

## PEMODELAN HYDRAULIC FRACTURE PADA SAAT PENGISIAN WADUK PERTAMA BENDUNGAN ROCKFILL

Wilson Koven<sup>1)</sup>, Muhammad Riza<sup>2)</sup>, Y. Djoko Setiyarto<sup>3)</sup>

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia  
Jl. Dipatiukur No. 112-116, Bandung, 40132, Indonesia

diterima: 23 Maret 2020  
dipublikasi: 6 April 2020

### ABSTRAK

*Bendungan rockfill akan mengalami kondisi kritis pada awal pengisian waduk akibat terjadinya hydraulic fracture pada hulu inti bendungan. Hydraulic fracture (retak hidrolis) pada bendungan rockfill terjadi akibat tanah tidak mampu menahan tegangan tarik dari tekanan hidrolis. Tegangan tarik akan terjadi apabila tekanan air pori lebih besar dari tegangan efektif tanah. Tekanan air pori akan meningkat pada saat pengisian waduk dan akan mengurangi tegangan efektif tanah. Untuk menganalisis perubahan tekanan air pori dan tegangan efektif selama proses pengisian maka dilakukan pemodelan potensi hydraulic fracture. Pada studi ini, pemodelan potensi hydraulic fracture dilakukan dengan model tanah elastic-plastic untuk inti bendungan dan linear-elastic untuk filter dan rockfill dengan kondisi tanah unsaturated di mana koefisien rembesan merupakan fungsi Soil-Water Characteristic Curve (SWCC). Pemodelan dilakukan menggunakan software komputer SEEP/W untuk menganalisis rembesan dan SIGMA/W untuk menganalisis tegangan. Pada studi ini akan ditampilkan pola debit rembesan, kontur tekanan air pori, tegangan total, dan tegangan efektif pada hulu inti bendungan.*

**Kata kunci:** *hydraulic fracture, rembesan, tanah unsaturated, tekanan air pori dan tegangan efektif*

### 1. Pendahuluan

Bendungan adalah bangunan penahan air yang menahan air dari hulu ke hilir. Salah satu jenis bendungan umum diketahui adalah jenis bendungan urugan. Bendungan memiliki resiko tinggi karena mengandung potensi bahaya keruntuhan yang dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar. Pada umur hidup bendungan, ada beberapa waktu dimana bendungan mengalami kondisi kritis. Salah satu kondisi dimana bendungan mengalami kondisi kritis adalah pada saat penggenangan pertama kali (*first impoundment*).

Penggenangan pertama kali (*first impoundment*) didefinisikan sebagai pengisian/peninggian air pertama kali pada hulu bendungan, biasanya peninggian ini dilakukan dalam beberapa bulan secara bertahap. Keruntuhan bendungan pada saat penggenangan pertama kerap berhubungan dengan adanya fenomena arching yang menyebabkan terjadinya *hydraulic fracture*.

Maksud Maksud penelitian ini adalah untuk memahami pemodelan potensi *hydraulic fracture* pada bendungan jenis urugan batu (*rockfill dam*) pada saat dilakukan penggenangan / pengisian pertama kali sehingga meminimalkan kemungkinan terjadinya *hydraulic fracture* pada bendungan

urugan batu.

### 2. Studi Pustaka

#### 2.1 Hydraulic Fracture

*Hydraulic fracture* (retak hidrolis) pada bendungan urugan batu didefinisikan sebagai retaknya permukaan hulu inti kedap air bendungan urugan batu akibat tekanan air waduk, karena terjadinya efek busur (*arching*) yang menyebabkan tegangan total lebih rendah dari beban di atasnya (*overburden pressure*), dan pada penggenangan pertama tegangan air pori mengurangi tegangan efektif sedemikian rupa sehingga tekanan hidrolis air waduk dapat membuat retak tarik (*tension fracture*). Apabila retak dibiarkan maka akan menyebabkan terjadinya piping yang berpotensi terjadinya kegagalan bendungan.

*Hydraulic fracture* selalu terjadi pada saat pengisian pertama, dan kecepatan penimbunan dan kecepatan pengisian waduk tidak mempengaruhi terjadinya *hydraulic fracture*. Pada pelaksanaan penimbunan yang lebih lama tubuh bendungan akan mengalami konsolidasi yang lebih besar dibandingkan dengan bendungan dengan pelaksanaan penimbunan yang cepat, demikian juga pada pengisian waduk yang lebih lama, inti akan

mengalami pembasahan yang lebih lama, sehingga jejaring aliran (*flownet*) sudah terbentuk dibanding dengan pengisian waduk yang lebih cepat. Kedua hal tersebut tidak mempengaruhi *hydraulic fracture* (Djawardi, 2011)<sup>[1]</sup>.

**Tabel 1** Perbedaan kecepatan penimbunan dan penggenangan pada bendungan yang mengalami retak hidrolis (Djawardi, 2013)<sup>[2]</sup>

Bendungan	Tinggi (m)	Waktu Pelaksanaan	Kecepatan Penimbunan
		(tahun)	(m/bulan)
Baldershead	48	4	2
Bytjogvet	90	1	20
Viddalvatn	70	1	11
Teton	93	3	27
Yan's Creek	24	2	7

Sebuah Analisis menyatakan bahwa rasio tinggi berbanding lebar dasar inti bendungan ( $H/W > 2$ ) adalah bendungan yang sangat rawan terhadap *hydraulic fracture*, sedangkan apabila rasio  $1 < (H/W) < 2$ , maka bendungan tersebut rawan terjadi *hydraulic fracture*.

Pada saat pengisian waduk pertama kali, air akan membasahi bagian *rockfill* bendungan dan kemudian merembes masuk ke dalam tubuh bendungan dan inti menjadi basah oleh karena rembesan tersebut. Akibat adanya rembesan maka akan terjadi penurunan tegangan efektif pada tanah. Apabila dicapai suatu kondisi dimana tegangan efektif tanah lebih kecil dari pada tekanan air pori maka akan terjadi tarikan hidrostatis yang memiliki potensi menyebabkan retak. Hubungan rembesan dan tegangan efektif akan dijelaskan pada sub bab Tegangan dan Tekanan Air Pori.

Kriteria terjadinya *hydraulic fracture* dalam analisis *hydraulic fracture* dengan metode elemen hingga dari evaluasi tegangan sebagai berikut:

- Nilai tegangan vertikal efektif ( $\sigma_v'$ ) pada permukaan hulu inti hasil analisis tegangan dan deformasi dengan menggunakan analisis ganda (*coupled analysis*) dibandingkan dengan tekanan hidrolis air waduk ( $\sigma_w$ ) dalam suatu tabel dan grafik,
- Apabila tegangan vertikal efektif pada suatu titik lebih kecil dari tekanan hidrolis ( $\sigma_v' < \sigma_w$ ) maka pada titik tersebut terjadi tegangan tarik ( $\sigma_t$ ) dan berpotensi terjadi *hydraulic fracture*,
- Tegangan tarik yang terjadi pada titik tersebut kemudian dibandingkan dengan tegangan tarik pada saat terjadi retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium.
- lebih besar dari tegangan tarik pada saat terjadi

retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium, maka akan terjadi *hydraulic fracture*,

- Apabila tegangan tarik pada titik yang ditinjau lebih kecil dari tegangan tarik pada saat terjadi retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium, meskipun terjadi tegangan tarik, tetap tidak terjadi *hydraulic fracture*,

Apabila ada potensi terjadinya *hydraulic fracture* maka solusi untuk menghindari *hydraulic fracture* adalah sebagai berikut:

- Memperlebar dasar inti bendungan
- Menaikkan tegangan efektif dan tegangan tarik dari tanah dengan cara pemadatan tanah
- Merencanakan inti kedap air dengan kemiringan sisi hulu dan sisi hilir secara simetris dengan sudut tertentu yang tergantung dari parameter bahan timbunan inti kedap air agar fenomena busur dapat dikurangi (Djawardi, 2013)<sup>[2]</sup>

### 3. Metodologi Penelitian

#### 3.1 Pemodelan Bendungan Rockfill

Model bendungan yang dipakai adalah model bendungan Jambu Aye di propinsi Nanggroe Aceh Darussalam pada posisi STA 0+300. Analisis dan pemodelan *hydraulic fracture* dilakukan dengan menggunakan software SEEP/W 2007 untuk memodelkan rembesan dan SIGMA/W 2007 analisis *uncoupled* untuk memodelkan tegangan.

Data teknis bendungan adalah sebagai berikut:

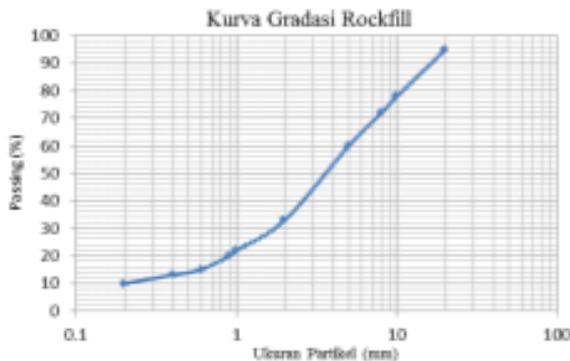
- Tinggi Bendungan : 56 m
- Lebar Bendungan : 400 m
- Elevasi Air Rencana : 64 m
- Kecepatan pengisian : 5 m per bulan
- Inti bendungan
  - Lebar sisi atas : 15 m
  - Lebar sisi bawah : 30 m
  - Tinggi : 54,5 m
  - Material : Lempung
- Fine Filter bendungan
  - Tebal dari Inti : 2 m
  - Material : Pasir
- Coarse Filter bendungan
  - Tebal DARI Fine Filter : 3 m
  - Material : Pasir
- Rockfill bendungan  
Material : kerakal dan kerikil

Pada pemodelan ini pengisian akan dilakukan 5 m / bulan. Pengisian akan dimulai pada hari ke-H dan akan dihentikan pada hari ke- H+260 ketika

elevasi muka air mencapai elevasi 64 m (elevasi rencana), kemudian dari hari ke- H+260 hingga hari ke- H+1825 (5 tahun) elevasi muka air akan tetap berada pada elevasi 64 m untuk mengamati proses penjujukan pada tanah di tubuh bendungan.

### 3.2 Data Material Bendungan

Rockfill pada bendungan merupakan material berupa kerikil (*gravel*). Kurva gradasi berikut diambil dari penelitian pada hasil studi dari bendungan Mianeh dam dan Madani dam di Iran oleh Ali Ganbari (An Experiment Study on the Behavior of Rockfill Materials Using Large Scale Test, 2008)<sup>[4]</sup>. Adapun kurva gradasi rockfill hasil studi tersebut adalah sebagai berikut:



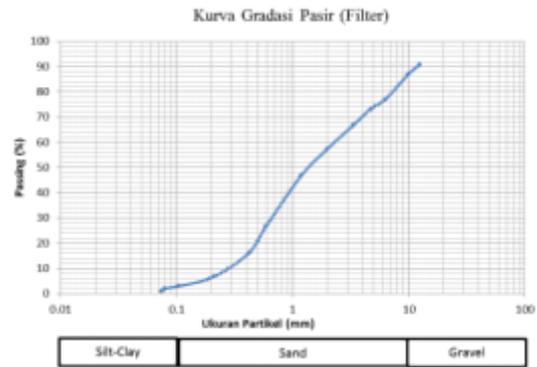
Gambar 1 Kurva Gradasi Rockfill

Dari kurva gradasi Rockfill tersebut dapat diperoleh beberapa data-data yaitu:

- D90 = 17 mm
- D60 = 5 mm
- D50 = 3,5 mm
- D30 = 1,8 mm
- D20 = 0,9 mm
- D10 = 0,2 mm
- P200 = 3,69%

Filter pada bendungan rockfill merupakan material pasir. Pada pemodelan ini, dikarenakan hasil kurva gradasi material pasir bendungan Jambu Aye tidak berada pada kurva gradasi yang telah ditentukan, maka untuk pemodelan pada studi ini digunakan kurva gradasi material pasir bendungan Keuliling yang juga berada di propinsi Aceh. Kurva gradasi pasir yang dipakai adalah kurva gradasi dari Laporan Hasil Penyelidikan Tanah “Pekerjaan Supervisi, Perencanaan Land Scape dan Penyelidikan Tanah Waduk Keuliling Nanggroe Aceh Darussalam”. Kurva dapat dilihat pada

Gambar 2.



Gambar 2 Kurva Gradasi Filter

Dari kurva gradasi filter (pasir) tersebut dapat diperoleh beberapa data-data yaitu:

- D90 = 12 mm
- D60 = 2,3 mm
- D50 = 1,35 mm
- D30 = 0,67 mm
- D20 = 0,49 mm
- D10 = 0,29 mm
- P200 = 1,4%

Inti bendungan yang akan dimodelkan adalah inti bendungan dengan material lempung plastisitas tinggi (*High Plasticity Clay / CH*). Untuk bagian inti bendungan data yang diperlukan adalah data hasil uji batas-batas atterberg. Hasil dari uji batas-batas atterberg pada bendungan Jambu Aye pada tahun 2010 adalah sebagai berikut:

Tabel 2 Hasil Uji Batas Atterberg Lempung CH

Tabun	Kode titik Bor	LL	PI
2010	TP-1	72.02	23.67
	TP-2	40.5	17.66
	TP-3	68.36	34.3
	TP-4	59.63	31.16
	TP-5	81.23	46.37
	TP-6	44.86	21.82
	TP-7	58.28	30.28
	TP-8	62.57	34.21
	TP-9	61.47	32.36
	TP-10	59.41	27.89
	TP-11	62.69	28.29
	TP-12	32.84	14.66
	TP-13	66.86	33.01
	TP-14	48	19.28
	TP-15	69.43	46.79
	TP-16	58.35	25.86
	TP-17	42.6	20.87
	TP-18	55.26	31.22
	TP-19	29.24	13.42
	TP-20	60.26	26.41
	TP-21	34.1	16.93
	TP-22	46.16	21.23
	TP-23	58.44	29.25
	TP-24	41.52	20.64
	TP-25	50.04	24.09
	TP-26	64.15	27.15
	TP-27	50.27	20.25
	TP-28	55.49	22.6
	TP-29	57.58	23.28
	TP-30	58.96	26.95
<b>Average</b>		<b>55.019</b>	<b>26.397</b>

Parameter kuat geser tanah adalah berupa nilai kohesi efektif ( $c'$ ) dan sudut geser efektif tanah ( $\phi'$ ). Parameter kuat geser material yang dimodelkan adalah sebagai berikut:

1. Parameter kuat geser untuk bagian **inti bendungan (lempung CH)** diambil dari uji Triaksial CU bendungan Jambu Aye. Hasil uji Triaksial CU yang didapat adalah sebagai berikut:  
 $c' = 18,47 \text{ kPa}$   
 $\phi' = 27,84^\circ$
2. Parameter kuat geser untuk material **tanah granular** untuk **filter** diambil dari "Laporan Perhitungan *Liquefaction*, Rembesan dan Analisa Seismik Desember 2003" dari Review Desain Saddle Dam dan Main Dam Waduk Keuliling. Nilai dari parameter tersebut adalah sebagai berikut:  
 $c' = 0$   
 $\phi' = 40^\circ$
3. Parameter kuat geser untuk material granular untuk **rockfill** diambil dari hasil studi pada bendungan Madani Dam (An Experimental Study on the Behavior of Rockfill Materials Using Large Scale Test)<sup>[5]</sup>. Dengan parameter kuat geser adalah sebagai berikut

$$c' = 0$$

$$\phi = 47,5^\circ$$

#### 4. Analisis Perhitungan

##### 4.1 Penentuan *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC)

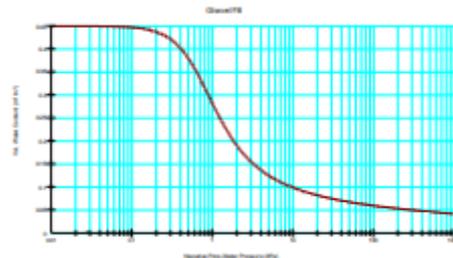
Penentuan *Soil Water Characteristic Curve* menggunakan metode **Fredlund and Xing**. Untuk penentuan kurva SWCC diperlukan *fitting curve parameter*. *Fitting curve parameter* adalah a, n dan m yang dihitung berdasarkan analisis butir untuk tanah granular (*rockfill dan filter*) dan nilai batas-batas atterberg untuk tanah kohesif (inti bendungan). Nilai fitting curve parameter untuk rockfill model bendungan adalah sebagai berikut:

$$a = 0,6$$

$$n = 2,16$$

$$m = 0,84$$

Dengan memasukkan *fitting curve parameter* ke *Volumetric Water Content Function* pada SEEP/W maka didapat *Soil-Water Characteristic Curve rockfill* yang diplot berdasarkan metode **Fredlund and Xing** untuk tanah bergranular.



Gambar 3 Kurva SWCC Rockfill

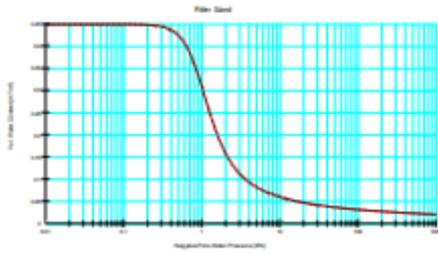
Nilai fitting curve parameter untuk filter model bendungan adalah sebagai berikut:

$$a = 0,86$$

$$n = 3,29$$

$$m = 0,96$$

Dengan memasukkan parameter penyesuai fungsi ke *Volumetric Water Content Function* pada SEEP/W maka didapat *Soil Water Characteristic Curve filter pasir* yang diplot berdasarkan metode **Fredlund and Xing** untuk tanah bergranular.



Gambar 4 Kurva SWCC Filter Pasir

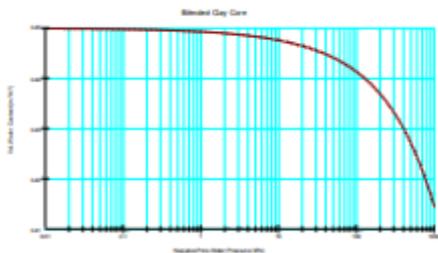
Nilai fitting curve parameter untuk core bendungan adalah sebagai berikut:

$$a = 132,62$$

$$n = 0,54$$

$$m = 0,057$$

Dengan memasukkan parameter penyesuaian fungsi ke *Volumetric Water Content Function* pada SEEP/W maka didapat *Soil-Water Characteristic Curve* inti bendungan (CH) yang diplot berdasarkan metode *Fredlund and Xing* untuk tanah berbutir halus.



Gambar 5 Kurva SWCC Filter Pasir

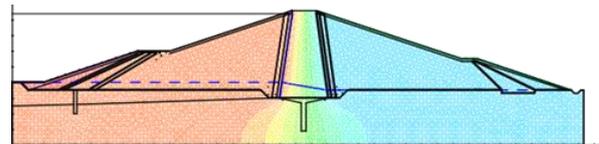
#### 4.2 Analisis dan Pemodelan Rembesan (Seepage) dengan SEEP/W 2007

Analisis dan pemodelan rembesan bendungan Jambu Aye dilakukan dengan rentang waktu (durasi) 1825 hari (5 tahun) dengan pengamatan sebagai berikut:

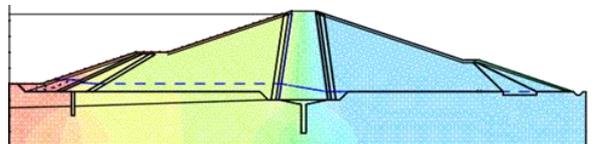
1. Hari H pengisian (mulai pengisian)
2. 15 hari pengisian (H + 15), dengan tinggi muka air 22,5 m dari fondasi
3. 30 hari pengisian (H + 30), dengan tinggi muka air 25 m dari fondasi
4. 60 hari pengisian (H + 60), dengan tinggi muka air 30 m dari fondasi
5. 90 hari pengisian (H + 90), dengan tinggi muka air 35 m dari fondasi
6. 120 hari pengisian (H + 120), dengan tinggi muka air 40 m dari fondasi
7. 180 hari pengisian (H + 180), dengan tinggi muka air 50 m dari fondasi

8. 260 hari pengisian (pengisian dihentikan) (H + 260), dengan tinggi muka air 64 m dari fondasi
9. 365 hari (1 tahun) dari hari H pengisian (H + 365), dengan tinggi muka air 64 m dari fondasi.
10. 730 hari (2 tahun) dari hari H pengisian (H + 730), dengan tinggi muka air 64 m dari fondasi
11. 1835 hari (5 tahun) dari hari H pengisian (H + 1825), dengan tinggi muka air 64 m dari fondasi

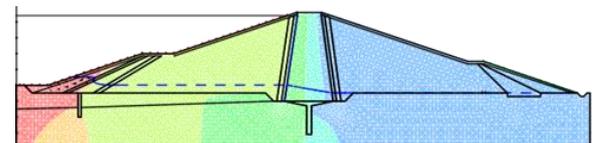
Hasil analisis rembesan dengan SEEP/W 2007 dapat dilihat pada Gambar 6 sampai Gambar 27 dan Tabel 3 di bawah. Gambar di bawah ini merupakan kontur total head dan kontur tekanan air pori selama pengisian waduk. Tabel merupakan total debit yang terjadi pada hulu inti bendungan.



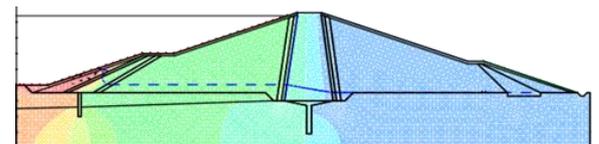
Gambar 6 Kontur Total Head Hasil SEEP/W Steady State (H = 0) Bendungan Jambu Aye



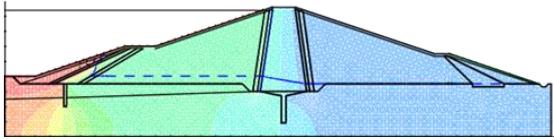
Gambar 7 Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +15 pengisian, elevasi muka air 22,5 m



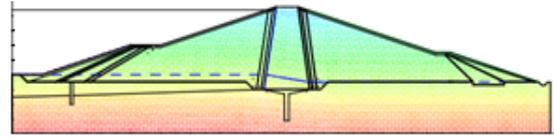
Gambar 8 Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +30 pengisian, elevasi muka air 25 m



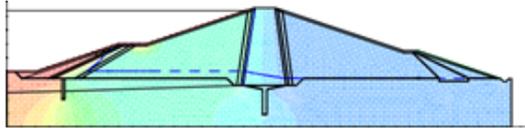
Gambar 9 Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +60 pengisian, elevasi muka air 30 m



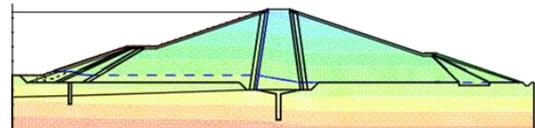
**Gambar 10** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +90 pengisian, elevasi muka air 35 m



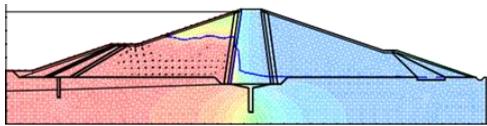
**Gambar 17** Kontur PWP Hasil SEEP/W Steady State (H = 0) Bendungan Jambu Aye



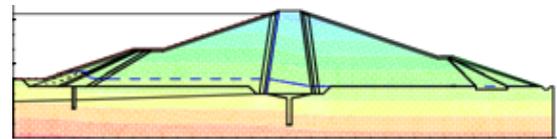
**Gambar 11** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +120 pengisian, elevasi muka air 40 m



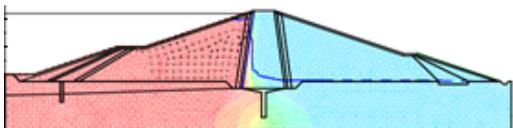
**Gambar 18** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+15) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 22,5 m



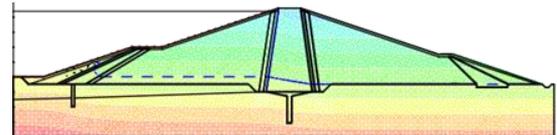
**Gambar 12** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +180 pengisian, elevasi muka air 50 m



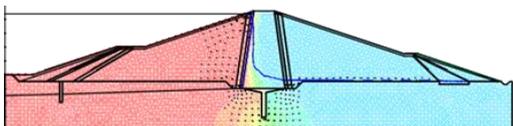
**Gambar 19** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+30) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 25 m



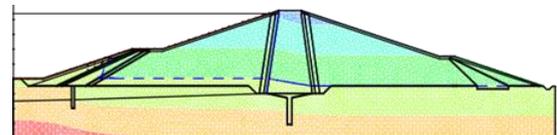
**Gambar 13** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +260 pengisian, elevasi muka air 64 m



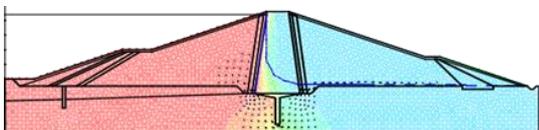
**Gambar 20** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+60) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 30 m



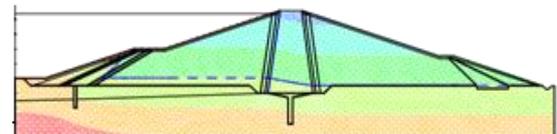
**Gambar 14** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +365 pengisian, elevasi muka air 64 m



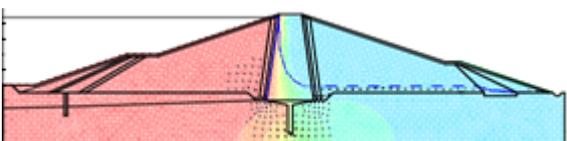
**Gambar 21** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H +90) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 35 m



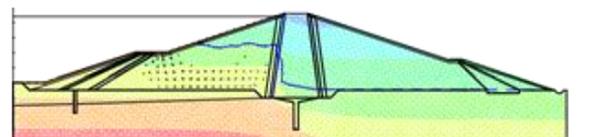
**Gambar 15** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +730 pengisian, elevasi muka air 64 m



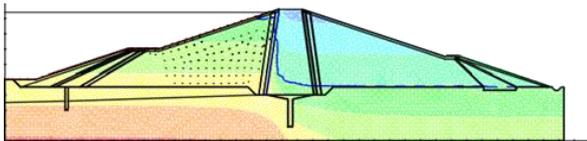
**Gambar 22** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+120) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 40 m



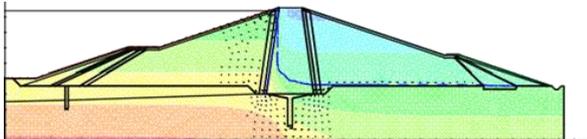
**Gambar 16** Kontur Total Head Hasil SEEP/W Transient Bendungan Jambu Aye, H +1825 pengisian, elevasi muka air 64 m



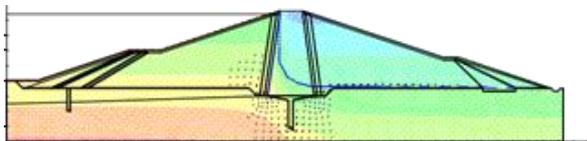
**Gambar 23** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+180) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 50 m



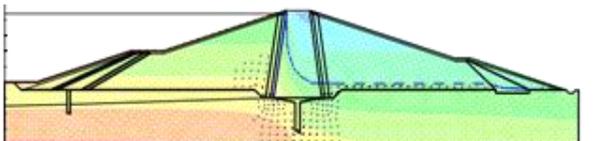
**Gambar 24** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+260) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



**Gambar 25** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+365) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



**Gambar 26** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H +730) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



**Gambar 27** Kontur PWP Hasil SEEP/W Transient (H+1825) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m

**Tabel 3** Hari Pengisian, Tinggi Muka Air dan Debit Rembesan pada Inti Bendungan

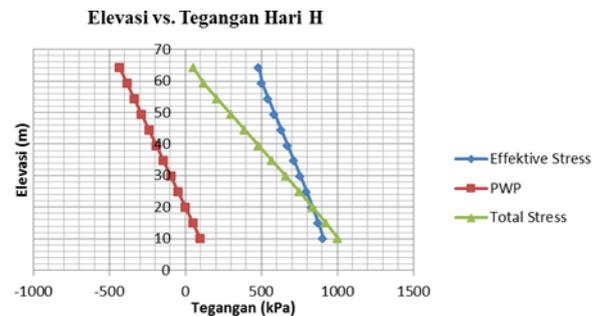
Days	Tinggi Muka Air (m)	Debit Rembesan pd Inti Bendungan (m <sup>3</sup> /day)
H	20	0.0057628
H + 15	22.5	0.0071739
H + 30	25	0.007196
H + 60	30	0.0074159
H + 90	35	0.0076145
H + 120	40	0.0085796
H + 180	50	0.17782
H + 260	64	0.072543
H + 365 (1th)	64	0.071872
H + 730 (2th)	64	0.068655
H + 1825 (5th)	64	0.062617

**NB: Elevasi diukur dari pondasi bendungan)**

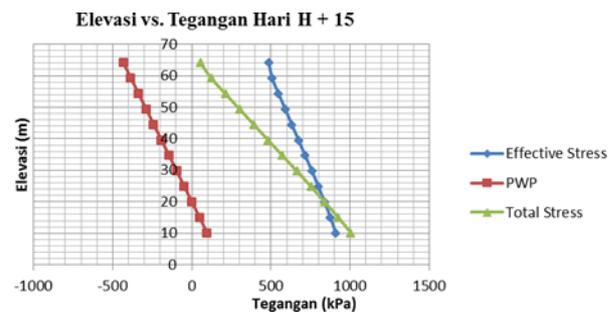
### 4.3 Analisis dan Pemodelan Tegangan dengan SIGMA/W 2007

Setelah melakukan analisis dan pemodelan rembesan dengan menggunakan SEEP/W 2007, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis dan pemodelan tegangan dengan SIGMA/W 2007.

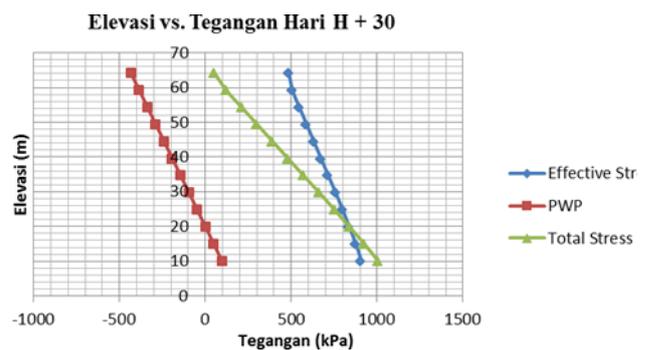
Untuk memodelkan dan mengetahui potensi *hydraulic fracture* maka hasil tegangan efektif, tekanan air pori (PWP), dan tegangan total akan diplot. Pemodelan dilakukan dengan rentang waktu 1825 hari (5 tahun). Berikut adalah hasil perubahan tegangan efektif dan tekanan air pori akibat pengisian waduk.



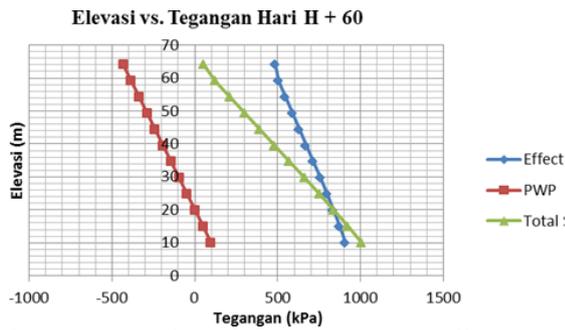
**Gambar 28** Elevasi vs. Tegangan hasil SIGMA Insitu (H = 0) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 20 m



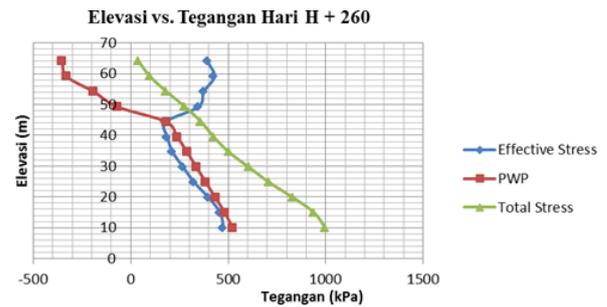
**Gambar 29** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 15) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 22,5 m



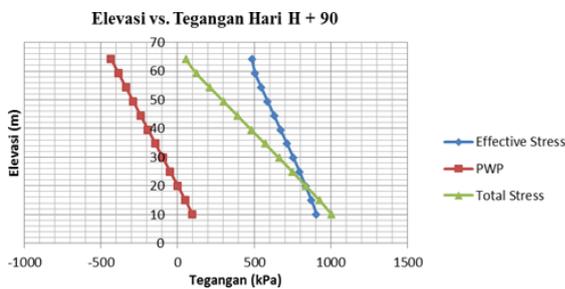
**Gambar 30** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 30) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 25 m



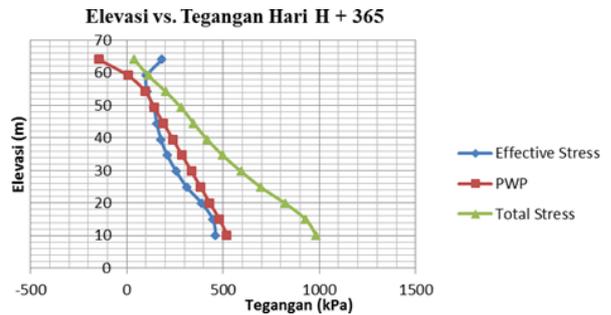
**Gambar 31** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 60) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 30 m



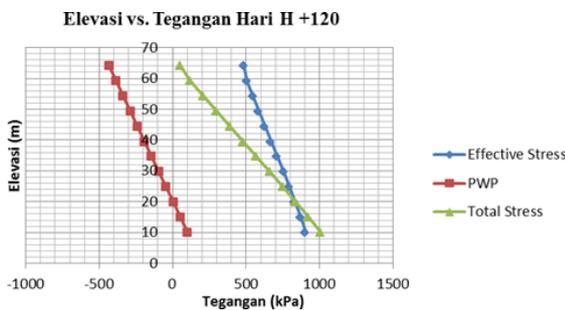
**Gambar 35** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 260) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



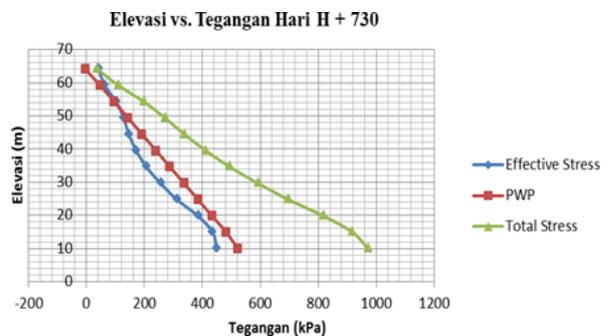
**Gambar 32** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 90) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 35 m



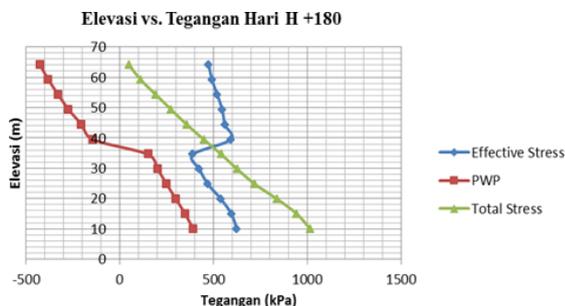
**Gambar 36** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 365) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



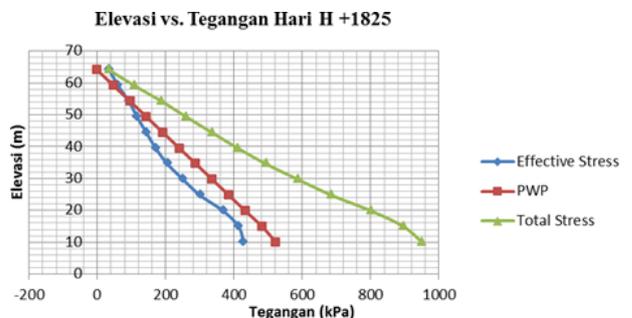
**Gambar 33** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 120) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 40 m



**Gambar 37** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H = 730) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m



**Gambar 34** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H + 180) Bendungan Jambu Aye, elevasi 50 m



**Gambar 38** Elevasi vs. Tegangan Hasil SIGMA Uncoupled (H = 1825) Bendungan Jambu Aye, elevasi muka air 64 m

Hasil yang didapat dari analisis dan pemodelan tegangan efektif, tekanan air pori, dan tegangan total untuk tiap waktu yang telah ditentukan terhadap potensi *Hydraulic fracture* adalah sebagai berikut:

1. Pada awal pengisian waduk hingga 6 bulan pengisian dengan tinggi elevasi air mencapai 50 m dari fondasi bendungan, tidak terdapat potensi *hydraulic fracture*
2. Pada hari ke 260 pengisian (akhir pengisian) dengan tinggi elevasi air mencapai titik tertinggi 64 m dari fondasi bendungan, terdapat potensi *hydraulic fracture* dari dasar hulu inti bendungan
3. Pada hari ke 365 (1 tahun) hingga hari ke 1825 (5 tahun) setelah pengisian selesai dengan tinggi elevasi air mencapai 64 m dari fondasi bendungan, terdapat potensi *hydraulic fracture* dari dasar hulu inti bendungan hingga elevasi 54 m pada hulu inti bendungan

Solusi untuk mencegah adanya potensi *hydraulic fracture* adalah dengan memperlebar dasar inti bendungan, dengan memadatkan tanah pada inti bendungan untuk meningkatkan tegangan efektif dan tegangan tarik pada tanah, serta merencanakan kemiringan hulu dan hilir inti bendungan secara simetri.

## 5. Penutup

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari hasil analisis dan pemodelan *Hydraulic fracture* pada bendungan rockfill adalah sebagai berikut:

1. Tanah pada pemodelan *hydraulic fracture* pada bendungan rockfill pada saat pengisian pertama adalah tanah *unsaturated*, dengan koefisien permeabilitas adalah berupa fungsi dari *Soil-Water Characteristic Curve*. Untuk mendapatkan *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) dibutuhkan data tanah berupa gradasi butir untuk tanah bergranular (rockfill dan filter) dan indeks plastisitas untuk tanah kohesif (core).
2. Pemodelan *hydraulic fracture* dilakukan dengan membuat fungsi *Soil-Water Characteristic Curve*, kemudian melakukan analisis rembesan dengan SEEP/W untuk mengetahui pola debit rembesan yang terjadi selanjutnya dilakukan analisis tegangan dengan SIGMA/W untuk mengetahui perubahan tekanan air pori dan tegangan

efektif

3. Akibat adanya rembesan pada inti bendungan, tekanan air pori pada waduk akan bertambah sehingga akan menyebabkan berkurangnya nilai tegangan efektif pada tanah. Nilai tegangan efektif pada hulu inti bendungan rockfill akan berkurang sedemikian rupa hingga dicapai suatu titik dimana tekanan air pori akan melebihi nilai tegangan efektif pada hulu inti bendungan rockfill. Pada titik inilah akan terdapat potensi *hydraulic fracture*. Pada studi ini, bendungan Jambu Aye yang dimodelkan akan memiliki potensi *hydraulic fracture* pada pengisian hari ke- H+260 dari dasar hulu inti bendungan hingga elevasi 44 m hulu inti bendungan. Potensi *hydraulic fracture* bertambah tinggi pada hari ke- H+365 (1 tahun) yakni dari dasar hulu inti bendungan hingga elevasi 54 m hulu inti bendungan dan hingga hari ke- H+1825 (5 tahun) elevasi hulu inti bendungan yang berpotensi mengalami *hydraulic fracture* tidak mengalami kenaikan lagi yakni hanya sampai pada elevasi 54 m.

### 5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk studi selanjutnya adalah:

1. Analisis *coupled* dengan menggunakan program komputer lain perlu dilakukan untuk dapat membandingkan hasil yang didapat dari analisis *uncoupled* dengan analisis *coupled*
2. Studi tentang model material non-linear hyperbolic elastic yang sesuai untuk bendungan rockfill dengan kondisi tanah *unsaturated* perlu dilakukan sehingga pemodelan yang dilakukan dapat mendekati kondisi di lapangan
3. Studi tentang tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) pada tubuh bendungan akibat penimbunan bertahap pada saat konstruksi bendungan perlu dilakukan sehingga pemodelan dapat mendekati kondisi yang sebenarnya
4. Uji laboratorium untuk menentukan *Soil Water Characteristic* perlu dilakukan untuk tanah dengan kondisi *unsaturated* sehingga pemodelan yang dilakukan dapat mendekati kondisi di lapangan.

Uji *hydraulic fracture* di laboratorium perlu dilakukan untuk mengetahui apakah terjadi *hydraulic fracture* atau tidak pada bendungan yang dimodelkan.

**Daftar Pustaka**

- [1] Djawardi, Didiek, Kabul B.S., Bambang S., & Hary C.H.. “Pengaruh Konfigurasi Inti Kedap Air Bendungan Urugan Batu Terhadap Retak Hidrolis”. *9<sup>th</sup> Indonesian Geotechnical Conference and 15<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting*, 361-365, 2011.
- [2] Djawardi, Didiek, Kabul B.S., Bambang S., & Hary C.H.. “Retak Hidrolis pada Bendungan Urugan Batu Faktor Penyebab dan Cara untuk Dapat Menghindarinya”. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7*, G165- G174, 2013
- [3] Ghanbari, Ali & Sadeghpour, Amir Hossien. “An Experimental Study on the Behavior of Rockfill Materials Using Large Scale Tests”. *EJGE*, 2008.
- [4] Das, Braja M. *Principle of Geotechnical Engineering (7th ed)*. USA: Cengage Learning, 2010.
- [5] Das, Braja M. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis jilid 1*. Jakarta: Erlangga, 1994.
- [6] Geo-Slope International Ltd. *Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W*. Canada: Geo-Slope International Ltd, 2013.
- [7] Fredlund, D. G. & Xing, A. “Equation for the Soil-Water Characteristic Curve”. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 521-532, 1993.
- [8] Vu, Hung Q. & Fredlund D. G. “Challenges to Modeling heave in Expansive Soil”. *Canada Geotech. J.* 43: 1249-1272, 2006.
- [9] Hernandez, Gustavo Torres. *Estimating the Soil-Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index*. A Master Thesis on Arizona State University. USA, 2011
- [10] Mattson, H., Hellstrom, J. G. I. & Lundstrom, T. S. *Research On Internal Erosion in Embankment Dam*. Swedish: Lulea University Of Technology, 2008.