

MODEL ALAT RANCANG BANGUN UNTUK MENENTUKAN GARIS ALIRAN REMBESAN AIR (*SEEPAGE LINE FORMATION*) DI TIMBUNAN TUBUH BENDUNGAN TIPE URUGAN HOMOGEN

Kusnan¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email : cwiksn@yahoo.co.id

Abstrak

Perilaku garis depresi (tekanan) aliran rembesan air (GAR) pada tanah timbunan tubuh bendung/tanggul homogen model fisik direncanakan lolos ayakan ASTM No: 45, kepadatan: 95,09% Angka Permeabilitas (k) = $9,1 \cdot 10^{-4}$ l/dt, 90,25% $k = 9,6 \cdot 10^{-4}$ l/dt, 84,47%, $k = 1,04 \cdot 10^{-4}$ l/dt Tanah lolos ayakan ASTM No. 50. Kepadatan 95,10% $k = 8,6 \cdot 10^{-4}$ l/dt, 90,38%, $k = 8,26 \cdot 10^{-4}$ l/dt, 85,19%, $k = 7,8 \cdot 10^{-4}$ l/dt, Tanah lolos ayakan ASTM No. 70. Kepadatan 95,06% angka (k) = $7,84 \cdot 10^{-4}$ l/dt. Berat Jenis tanah rata-rata (G_s) = 2,345 dan angka kestabilan yang terjadi $SF = 5,679 > 1,25$ (angka keamanan standart). Persamaan Garis Aliran Rembesan air (GAR) dengan kedalaman $H = 800, 700, 600, 400$, dan 260 cm GAR Empiris, dan GAR teori Matematika-Laplace dengan kedalaman air tampungan yang sama, tidak terdapat perbedaan (H_0 ditolak), kecuali untuk $H = 260$ cm terdapat perbedaan (H_0 diterima), berarti kedua persamaan membentuk persamaan garis non linier. Debit rembesan kedua GAR ditubuh timbunan bendung/tanggul dengan variasi kepadatan, tinggi muka air tampungan air yang sama di bagian hilir (a). Teori Matematika-Laplace $Q_0 = 1,7459 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,30121 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $3,92662 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,60178 \cdot 10^{-3}$ l/dt. Dan (b) Uji model Fisik (empiris) $Q_0 = 1,47 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,43 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,53 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,87 \cdot 10^{-3}$ l/dt; $1,53 \cdot 10^{-3}$ l/dt, keduanya menunjukkan < debit tampungan air bendungan/waduk (Q_{total}) yaitu 2%. 1488291,2 l atau 0,0574 l/dt.

Kata kunci: Simulasi alat model fisik tubuh bendungan, ditemukan model perumusan persamaan Garis Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*)

Abstract

The line of depression (pressure) of the flow of water seepage (GAR) on the soil embankment / dam weights of the physical model homogeneously passes the ASTM sieve No: 45, density: 95.09% Permeability (k) = $9,1 \cdot 10^{-4}$ l / dt, 90,25% $k = 9,6 \cdot 10^{-4}$ l / dt, 84,47%, $k = 1,04 \cdot 10^{-4}$ l / dt Land escaped by ASTM sieve no. 50. Density 95.10% $k = 8.6 \cdot 10^{-4}$ l / dt, 90.38%, $k = 8.26 \cdot 10^{-4}$ l / dt, 85.19%, $k = 7,8 \cdot 10^{-4}$ l / dt, Land escapes ASTM sieve no. 70. Density 95.06% number (k) = $7.84 \cdot 10^{-4}$ l / dt. Weight Average soil type (G_s) = 2,345 and stability number occurring $SF = 5,679 > 1.25$ (standard security figures). The water flow equation (GAR) equation with a depth of $H = 800, 700, 600, 400$, and 260 cm GAR Empirical, and GAR of Matematika-Laplace theory with the same water depth, no difference (H_0 rejected), except for $H = 260$ cm there is a difference (H_0 diterima), means the two equations form a non linear line equation. The second seepage discharge of GAR in the embankment / dykes with variation in density, the same water level of the water reservoir downstream (a). Mathematical-Laplace Theory $Q_0 = 1,7459 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1,30121 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $3,92662 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1.60178 \cdot 10^{-3}$ l / dt. And (b) Physical model test (empirical) $Q_0 = 1.47 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1.43 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1.53 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1.87 \cdot 10^{-3}$ l / dt; $1.53 \cdot 10^{-3}$ l / dt, both show < discharge water reservoir / reservoir (Q_{total}) that is 2%. 1488291.2 l or 0.0574 l / dt.

Keywords : Simulation tool model of physical body dam, found the model formulation equation *Seepage Line Formation* (*Seepage Line Formation*)

PENDAHULUAN

Bendungan adalah sebagai penyangga tendon/tampungan air yang dapat juga diartikan sebagai timbunan penahan air Sunarto (1989), maka untuk keperluan tersebut perlu dibuatkan penahan timbunan urugan dari tanah yang berbentuk bendung (trapesium), dan untuk mencegah air tampungan agar tidak merembes di sekitar lokasi tampungan. Dalam pelaksanaan pembuatan suatu bendungan banyak pertimbangan yang harus dipelajari sebelum melakukan desain (perencanaan), yaitu suatu analisa secara teknis yang berorientasi kepada fungsi bendung itu sendiri. Pertimbangan ini mencakup kondisi geologi dan seismologi sekitar lokasi pembangunan, kondisi pelapisan tanah pondasi bendungan dan penyediaan bahan timbunan tanah sebagai bahan konstruksi.

Dalam penyelidikan bahan timbunan harus dapat ditentukan jumlah berbagai macam bahan yang tersedia di sekitar lokasi, Najoan Th.F dan Endang Rachmat (1999:1), menurut Takeda et al. (1989: 67) hampir semua bahan tanah atau batuan yang ada tempat lokasi pembangunan dapat digunakan sebagai bahan timbunan tubuh bendungan, kecuali tanah yang mengandung zat-zat organik atau zat-zat yang mudah larut (mengandung kadar kelembaban tinggi). Secara teknis yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan bahan tanah untuk urugan timbunan tubuh bendung sebagai berikut; (1). Persyaratan stabilitas bendungan; (2). Tingkat kepadatan dan kekuatan geser yang memadai; (3). Angka *permeabilitas* tanah sesuai dengan persyaratan yang diperlukan; (4). Mudah dikerjakan pada penggalian, pengelolaan, pengangkutan, penimbunan dan pemadatan.

Timbunan urugan bendung dapat hancur akibat kebocoran atau aliran rembesan atau aliran rembesan air, sebagian kejadian ini terjadi pada saat pengisian atau dalam tahun pertama bangunan bendungan dioperasikan. Hal ini menyebabkan adanya gaya-gaya yang timbul akibat aliran rembesan atau aliran rembesan air di dalam tubuh timbunan bendungan. Rembesan air ini terjadi karena adanya perbedaan tekanan rembesan aliran air, jika tekanan yang terjadi makin besar apabila tampungan air di bendungan makin tinggi (besarnya debit volume penampungan air). Selama terjadinya aliran rembesan atau aliran rembesan air dalam timbunan tubuh bendungan, tekanan aliran rembesan air yang ada berangsur-angsur akan berkurang sampai pada tekanan minimum (kecil) di bagian belakang

timbunan (hilir).

Pada penelitian ini penulis tertarik untuk meneliti Model garis depresi aliran rembesan air (*Seepage Line Formation*) di tubuh timbunan bendungan tipe urugan homogen, agar supaya mendapatkan model perumusan persamaan baru, dalam waktu jangka pendek diharapkan dapat membuat alat rancang bangun model fisik sebagai sarana untuk menemukan model perumusan yang dapat dipakai untuk menghitung garis aliran rembesan air di tubuh bendung, khususnya pada bendung tipe urugan homogen.

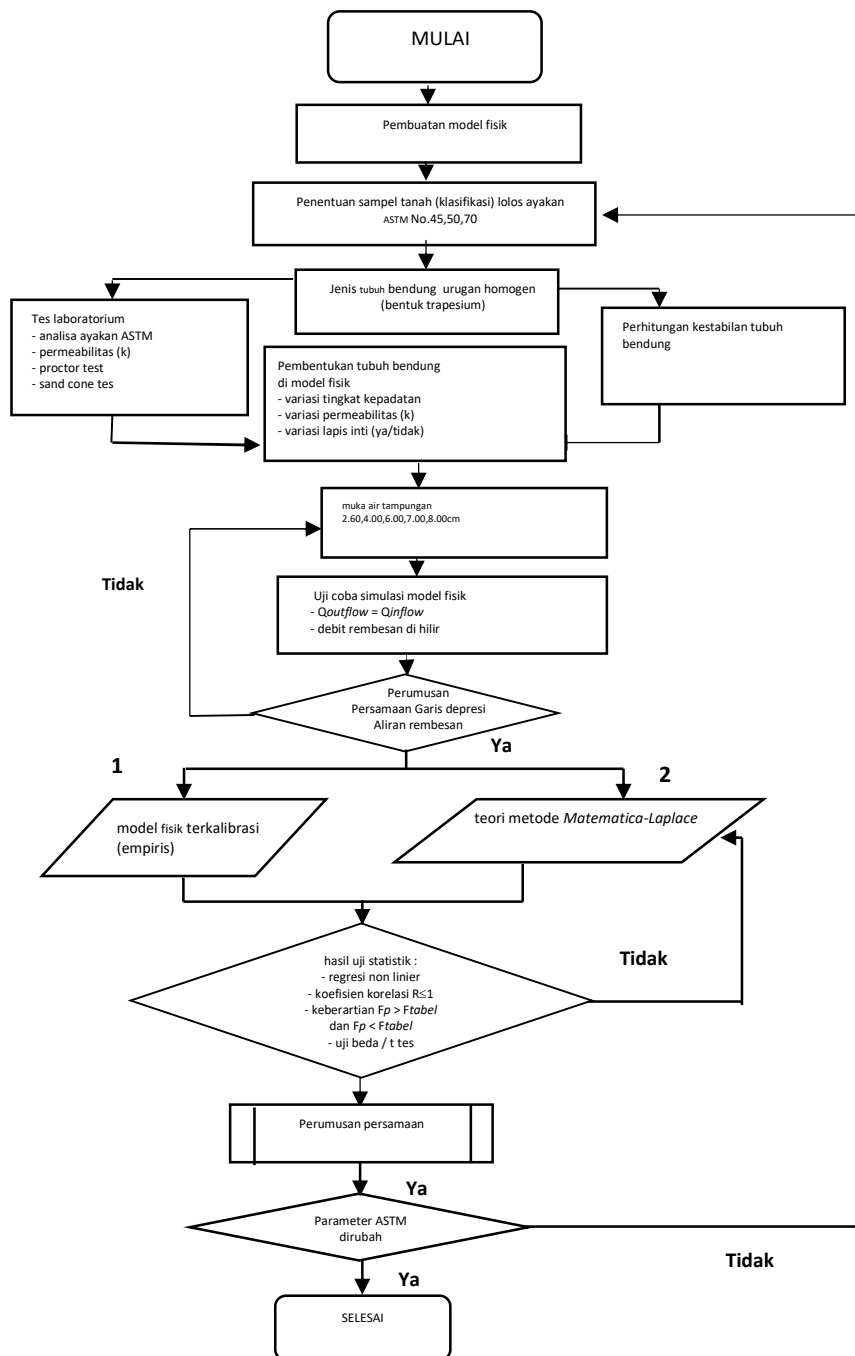
Garis depresi Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*) pada timbunan tubuh bendungan homogen perlu adanya teori kajian ilmiah khususnya proses Garis depresi Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*) yang melalui tubuh timbunan bendung/tanggul. Analisa Garis depresi Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*) adalah suatu rembesan air bukan merupakan kejadian yang sangat pasti, tetapi hasil hitungan kajian teoritis sering terjadi kesalahan-kesalahan lebih dari perkiraan data di lapangan. Hasil perhitungan yang kurang ini dapat diperbaiki apabila ikut ditinjau keadaan kejadian aliran rembesan air yang sebenarnya dengan ilustrasi membuat **alat rancang bangun model fisik** sebagai sarana untuk mencari model Perumusan Persamaan Garis depresi Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*) yang hasilnya mendekati kebenaran dengan uji eksperimen model fisik.

METODE

Metode yang diterapkan dalam pelaksanaan penelitian, meliputi :

- Rancangan Penelitian, Dalam rancangan penelitian, akan diidentifikasi jenis-jenis variabel dan dibahas masalah rancangan percobaan, mengingat penelitian ini adalah eksperimen dalam laboratorium
- Deskripsi Variabel Bebas dalam Penelitian, Variabel bebas ini sengaja dibuat dengan beberapa variasi perlakuan, supaya dapat digunakan sebagai variabel kontrol dan selanjutnya beberapa perlakuan diamati pengaruhnya terhadap variabel terikat. Untuk memberikan keyakinan secara nyata kepada variabel bebas, ada beberapa variasi yang diberikan pada perlakuan penelitian yaitu variasi jenis butir pasir atau tanah timbunan (tanah lolos ayakan ASTM No: 45,50,70), secara langsung terkandung didalamnya nilai angka *permeabilitas*, variasi tingkat kepadatan tanah timbunan

- (density) 95%,90%,85%, dan variasi tinggi perlakuan muka air tampungan bendungan dalam eksperimen pada alat model fisik (800cm, 700cm, 600cm, 400cm, 260cm).
- c. Deskripsi Variabel Terikat dalam Penelitian, Variabel Terikat ini akan muncul sebagai hasil dari proses perhitungan teori *Matemática-Laplace*. Oleh karena munculnya variabel ini diharapkan dapat menunjukan ada-tidaknya pengaruh dari beberapa variasi perlakuan di variabel bebas, dengan dibuat sedemikian rupa dari beberapa variasi perlakuan yang diberikan pada variabel bebas, mengakibatkan timbulnya pengaruh yang tampak nyata, maka untuk hal tersebut perlakuan variasi beberapa di variabel bebas dibuat cukup ekstrim, agar perbedaan dampak yang ditimbulkannya terlihat dan dapat diamati.
- d. Diagram Alir Penelitian, Seluruh proses penelitian dari awal sampai dengan mendapatkan tujuan hasil penelitian yang di rencanakan, digambarkan dalam bentuk diagram alir penelitian seperti tertera pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Operasional Alir (*Flow chart*) penelitian

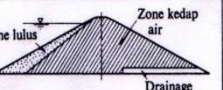
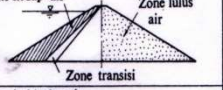
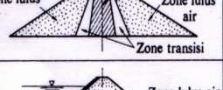
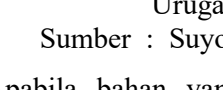
HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Model Fisik Hidrolik

Model fisik hidrolik adalah suatu bentuk pengecilan (miniatur) dari suatu bangunan, dimana konsep secara menyeluruh oleh Dieterich J. Schuring, (1997), bahwa skala diuji coba pada minatur model fisik (eksperimen) seperti kondisi sebenarnya/prototipe memperhatikan faktor yang ada di prototipe keadaan sama, dengan faktor yang di alat rancang bangun model fisik, sebagaimana dikemukakan oleh Priyantoro, (1997), berprinsip membentuk kembali masalah-masalah yang ada prototipe kedalam skala yang lebih kecil.

b. Bentuk Bendungan Tipe Urugan

Bendungan tipe urugan sehubungan dengan fungsinya sebagai bangunan penahan aliran rembesan air kearah dinding bendungan, secara garis besar tubuh bendung/tanggul merupakan dinding penahan rembesan air kearah hilir. Ditinjau dari penempatan serta susunan bahan urugan yang membentuk tubuh bendungan/tanggul untuk dapat memenuhi sebagaimana fungsinya dengan baik, bendungan tipe urugan dapat dibagi menjadi 3 tipe utama seperti pada gambar 2:

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Tiri		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tiri kedap air di udiknya.
Bendungan Zonal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
Bendungan Inti miring		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Inti vertikal		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll. nya.
Bendungan Sekat		

Gambar 2. Klasifikasi Umum Bendungan Urugan

Sumber : Suyono, (1989)

Apabila bahan yang pembentuk tubuh bendung/tanggul terdiri dari butiran tanah yang hampir sejenis dengan gradasi seragam dan 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama (bendungan tipe urugan homogen), Najoan, (1998) dan Suyono, (1989) mengutarakan bendungan urugan digolongkan

dalam tipe homogen, apabila bahan yang pembentuk tubuh bendung/tanggul tersebut terdiri tanah yang hampir sejenis dan gradasinya (susunan ukuran butirnya) hampir seragam.

c. Timbunan Tubuh Bendung

Soenarto, (1989), bahwa timbunan tanah dan bahan urugan yang ditimbun dipadatkan lapis demi lapis setebal kurang lebih 20 cm dengan digilas dan dipadatkan secara hidraulik sejumlah volume akan membentuk suatu penahan air tampungan, secara umum juga disebut sebagai penyangga tandon air, sedangkan penyangga tandon air dapat diartikan sebagai dinding timbunan penahan air atau disebut bendung/tanggul.

d. Kestabilan (*Stabilitas*)

Dalam melakukan penimbunan yang memenuhi syarat kekuatan apabila waktu tampungan bendung/tanggul air waduk di isi penuh, kekuatan geser tanah timbunan harus memenuhi syarat kestabilan konstruksi (aman) terhadap bahaya longsor, menurut Ricard, (1995), lebih baik untuk material di lapangan ditetapkan dengan tingkat kepadatan 85% s/d 90% dari γ_d maksimum, sedangkan gaya-gaya atau beban yang bekerja pada bendung/tanggul timbunan akibat bahan dan tampungan air akan mempengaruhi stabilitas tubuh bendungan, Suyono, (1989), untuk menjaga stabilitas tubuh bendungan terhadap bahaya longsor setelah timbunan bendung selesai terbentuk, perlu dikontrol faktor keamanan (*SF*), Wahyudi (1996 : 5), menyarankan bahwa untuk kasus longsor lereng timbunan dari hasil empat metoda (*Bishop, Fractile, Monte Carlo, Autodkorelasi*) *SF* adalah 2,2 ; 1,62: 1,45 dan 1,23, perhitungan stabilitas lereng, menurut Wesley, (1967), dan Bowles, (1991) faktor keamanan di iijinkan minimum 1,25 untuk keadaan keruntuhan tak terjadi.

e. Bentuk Model Perumusan Persamaan Garis depresi Aliran Rembesan Air (*Seepage Line Formation*)

Bentuk persamaan garis regresi yang sesuai dengan bentuk Garis depresi Aliran Rembesan air (*Seepage Line Formation*) ialah teori *Matematis-laplace*, dan hasil simulasi di alat rancang bangun Model Fisik (empiris), didasarkan pada pasangan x (jarak pias) dan y dapat digrafiskan atas dasar pasangan x, y, dengan bentuk persamaan garis regresi non linier. Sedangkan jenis dapat dipilih berbentuk

kwadratik eksponensial, atau *logaritmik*.

1) Pembuatan Alat Rancang Bangun Model Fisik

Alat Rancang Bangun Model Fisik adalah suatu bentuk pengecilan (miniatur) yang dirancang sesuai kajian teori pemodelan skala 1:25 dari suatu bangunan bentuk model fisik yang terdiri dari utama yaitu Menara Tandon Air tampungan Gambar 3.



Gambar 3. Model Alat rancangan Bangun, Tandon air, dan alat uji permeabilitas

2) Sampel Tanah/Jenis Timbunan Bendung/ Tanggul

Pasir yang dijadikan sampel dalam penelitian ini berjenis pasir halus, yang mana butiran adalah lolos ayakan No. 45, 50, 70 masing berdiameter 0,138 mm, 0,117 mm, 0,083 mm. Ukuran butiran ini dipilih setelah mendapatkan kepastian uji coba untuk mendapatkan koefisien permeabilitas sekitar 0,01 cm/dt sampai dengan 0,001 cm/dt, Das (1988). Hasil dari uji saringan ini setelah dikonfirmasi dengan gambar grafiknya pada *grain size distribution curve*, Hainim, (1991) menunjukkan bahwa tanah tersebut berjenis halus dengan butir-butirnya seragam (*poorly uniform graded*). Uji analisa saringan ayakan ASTM, kemudian di uji

laboratorium Mekanika Tanah di Jurusan Teknik Fakultas Teknik Unesa

a) Uji Kepadatan Standar dan Koefisien Permeabilitas

Sebagai pedoman awal dalam pembuatan timbunan bendung/tanggul yang diuji cobakan didalam alat model fisik, diperlukan terlebih dahulu nilai kepadatan yang hendak direncanakan. Untuk itu sampel tanah/pasir diuji dengan uji kepadatan standar menggunakan peralatan uji proctor. Melalui pengujian ini hendak dipadatkan beberapa pedoman pembuatan timbunan bendung/ tanggul pada model fisik dengan macam butiran lolos ayakan No. 45, 50, 70 dengan menghasilkan nilai kadar air dan nilai bobot isi pada tanah/pasir yang dipakai sebagai bahan timbunan bendung/tanggul.

Hasil uji kepadatan standar dan angka rembesan (Permeabilitas K) ini memberikan nilai kepadatan tanah rencana yang berupa bobot isi kering (γ_d) adalah mempunyai arti setara dengan nilai bobot isi basah (γ_t) dan kadar air optimum yang memberikan nilai bobot isi maksimum menunjukkan dalam prosen (%), hasil dapat dilihat dalam tabel dan grafik berikut ini:

Kepadatan tanah proctor test dan pengamatan permeabilitas (*rembesan*) uji konstan head pada tanah bahan timbunan tubuh bendung/tanggul (*tanah asli*). Adapun gambar kurve mengenal hubungan kadar air optimum dengan bobot isi maksimum dari hasil percobaan laboratorium seperti pada Tabel: 1.

Tabel 1. Uji Tingkat Kepadatan dan Angka Permeabilitas (k)

Jenis tanah lolos saringan No. (butir) ASTM	Kadar Air (%)	Berat volume kering (γ_d) gram/cm ³		Tingkat kepadatan (%)	Rembesan (k) cm/detik
		Proctor tes (γ_{d1})	Sand Cone test (γ_{d2})		
No. 45 (0,139 mm)	25,50	1,509	1,435	95,09	$9,1 \times 10^{-4}$
	24,46	1,509	1,3619	90,25	$9,6 \times 10^{-4}$
	22,90	1,509	1,2897	85,47	$1,04 \times 10^{-4}$
	18,64	1,540	1,465	95,1	$8,6 \times 10^{-4}$
No. 50 (0,117 mm)	17,66	1,540	1,392	90,38	$8,9 \times 10^{-4}$
	16,70	1,540	1,312	85,19	$9,3 \times 10^{-4}$
	16,52	1,64	1,559	95,06	$8,04 \times 10^{-4}$
No. 70 (0,083 mm)	15,78	1,64	1,472	89,75	-
	14,86	1,64	1,390	84,75	-

Tabel 2. Analisa Stabilitas Lereng di Bagian Hulu dan Hilir Keadaan Tampungan Air bendung/Waduk Penuh

No.	B (m)	Tinggi pada pias (H) H ₁ (m)	H ₂ (m)	luas pias daerah (m ²)			Total Luas (A)	Berat irisan bertikal W (Kg)			Total Berat W (t)	0 (0°)	L (m)	P (t/m)	P ₁ (t/m)	P ₂ V	N (t/m)	T (t/m)	U (t/m)
				Air A ₁	Jenuh Air A ₂	Tanah Basah A ₃		W ₁ (t)	W ₂ (t)	W ₃ (t)									
1	1,40	0,50	7,30	10,01	0,77	-	10,78	10,01	0,713	-	10,7238	-10	1,422	1,925	0,334	-1,893	10,895	0,031	5,901
2	2,00	2,00	6,05	12,00	3,75	-	15,75	12,00	3,476	-	15,4763	-4	2,005	1,125	0,079	-1,122	15,518	0,042	10,075
3	3,00	2,30	4,70	9,30	6,65	-	15,95	9,30	6,165	-	15,4646	2	2,001	0,489	0,017	0,489	15,472	0,037	9,305
4	3,00	4,45	3,40	6,60	8,95	-	15,55	6,60	8,297	-	8,8967	10	2,031	2,768	0,481	2,726	9,242	-1,182	12,491
5	3,00	5,30	1,90	3,80	10,60	-	14,40	3,80	9,826	-	13,6262	19	2,115	4,958	1,614	4,688	14,496	-0,253	13,219
6	2,00	5,85	0,50	1,08	11,75	-	12,83	1,08	10,892	-	11,9723	26	2,225	6,194	2,715	5,567	13,476	-0,318	13,572
7	3,00	5,10	0,90	-	10,00	2,10	12,10	-	9,270	4,047	13,3167	30	2,309	6,929	3,465	6,001	14,997	0,657	12,814
8	2,00	2,40	1,80	-	6,55	3,70	10,25	-	6,072	7,130	13,2018	44	2,780	8,112	5,635	5,833	15,131	3,338	9,174
9	2,00	0,80	2,25	-	1,69	3,71	5,40	-	1,564	7,154	8,7180	54	3,444	8,552	6,962	4,966	12,025	2,132	6,629
10	0,85	0,00	0,70	-	-	0,49	0,49	-	-	0,945	0,9418	62	1,810	1,119	0,988	0,525	14,302	0,307	1,267

Keterangan :

L = $b/\cos \Theta$ W₁ = $A_1 \cdot \gamma_w$ W₂ = $A_2 \cdot \gamma_{sat}$ P = $(h_1 + h_2) \cdot b \tan \Theta$ P₁ = $P \sin \Theta$ N = $w \cos \Theta$ T = $w \sin \Theta - P \cos \Theta$ μ = $\phi \gamma_w (h_1 + h_2) L$ ϕ = 1,0 pias dibawah garis depresi ϕ = 0,5 pias diatas garis depresi

c = 0,5

 Θ = 33,5

$$SF = \frac{C.L + \sum(N-U) \tan \phi}{T} = \frac{0 + \sum(135,554 - 94,447) \tan 33,5}{4,7911} = \frac{27,209}{4,7911} = 5,679 > 1,25 \text{ Aman}$$

4) Garis depresi Aliran Rembesan air
(Empiris) Uji Model Fisik

a) Garis depresi Aliran Rembesan air
(*Empiris*) atau GAR

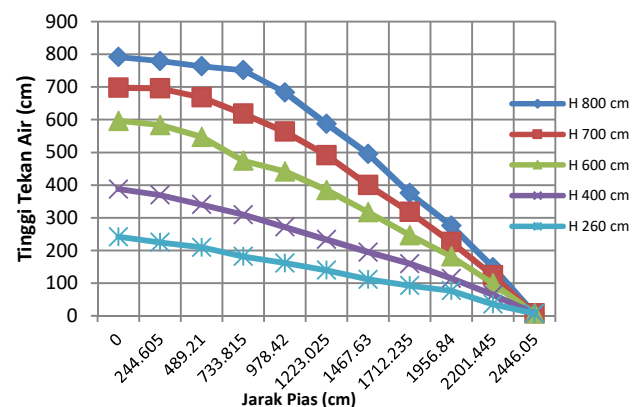
Sebaran garis depresi aliran rembesan/resapan air ke arah aliran dari hulu ke hilir. Timbunan bendung/tanggul, pada alat rancang bangun model fisik (*Empiris*) membentuk garis aliran depresi rembesan air (GAR) yang berupa kurva lengkung, yang membentuk garis aliran parabola dimulai dari arah bagian hulu. Pada saat waktu pelaksanaan uji coba alat

rancang bangun Model Fisik, keadaan stabil akan dicapai apabila dalam proses pengisian tampungan (Q_i) dan rembesan (Q_o) termasuk debit luberan, kondisinya harus seimbang (*water balance*) air *inflow*, dan menunjukkan keadaan konstan. Dengan keadaan keseimbangan air itu maka garis depresi aliran rembesan air (GAR) yang terbentuk juga mengalami kestabilan. Dimana data mengenai kurve garis depresi aliran rembesan air yang sudah terbentuk dalam kondisi kestabilan. Dapat dilihat pada tabel 3 dan Gambar 5.

Tabel 3 Tinggi Tekan Air Rembesan (Garis Depresi) Hasil Pengamatan Uji Model Fisik (Empiris)
Pada Timbunan Tubuh Tanggul

No. Piszo- metri	Pias Aliran (cm)	Tekanan Air Rembesan Pada Tubuh Tanggul				
		H. 800 cm (Y) cm	H. 700 cm (Y) cm	H. 600 cm (Y) cm	H. 400 cm (Y) cm	H. 260 cm (Y) cm
0	0	792	698	597	388	242
1	244,605	780	696	584	370	225
2	489,21	764	669	548	340,6	210
3	733,815	752	619	475	310	182
4	978,42	684	564	442	272	162
5	1223,025	588	492	385	234	140
6	1467,63	496	400,6	317,6	195	112
7	1712,235	376	318	247	160	93
8	1956,84	276	226	182	115	77
9	2201,445	149	124	99,6	65	36
10	2446,05	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6

Bentuk umum garis depresi sebagaimana yang dihasilkan simulasi/observasi dalam pengamatan (*empiris*), dimana sebaran korelasi antara masing-masing garis depresi aliran rembesan air (GAR) menunjukkan garis regresi non liner yang mempunyai sebaran garis sama ini ditunjukan R yang terjadi $(0,99) < 1$ dan tingkat kesalahan (*Standart Error of Coefision*) 0,01 s/d 0,02 % sebagaimana digambarkan 5. berikut ini.



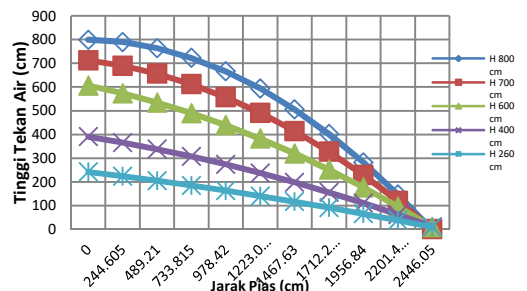
Gambar 5. Diagram garis aliran rembesan air empiris (uji coba model fisik)

b) Persamaan Regresi Garis depresi Aliran Rembesan Empiris kemudian diolah menjadikan persamaan Kwadratik mendapatkan hasil seperti tabel:

Tabel 4. Persamaan garis aliran rembesan regresi kwadratik empiris pada tiap ketinggian air tampungan.

No.	Tinggi Air Tampungan (H)cm	Persamaan garis depresi aliran Rembesan Empiris Regresi Kwadratik $\hat{Y}$ estimasi
1	800	$\hat{Y} = 799,4042 - 0,007766 x - 0,000131 x^2$
2	700	$\hat{Y} = 713,092 - 0,007130 x - 0,00008989 x^2$
3	600	$\hat{Y} = 606,416 - 0,12109 x - 0,00005021 x^2$
4	400	$\hat{Y} = 390,907 - 0,0945 x - 0,0000248 x^2$
5	260	$\hat{Y} = 242,683 - 0,0715 x - 0,000096 x^2$

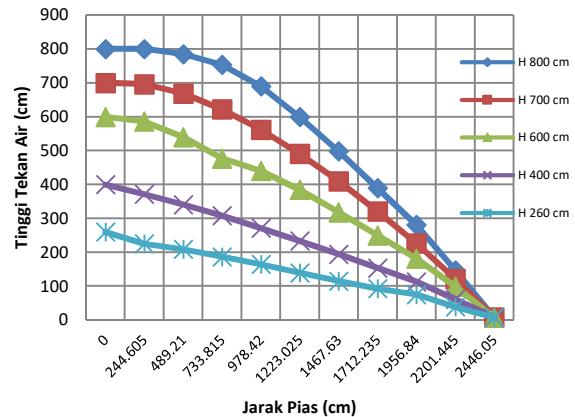
Analisis mengenai penyusunan persamaan regresi $\hat{Y}$ estimasi tertera pada lampiran yang disebutkan diatas, sedangkan gambar diagram garis depresi kwadratik seperti pada gambar 6 berikut:



Gambar 6. Diagram garis aliran rembesan empiris kwadratik

5) Analisis Garis Depresi (*Seepage line Formation*) Teori *Matematica-Laplace*

a. Analisis garis aliran Rembesan Air teori *Matematica-Laplace*, dapat dihitung melalui analisa program Basic computer dengan hasil sebagai gambar 7 berikut:



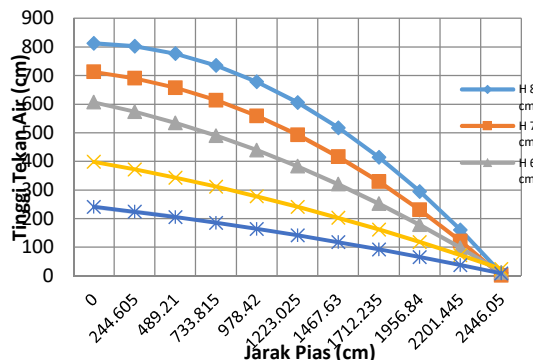
Gambar 7. Diagram Garis Aliran Rembesan air Teori *Matematica-Laplace*

b. Garis depresi Aliran Rembesan air teori *Matematica-Laplace* yang membentuk garis regresi non linier, kemudian diolah menjadikan persamaan Kwadratik hasil analisis regresi teori *Matematica-Laplace* dapat disajikan sebagai berikut:

Tabel 5. Persamaan garis depresi aliran rembesan air regresi kwadratik teori *Matematica-Laplace*

No.	Tinggi Air Tampung (H) cm	Persamaan garis Depresi Empiris Regresi Kwadratik $\hat{Y}$ estimasi
1	800	$\hat{Y} = 800,1035 - 0,01 x - 0,00013 x^2$
2	700	$\hat{Y} = 713,3103 - 0,006832x - 0,00091 x^2$
3	600	$\hat{Y} = 607,2 - 0,12321 x - 0,000044 x^2$
4	400	$\hat{Y} = 399,2453 - 0,10912 x - 0,00002 x^2$
5	260	$\hat{Y} = 241,8464 - 0,06816 x - 0,000011 x^2$

Sedang untuk lebih jelas persamaan ini sebaran garis *Matematica-laplace* aliran rembesan air yang terjadi dapat dilihat pada gambar 8 diagram garis aliran rembesan regresi kwadratik hasil teori *Matematica-Laplace*.



Gambar 8. Diagram Garis Aliran Rembesan Air Regresi Kwadratik Teori *Matematica-Laplace*

6) Uji Beda Hipotesis Nihil (H_0) dan Alternatif (H_1)

Analisis uji perbedaan hipotesis untuk menguji apakah ada perbedaan hipotesis, nihil dan hipotesis alternatif, sesuai yang telah dirumuskan pada kajian, maka mendapatkan hasil sebagai table 3.6 berikut:

Tabel 6. Uji beda Hipotesis pada Garis Aliran Rembesan air Alir Kwadratik Empiris dan Teori *Matemática-Laplace*

No	Tinggi Air Tampung (H)cm	Persamaan garis aliran rembesan airEmpiris Regresi Kwadratik $\hat{Y}$ estimasi ($\hat{Y}_{est}$)	Persamaan garis aliran rembesan air Empiris Regresi Kwadratik teori <i>Matemática-laplace</i> ($\hat{Y}_{est}$)	Hasil uji beda $t < t_{tabel=2,228}$	Hasil Korelasi R
1	800	$799,4042 - 0,007766x - 0,000131x^2$	$800,1035 - 0,01x - 0,00013x^2$	12,333	0,999
2	700	$713,092 - 0,007130x - 0,00008989x^2$	$713,3103 - 0,006832x - 0,00091x^2$	7,836	0,999
3	600	$606,416 - 0,12109x - 0,00005021x^2$	$607,2 - 0,12321x - 0,000044x^2$	3,908	0,999
4	400	$390,907 - 0,0945x - 0,0000248x^2$	$399,2453 - 0,10912x - 0,00002x^2$	2,228	0,999
5	260	$242,683 - 0,0715x - 0,000096x^2$	$241,8464 - 0,06816x - 0,000011x^2$	1,462	0,999

7) Debit Rembesan di Hilir

a. Debit Aliran Rembesan Uji Model Fisik (Empiris)

Debit rembesan yang terjadi di bagian Hilir Tubuh Bendung/tanggul hasil Uji Model Fisik (*Empiris*) Pengamatannya dilakukan pengukuran dengan sarana gelas ukur dan stop watch sebagai pengganti alat Thomson.

Tabel 7. Debit Aliran Rembesan di hilir hasil perhitungan simulasi (empiris).

No.	Tubuh Bendung Pasir Lolos Ayakan ASTM	Tingkat Kepadatan tubuh tanggul	Debit Rembesan Di Bagian Hulu Tubuh Tanggul Pada Ketinggian Air Tampung (l/dt)				
			H. 800cm	H. 700cm	H. 600cm	H. 400cm	H. 260cm
1		95%	0,0012	0,0011	0,0010	0,0012	0,0011
2	45, 50, 70	90%	0,0013	0,0014	0,0016	0,0025	0,0017
3		85%	0,0019	0,0018	0,0020	0,0019	0,0018
Debit Total Tampung air l/dt			231,5678	192,5578	156,368	92,7662	55,0462

b. Analisis Debit Aliran Rembesan *Matemática-Laplace*

Debit rembesan ini dihitung dengan teori Aliran dengan *keadaan* steady pada bending/tanggul berbentuk trapezium.

Tabel 8. Debit Aliran Rembesan di hilir hasil perhitungan *Matemática-Laplace*.

No.	Tubuh Bendung Pasir Lolos Ayakan ASTM	Tingkat Kepadatan tubuh tanggul	Debit Aliran Rembesan Di Bagian Hulu Tubuh Bendung Pada Ketinggian Air Tampung (l/dt)				
			H. 800cm	H. 700cm	H. 600cm	H. 400cm	H. 260cm
1		95%	0,17472	0,13012	0,09305	0,03926	0,01602
2	45, 50, 70	90%	0,18777	0,13985	0,10002	0,04221	0,01722
3		85%	0,19995	0,14892	0,10651	0,04494	0,01833
Debit Total Tampung air l/dt			231,5625	192,5578	156,368	92,7662	55,0462

a. Discussion

1) Pengertian tanah timbunan bendung

Sebagaimana tentang persoalan permasalahan dalam penelitian ini adalah tentang persoalan analisis garis aliran rembesan air empiris, teoritis rembesan air dan debit rembesan, perhatian ditujukan kepada sifat-sifat kelulusan air terhadap urugan tanah timbunan bendung/tanggul tidak hanya tergantung pada macam tanah tetapi juga oleh adanya struktur dari tubuh timbunan bendung/tanggul itu. Untuk mendapatkan aliran air rembesan dapat dikalibrasikan serta divalidasi dilapangan perlu memakai sarana uji alat rancang bangun model fisik dengan memakai sampel tanah/pasir halus yang

lebih dahulu diuji laboratorium Mekanika tanah yang diperuntukkan sebagai pedoman kebenaran di lapangan, sampel tanah direncanakan mempunyai nilai tingkat kepadatan ASTM No:45 95,01%; 90,25%; 85,47%; ASTM No:50 95,13%; 90,39%; 85,20% dan ASTM No:70; 95,06%; 90,75%; 84,485%;. koefisien permeabilitas (*k*) rembesan pada umumnya, yaitu pasir kasar 1,0-0,01 cm/detik dan pasir halus 0,01-0,001 cm/detik (*koefisien permeabilitas*) sampel sengaja diciptakan mendekati pada persyaratan yang ada dalam temuan ilmiah, yaitu sampel tanah/pasir halus yang memberikan nilai kontribusi kestabilan jalannya aliran air (*tekanan/depresi air*) serta tanah yang

mempunyai sifat homogen.

2) Garis depresi aliran rembesan air empiris

Garis aliran rembesan air hasil pengamatan (*Empiris*) telah menunjukkan bentuk sebaran garis lengkung non linier, mencermati bentuk kurva lengkung dari garis depresi empiris ternyata perlakuan variasi tingkat kepadatan pada timbunan bendung/tanggul mempegaruhi bentuk garis aliran air rembesan, variasi perlakuan menunjukan bentuk lengkung garis yang sama tetapi yang terpengaruh adalah lamanya waktu yang diperlukan dalam uji simulasi berbeda, yaitu makin besar nilai tingkat kepadatan waktu yang diperlukan makin lama, maka bentuk garis lengkung aliran tersebut dapat digolongkan persamaan regresi yang mempunyai bentuk persamaan regresi non linier. Untuk mengamati bahwa di masing-masing garis depresi yang terjadi pada variasi air tampungan memperlihatkan garis lengkung non linier dimana hubungan antara garis mempunyai angka korelasi R_1 ditunjukkan berdasar *Standard Error of Coefisien* yaitu : 2,1%, 1,26%, 1,98%, 2,2% , 1,11% < 5% (*Confidenci Interval*). Selanjutnya dari masing-masing bentuk garis regresi non linier di

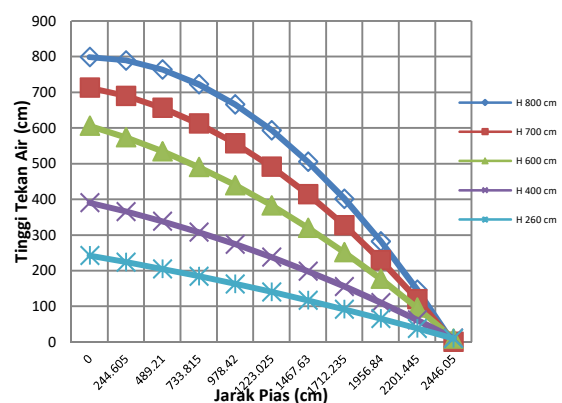
coba-coba dalam uji keberartian bahwa masing-masing persamaan garis regresi menunjukkan perhitungan F hasil penelitian > F tabel dengan memakai 95% *confidence interval (level of significance 5%)* berarti bentuk garis regresi depresi sebaran aliran rembesan air di, tubuh bendung/tanggul adalah bentuk garis aliran rembesan regresi kwadratik atau curvilinier parabola. Bentuk persamaan garis aliran rembesan regresi kwadratik ini adalah $Y=a+bx+cx^2$ yang mana hasil analisis regresi kwadratik terhadap masing-masing Konstanta persamaan a, b, c sebagai berikut:

- Konstanta a memiliki harga yang berbeda-beda tergantung dengan tinggi air tampungan waduk (h), sebab itu nilai a intersep persamaan regresi yang merupakan nilai dasar y jika harga $x = 0$.
- Konstanta b dan c adalah nilai Konstanta persamaan yang ada di persamaan regresi kwadratik, maka lengkung garis depresi empiris kwadratik merupakan lengkung garis regresi yang dipakai sebagai pengganti persamaan garis aliran rembesan regresi depresi Empiris yang terjadi, hal ini dapat juga dijabarkan dalam bentuk estimasi yaitu : $Y = a + bx + cx^2$

Tabel 9. Uji Keberartian Garis Aliran Rembesan Kwadratik Model Fisik (empiris)

No.	Tinggi Air Tampung (H) cm	Persamaan Garis Aliran Rembesan regresi Kwadratik ($\hat{Y}$ est)	Koefisien Regresi		Uji Keberartian	
			$R^2_{xy.xk}$	R_{xy}	F penelitian	F tabel
1	800	$799,4042 - 0,007766x - 0,000131x^2$	0,9999922	0,5170417	758215,42	5,32
2	700	$713,092 - 0,00713x - 0,00008989x^2$	0,9999959	0,5044741	144605,42	5,32
3	600	$606,416 - 0,12109x - 0,00005021x^2$	0,9999951	0,4923988	123296,10	5,32
4	400	$309,907 - 0,0945x - 0,0000248x^2$	0,9999979	0,4907360	2860307,1	5,32
5	260	$242,663 - 0,0715x - 0,0000096x^2$	0,9999902	0,4868707	625629,5	5,32

F hasil penelitian garis depresi uji coba model fisik (*empiris*) di masing-masing ketinggian air tampungan waduk F hasil penelitian > F tabel = 5,32. Jika memakai 95% *confidence interval, level of significance 5%* F hasil penelitian ini berarti menunjukkan bentuk regresi kwadratik. Bentuk sembaran garis depresi pada garis aliran rembesan air empiris, dengan pola bentuk persamaan model kwadratik ini sangat significance apabila untuk dipakai sebagai pendekatan, hal tersebut dapat dilihat pada gambar diagram garis aliran rembesan air.

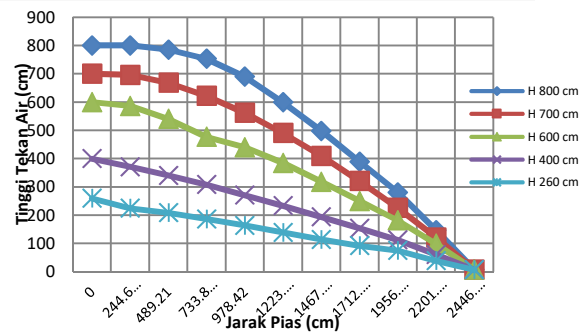


Gambar 9. Analisis garis aliran rembesan air regresi empiris kwadratik.

Setelah seluruh variasi garis aliran rembesan air di tubuh bendung Empris dianalisis, maka lengkung garis depresi empiris yang terjadi dapat terwakili oleh persamaan lengkung garis aliran rembesan air regresi kwadratik dalam bentuk estimasi yaitu $Y_{est} = a + bx + cx^2$, dalam hal ini dapat dilihat pada gambar diatas.

3) Garis Aliran Rembesan air teori *Matemata-Laplace*

Garis aliran rembesan air hasil perhitungan teori *Matemata-Laplace* menunjukkan kecenderungan (*trend*) sama dengan garis aliran rembesan air yang terjadi pada uji coba empiris model fisik (*empiris*). Hal ini dapat dibuktikan bahwa hubungannya mempunyai sebaran aliran air rembesan yang sama atau sangat senigfikan dimana R yang terjadi < 1 yaitu 0,999.



Gambar 10. Diagram korelasi garis aliran arembesan regresi kwadratik empiris dan teori *Matemata-Laplace*

Garis depresi ini juga merupakan Garis lengkung depresi yang membentuk persamaan kurve non linier kwadratik hasil lampiran L30 s/d L34 yang dibuktikan uji keberartian bahwa F hasil penelitian ; 796817,04 ; 2151743,1 ; 1820134,11 436115,52; 21135898,4 > F 7 tabel 5,32, berarti persamaan regresi tersebut signifikan (*bentuk regresi pangkat dua sangat cocok*) persamaan ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

Tabel 10 Uji Keberartian Garis Aliran Rembesan air Kwadratik *Matemata-Laplace*

No.	Tinggi Air Tampungan (H) cm	Persamaan Garis Aliran Rembesan regresi Kwadratik ($\hat{Y}_{est}$)	Koefisien Regresi		Uji Keberartian	
			R ² .xy,xk	R _{xy}	F penelitian	F tabel
1	800	$800,1035 - 0,01x - 0,00013x^2$	0,9999993	0,516299	796817,04	5,32
2	700	$713,3103 - 0,06832x - 0,00008989x^2$	0,9999997	0,504717	2151743,10	5,32
3	600	$607,20 - 0,12321x - 0,00002x^2$	0,9999970	0,4924580	1820134,10	5,32
4	400	$399,2453 - 0,10912x - 0,000049x^2$	0,9999960	0,4821770	436115,52	5,32
5	260	$241,244 - 0,06816x - 0,000011 x^2$	0,9999950	0,4896070	1135898,40	5,32

4) Analisis uji beda Hipotesis Nihil dan Alternatif pada persamaam Garis Aliran Rembesan air Teori dan Uji model Fisik (Empiris).

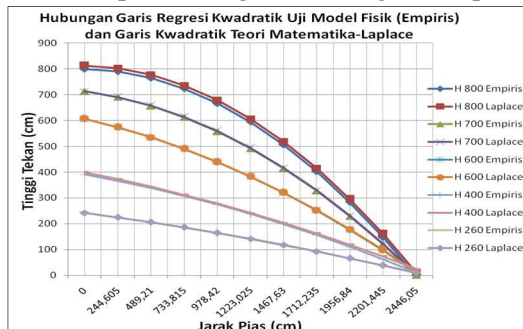
Garis Aliran Rembesan air Kwadratik Empiris dan Teori *Matemata-Laplace*, hasil uji beda hipotesis untuk garis depresi yang terjadi pada tinggi tampungan air H=800 cm, H=700 cm, H=600 cm, H=400 cm, Ho ditolak karena t yang terjadi $3,333 > t$ (tabel 2,228), -7,836; -6,936 < t (tabel -2,228) berarti keempat persamaan garis depresi itu tidak terdapat perbedaan, sedangkan untuk persamaan H=260 cm , Ho diterima karena t yang terjadi $1,462 > t$ (tabel -2,228) berarti persamaam garis depresi terdapat perbedaan.

5) Pembahasan terhadap dua pendekatan

Persamaan GAR

Pada pendekatan teori *Matemata-Laplaee* pada bagian hilir diasumsikan tinggi depresi sesuai dengan keadaan yang sebenarnya (*Empiris*), begitu pula pada bagian hulu. Sehingga pendekatan *Matemata-Laplace* dimaksudkan untuk menentukan tinggi tekanan Air Rembesan didalam tubuh timbunan bendung/tanggul. Jadi hasil analisis teori *Matemata-Laplace* sangat tergantung keberadaan tinggi tampungan yang ada di hulu dan tinggi tekan air rembesan di hilir. Jika empiris dan Teori *Matemata-Laplace* pendekatannya dibandingkan ternyata memang sama. Dalam hal ini secara uji coba model fisik (empiris) yang mendekati hasilnya adalah Perhitungan Teori *Matemata-Laplace*. Dengan

demikian secara persamaan garis depresi dapat didekati secara non linear, yaitu $\hat{Y} = a + b.X + c.X^2$. Dan Persamaan ini ternyata juga dapat diterapkan pada teori *Matematis-Laplace* tetapi harga konstanta b dan c berbeda dengan hasil uji model fisik (*Empiris*). Untuk mengetahui pendekatan hasil yang diperoleh pada analisis perbandingan kedua garis depresi



Gambar 11. Hubungan Garis regresi Kwadrat Uji Model Fisik (*Empiris*), Garis Depresi Regresi Teori dan Garis Kwadrat Teori *Matematis-Laplace*.

6) Debit Rembesan air

Debit rembesan pada hasil uji model fisik (*empiris*) dan teori *Matematis-Laplace* ditubuh timbunan bendung/tanggul homogen dengan variasi kepadatan, tinggi tampungan air bendung/waduk, debit rembesan yang terjadi dibagian hilir dari kedua variabel (*Empiris* dan *Teori Matematis-Laplace*) menunjukan besaran volume < 2 % dari volume total tampungan air, untuk tingkat kepadatan 95% tidak ada perbedaan debit rembesan (H_o ditolak F penelitian/hitungan $328,797 > F$ tabel $19,406$), sedangkan untuk tingkat kepadatan 90%, 85% terdapat perbedaan (H_o diterima F penelitian hitungan masing-masing $0,246; 1,261 < F$ tabel $19,406$).

KESIMPULAN

Didasarkan hasil analisa data pada penelitian ini, maka studi ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Alat rancang bangun dapat digunakan sebagai alat tambahan uji GAR dilaboratorium, hal ini telah diujikan pada tubuh timbunan bendung/tanggul homogen dengan tingkat kepadatan 95% pada kondisi tinggi air tampungan $H=800, 700, 600, 400, 260$ cm, secara kalibrasi

mendapatkan hasil Persamaan $\hat{Y} = a + b.X + c.X^2$ adalah garis depresi aliran rembesan air (GAR) $a=800,1042; 713,3102; 607,096; 399,007; 241,863$ $b=0,007766; 0,007130; 0,12309; 0,1092; 0,0715$ $c=0,000131; 0,00008; 0,00003; 0,000024; 0,000096$; dan GAR Teori *Matematis-Laplace* $a=800,1035; 713,3103; 607,2; 399,2453; 241,8464$ $b=0,01; 0,006832; 0,12321; 0,10912; 0,06816$ $c=0,00013; 0,00091; 0,000044; 0,00002; 0,000011$, keduanya tidak terdapat perbedaan antara GAR Teori *Matematis-Laplace* dengan hasil uji coba model fisik (*GAR Empiris*). $t=11,433; 6,326; 3,108; 3,228; 3,462 > 2,228$ tabel.

- Hasil Uji Simulasi aplikasi Persamaan garis depresi aliran rembesan air (GAR) pada tubuh timbunan bendung/tanggul homogen tingkat kepadatan 80 %, 85 %, 95 % pada kondisi air tampungan minimum ($H=260$ cm) terdapat perbedaan antara Teori *Matematis-Laplace* dengan hasil uji coba model fisik (*Empiris*) hal ini disebabkan tekanan rembesan air mengecil.
- Debit volume rembesan air yang terjadi dibagian hilir tubuh timbunan bendung/tanggul homogen pada tingkat kepadatan 85 %, 90 % tidak ada perbedaan kecuali pada tingkat kepadatan 95 % ada perbedaan, namun kedua data tersebut masih memenuhi persyaratan volume debit rembesan maximum yang diijinkan sebesar 2% dari tampungan total.
- Bentuk persamaan garis depresi aliran rembesan air ditubuh timbunan bendung/tanggul homogen dengan tingkat kepadatan adalah :
 - Bentuk persamaan Uji model Fisik (*Empiris*) yaitu : $\hat{Y} = a + b.X + c.X^2$, yaitu dengan Tinggi air tampungan 800,700,600,416 dan 260 cm besaran nilai $a=799,4042; 713,092; 606,416; 399,907; 242,663$; $b=0,007766; 0,00713; 0,12109; 0,0945; 0,0715$; dan $c=0,00031; 0,00008989; 0,00005021; 0,0000248; 0,0000046$.
 - Bentuk persamaan Uji teori *Matematis-Laplace* yaitu : $\hat{Y} = a + b.X + c.X^2$, dengan ketinggian air tampungan 800,700,600,400 dan 260 cm besaran nilai $a=800,1035; 713,3103; 607,20; 399,2453; 241,244$. $b=0,001; 0,06832; 0,12321; 0,10912$;

0,06816. $c=0,00013$; $0,00008989$; $0,000049$; $0,00002$; $0,000011$. Untuk angka koefisien penyesuaian GAR empiris terhadap GAR Matematika – Laplace dengan persamaan sebagai berikut : Selisih nilai $a=1 > 0,0993$; $0,2183$; $0,784$; $0,6617$ dan $1 < 1,414$. $b=1 > 0,006766$; $0,06119$; $0,00212$; $0,0146$; $0,0034$. $c=0$
Jika dilihat perbedaan pada angka nilai a, b, c , maka kedua perumusan GAR memakai 95% *confidence interval, level*

of significance 5% perumusan GAR memenuhi syarat. Sehingga perumusan GAR empiris dapat dipakai sebagai perumusan alternative untuk menentukan garis rembesan air yang terjadi di tubuh bendung.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini telah mendapatkan dukungan dari laboratorium Teknik Sipil dan dosen Teknik Sipil Universitas Negeri Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Braja M. Das, (1988), *Mekanika Tanah Jilid 1 & 2*. Jakarta. Erlangga.
- Daniel Harmey, (2002), *Pedestrian modeling: Current methods and future directions*, *Journal Journal of the Irrigation and Drainage Division*, (January) Proceedings of The American Society of Civing Enginners.
- Dieterich J. Schuring, (1997), *Scale Models in Engineering*. Buffalo New York. A Wheaton and Co.
- Djarwanto PS, (1996) *Statistik Induktif*. Yogyakarta. BPFE.
- Hadari Nanawi, (1994), *Peneliti Terapan*, Yogyakarta, Gajah Mada University Press.
- Ibnu Kasiro, (2003), *Perilaku dan Stabilitas Rembesan Bendungan Krisak*, Jawa Tengah Sebelum dan Sesudah Perbaikan, *Jurnal PIT IX HATHI*, Senggigi – NTB.
- Lashari, (2000), *Analisis Kalibrasi Alat-alat Laboratorium*, *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan* No:4 Volume 2 (Desember) : 1-13 Fakultas Teknik UNNES.
- Soedibyo, (1993), *Teknik Bendungan*, Jakarta, Pradya Paramita.
- Sudjana, (1992), *Teknik Analisis Regresi dan Korelasi*, Bandung, Tarsito.
- Suharsini Arikunto, (1996), *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktek*, Edisi Revisi III, Jakarta, PT. Rineka Cipta.
- Suyono Sosrodarsono, (1998), *Bendungan Type Urugan*, Jakarta, Pradya Paramita.