

STUDI KESTABILAN BENDUNGAN MARANGKAYU DENGAN CUTOFF TRENCH DI HULU TUBUH BENDUNGAN

Guntarto Achmadi, Bambang Sarwono, dan A.A.N. Satria Damarneegara
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas FTSP, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail : sarwonobambang@yahoo.com; otratnug@gmail.com

Abstrak— Bendungan Marangkayu di Kabupaten Kutai Kertanegara, Propinsi Kalimantan Timur dibangun diatas tanah lunak, serta didesain dengan cutoff trench pada hulu tubuh bendungan, karena pada as pondasi bendungan sudah direncanakan dipasang PVD (Prefabricated Vertical Drain) yang berfungsi mempercepat proses konsolidasi. Studi bendungan dengan cutoff trench pada sisi hulu ini akan menghitung stabilitasnya dibandingkan bendungan tanpa dipasang cutoff trench, menganalisa stabilitas saat bendungan selesai dibangun dalam keadaan kosong, saat bendungan dalam kondisi tampungan penuh (fullbank) dan saat terjadi penurunan muka air secara mendadak (Rapid Drawdown), perencanaan perbaikan pondasi dengan PVD, serta menganalisa biaya untuk pembangunan bendungan tersebut. Dari hasil perhitungan didapat angka keamanan bendungan tanpa cutoff trench sebesar 1,24. Terjadi peningkatan angka keamanan pada bendungan dengan cutoff trench menjadi 1,46. Sedangkan biaya untuk pembangunan bendungan dan perbaikan pondasi sebesar Rp. 76.876.608.742,-

Kata Kunci : *Cutoff Trench*, stabilitas bendungan, angka keamanan

I. PENDAHULUAN

Secara geografis lokasi bendungan Marangkayu terletak antara 00001' LS hingga 00015' LS dan 117015'BT hingga 117030'BT. Sedangkan secara administratif terletak di wilayah administratif Kecamatan Marangkayu, Kabupaten Kutai Kertanegara, Propinsi Kalimantan Timur.

Kecamatan Marangkayu terdapat suatu lahan persawahan seluas 1500 Ha yang belum teraliri irigasi teknis. Selama ini lahan sawah tersebut menggunakan sistem tadah hujan. Sungai Marangkayu yang merupakan satu-satunya aliran sungai terdekat di areal lahan pertanian, belum dapat dimanfaatkan secara optimal. Hal ini dikarenakan adanya kendala yang dihadapi oleh petani, yaitu elevasi sawah rata-rata yang ada lebih tinggi daripada elevasi muka air sungai. Tujuan pembangunan Bendungan Marangkayu adalah untuk pengairan irigasi pertanian pada lahan persawahan seluas 1500 Ha yang belum teraliri secara optimal.

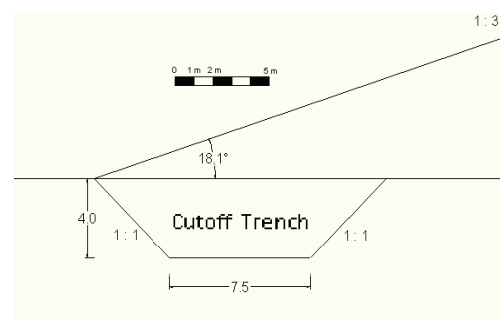
Salah satu aspek yang ditinjau pada bendungan kategori besar yaitu kestabilan tubuh bendungan. Bendungan dengan tinggi 10 m sampai dengan 15 m dapat dikategorikan besar menurut *ICOLD* (*International Commision On Large Dams*) apabila memenuhi persyaratan berikut :

- Panjang puncak bendungan tidak kurang dari 500 m.
- Debit banjir maksimal yang diperhitungkan tidak kurang dari 2000 m³/detik.
- Kapasitas bendungan lebih dari 1.000.000 m³.

d. Bendungan menghadapi kesulitan - kesulitan khusus pada pondasinya.

e. Bendungan didesain tidak seperti biasanya.

Begitu juga bendungan Marangkayu yang dikonstruksi diatas tanah lunak, kestabilan menjadi salah satu kunci keberhasilan pembangunannya. Dan penanganan agar bendungan stabil diatas tanah lunak yaitu dengan mengganti pondasi dengan tanah yang memenuhi syarat untuk timbunan bendungan dan memasang *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). PVD ini merata dipasang pada tubuh bendungan, sehingga *cutoff trench* yang semula dipasang di as bendungan, digeser ke hulu dari tubuh bendungan. Detail *cutoff trench* pada hulu bendungan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Detil Cutoff Trench Pada Hulu Bendungan

II. METODOLOGI

A. Umum

Pada umumnya letak cutoff trench dari bendungan tipe urugan terletak di tengah as tubuh bendungan. Tetapi bendungan Marangkayu memiliki cutoff

trench di sebelah hulu dari as tubuh bendungannya. Oleh karena itu diperlukan analisa kestabilan untuk stabilitas tubuh bendungan terdiri dari 3 yaitu :

- a. Mengadakan analisa dan inventarisasi terhadap gaya – gaya yang akan bekerja pada tubuh bendungan.
- b. Mengadakan analisa dan perhitungan untuk stabilitas rencana lereng tubuh bendungan.
- c. Mengadakan analisa dan perhitungan stabilitas tubuh bendungan terhadap gaya – gaya yang timbul oleh adanya aliran filtrasi di dalam tubuh bendungan.

Dalam penyusunannya langkah - langkahnya adalah sebagai berikut :

B. Persiapan

- Studi literatur : Studi literatur maksudnya adalah untuk mengumpulkan materi dan literatur yang digunakan sebagai acuan dalam studi suatu permasalahan.
- Studi lapangan : meninjau lokasi bendungan yang akan direncanakan sebagai as tubuh bendungan, lokasi genangan dan sungai Marangkayu.

C. Pengumpulan Data

1. Layout lokasi Bendungan Marangkayu
2. Topografi Bendungan Marangkayu
3. Data curah hujan
4. Data tanah *Borrow Area* dari uji laboratorium
5. Data Spesifikasi Teknis Bendungan Marangkayu
6. Data jumlah penduduk
7. Potongan melintang bendungan Marangkayu

D. Tahap Analisa Perencanaan

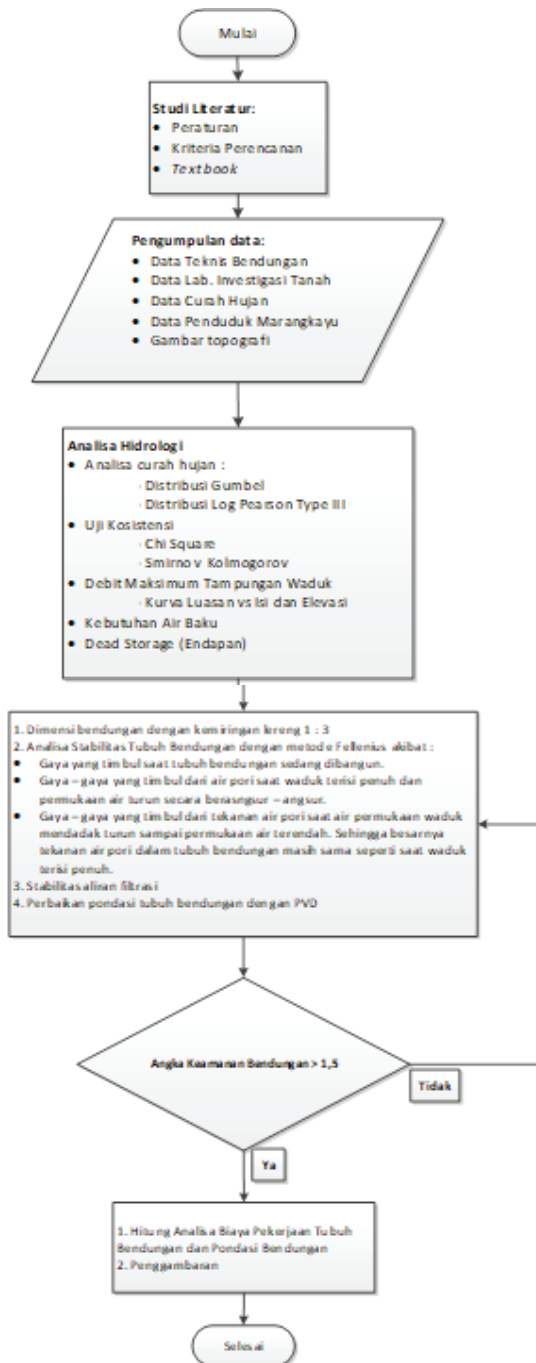
- a) Analisa Hidrologi :
 1. Analisa data curah hujan
 2. Analisa frekuensi dan probabilitas
 3. Uji kecocokan parameter distribusi
 4. Periode ulang hujan
 5. Debit banjir dengan metode hidrograf sintetik Nakayasu
- b) Analisa kestabilan bendungan
 1. Merencanakan dimensi bendungan
 2. Merencanakan *cutoff trench*
 3. Analisa kestabilan bendungan saat kondisi tampungan kosong atau selesai dibangun
 4. Analisa kestabilan bendungan saat kondisi tampungan penuh (*fullbank*)
 5. Analisa kestabilan bendungan saat kondisi tampungan penuh lalu turun tiba - tiba (*rapid drawdown*) ditinjau :

- saat ketinggian muka air = H_{max}
- saat ketinggian muka air = $3/4 H_{max}$
- saat ketinggian muka air = $1/2 H_{max}$
- saat ketinggian muka air = $1/4 H_{max}$

- c) Preloading dan perencanaan PVD untuk kekuatan pondasi
 1. Menghitung preloading dengan menentukan tinggi inisial ($H_{initial}$)
 2. Merencanakan jarak antar PVD yang ekonomis
 3. Menghitung kuat geser tanah setelah terjadi konsolidasi akibat pemasangan PVD
- d) Analisa biaya pada pekerjaan tubuh bendungan

E. Bagan Alir

Bagan alir penyelesaian artikel dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penyusunan Artikel

III. PEMBAHASAN

A. Analisa debit banjir dengan Hidrograf Sintetik Nakayasu.

Parameter yang berpengaruh dalam membuat hidrograf pada sungai Marangkayu yaitu :

1. Tenggang waktu dari permulaan hujan hingga akhir dari hujan
2. Tenggang waktu hidrograf (*time base of hydrograph*)
3. Luas daerah pengaliran
4. Panjang alur sungai utama terpanjang (*length of the longest channel*)
5. Koefisien pengaliran (*run-off coefficient*)

Tenggang waktu (T_p)

$$T_p = t_g + 0,8 t_r$$

$$T_r = 0,5 t_g$$

T_g sesuai dengan panjang sungai Marangkayu 15,775 km > 15 km, maka $t_g = 0,4 + 0,058L$

$$t_g = 0,4 + 0,058 (15,775) = 1,315$$

$t_r = 0,8 \times 1,315 = 1,052$ jam (asumsi karena bentuk sungai Marangkayu tipe sungai perenial)

$$T_p = 1,315 + 0,8 \times 1,052 = 2,156 \text{ jam}$$

$$t_{0,3} = \alpha \times t_g, \text{ dipakai } \alpha = 3$$

$$= 3 \times 1,315$$

$$= 3,945 \text{ jam}$$

Luas DAS Sungai Marangkayu, $CA = 156,86 \text{ km}^2$

Koefisien pengaliran $C = 0,35$ (hutan berbukit kelandaian 10%)

$$Q_p = \frac{CA \cdot R_o}{3,6(0,3T_p + T_{0,3})}$$

$$= \frac{156,86 \times 1}{3,6(0,3 \times 2,156 + 3,945)}$$

$$= 9,489 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Saat kurva naik : $0 < t < T_p$ dan $t = 2$ jam

$$Q = \left(\frac{t}{T_p}\right)^{2,4} \times Q_p$$

$$Q_{(2)} = \left(\frac{2}{2,156}\right)^{2,4} \times 9,489 \text{ m}^3/\text{det} = 7,919 \text{ m}^3/\text{det}$$

Tabel 1: Tabel saat kurva Nakayasu naik

t	A = (t/T _p) ^{2,4}	Q = Q _p x A
0	0	0
1	0.1581	1.5004
2	0.8346	7.9194

Sumber : Perhitungan

Saat kurva turun : $t_p < t < T_{0,3} = 6,102$ jam dan $t_p = 2,156$ jam (gambar 3)

$$Q_p \times 0,3^{t-t_p / T_{0,3}}$$

Ditabelkan sesuai Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 2: Tabel saat kurva Nakayasu turun

t	A	Q
2.156	1.000158	9.490627
3	0.773042	7.335493
4	0.569719	5.406139
5	0.419874	3.984236
6	0.30944	2.936317
6.102	0.299956	2.846319

Sumber : Perhitungan

Saat kurva turun ($T_p + T_{0,3} < t < T_p + T_{0,3} + 1,5T_{0,3}$) atau ($6,102 < t < 12,02$)

Tabel 3: Tabel Saat Kurva Nakayasu Turun

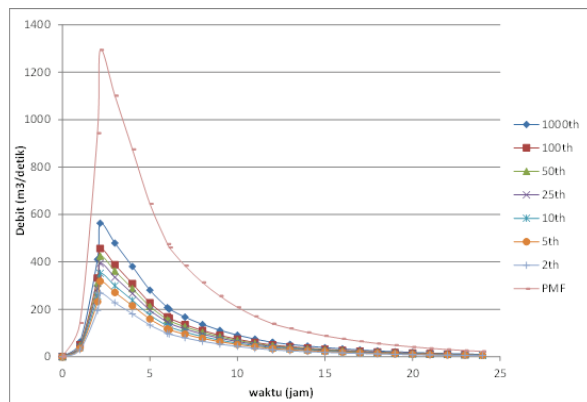
t	A	Q
6.102	0.2999706	2.8464588
7	0.2498792	2.3711353
8	0.2038772	1.9346166
9	0.166344	1.5784596
10	0.1357206	1.2878701
11	0.1107349	1.0507772
12	0.0903489	0.8573323
12.02	0.089982	0.8538508

Sumber : Perhitungan

Saat kurva turun ($t > T_p + T_{0.3} + 1,5T_{0.3}$) atau ($t > 12,02$)

Tabel 4: Tabel Saat Kurva Nakayasu Turun

t	A	Q
13	0.0774875	0.735289
14	0.0665213	0.631229
15	0.057107	0.541896
16	0.0490251	0.465205
17	0.042087	0.399368
18	0.0361307	0.342849
19	0.0310174	0.294328
20	0.0266277	0.252674
21	0.0228593	0.216915
22	0.0196242	0.186217
23	0.0168469	0.159863
24	0.0144627	0.137239



Gambar 3 Hidrograf Sintetik Nakayasu untuk QPMF

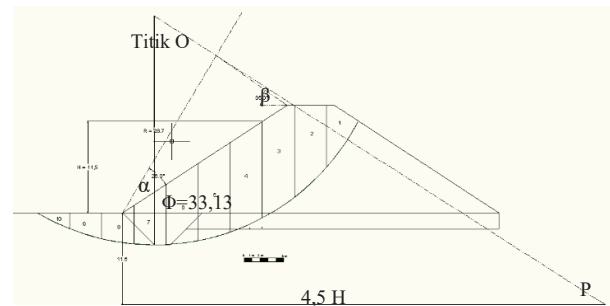
Kurva hidrograf Qpmf pada Gambar 3 merupakan hidrograf satuan tunggal untuk periode ulang 2 tahun sampai 1000 tahun. Hidrograf satuan merupakan hidrograf limpasan langsung ke saluran dari limpasan permukaan oleh hujan satuan (Kamiana,2010). Jadi asumsi limpasan permukaan yang masuk kesaluran adalah limpasan efektif (*Surface Runoff Efective*) pada saluran/sungai yang akan dibangun bendungan. Dengan puncak *spillway* pada elevasi +110, maka dari perhitungan didapat elevasi maksimal dari debit PMF yaitu +111,5 m (Ainul Yaqien,2014).

B. Merencanakan Dimensi dan Menghitung Stabilitasnya

Acuan merencanakan dimensi tubuh bendungan berdasarkan *handout* Waduk dan PLTA dengan data sebagai berikut :

H = 11,5 m (dari perhitungan Qpmf Sungai Marangkayu)
n = 1 : 1,5 (asumsi untuk bendungan yang ekonomis)
 $\Phi = 33,13^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)
 $\alpha = 26^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)
 $\beta = 35^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)
R = 28.7 m

Potongan tubuh bendungan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Potongan Tubuh Bendungan

Pada gambar 4, *cutoff trench* direncanakan terletak di As bendungan atau dihilu (*Upstream*) dari as bendungan yang dapat direncanakan dengan rumus (*Design Of Small Dams*):
Rumus menentukan dimensi *cutoff trench* :

$$w = h - d_f \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan : w = lebar dasar *cutoff trench* (m)
h = tinggi genangan (m)
df = kedalaman *cutoff trench* (m)

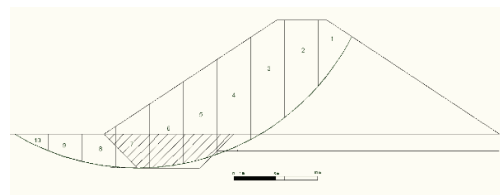
$$w = 11,5 - 0,5 = 11,0 \text{ m}$$

Setelah digambar, dihitung angka keamanan untuk :

- B.1. Potongan tubuh bendungan dengan *cutoff trench*
- B.2. Potongan tubuh bendungan tanpa *cutoff trench*

B.1. Potongan tubuh bendungan dengan *cutoff trench*

Bidang longsor tubuh bendungan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bidang Longsor Tubuh Bendungan dengan *Cutoff Trench*

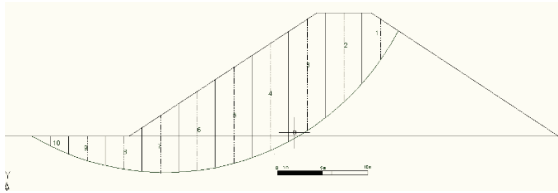
Dari perhitungan angka kemandan untuk bendungan dengan *cutoff trench*, F_s sebesar :

$$F_s = \frac{1270321609 + 109124}{1582N}$$

$F_s = 465$ tidak OK

B.2. Potongan tubuh bendungan tanpa *cutoff trench*

Bidang longsor tubuh bendungan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Bidang Longsor Tubuh Bendungan dengan *Cutoff Trench*

Untuk bendungan tanpa *cutoff trench*, F_s sebesar:

$$F_s = \frac{C + (N - U - N_e) \tan \phi}{T + T_e}$$

$$F_s = \frac{142315818 + 17124}{1318N}$$

$F_s = 245$ tidak OK

Karena tidak memenuhi syarat maka direncana dengan kemiringan lereng 1 : 3

B.3 Desain tubuh bendungan dengan kemiringan lereng 1 : 3

Data perencanaan :

H = 11,5 m (dari perhitungan flood routing Sungai Marangkayu)

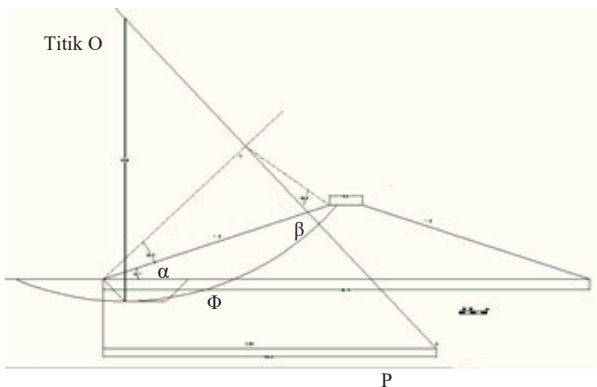
n = 1 : 3 (*handout* Waduk dan PLTA).

$\Phi = 18,1^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)

$\alpha = 25^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)

$\beta = 35^\circ$ (*handout* Waduk dan PLTA)

R = 51,6 m



Gambar 7. Potongan Bendungan Dengan Lereng 1 : 3

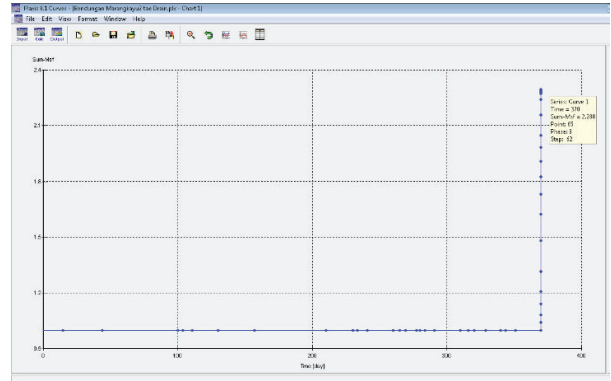
B.4. Menghitung angka kemandan saat kondisi bendungan dengan tumpungan kosong

Untuk bendungan dengan R = 51,6 m dan keadaan kosong dari perhitungan diperoleh F_s :

$$F_s = \frac{1728,2kN + 3116,7kN}{1522,5kN}$$

$$F_s = 2,05 > 1,5 \dots OK$$

Dengan program bantu Plaxis diperoleh hasil perhitungan bidang longsor dan angka kemandan



Gambar 8. Angka Kemandan Saat Bendungan Kosong

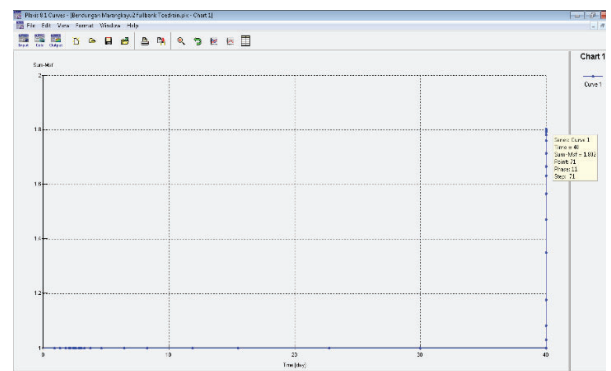
Saat bendungan kosong setelah dibangun, dari perhitungan program Plaxis (gambar 7) nilai F_s = 2,28

B.5. Menghitung angka kemandan saat kondisi bendungan dengan tumpungan penuh

Untuk bendungan dengan R = 51,6 m dan keadaan penuh, dari perhitungan diperoleh F_s :

$$F_s = \frac{1728,2kN + 564,1kN \tan 19,81}{1032,1kN}$$

$$F_s = 1,86 > 1,5 \dots OK$$

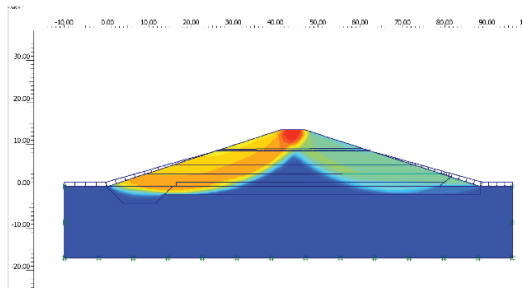


Gambar 9. Gambar Garis Longsor (Atas) dan Angka Kemandan Saat Bendungan Penuh (Bawah)

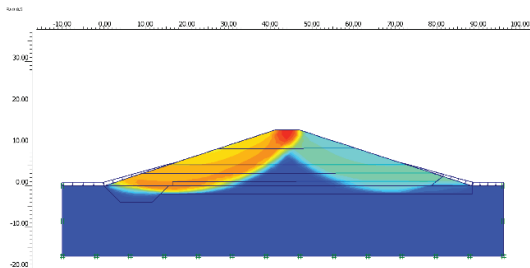
Saat bendungan penuh (*fullbank*) dari perhitungan program Plaxis (gambar 9) nilai F_s = 1,80

B.6. Menghitung angka keamanan saat kondisi bendungan dengan tampungan penuh lalu muka air turun tiba - tiba

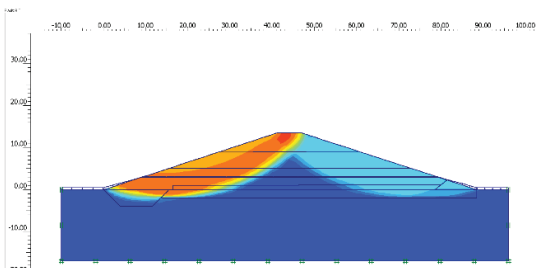
- a. Saat 3/4 Hmax
- b. Saat 1/2 Hmax
- c. Saat 1/4 Hmax



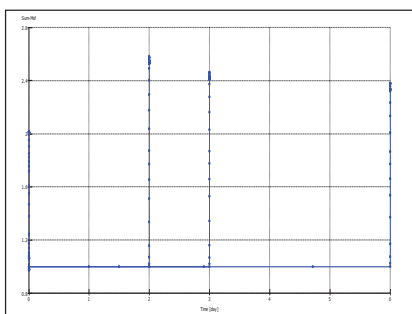
Gambar 10. Gambar Garis Longsor Turun Tiba-Tiba Sampai Saat 3/4Hmax



Gambar 11. Gambar Garis Longsor Turun Tiba-Tiba Sampai Saat 1/2 Hmax



Gambar 12. Gambar Garis Longsor Turun Tiba-Tiba Sampai Saat 1/4 Hmax



Gambar 13. Gambar Angka Keamanan Hmax, 3/4 Hmax, 1/2 Hmax, 1/4 Hmax

Dari perhitungan Plaxis gambar 11,12 dan 13 nilai Fs untuk :

- i. Saat 3/4 Hmax nilai Fs = 2,60
- ii. Saat 1/2 Hmax nilai Fs = 2,49
- iii. Saat 1/4 Hmax nilai Fs = 2,30

Dari perhitungan manual diperoleh nilai Fs sebagai berikut dengan R = 51,6 m :

➤ Saat muka air setinggi 3/4 H :

$$F_s = \frac{Cl + (N - U - N_e) \cdot \text{tg} \phi}{T + T_e} = \frac{1728,2kN + 983,3kN}{930,4kN} = 1,9 > 1,5 \dots OK$$

➤ Untuk bendungan dengan muka air setinggi 1/2 H:

$$F_s = \frac{1728,2kN + 983,3kN}{1383,6kN} = 1,5 = 1,5 \dots OK$$

➤ Saat muka air setinggi 1/4 H :

$$F_s = \frac{1937,5kN + 1728,2kN}{1389kN} = 1,7 > 1,5 \dots OK$$

B.7. Dari perhitungan stabilias secara manual dan Plaxis dapat di tabelkan

Rekapitulasi angka keamanan perhitungan manual dapat dilihat pada Tabel 5 sedangkan rekapitulasi dari perhitungan Plaxis dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 5: Rekapitulasi Angka Keamanan Perhitungan Manual

Stabilitas saat bendungan	Fs
1. Kosong	2.05
2. Penuh	1.77
3. Turun Tiba -tiba	
3/4 Hmax	1.9
1/2 Hmax	1.5
1/4 Hmax	1.7

Tabel 6. Rekapitulasi Angka Keamanan Dari Perhitungan Plaxis

Stabilitas saat bendungan	Fs
1. Kosong	2,28
2. Penuh	1,80
3. Turun Tiba-tiba	
3/4 Hmax	2,60
1/2 Hmax	2,49
1/4 Hmax	2,30

C. Perencanaan dan Perhitungan PVD

Lamanya penurunan lapisan tanah tanpa PVD sebesar:

single drainage $h_d = 10$ m, $T_{90\%} = 0.848$

$C_v = 0,00123$ cm²/sec (Tabel 5.1 Uji Laboratorium Tanah)

$$t = \frac{T_{90\%} \times h^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0,848 \times (1000\text{cm})^2}{0,00123 \times 3600 \times 24 \times 365}$$

$$t = 21,8\text{tahun}$$

Sehingga diperlukan PVD untuk mempercepat konsolidasi.

D. Rekapitulasi Analisa Harga Satuan

Jumlah total biaya untuk pembangunan tubuh bendungan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Rekapitulasi Analisa Harga Satuan Pekerjaan Tubuh Bendungan

No	Uraian	Satuan	Volumen	Harga satuan Rp.	Jumlah Rp.
1	Pekerjaan Perbaikan				
	Mudatan	kg	1.00	33.500.000	33.500.000
	Kawat Besi	m ²	2.5277,20	4.000	10.110.880
2	Pekerjaan Tanah				
	Gravel Pondasi	m ³	80.100,00	40.710	3.271.000,00
	Gravel Cut Off	m ³	29900,00	92.421	2.767.377,00
	Terbunan				
	Terbunan P. dan di atas	m ³	281000,00	101.102	28.408.600,00
	Pasar kora Filter	m ³	23700,00	334.334	7.923.804,00
3	Pemasangan batu besi drain	m ³	6024,00	334.410	2.014.792,12
4	Pemasangan PVD	m ²	422000,00	6.602	2.786.418,50
	Total Biaya Tubuh Bendungan				76.876.608.742

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan :

1. Faktor keamanan bendungan lereng 1 : 1,5 tanpa *cutoff trench* $F_s = 1,24$. Desain *cutoff* dapat meningkatkan faktor keamanan pada bendungan lereng yang sama, yaitu $F_s = 1,46$.
2. Kestabilan pada bendungan dengan lereng 1 : 3 dengan *cutoff trench* di hulu mempunyai $F_s = 1,5$
3. Biaya pembangunan tubuh bendungan dengan *cutoff trench* dan perbaikan pondasi dengan PVD yaitu Rp 76.876.608.742,-

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ainul Yaqien. 2014. Perencanaan Bangunan Pelimpah (*Spillway*) Bendungan Marangkayu, Kab. Kutai Kertanegara, Kalimantan Timur.
- [2] Bureu of Reclamation. Design of Small Dams.
- [3] Ceteau. Manual Design Ceteau PVD.
- [4] CV. Teknika Cipta Konsultan. 2007. Laporan Data Teknis Perencanaan Bendungan Marangkayu.
- [5] Gouw Tjie-liong. 2010. Handout Prakompresi dengan Vertikal Drain Sintetik. Jakarta
- [6] Hary C. Hardiyatmo. 2010. Mekanika Tanah 2. Gajah Mada University Press

- [7] Herman Wahyudi.1997. Diktat Teknik Reklamasi.
- [8] Kamiana, I Made. 2010. Teknik Perhitungan Debit Rencana Bangunan Air. Jakarta : Graha Ilmu
- [9] Nadjadj Anwar. 2012. Rekayasa Sumber Daya Air. Surabaya : ITS Press
- [10] PD-T 2004-A tentang Analisa Bendungan Urugan Akibat Gempa
- [11] Soediby. 1993. Teknik Bendungan.Jakarta : Pradnya Paramita
- [12] Soekibat Roedy Soesanto dan Abdullah Hidayat. Diktat Waduk
- [13] Suyono Sosrodarsono. 2002. Bendungan Type Urugan. Jakarta : Pradnya Paramita