



JURNAL RONA TEKNIK PERTANIAN

ISSN : 2085-2614

JOURNAL HOMEPAGE : <http://www.jurnal.unsyiah.ac.id/RTP>



Analisa Pola Penyebaran Aliran Air Tanah Pada Model Tanggul

Fitri Herawaty¹⁾, Mustafiril¹⁾, Dewi Sri Jayanti¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala

Email : herawatyfitri@yahoo.com

Abstrak

Rembesan merupakan salah satu masalah yang sering terjadi pada tanggul. Besarnya rembesan sangat dipengaruhi oleh sifat permeabilitas tanah. Permeabilitas tanah akan menurun dengan meningkatnya kadar air dalam tanah. Rembesan yang terjadi pada tanggul akan membentuk suatu pola aliran air di dalam tubuh tanggul. Rembesan air akan berjalan sejajar dengan garis muka air tanah sehingga garis rembesan juga merupakan garis aliran. Sehingga garis-garis equipotensial akan memotong garis rembesan ini sehingga jarak vertikal antara perpotongan adalah sama. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai debit rembesan berdasarkan rumus empiris jauh lebih kecil dibandingkan dengan metode pengukuran langsung dan program *SEEP/W*. Hal ini disebabkan karena pada metode empiris selain faktor permeabilitas dan dimensi tanggul, juga dipengaruhi oleh panjang zona basah. Sebaliknya, pada pengukuran secara langsung dan metode analisis dengan program *SEEP/W*, debit rembesan hanya dipengaruhi oleh nilai permeabilitas, tinggi muka air dan dimensi tanggul, sedangkan panjang zona basah tidak berpengaruh

Kata kunci : Tanggul, Pemadatan Tanah, Rembesan, Garis Freatik, Debit Rembesan

Analyses of Spreading Seepage Pattern on Embankment Model

Fitri Herawaty¹⁾, Mustafiril¹⁾, Dewi Sri Jayanti¹⁾

¹⁾ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Syiah Kuala University

Email : herawatyfitri@yahoo.com

Abstract

Seepage are one problem that often occurs in the embankment. The magnitude of seepage is greatly influenced by the soil permeability characteristic. Soil permeability would decreased with increasing water content in the soil. Seepage that occurs in embankments would form a pattern of water flow inside the embankment. Seepage water will run parallel with the water levels line so that seepage is also a flow line. So that the equipotential lines will cut the line permeability so that the vertical distance between the intersections is the same. The results obtained indicate that the seepage discharge based on empirical formula smaller than the direct measurement method and program *SEEP/W*. This is due because of at the empirical method besides permeability and embankment dimension, also influenced by length of wet zone. In contrast, the direct measurement and analysis methods with the program *SEEP/W*, seepage discharge is only affected by the value of the permeability, water levels and embankment dimensions, while the length of wet zone does not effect.

Keywords: Embankment, Soil Compaction, Seepage, Phreatic Line, Seepage Discharge

PENDAHULUAN

Air merupakan unsur yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan manusia. Bahkan dapat dipastikan tanpa pengembangan sumberdaya air secara konsisten peradaban manusia tidak akan mencapai tingkat yang dinikmati sampai saat ini. Pertambahan penduduk dan ekonomi telah meningkatkan kebutuhan air baik jumlahnya maupun kualitasnya. Persoalan air, sumber air dan ketersediaan air merupakan persoalan bersama karena menyangkut masa depan seluruh kehidupan termasuk kehidupan umat manusia. Dalam melakukan pengelolaan air dan sumber air, harus dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan berbagai kepentingan dan berwawasan lingkungan. Untuk itu perlu adanya pembangunan bendungan sebagai salah satu cara mengatasi kekurangan air.

Peran bendungan ialah untuk penyediaan air irigasi yang sangat vital bagi masyarakat, terutama pada saat musim tanam kedua dan seterusnya. Bendungan juga merupakan pengendali banjir yang efektif, serta penyedia air baku untuk rumah tangga, perkotaan dan juga industri. Disamping manfaat dari bendungan juga terdapat beberapa resiko adanya bendungan seperti erosi dan longsor. Salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan membangun tanggul yang berfungsi untuk melindungi daerah irigasi dari banjir yang disebabkan oleh sungai, menahan rembesan, dan menyangga aliran.

Tanggul selalu menghadapi masalah stabilitas tubuh tanggul. Hal ini disebabkan karena hampir seluruh tubuh tanggul terletak di bawah garis rembesan (*seepage line*). Dalam pembuatan tanggul untuk meningkatkan stabilitas maka bahan untuk tubuh tanggul harus dipadatkan. Agar diperoleh tingkat kepadatan yang maksimum maka pemadatan bahan tanggul dilakukan pada saat kadar air optimum. Apabila garis rembesan memotong lereng hilir suatu tanggul maka akan terjadi aliran-aliran rembesan keluar menuju permukaan lereng tersebut terlihat gejala keruntuhan dan longsoran kecil pada permukaan lereng hilir (Sosrodarsono dan Takeda, 1977).

Rembesan air di dalam tubuh tanggul merupakan persoalan yang serius. Dikarenakan sumber utama kehilangan air irigasi pada saluran tanah adalah melalui rembesan pada dasar saluran dan tanggul saluran. Menurut Wesley (1977), permeabilitas atau daya rembesan adalah kemampuan tanah untuk dapat melewatkan air. Air yang dapat melewati tanah hampir selalu berjalan lancar, yaitu jalan atau garis yang ditempuh air merupakan garis dengan bentuk yang teratur (*smooth curve*).

Dengan adanya aliran air atau garis rembesan pada tubuh tanggul, akan menyebabkan naiknya tekanan air pori sehingga mengakibatkan menurunnya kekuatan geser tanah dan butir-butir kecil dari tanah akan hanyut sehingga erosi yang makin lama makin besar dan

biasanya terjadi dalam waktu yang sangat cepat (gejala *piping*). Oleh karena itu diperlukan suatu penelitian untuk menganalisis debit aliran dan penyebaran aliran air pada model tanggul. Hasil penelitian tersebut diharapkan dapat bermanfaat untuk menjelaskan proses penyebaran aliran air pada tubuh tanggul.

METODE PENELITIAN

1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Tanah dan Air Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, dan Laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala. Waktu penelitian dari September 2013 s/d Januari 2014.

2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan antara lain: cangkul dan sekop untuk pengambilan sampel tanah; saringan, oven, cawan, wadah pengaduk, pengaduk, gelas ukur dan *ring sample* untuk analisis sifat fisik dan mekanik tanah; *Proctor*, *rammer*, *mold* untuk pemadatan tanah serta perlengkapan lainnya.

Bahan yang digunakan adalah Tanah Latosol yang berasal dari Gampong Aneuk Galong Titi Kecamatan Suka Makmur Kabupaten Aceh Besar; *acrylic*, lem *acrylic*, pipa, selang, besi siku, bambu dan air destilasi, larutan H_2O_2 , dan sodium silikat.

3. Metode Penelitian

Untuk bahan timbunan model tanggul digunakan contoh tanah tidak utuh (terganggu). Contoh tanah tersebut diambil menggunakan cangkul pada kedalaman 20 - 40 cm, kemudian tanah dikeringkan dengan cara dianginkan agar kadar airnya berkurang sehingga memudahkan dalam pengayakan. Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah meliputi uji tekstur tanah dengan ASTM D1140-54, kadar air dengan ASTM D2216-71, permeabilitas tanah dengan ASTM D2434-68, berat jenis tanah dengan ASTM D854, uji konsistensi tanah dengan ASTM D4318, serta uji pemadatan tanah dengan *Proctor* ASTM D698-70.

a. Pengukuran Kadar Air

Pengukuran kadar air (Sapei, dkk., 1990) dihitung dengan persamaan berikut :

$$W = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

b. Permeabilitas Tanah

Koefisien permeabilitas tanah dengan persamaan (Sapei, dkk., 1990) :

$$K_T = 2.3 \times \left[\frac{a \cdot l}{AT} \right] \log \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (2)$$

Pengukuran nilai permeabilitas dilakukan dua kali pada bahan tanah utuh, yaitu sebelum model tanggul dibuat dan setelah model tanggul dibuat.

c. Indeks plastisitas (*Plasticity Indeks/PI*)

Indeks plastisitas adalah selisih dari batas cair dan batas plastis (Hardjowigeno, 2003):

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots (3)$$

d. Uji Pemadatan Tanah

Uji pemadatan tanah dapat dilakukan dengan uji tumbuk manual yang dilaksanakan untuk menentukan nilai ρ_d (berat isi kering) dari pemadatan di lapangan pada proses pemadatan tanggul. Nilai ρ_d dihitung untuk menentukan kadar air tanah berdasarkan kepadatan relatif (RC) yang didefinisikan (Bowles, 1993):

$$RC = \frac{\text{berat isi kering di lapangan}}{\text{berat isi kering maks percobaan di lab}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

Uji tumbuk manual dilakukan untuk mendapatkan *ratio compaction* (RC) > 90%. Tanah dipadatkan menggunakan alat tumbuk manual yang mempunyai berat, tinggi jatuh, jumlah tumbukan, jumlah lapisan, dan energi serta frekuensi penumbukan yang ada telah diperhitungkan sehingga jumlah tumbukan (besarnya energi yang diberikan) menunjukkan kepadatan maksimum dan kadar air optimum bahan tersebut.

e. Garis Aliran (*Freatik*)

Panjang zona basah a bisa dihitung dengan rumus berikut (Casagrande, 1973 dalam Hardiyatmo, 2002) :

$$y = \sqrt{(d^2 + H^2)} - \sqrt{(d^2 - H^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha)} \dots\dots\dots (5)$$

Karena garis freatik merupakan parabola, maka dapat digunakan persamaan berikut (Sosrodarsono dan Takeda, 1977) :

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \text{ atau } y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \dots (6)$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \dots\dots\dots (7)$$

f. Debit rembesan

Debit rembesan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Casagrande, 1973 dalam Hardiyatmo, 2002) :

$$q = k a \sin^2 \alpha \dots\dots\dots (8)$$

g. Muka Air Tanah

Untuk membantu memantau aliran air digunakan selang-selang transparan yang dipasang di bagian samping kotak tanggul. Untuk memantau ketinggian muka air di dalam tubuh tanggul digunakan alat AWLR yang diletakkan di tengah tubuh tanggul. Kondisi muka air tanah menggunakan persamaan berikut (Verruijt, 1970):

$$h = H_1^2 - (H_1^2 - H_2^2) \frac{x}{L} + \frac{R}{k} x (L - x) \dots\dots\dots (9)$$

h. Kapasitas Aliran Filtrasi

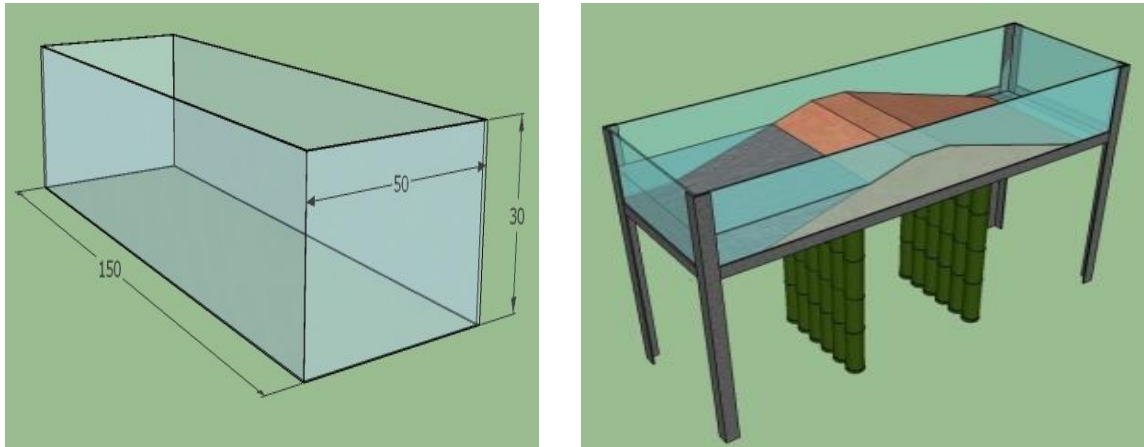
Memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh tanggul dan pondasi bendungan didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi, dapat dihitung dengan rumus berikut (Sosrodarsono dan Takeda, 1977) :

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} K.H.L \dots\dots\dots(10)$$

4. Pembuatan Model Tanggul

Model tanggul dibuat dalam sebuah kotak model yang terbuat dari bahan *acrylic* dengan kerangka besi. Kotak model ini dilengkapi dengan *inlet*, *spillway* sebagai kontrol ketinggian, dan *outlet* untuk pembuangan rembesan air. Ukuran kotak model tanggul berdasarkan ukuran tanggul yang direncanakan dengan skala 1 : 12. Kotak model tanggul yang digunakan berukuran panjang 150 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 30 cm. Tanah dipadatkan menggunakan *rammer* dengan jumlah tumbukan, jumlah lapisan, dan tinggi jatuhnya berdasarkan uji tumbuk manual. Jumlah tumbukan tiap lapisan adalah (Jayadi, 2009) :

$$N_{\text{model}} = \frac{\text{Luas lapisan ke-n}}{\text{Luas kotak tumbuk manual}} \times N_{\text{box}} \dots\dots\dots (11)$$



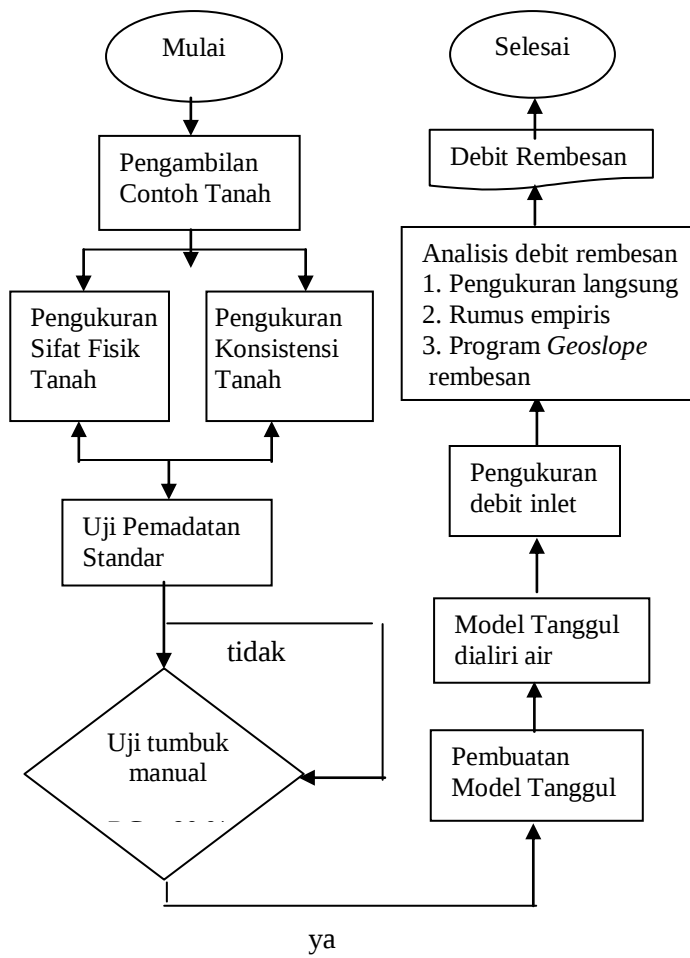
Gambar 1. Kotak Model Tanggul

Dimensi tanggul yang dirancang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Tanggul

Spesifikasi	Dimensi	
	Model (cm)	Sebenarnya (cm)
H (Tinggi muka air)	12,5	150
H _f (Tinggi jagaan)	5,0	60
H _d (Tinggi tanggul)	17,5	210
B (Lebar puncak atas/mercu)	12,5	150
L (Lebar bagian bawah tanggul)	140,0	1680
H _p (Tinggi muka air dasar saluran)	15	180
Kemiringan	1 : 3	1 : 3

Sumber : Soedibyo (1993) dalam Idhkam (2005)



Gambar 2. Flowchart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Sifat Fisika dan Mekanik Tanah

Berdasarkan hasil Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala (2013), beberapa sifat fisika dan mekanik sampel tanah Latosol yang berasal dari Gampong Aneuk Galong Titi Kecamatan Suka Makmur Kabupaten Aceh Besar pada kedalaman 20 cm sampai 40 cm dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat fisika dan mekanik tanah Latosol Kec. Suka Makmur, Kab. Aceh Besar dan Tanah Latosol Dermaga, Bogor

Parameter	Nilai	
	Herlina (2003) dalam Idkham (2005)	Hasil Analisis
Sifat Fisika		
Berat jenis tanah (gr/cm^3)	2,64	2,736
Fraksi liat (%)	62,13	98,400
Fraksi kerikil (%), debu (%)	12,94	0,000
Fraksi pasir (%)	24,93	1,600
Permeabilitas tanah (cm/detik)	$4,28 \times 10^{-6}$	$1,33 \times 10^{-7}$
Angka pori (e)	0,61	1,101
Porositas (n)	1,55	0,524
Sifat Mekanik		
Batas cair (LL) (%)	61,42	56,93
Batas plastis (PL) (%)	41,36	32,23
Indeks plastisitas (PI) (%)	20,06	24,69
Kadar air (%)	33,5	26,40
Berat isi kering (gr/cm^3)	1,30	1,49

Sumber : Hasil Analisis Herlina (2003) dalam Idkham (2005) dan Analisis Laboratorium Mekanika Tanah (2013)

2. Pemadatan Tanah

Seperti yang terlihat pada Tabel 1, dengan kadar air *Proctor* adalah 26,40% dengan berat isi kering tanah $1,49 \text{ gr/cm}^3$ maka dapat dikatakan bahwa pada usaha pemadatan tersebut kadar air optimum yang digunakan dalam pemadatan adalah 26,40% dengan berat isi kering $1,49 \text{ gr/cm}^3$ sebagai acuan untuk melakukan pemadatan di dalam model tanggul dengan RC di atas 90%.

Untuk mengisi model tanggul dengan panjang 150 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 2,50 cm adalah 48,53 kg. Kadar air udara tanah diperoleh 5,70%, kadar air ini sangat kecil dibandingkan dengan kadar air optimum tanah pada uji pemadatan di laboratorium sebesar 26,40% yang dibutuhkan untuk melakukan pemadatan di dalam model. Maka diperlukan

penambahan air pada tanah dengan penyemprotan sehingga mencapai kadar air optimum yaitu 10 liter.

3. Permeabilitas Tanah

Dari hasil uji permeabilitas tanah sebelum tanggul dialiri air lebih besar dari nilai permeabilitas tanah sesudah dialiri air yaitu $9,72 \times 10^{-8}$ cm/s lebih besar dari $7,96 \times 10^{-8}$ cm/s. Permeabilitas tanah akan berkurang dengan meningkatnya kadar air dalam tanah (Baver, 1969). Berdasarkan klasifikasi permeabilitas menurut Sitorus (1980), tanah sebelum tanggul dialiri air termasuk ke dalam permeabilitas sangat rendah karena memiliki permeabilitas kurang dari 0,125 cm/jam yaitu sebesar $9,72 \times 10^{-8}$ cm/s (0,00034 cm/jam).

Semakin besar nilai permeabilitas suatu tanah, maka kemampuan tanah untuk dilalui air atau kecepatan Bergeraknya semakin besar/cepat. Sebaliknya, jika nilai permeabilitas tanah semakin rendah maka kemampuan tanah untuk dilalui air atau kecepatan Bergeraknya semakin kecil/lambat.

4. Garis Aliran (*Freatic Line*)

Pendugaan garis freatik pada penelitian ini dilakukan dengan tiga metode, yaitu :

a. Garis aliran berdasarkan model tanggul

Pengamatan langsung terhadap model tanggul untuk mempermudah dalam mempelajari teori garis aliran pada tubuh tanggul. Kelebihan yang diperoleh dari penggunaan model ini yaitu dapat menggambarkan batas atas dari rembesan sehingga garis aliran yang terjadi dapat diperoleh secara lebih tepat untuk menggambarkan kondisi yang sesungguhnya di lapangan (Jumikis, 1962).



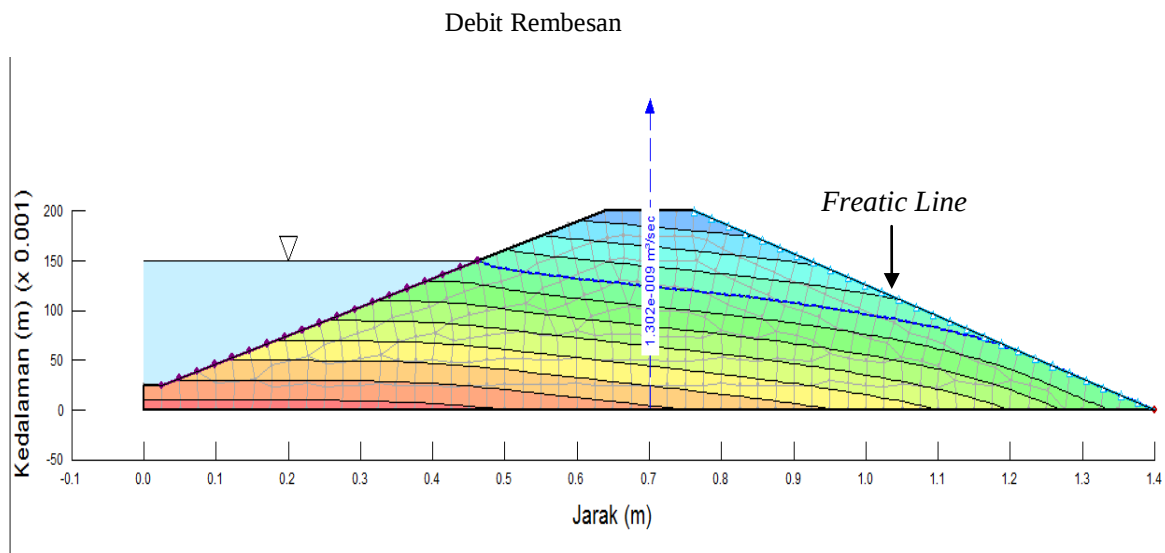
Gambar 3. Zona basah tampak atas

b. Garis aliran berdasarkan analisis grafis

Penggambaran dengan metode grafis dilakukan berdasarkan Gambar 4.3 sedangkan nilai H , β , dan S ditentukan berdasarkan dimensi tanggul. Dengan nilai-nilai tersebut, dapat dihitung panjang zona basah a dengan persamaan. Casagrande (1973). Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai a sebesar 6,94 cm. Nilai a sebesar 6,94 cm menunjukkan titik perpotongan antara garis aliran dengan muka tanggul dibagian hilir. Nilai ini juga dapat diartikan bahwa permulaan aliran air yang keluar dari tubuh tanggul terletak pada jarak 6,94 cm dari ujung bawah permukaan tanggul bagian hilir.

c. Garis aliran berdasarkan *Geoslope (SEEP/W)*

Untuk menggambarkan garis aliran (*freatic line*) dan hal lainnya yang berhubungan dengan rembesan, maka program yang digunakan adalah *SEEP/W*. Penggambaran garis aliran dengan program ini juga memperhitungkan sifat fisik tanah.



Gambar 4. Pola penyebaran aliran air dengan *Geoslope*

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa garis freatik yang memotong tubuh garis tanggul di hulu dan memotong garis tanggul di hilir dengan panjang sebesar a dari ujung bawah tanggul bagian hilir. Panjang a adalah selisih koordinat 1 dan koordinat 2 (Idkham, 2005). Koordinat 1 adalah (1,1863 m; 0,0646 m) dan koordinat 2 adalah (1,40 m; 0,0 m). Sehingga panjang a adalah $\sqrt{(1,40 - 1,1863)^2 + (0,0646 - 0)^2} = 0,2232 \text{ m} = 22,32 \text{ cm}$.

Dari ketiga metode tersebut panjang zona basah berdasarkan analisis grafis merupakan yang terkecil yaitu 6,94 jika dibandingkan berdasarkan pengamatan langsung maupun dengan

program *Geoslope* (*SEEP/W*). Hal ini terjadi karena metode analisis grafis hanya dipengaruhi oleh dimensi tanggul dan tidak memperhitungkan faktor permeabilitas tanah.

5. Pola Penyebaran Aliran Air

Rembesan air dalam tanah hampir selalu berjalan secara linear yaitu garis yang ditempuh air merupakan garis dengan bentuk yang teratur (*smooth curve*). Pola penyebaran aliran air tanah dilakukan dengan menggunakan dua metode yaitu metode pengamatan langsung dan *Geoslope* (*SEEP/W*). Setelah tanggul digenangi air maka proses pengaliran air akan diamati dengan bantuan selang-selang transparan yang terdapat pada sisi samping tubuh tanggul.

Menurut Wesley (1977), permukaan rembesan adalah suatu permukaan dimana air merembes keluar pada permukaan tanah. Karena air keluar maka permukaan ini tidak merupakan aliran. Sedangkan garis rembesan adalah batas paling atas dari daerah dimana rembesan berjalan. Jadi sebenarnya garis rembesan adalah sama dengan muka air tanah. Rembesan air berjalan sejajar dengan garis ini sehingga garis rembesan juga merupakan garis aliran. Sehingga garis-garis equipotensial akan memotong garis rembesan ini dengan cara sedemikian sehingga jarak vertikal antara perpotongan adalah sama seperti terlihat pada Gambar 4.

6. Debit Rembesan

a. Debit rembesan berdasarkan pengamatan terhadap model tanggul

Besarnya volume air yang ditambahkan untuk ketinggian muka air 12,5 cm adalah 13,3 L pada pukul 14.39 WIB tanggal 8 Januari 2014. Ketinggian air dipertahankan tetap pada ketinggian 12,5 cm, dengan penambahan air apabila ketinggian air telah kurang dari 12,5 cm tersebut. Besarnya debit rata-rata *inlet* $5,37 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Sedangkan untuk pengukuran besarnya volume *outlet* dilakukan pengukuran setiap 1 jam melalui lubang 1 dan lubang 3. Adapun besarnya debit *outlet* rata-rata untuk lubang 1 adalah sebesar $1,13 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ sedangkan besarnya debit *outlet* rata-rata untuk lubang 3 adalah sebesar $9,60 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$. Dengan total debit *outlet* rata-rata untuk lubang 1 dan lubang 3 adalah $1,04 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$. Debit rembesan yang diukur merupakan rembesan air yang keluar melalui tubuh tanggul dan rembesan yang melalui bagian bawah tanggul.

b. Debit rembesan berdasarkan rumus empiris

Berdasarkan hasil perhitungan pada ketiga cara ini, cara Casagrande dan cara Grafik yang memiliki debit rembesan yang mendekati sama, sedangkan cara Bowles hasil debit rembesan lebih besar dari kedua cara tersebut. Hal ini dipengaruhi oleh besar zona basah yang didapatkan dari ketiga metode tersebut.

c. Program *SEEP/W*

Melalui hasil program *SEEP/W* dapat diketahui besar debit rembesan yang terjadi dalam tubuh tanggul. Berdasarkan *flux section* dengan tingkat RC di atas 90% pada model tanggul sebesar $1,30 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ seperti pada Gambar 4.

Debit rembesan yang didapatkan dengan metode pengamatan langsung lebih besar yaitu $3,88 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Nilai permeabilitas yang didapatkan sebelum tanah dialiri air yaitu $9,72 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ dengan debit rembesan yang didapatkan sebesar $1,04 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$. Begitu juga dengan nilai debit rembesan dengan metode rumus empiris (Casagrande, Grafik, dan Bowles), dalam penelitian Idkham (2005) lebih besar dibandingkan dengan nilai debit rembesan hasil analisis.

Semakin besar nilai permeabilitas maka kemampuan tanah untuk meloloskan air semakin besar. Dalam perbandingan di atas terlihat bahwa dalam Idkham (2005) nilai permeabilitas tanah sebelum dialiri lebih besar dibandingkan dengan nilai permeabilitas pada hasil analisis.

Debit rembesan yang mengalir pada tubuh tanggul tidak boleh melebihi debit kritis ($Q_o < Q_c$). Menurut Soedibyo (1993) debit rembesan harus dibatasi 2% - 5% dari debit rata-rata yang masuk kedalam waduk. Debit *inlet* (Q_i) yang mengalir pada penelitian ini sebesar $5,37 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Debit kritis (Q_c) yang dihasilkan yaitu $1,07 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ sampai $2,68 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, sedangkan debit rembesan atau debit *outlet* (Q_o) yang mengalir sebesar $1,04 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$. Karena $Q_o < Q_c$ maka tanggul yang terbentuk adalah stabil dan tidak menimbulkan gejala *piping* dan sufosi.

Dibandingkan dengan metode pengukuran langsung dan program *SEEP/W*, debit rembesan berdasarkan rumus empiris menghasilkan debit yang jauh lebih kecil. Hal ini disebabkan karena pada metode empiris selain faktor permeabilitas dan dimensi tanggul, panjang zona basah juga mempengaruhi perhitungan. Sebaliknya, pada pengukuran secara langsung dan metode analisis dengan program *SEEP/W*, debit rembesan hanya dipengaruhi oleh nilai permeabilitas, tinggi muka air dan dimensi tanggul, sedangkan panjang zona basah tidak berpengaruh.

7. Kapasitas Aliran Filtrasi

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh tanggul. Kapasitas filtrasi suatu tanggul mempunyai batas-batas tertentu yang mana apabila kapasitas aliran filtrasi melampaui batas, maka kehilangan air yang terjadi akan cukup besar, disamping itu kapasitas filtrasi yang besar dapat menimbulkan gejala sufosi (*piping*) yang membahayakan stabilitas tubuh tanggul (Sosrodarsono dan Takeda, 1977).

Kapasitas aliran filtrasi yang terjadi didalam tubuh tanggul lebih kecil dibandingkan debit rembesan yang keluar dari tubuh tanggul melalui pengamatan langsung. Nilai kapasitas aliran filtrasi yang didapatkan yaitu sebesar $3,68 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ dengan debit rembesan berdasarkan pengamatan langsung sebesar $1,04 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$. Maka hal ini membahayakan stabilitas tanggul karena dapat menimbulkan gejala sufosi (*piping*).

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemadatan tanah dilakukan dengan uji Proctor di laboratorium sebagai uji standar, dengan nilai OMC 26,40% dan berat isi kering maksimum $1,49 \text{ gr/cm}^3$.
2. Nilai permeabilitas tanah setelah dipadatkan pada tanggul $9,72 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, dan nilai permeabilitas tanah setelah dialiri air sebesar $7,96 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$. Nilai permeabilitas tanah semakin rendah maka kemampuan tanah untuk dilalui air atau kecepatan bergerakinya semakin kecil/lambat.
3. Debit *outlet* rata-rata pada pengamatan langsung adalah $1,04 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, debit *outlet* rata-rata menggunakan rumus empiris $7,00 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{s}$ dan debit *outlet* menggunakan program *SEEP/W* $1,30 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$. Pada metode empiris selain faktor permeabilitas dan dimensi tanggul, panjang zona basah juga mempengaruhi perhitungan. Sebaliknya, pada pengukuran secara langsung dan metode analisis dengan program *SEEP/W*, debit rembesan hanya dipengaruhi oleh nilai permeabilitas, tinggi muka air dan dimensi tanggul, sedangkan panjang zona basah tidak berpengaruh.
4. Panjang zona basah (*a*) pada pengamatan langsung sebesar 12 cm sedangkan perhitungan secara grafis *a* sebesar 6,94 cm.
5. Garis rembesan sama dengan muka air tanah. Rembesan air berjalan sejajar dengan garis muka air tanah sehingga garis rembesan juga merupakan garis aliran. Sehingga garis-garis equipotensial akan memotong garis rembesan ini sehingga jarak vertikal antara perpotongan adalah sama.

Berdasarkan penelitian disarankan beberapa hal berikut:

1. Perlu penelitian lanjutan tentang pemakaian gipsum sebagai metode analogi elektrik untuk pola penyebaran aliran air.
2. Perlu dilakukannya pengukuran ketinggian air dalam selang transparan untuk mengetahui pergerakan air secara lebih baik.
3. Pemadatan tanah yang dilakukan di dalam kotak model tanggul harus sesuai dengan standar pemadatan *Proctor* di laboratorium.
4. Sebaiknya dilakukan pengadukan tanah dan air terlebih dahulu di luar kotak model tanggul sebelum dilakukan penumbukan di dalam kotak model tanggul agar lebih merata.
5. Penambahan air ketika pengadukan untuk memudahkan pemadatan di dalam kotak model tanggul harus sesuai dengan kadar air optimum yang diperoleh pada pengujian pemadatan standar di laboratorium.
6. Perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang menggunakan jenis tanggul (bendungan) yang lain seperti bendungan zonal dan bendungan sekat sebagai perbandingan.

DAFTAR PUSTAKA

- Baver, L.D. 1969. Soil Physics. John Wiley and Sons Inc, New York.
- Idkham, M. 2005. Analisis Debit dan Pola Penyebaran Aliran Air (*Seepage*) serta pengaruhnya terhadap stabilitas pada model tanggul dengan bahan tanah latosol Dermaga, Bogor. Intitut Pertanian Bogor, Bogor.
- Jumikis, A.R. 1962. Soil Mechanics. D Van Nostrand Company, Inc., New York.
- Sitorus, S.R.P., O. Hariadjaja dan K.R. Brata. 1980. Penuntun Praktikum Fisika Tanah Ultisol. Intitut Pertanian Bogor, Bogor.
- Soedibyo. 1993. Teknik Bendungan. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Sosrodarsono, S dan K. Takeda. 1977. Bendungan Tipe Urugan. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Wesley, L.D. 1977. Mekanika Tanah. Diterjemahkan oleh A.M. Luthfi. Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta Selatan