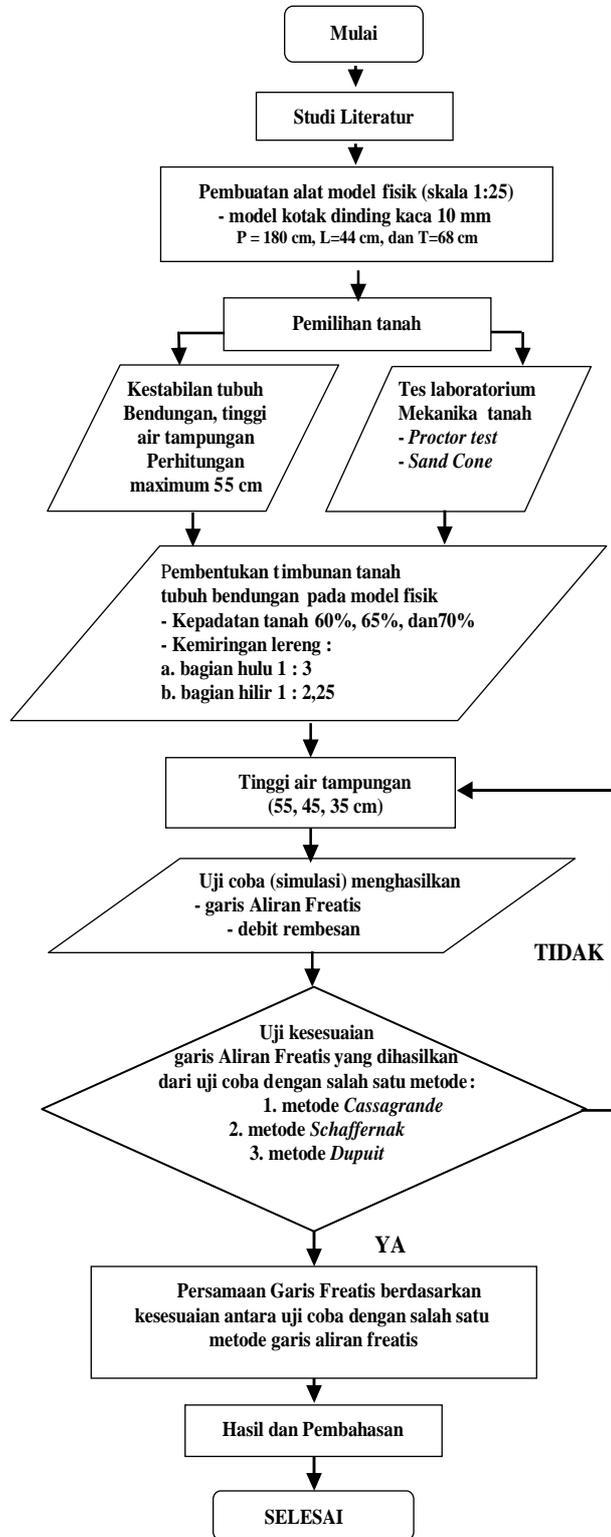
a. Uji pemadatan tanah

Uji pemadatan tanah dilakukan pada Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala dengan uji *Proctor* dan di lapangan dengan uji *Sand Cone*.

b. Uji permeabilitas dengan tinggi energi turun (*Falling-head*)

Pada uji permeabilitas *falling head*, tanah benda uji dimasukkan di dalam tabung. Pipa pengukur didirikan di

atas benda uji. Air dituangkan melalui pipa pengukur dan dibiarkan mengalir melewati benda uji. Ketinggian air pada awal pengujian (h_1) pada saat waktu $t_1= 0$ dicatat. Pada waktu tertentu (t_2) setelah pengujian berlangsung, muka air menjadi h_2 .

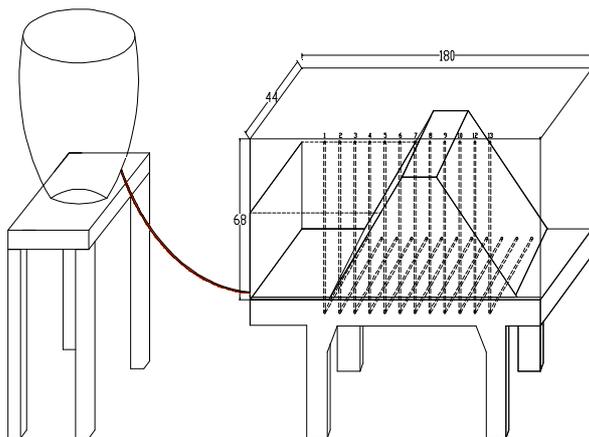


Gambar 2. Bagan alir metode penelitian

c. Pembuatan model

Pada penelitian ini digunakan model dengan tubuh bendungan tipe urugan homogen menggunakan tanah lempung kekuning-kuningan. Model fisik yang dirancang pada penelitian ini merujuk pada penelitian Kusnan (2008). Kemiringan lereng sesuai dengan referensi yaitu bagian hulu 1 : 3 dan kemiringan lereng bagian hilir 1 : 2,25 dan memiliki permeabilitas sebesar $4,9 \times 10^{-7}$ cm/det.

Pada saat pembentukan, tanah dipadatkan dengan menggunakan balok kayu seberat 3 kg. Tanah dipadatkan per lapisan (10 cm per lapisan) dengan jumlah tumbukan yang bervariasi berdasarkan tingkat kepadatan tanah. Untuk tanah dengan kepadatan 60% ditumbuk sebanyak 5 kali ditempat yang sama dan dengan tinggi jatuh yang sama. Pada tingkat kepadatan 65% tanah ditumbuk sebanyak 10 kali, sedangkan untuk kepadatan tanah 70% tanah ditumbuk sebanyak 15 kali di tempat yang sama dengan tinggi jatuh yang sama. Sketsa model bendungan dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Sketsa model tubuh bendungan

Pembuatan model dilakukan sebagai berikut:

- Pengadaan bahan penelitian meliputi air, tanah, pasir, karet, dan aspal.
- Persiapan peralatan yang digunakan pada penelitian yaitu berupa bejana kaca sebagai alat model fisik dengan ketebalan 10 mm dan ukuran panjang, lebar, dan tinggi wadah yaitu 180 cm x 44 cm x 68 cm.
- Selang-selang yang berfungsi sebagai pizometer dipasang pada dinding arah memanjang kaca. Jumlah yang dipasang sebanyak 9 selang dengan jarak setiap selang 10 cm.
- Bahan-bahan berupa pasir, karet, dan aspal dihamparkan sebagai dasar bejana alat model fisik.

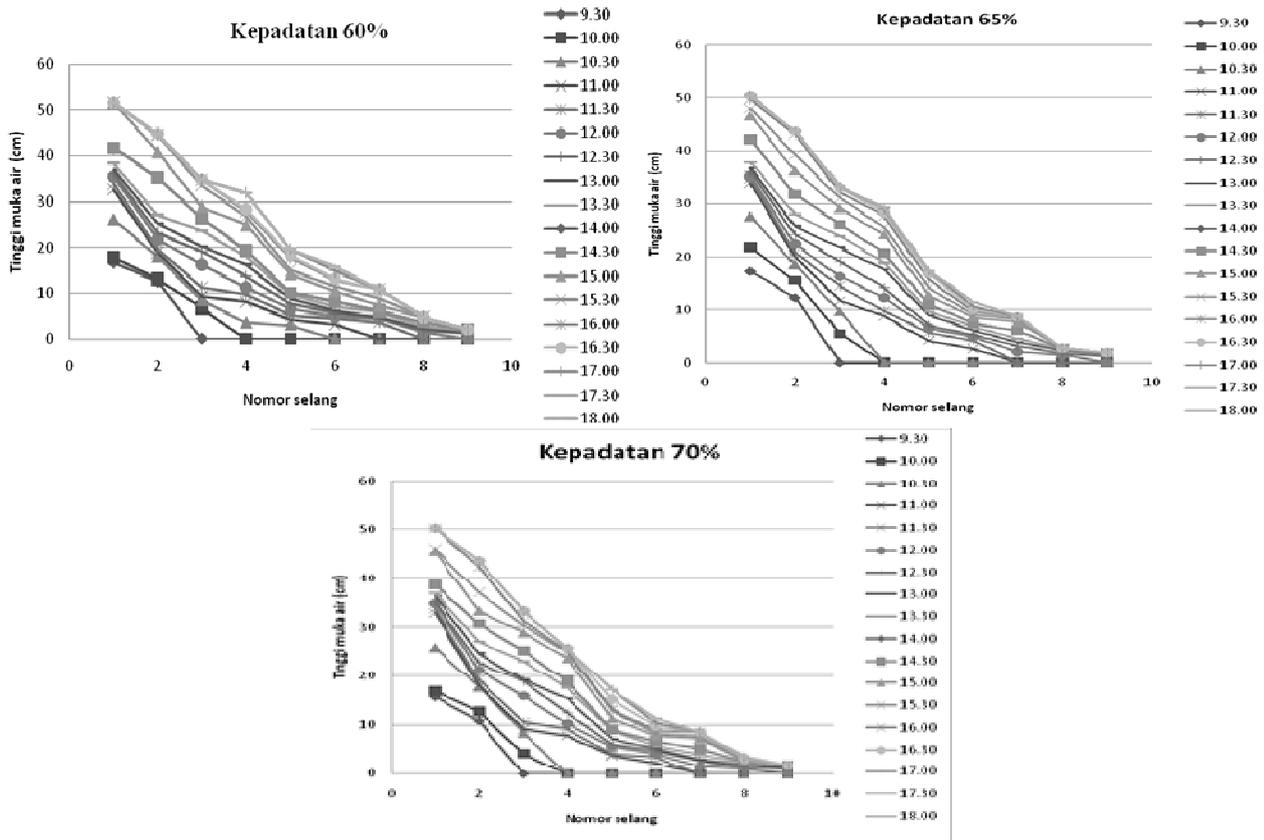
- Tanah ditimbun per lapisan dengan tinggi 10 cm dan ditumbuk dengan menggunakan balok seberat 3 kg sesuai dengan kepadatan. Tanah ditimbun hingga membentuk trapesium dengan lebar 44 cm, panjang 134,4 cm, dan tinggi 68 cm. Pembentukan tubuh bendung tersebut berdasarkan variasi kepadatan tanah yang direncanakan.
- Air diisi pada bagian hulu tubuh bendungan sebagai daerah genangan dengan variasi tinggi muka air 35 cm, 45 cm, dan maksimum 55 cm.
- Pengamatan garis aliran pada tubuh bendungan diamati melalui selang yang dipasang pada kaca. Kenaikan air pada selang dilakukan tiap 30 menit selama 8,5 jam sampai aliran konstan dan diperoleh debit rembesan dari tubuh bendungan.
- Observasi dilakukan sebanyak 9 kali dengan variasi tingkat kepadatan tanah yaitu 60%, 65%, dan 70%, serta variasi tinggi air tampungan 35 cm, 45 cm, dan 55 cm.
- Debit observasi yang ditampung di dalam gelas ukur dibandingkan dengan debit hasil analitis dari perhitungan sebagai kalibrasi model alat uji fisik.

5. Hasil dan Pembahasan

5.1 Pola aliran garis freatis

Pola aliran garis freatis dengan tingkat kepadatan tanah diamati dengan 3 variasi tinggi air tampungan, yaitu 35 cm, 45 cm, dan 55 cm. Pada masing-masing tinggi air tampungan, terjadi perbedaan bentuk pola aliran, hal ini disebabkan karena besarnya tekanan yang terjadi berbeda yang disebabkan oleh pengaruh tinggi air tampungan tersebut. Dari ketiga variasi tersebut, hanya tinggi air maksimum 55 cm yang dapat memenuhi salah satu teori garis aliran rembesan, yaitu Metode Cassagrande karena garis aliran yang terbentuk memenuhi persyaratan dari metode tersebut. Grafik kenaikan air pada selang dengan interval waktu 30 menit pada tinggi tampungan 55 cm untuk masing-masing kepadatan diberikan pada **Gambar 4**.

Garis aliran mulai melengkung pada selang pengamatan pertama dan memotong tubuh bendungan bagian hilir. Pada tinggi tampungan 35 cm dan 45 cm tidak ada metode yang memenuhi, hal ini disebabkan oleh garis aliran yang tidak sampai pada tubuh bendung bagian hilir. Keterbatasan lamanya waktu pengamatan menjadi salah satu penyebab hal tersebut. Bila waktu pengamatan diperpanjang, diyakini bahwa akan terdapat debit rembesan pada kaki hilir bendungan baik pada tinggi tampungan 35 cm maupun 45 cm. Pada penelitian ini kenaikan air pada selang diamati selama 8,5 jam sampai aliran konstan dan diperoleh debit rembesan dari tubuh bendungan.



Gambar 4. Grafik kenaikan air pada pizometer dengan kepadatan tanah yang berbeda (H=55 cm)

Hasil yang diperoleh berupa sketsa gambar terjadinya rembesan dalam tubuh bendungan. Pola aliran dengan tingkat kepadatan tanah 60%, 65%, dan 70% diamati dengan 3 variasi tinggi air tampungan, yaitu 35 cm, 45 cm, dan 55 cm. Selengkapnya pola aliran dan bentuk gradien hidrolik dari masing-masing sudut dapat dilihat pada Gambar 5, 6, dan 7.

Dari ketiga variasi tersebut, hanya tinggi air maksimum 55 cm yang dapat memenuhi salah satu teori garis aliran rembesan, yaitu metode Cassagrande. Dalam metode Cassagrande harus memenuhi persyaratan garis aliran yang terbentuk mulai melengkung pada selang pengamatan pertama dan memotong tubuh bendungan bagian hilir. Hal ini disebabkan karena garis aliran yang tidak sampai pada tubuh bendung bagian. Dari ketiga garis freatis, aliran air pada tubuh bendungan mulai konstan pada pukul 15.00 WIB. Uji model tubuh bendungan ini dilakukan mulai pukul 9.30 pagi sampai 18.00. Keterbatasan lamanya waktu pengamatan menjadi salah satu penyebab hal tersebut.

Dari grafik hubungan antara tinggi muka air tampungan dan jarak, maka diperoleh gradient hidrolik garis freatis dengan masing-masing tingkat kepadatan tanah 60%, 65%, dan 70% adalah 6,3733, 4067, dan pada kepadatan tanah 70% adalah sebesar 6,295.

5.2 Debit rembesan

Besarnya debit yang terjadi dihitung dengan langkah perhitungan metode Cassagrande, yang merupakan teori yang memenuhi garis aliran freatis yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Besarnya debit analitis dan debit observasi diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Debit rembesan analitis dan observasi

Q (cm ³ /detik)	h (cm)	R= 60%	R= 65%	R= 70%
Analitis	35	-	-	-
Observasi		-	-	-
Analitis	45	-	-	-
Observasi		-	-	-
Analitis	55	6,15x10 ⁻⁶	5,81x10 ⁻⁶	5,37x10 ⁻⁶
Observasi		8,07x10 ⁻⁶	7,80x10 ⁻⁶	7,21x10 ⁻⁶

Dari hasil analitis dan observasi, rembesan yang paling besar terjadi pada tingkat kepadatan tanah 60% dengan tinggi air tampungan 55 cm, sedangkan rembesan terkecil terjadi pada tanah dengan tingkat kepadatan 70%. Besarnya rembesan yang terjadi dipengaruhi oleh tingkat kepadatan tanah, tinggi air tampungan, dan juga tinggi dari tubuh bendungan itu sendiri.

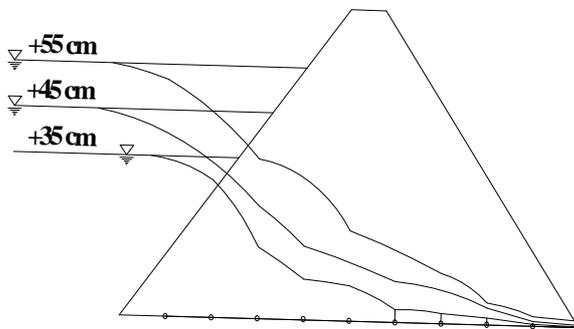
Tanah dengan kadar air yang optimum jika ditambah kepadatannya menghasilkan rembesan yang kecil, hal ini disebabkan karena angka pori dari tanah tersebut semakin berkurang, sehingga mempertinggi kuat geser tanah dari tubuh bendungan itu sendiri. Semakin tinggi tingkat kepadatan tanah, maka semakin kecil nilai koefisien permeabilitas dan debit rembesan yang dihasilkan. Dengan hasil yang telah didapatkan pada penelitian ini, maka tingkat kepadatan tanah terbaik untuk debit rembesan terkecil terjadi pada tingkat kepadatan tanah 70%.

5.3 Kalibrasi pemodelan

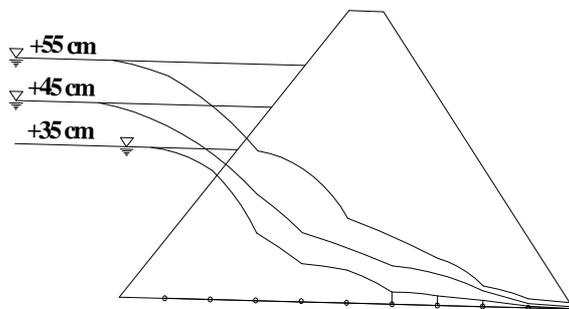
Debit yang didapatkan dari perhitungan berbeda dari debit yang dihasilkan dari penelitian. Debit yang

didapatkan dari perhitungan lebih kecil dari debit hasil penelitian. Hubungan antara debit analitis dengan debit observasi dapat dilihat pada **Gambar 8**.

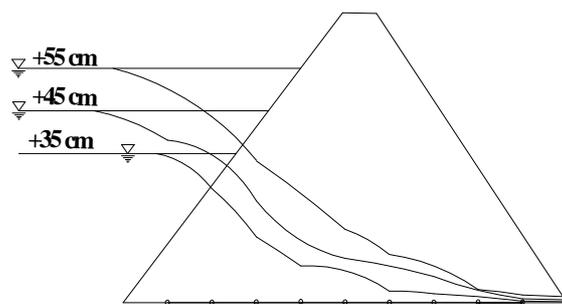
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa perbandingan hasil debit analitis dengan debit observasi memiliki *trend* yang sama walaupun hasil yang didapatkan sedikit berbeda. Perbedaan tersebut dikarenakan karena peralatan yang digunakan dalam penelitian ini masih memiliki kekurangan dalam ketelitian. Grafik kalibrasi pemodelan dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 5. Pola aliran dengan tingkat kepadatan tanah 60%

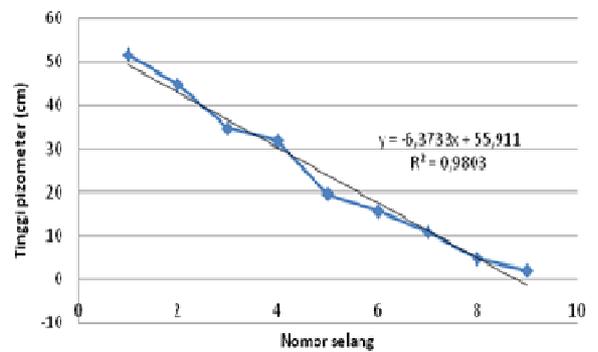


Gambar 6. Pola aliran dengan tingkat kepadatan tanah 65%

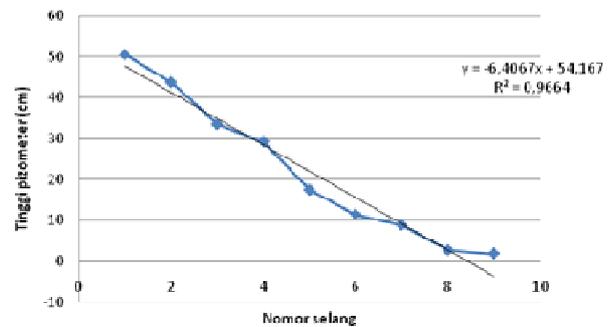


Gambar 7. Pola aliran dengan tingkat kepadatan tanah 70%

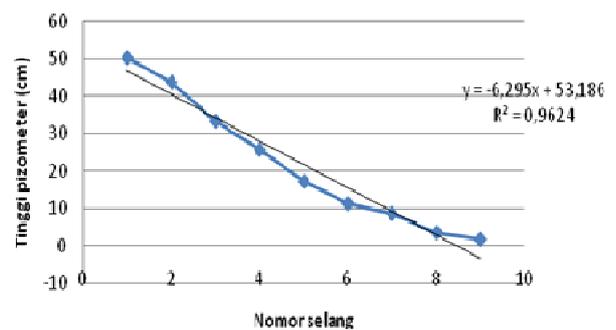
Gradien hidrolik

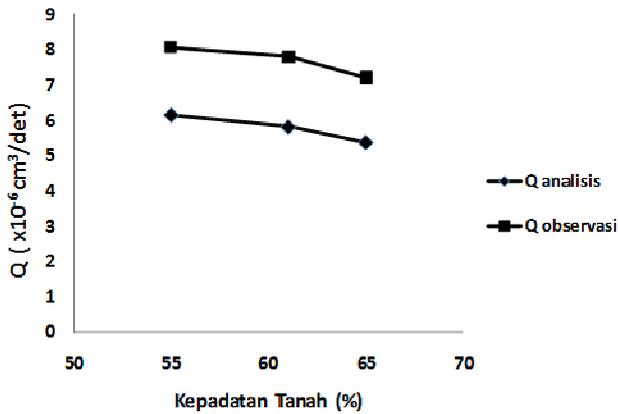


Gradien hidrolik

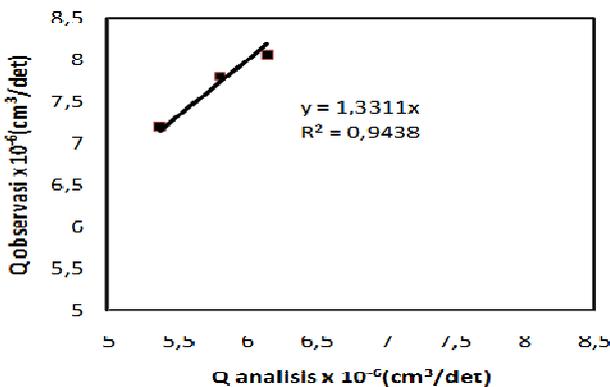


Gradien hidrolik





Gambar 8. Grafik hubungan antara debit analitis dengan debit observasi



Gambar 9. Grafik kalibrasi pemodelan

Pada grafik tersebut terlihat bahwa debit observasi melalui uji model fisik lebih besar dari debit hasil analitis. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu kepadatan tanah yang belum memenuhi standar, ketepatan alat, dan lamanya waktu pengamatan. Namun pola aliran dan debit rembesan yang diperoleh dari hasil observasi telah sesuai dengan *trend* analitis. Uji kedekatan atau kecocokan data hasil analitis dan observasi dengan menggunakan fungsi objektif atau fungsi kesalahan menghasilkan nilai Kesalahan Absolut Rata-rata (KAR) sebesar 0,25. Hal ini memberikan informasi bahwa estimasi ketelitian penelitian yang merupakan faktor dari kepadatan tanah, ketepatan alat, dan lamanya waktu pengamatan adalah sebesar 0,75.

6. Kesimpulan

1. Dari hasil penelitian, tingkat kepadatan tanah tubuh bendungan yang menghasilkan rembesan terkecil yaitu kepadatan 70%. Semakin tinggi tingkat kepadatan pada tubuh bendungan, maka semakin kecil rembesan yang terjadi. Hal ini disebabkan karena semakin padat timbunan tanah, maka semakin kecil rongga pori dari tanah tersebut sehingga menghambat atau memperlambat jalannya air dari tanah itu sendiri dan juga kuat geser tanah semakin besar.

2. Sebaliknya, semakin kecil tingkat kepadatan tanah semakin besar debit rembesan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena butiran tanah memiliki rongga yang mudah dilalui oleh air, sehingga mempercepat terjadinya rembesan air yang melalui tubuh bendungan. Dengan demikian, tingkat kepadatan tanah sangat mempengaruhi besar kecilnya debit rembesan yang terjadi. Untuk pengelolaan (*management*) debit rembesan yang terjadi dengan membangun konstruksi drainase pada kaki bendungan. Hal ini memiliki keuntungan secara konstruksi yang berimbang pada faktor finansial. Karena konstruksi drainase yang diperlukan pada kaki bendungan tidak terlalu besar, namun cukup efisien dan efektif dalam pengelolaannya.

Daftar Pustaka

- Adidarma W.K., Hadihardaja I.K, Sri L., 2004, Perbandingan Pemodelan Hujan-Limpasan Antara Artificial Neural Network (ANN) dan NRECA, Bandung: *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 11, 105 -115.
- Anonim, 2011, *SMALL DAMS Design*, Surveillance and Rehabilitation, CIGB ICOLD bulletin.
- Bowles, J.E., 1993, *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) terjemahan J.K. Hainim*, Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Chen, F.W, and Baladi, G.Y., 1985, *Soil Plasticity: Theory and Implementation (Developments in Geotechnical Engineering)*, USA: Elsevier Science Publishers.
- Das, B.M., 1995, *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik)*, Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hardiyatmo, H.C., 2006, *Mekanika Tanah 1*, Edisi Ke-4. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Kusnan, 2008, Kalibrasi Alat model Fisik Formulasi GAF (Garis Aliran Filtrasi) di Timbunan Tubuh Bendungan Homogen, *Jurnal Agritek*, Vol. 16 No. 9, halaman 1709-1721.
- Wesley, D.L., 2012, *Mekanika Tanah*, Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Noori, M.A.B and Khaleel S.I., 2011, *Evaluation of Seepage and Stability of Duhok Dam*, Al-Rafidain Engineering, Vol.19 No.1, p. 42-58.