

**Analisa Stabilitas *Finite Element Method* Bendungan Tipe Urugan
(Studi Kasus : Embung Welulang Pasuruan)**

***Stability analysis of the finite element method of earth-fill dam type
(Case Study: Embung Welulang Pasuruan)***

Zarfiah Qotrunnada¹, Arief Alihudien^{2*}, Nanang Saiful Rizal³

¹Mahasiswa Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Email : zarfiahqotrunnada@gmail.com

²Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember* Koresponden Author

Email : ariefalihudien@unmuhjember.ac.id

³Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember

Email : nanangsaifulrizal@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Dalam perencanaan embung tanah dibangun melalui penimbunan material tanah yang dibentuk dengan kemiringan dan ketinggian tertentu serta pemilihan zona tubuh embung yang disesuaikan dengan keadaan tanah di wilayah tersebut. Hal ini perlu perhatian serius, karena akan berpengaruh terhadap stabilitas tubuh embung. Stabilitas merupakan persyaratan yang harus dipenuhi dalam pembangunan embung, dimana jika syarat stabilitas tersebut tidak terpenuhi, berdampak pada keamanan embung. Stabilitas tubuh embung menggunakan software bantu Plaxis 2D Versi 20 akan ditinjau dalam kondisi: baru dibangun, muka air normal, muka air banjir dan gempa, dan kondisi rapid drawdown. Data – data yang digunakan sebagai penunjang dalam analisa ini adalah data sekunder, didapatkan dari instansi terkait atau hasil survei dari pihak lain. Data tersebut meliputi : Data topografi, Data Hidrologi, Data Kebutuhan Air, Data tanah, tinjauan zona gempa. Analisa debit banjir rencana periode ulang 25 tahun sebesar 25,842 m³/detik. kapasitas efektif sebesar 1569,506 m³. jumlah air yang dapat ditampung oleh embung adalah 15947,22 m³. Analisa stabilitas embung drainase horizontal saat *Rapid drawdown* 1.596. embung drainase tegak saat *Rapid drawdown* 1.576, embung kedap air dan dipasang drainase di depan inti saat *Rapid drawdown* 1.385. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai perkuatan atau perbaikan tanah dibawah embung

Kata Kunci : Embung tanah, Debit Banjir, Stabilitas, *Plaxis* 2D.

Abstract

In planning the soil reservoir is built through stockpiling of soil material which is formed with a certain slope and height and the selection of the reservoir body zone that is adapted to the soil conditions in the area. This needs serious attention because it will affect the stability of the reservoir body. Stability is a requirement that must be met in the construction of a reservoir, where if the stability requirements are not met, it will have an impact on the safety of the reservoir. The stability of the reservoir body using Plaxis 2D Version 20 software will be reviewed under the following conditions: newly built, normal water level, floodwater level and earthquake, and rapid drawdown conditions. The data used to support this analysis are secondary data, obtained from relevant agencies or survey results from other parties. The data includes topographic data, hydrological data, water demand data, soil data, an overview of earthquake zones. The flood discharge analysis for the planned return period of 25 years is 25,842 m³/s. effective capacity of 1569,506 m³. the amount of water that can be accommodated by the reservoir is 15947.22 m³. Analysis of the stability of the horizontal drainage earthfill reservoir during the 1.596 Rapid drawdowns. Vertical drainage earth-fill dam during Rapid drawdown 1.576, Vertical core gravel pebble fill dams during Rapid drawdown 1.385. There is a need for further research on strengthening or improving the soil under the dam

Keywords : earthfill reservoir, flood discharge, Stability, *Plaxis* 2D.

1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bendungan tipe urugan untuk memenuhi berbagai kebutuhan manusia telah dibangun sejak jaman dahulu. Bendungan urugan mempunyai alas luas sehingga beban yang harus didukung oleh pondasi bendungan terhitung kecil.

Sebagaimana diketahui membangun bendungan dalam hal ini adalah embung, merupakan bangunan konservasi air berbentuk kolam untuk menampung air hujan maupun air limpasan. Embung mempunyai beberapa bagian seperti tubuh bendung. Tubuh bendung pada Embung Welulang ini direncanakan menggunakan material urugan atau biasa disebut bendung tanah, hal ini dikarenakan bendung tanah dapat dibangun pada kondisi diatas pondasi dengan daya dukung rendah.

Dalam perencanaan bendung tanah pada Embung Welulang dibangun melalui proses penimbunan material tanah yang dibentuk dengan kemiringan dan ketinggian tertentu serta pemilihan zona tubuh bendung yang disesuaikan dengan keadaan tanah di wilayah tersebut. Hal ini perlu mendapat perhatian serius, karena akan berpengaruh terhadap stabilitas tubuh embung.

Stabilitas merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi dalam pembangunan suatu bendung, dimana jika syarat stabilitas tersebut tidak terpenuhi, akan berdampak pada keamanan bendung yang meliputi penurunan (settlement), kebocoran, rembesan, longsor, erosi dan retakan. Stabilitas tubuh bendung pada tugas akhir ini akan ditinjau dalam beberapa kondisi yaitu, kondisi baru dibangun, muka air normal, muka air banjir dan gempa, dan kondisi surut cepat (*rapid drawdown*). Oleh karena itu, dibutuhkan data – data seperti data hidrologi, data hidrolika dan data pengujian tanah di laboratorium hingga uji di lapangan. Data-data ini bertujuan sebagai bahan pendukung analisa stabilitas embung yang merupakan faktor penting untuk keamanan dan kekuatan tubuh bendung.

Terdapat beberapa model tubuh bendungan tipe urugan yang digunakan pada studi kasus Embung Welulang, sehingga diketahui faktor aman sesuai dengan ketentuan syarat minimum, maka dibutuhkan analisa stabilitas tubuh bendung

yang dapat memodelkan langsung sesuai kondisi tanah dan tubuh bendung. Analisa dilakukan menggunakan aplikasi komputer Plaxis 2D versi 20 berdasarkan *Finite Element Method*.

B. Rumusan Masalah

Maka rumusan masalah yang akan dibahas antara lain :

1. Bagaimana analisa debit banjir rencana pada Embung Welulang?
2. Berapa ketersediaan air pada embung berdasarkan curah hujan yang ada?
3. Bagaimana desain rencana dimensi tubuh bendung tipe urugan pada Embung Welulang?
4. Bagaimana kontrol stabilitas beberapa model tubuh bendung menggunakan bendungan tipe urugan pada studi kasus Embung Welulang?

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Analisa Hidrologi

1. Distribusi Curah Hujan Rerata Daerah

Ada 3 metode berbeda dalam menentukan curah hujan daerah yaitu :

- a. Metode tinggi rata – rata aljabar
- b. Metode polygon thiessen
- c. Metode Isohiet

Akan tetapi pada Tugas Akhir ini dalam menghitung curah hujan rerata daerah menggunakan **Metode Rata – Rata Aljabar**.

2. Analisa Curah Hujan Rancangan

Untuk menganalisa curah hujan rancangan yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah metode Distribusi **Log Person Type III**, dengan pertimbangan bahwa cara ini lebih fleksibel dan dapat dipakai untuk semua sebaran data dilihat dari sifat parameter masing – masing distribusi

Sifat Parameter statistik dari masing -masing distribusi teoritis dapat dilihat sebagai berikut :

- Distribusi Normal : $C_s = 0$ dan $C_k = 3$
- Distribusi Log Normal : $C_s > 0$
- Distribusi Gumbel : $C_s = 1,139$ dan $C_k = 5.402$
- Distribusi Log Pearson Tipe III : C_s dan C_k yang tidak disebutkan diatas (lebih fleksibel)

3. Analisa Hidrograf Sintetis Debit Banjir Rencana

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini ditentukan debit banjir rencana menggunakan Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu.

Rumus hidrograf dari satuan Nakayasu adalah: (C.D. Soemarto, 1987)

$$Q_p = \frac{C \cdot A \cdot R_0}{3,6 (0,3 \cdot T_p + T_{0,3})}$$

Dengan:

Q_p = debit puncak banjir (m³/det)

R_0 = hujan satuan (mm)

T_p = tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)

$T_{0,3}$ = waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari puncak sampai 30% dari debit puncak

A = luas daerah pengaliran sampai outlet

C = koefisien pengaliran

B. Analisa Ketersediaan Air

Analisa ketersediaan air dalam Tugas Akhir ini menggunakan Metode Fj Mock. Metode ini menganggap bahwa hujan yang jatuh Sebagian akan hilang sebagai evapotranspirasi, Sebagian akan langsung menjadi direct run off dan Sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah (infiltrasi).

Metode FJ Mock diperoleh dengan memasukkan perhitungan data curah hujan bulanan, evapotranspirasi dan parameter lainnya, sehingga menghasilkan debit aliran bulanan

C. Lengkung Kapasitas Waduk

Lengkung kapasitas waduk digunakan sebagai penentuan volume total waduk berdasarkan data topografi. Perhitungan ini di membutuhkan beda tinggi (kontur) masing – masing 1 m. Cari luas permukaan genangan yang dibatasi garis kontur. Kemudian cari volume yang dibatasi oleh dua garis kontur yang berurutan dengan menggunakan persamaan volume (Sodiby, 1993)

D. Kapasitas Mati (*Dead Storage*)

Karena tidak ada catatan hasil pengukuran sedimen, maka penentuan sedimen menggunakan tabel berikut, apabila luas daerah pengaliran calon waduk lebih kecil dari 100 km² :

Tabel 1 Angka Satuan Sedimentasi di Daerah Pengaliran

Topografi	Geografi	Daerah pengaliran (km ²)					
		2	5	10	20	30	50
Stadium permulaan pembentukan	Zona A			100 - 300	300 - 800	800 - 1200	
	Zona B			100 - 200	200 - 500	500 - 1000	
	Zona C			100 - 150	150 - 400	400 - 800	
Stadium akhir pembentukan	Zona A			100 - 200	200 - 500	500 - 1000	
	Zona B			100 - 150	150 - 400	400 - 1000	
	Zona C			50 - 100	100 - 350	300 - 500	
Stadium pertengahan	Zona B	< 50		50 - 100	100 - 350	300 - 500	
	Zona C	< 50		50 - 100		100 - 200	
Dataran yang stabil	Zona B	< 50		50 - 100		100 - 200	
	Zona C		< 50		50 - 100	100 - 200	

Sumber : Buku *Bendungan type urugan*, Suyono, 2003

Selanjutnya dimasukkan kedalam perhitungan volume total sedimen selama umur rencana embung dengan persamaan :

$$\text{Volume sedimen total} = P_s \times A \times n$$

Di mana:

P_s = harga satuan sedimentasi (m³/km²/tahun)

A = luas daerah pengaliran (km²)

n = umur rencana (tahun)

E. Kapasitas Efektif

Kapasitas efektif embung ditentukan dari besarnya debit pengambilan pada pintu keluaran (outlet). Kapasitas efektif embung diperlukan untuk mengetahui jumlah air yang masih harus disimpan pada tampungan sehingga pada saat air digunakan masih mencukupi kebutuhan yang diperlukan. Untuk menghitung tampungan air embung digunakan persamaan keseimbangan air (Water Balance) antara inflow dari debit andalan dan outflow untuk kebutuhan air baku penduduk.

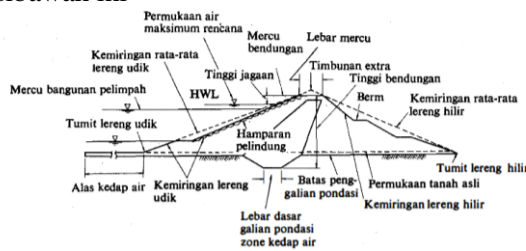
F. Penelusuran Banjir (*Flood Routing*)

Tinggi permukaan maksimal air waduk harus dapat dihitung dengan teliti menggunakan rumus penelusuran banjir. Dengan mengetahui tinggi permukaan maksimal air waduk, maka dapat dicari tinggi bendungan yang paling optimal dalam keadaan aman terhadap risiko banjir. Salah satu cara yang diuraikan disini adalah dengan cara tahap demi tahap (step by step).

G. Dimensi Tubuh Embung

Pada perencanaan dimensi tubuh embung di butuhkan perhitungan meliputi tinggi bendun, lebar bendung, panjang bendung, dan kemiringan lereng.

Sehingga akan terlihat seperti gambar dibawah ini



Gambar 1 Istilah untuk bendungan urugan
 Sumber : Buku Bendungan type urugan, Suyono, 2003:170

H. Data Geologi

Untuk penyelidikan bawah permukaan, bisa dilakukan uji laboratorium atau investigasi langsung di lapangan dengan menggunakan alat SPT (Standard Penetration Test). Parameter – parameter tanah yang tidak diketahui dari hasil uji laboratorium dapat dicari menggunakan rumus empiris ataupun dengan tabel korelasi

I. Analisa Stabilitas

1. Ketahanan terhadap Gelincir
2. Ketahanan terhadap guling
3. Analisa percepatan gempa
4. Analisa surut cepat (*Rapid Drawdown*)

J. Finite Element Method

Finite Element Method atau metode elemen hingga merupakan metode perhitungan yang didasarkan pada konsep diskritasi, yaitu pembagian suatu sistem struktur, masa, atau benda padat menjadi elemen – elemen yang lebih kecil. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menghitung distribusi beban yang terjadi pada elemen seperti deformasi dan tegangan. Menurut Ir. Soedibyo (2003)

K. Software Plaxis 2D

Plaxis merupakan sebuah program dalam bidang geoteknik yang menggunakan Metode Elemen Hingga untuk aplikasi geoteknik. Dalam pemodelan geometri struktur geoteknik, dibentuk berdasarkan komponen – komponen yaitu titik, garis, dan cluster. Setelah pembuatan geometri, pemodelan elemen hingga dapat dianalisa berdasarkan komposisi cluster dan garis pada pemodelan geometri.

3. METODOLOGI

A. Lokasi Penelitian

Secara administratif lokasi penelitian terletak di Kecamatan Lumbang, Kabupaten Pasuruan, Provinsi Jawa Timur. Dan secara geografis terletak pada posisi 7°82' LS dan 113°03 BT

B. Pengumpulan dan Analisis Data

Data tersebut meliputi:

1. Data Topografi
 Data topografi merupakan peta topografi dan peta lokasi kawasan
2. Data Hidrologi
 Data yang digunakan sebagai perhitungan hidrologi adalah data curah hujan stasiun selama 10 tahun.
3. Data Klimatologi
 Data klimatologi meliputi data kelembapan, data suhu/temperatur dan data kecepatan angin
4. Data Kebutuhan Air
 Data kebutuhan air didapatkan dari perhitungan dengan menjumlahkan dari data kebutuhan air baku, evaporasi dan air bersih.
5. Data Tanah
 Data tanah didapatkan dari hasil uji laboratorium, selain itu didapatkan dari rumus empiris maupun korelasi.
6. Tinjauan Zona Gempa
 Tinjauan kondisi dan klasifikasi zona gempa pada daerah lokasi proyek Embung Welulang, untuk mengetahui sejauh mana pengaruh zona gempa terhadap bangunan bending

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Hidrologi

1. Analisa Curah Hujan Rata – Rata

Analisa data curah hujan digunakan untuk mendapatkan curah hujan maksimum di stasiun hujan Panditan, Sanganom dan Lumbang, yang kemudian digunakan sebagai perhitungan curah hujan rencana.

Untuk mendapatkan curah hujan rata – rata metode aljabar yaitu dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Curah hujan rata-rata harian (Ri) 2011 :} \\ &= (R1+R2+R3)/n \\ &= (70+104+38)/3 \end{aligned}$$

= 70,7 mm

Tabel 1 Hasil perhitungan curah hujan harian maksimum dengan menggunakan metode Aljabar

No	Tanggal	STASIUN CURAH HUJAN (mm)			Curah Hujan Rata-Rata Harian	Curah Hujan Rata-Rata Daerah (mm) R Maks
		LUMBANG	PANDITAN	SANGANOM		
1	17/01/11	70,0	104,0	38,0	70,7	70,7
	17/12/11	70,0	104,0	38,0	70,7	
	22/02/11	27,0	30,0	114,0	57,0	
2	07/02/12	114,0	-	-	38,0	90,3
	04/04/12	96,0	135,0	40,0	90,3	
	04/02/12	73,0	64,0	116,0	84,3	
3	09/06/13	86,0	-	27,0	37,7	82,3
	10/06/13	86,0	86,0	75,0	82,3	
	02/03/13	36,0	83,0	102,0	73,7	
4	03/05/14	97,0	-	22,0	39,7	46,0
	09/02/14	4,0	115,0	19,0	46,0	
	14/04/14	-	-	70,0	23,3	
5	01/02/15	98,0	72,0	51,0	73,7	129,3
	23/04/15	89,0	217,0	82,0	129,3	
	19/01/15	-	29,0	83,0	37,3	
6	29/12/16	94,0	41,0	45,0	60,0	60,0
	12/02/16	89,0	87,0	-	58,7	
	08/06/16	38,0	16,0	82,0	45,3	
7	20/03/17	101,0	137,0	90,0	109,3	109,3
	20/03/17	101,0	137,0	90,0	109,3	
	26/03/17	-	-	105,0	35,0	
8	31/01/18	189,0	147,0	-	112,0	112,0
	31/01/18	189,0	147,0	-	112,0	
	-	-	-	0,0		
9	17/02/19	72,0	33,0	60,0	55,0	72,7
	27/01/19	64,0	154,0	-	72,7	
	02/02/19	49,0	-	86,0	45,0	
10	21/01/20	135,0	120,0	106,0	120,3	120,3
	21/01/20	135,0	120,0	106,0	120,3	
	08/11/20	98,0	69,0	116,0	94,3	

Sumber : Data dan Hasil Perhitungan

2. Analisa Frekuensi dan Distribusi Data Hujan Rancangan

Analisa frekuensi dan distribusi hujan rancangan digunakan untuk mendapatkan parameter statistik agar diketahui jenis distribusi yang sesuai dengan data curah hujan. Hasil uji parameter bisa dilihat pada tabel dibawah :

Tabel 2 Hasil uji parameter statistik data curah hujan

No.	Tabun	R _i	P	(R _i - R)	(R _i - R) ²	(R _i - R) ³	(R _i - R) ⁴
1	2011	70,67	9,09	-18,63	347,20	-6469,51	120548,6
2	2012	90,33	18,18	1,03	1,07	1,10	1,1
3	2013	82,33	27,27	-6,97	48,53	-338,12	2355,6
4	2014	46,00	36,36	-43,30	1874,89	-81182,74	3515212,5
5	2015	129,33	45,45	40,03	1602,67	64160,13	2568544,0
6	2016	60,00	54,55	-29,30	858,49	-25153,76	737005,1
7	2017	109,33	63,64	20,03	401,33	8040,07	161069,3
8	2018	112,00	72,73	22,70	515,29	11697,08	265523,8
9	2019	72,67	81,82	-16,63	276,67	-4601,91	76545,1
10	2020	120,33	90,91	31,03	963,07	29887,20	927499,5
Jumlah Rerata/R		893,000 89,300			6889,21	-3960,45	8374304,7
STD.DEV =		27,667					
Cs =		-0,026					
Ck =		-1,220					
Cv =		0,310					

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari hasil uji parameter statistik didapatkan Cs = -0,026, Ck = -1,220, dan Cv = 0,310, maka berdasarkan syarat dari masing – masing tipe distribusi, dapat disimpulkan bahwa data yang sesuai adalah distribusi Log Pearson Tipe III.

• Distribusi Log Person Tipe III

Berikut hasil perhitungan dari uji distribusi Log Person Tipe III.

Tabel 3 Perhitungan Log Person Tipe III

No	Tabun	R (mm)	LogR	Log R - Log Rr	(Log R - Log Rr) ²	(Log R - Log Rr) ³	Hasil Perhitungan	Ket
1	2011	70,7	1,84921	-0,08108	0,00657	-0,00053	0,00004	Log Rr = 1,9303
2	2012	90,3	1,95585	0,02555	0,00065	0,00002	0,00000	S = 0,1446
3	2013	82,3	1,91558	-0,01472	0,00022	0,00000	0,00000	Cs = -0,5146
4	2014	46,0	1,66276	-0,26754	0,07158	-0,01915	0,00512	Ck = -0,5216
5	2015	129,3	2,11171	0,18142	0,03312	0,00597	0,00108	Cv = 0,3749
6	2016	60,0	1,77815	-0,15214	0,02315	-0,00352	0,00054	Ki(2) = 0,0849
7	2017	109,3	2,03875	0,10846	0,01176	0,00128	0,00014	Ki(5) = 0,8561
8	2018	112,0	2,04922	0,11892	0,01414	0,00168	0,00020	Ki(10) = 1,2132
9	2019	72,7	1,86134	-0,06896	0,00476	-0,00033	0,00002	Ki(25) = 1,5613
10	2020	120,3	2,08039	0,15009	0,02253	0,00338	0,00051	Ki(50) = 1,7687
n =		10						Ki(100) = 1,9457
Jumlah Rata-rata		893,000	19,303	0,00000	0,18827	-0,01121	0,00765	
Log Rr		1,930						

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 4 Analisa probabilitas hujan dengan distribusi Log Person Tipe III

Tr (tahun)	Pr (%)	Log Rr	Sy	K	K . Sy	Log Rt	Rt (mm)
2	50	1,9303	0,1446	0,085	0,01	1,94	87,61
5	20	1,9303	0,1446	0,856	0,12	2,05	113,27
10	10	1,9303	0,1446	1,213	0,18	2,11	127,58
25	4	1,9303	0,1446	1,561	0,23	2,16	143,26
50	2	1,9303	0,1446	1,769	0,26	2,19	153,50
100	1	1,9303	0,1446	1,944	0,28	2,21	162,71

Sumber : Hasil Perhitungan

• Uji Kecocokan Distribusi

Data hidrologi yang dipakai untuk mengestimasi banjir rancangan ataupun debit andalan menggunakan Analisa frekuensi belum tentu sesuai dengan distribusi – distribusi yang dipilih. Untuk itu perlu uji kecocokan distribusi menggunakan 2 sistem yaitu Uji Smirnov Kolmogorof dan Uji Chi – Square. Pada uji keduanya distribusi Log person Tipe III memenuhi syarat uji kecocokan, dapat dilihat pada table berikut ini :

Tabel 5 Kesimpulan Uji Kecocokan Distribusi

Uji Smirnov Kolmogorof			
D _{maks}	Nilai	D _o	Hasil
0,122	<	0,486	OK
Uji Chi – Kuadrat			
X ²	Nilai	Dk	Hasil
2,000	<	3,841	OK

Sumber : Hasil Perhitungan

3. Analisa Debit Banjir Rencana

Untuk membuat hidrograf banjir pada sungai, maka perlu dicari karakteristik atau

parameter daerah pengaliran terlebih dahulu. Kemudian dilakukan perhitungan hidrograf dengan menggunakan metode hidrograf satuan sintetik nakayasu, dengan hasil :

Tabel 6 Rekapitulasi Hidrograf banjir dengan kala ulang

JAM	10 TAHUN	25 TAHUN	50 TAHUN	100 TAHUN
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	0,218	0,245	0,263	0,279
0,56	13,870	15,575	16,689	17,690
0,6	21,427	24,061	25,781	27,328
0,8	23,014	25,842	27,690	29,351
1,1	21,329	23,950	25,663	27,202
1,2	20,387	22,892	24,529	26,001
1,4	19,184	21,542	23,082	24,467
1,6	14,239	15,989	17,133	18,161
2,0	9,526	10,697	11,462	12,149
2,2	6,534	7,337	7,862	8,334
2,4	4,876	5,476	5,867	6,219
2,6	3,532	3,967	4,250	4,505
2,8	2,537	2,849	3,053	3,236
3,0	1,800	2,021	2,165	2,295
3,2	1,362	1,529	1,639	1,737
3,4	1,031	1,157	1,240	1,315
3,6	0,780	0,876	0,939	0,995
3,8	0,590	0,663	0,710	0,753
4,0	0,447	0,502	0,538	0,570
4,2	0,338	0,380	0,407	0,431
4,4	0,256	0,287	0,308	0,326
4,6	0,194	0,217	0,233	0,247

Sumber : Hasil Perhitungan

B. Perhitungan Evapotranspirasi Potensial (ET_o)

Dalam perkembangan, terdapat beberapa rumus Penman yang disederhanakan guna mempermudah perhitungan. Perhitungan Evapotranspirasi menggunakan metode Penman Modifikasi yang disajikan dalam rumus :

$$ET_o = c.[W.R_n + (1-W).f(u).(ea-ed)]$$

C. Perhitungan Debit Andalan

Analisa debit andalan merupakan debit minimum yang digunakan untuk mengetahui jumlah debit yang ada di sungai atau digunakan sebagai analisa ketersediaan air, sehingga dapat diketahui apakah debit tersebut mampu memenuhi kebutuhan air yang di perlukan. Metode Analisa debit andalan menggunakan metode Fj Mock, dimana metode ini menanggapi bahwa hujan yang jatuh sebagian akan hilang sebagai evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi direct run off dan Sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah (infiltrasi). Metode ini berdasarkan data curah hujan bulanan, evapotranspirasi dan karakteristik hidrologi daerah pengaliran.

Tabel 7 Rekapitulasi Debit Andalan 80%

No	Bulan	Hari	Debit Andalan 80%	Debit	Debit
			m3/detik	m3/hari	m3/bulan
1	Januari	31	0,04	3671,96	113830,8
2	Februari	28	0,13	11625,44	325512,3
3	Maret	31	0,07	6154,59	190792,2
4	April	30	0,06	5606,04	168181,1
5	Mei	31	0,04	3557,60	110285,6
6	Juni	30	0,03	3017,57	90527,14
7	Juli	31	0,04	3376,46	104670,4
8	Agustus	31	0,02	2033,53	63039,45
9	September	30	0,03	2710,49	81314,8
10	Oktober	31	0,03	2195,76	68068,59
11	November	30	0,07	5642,47	169274,1
12	Desember	31	0,13	11139,46	345323,2

Sumber : Hasil Perhitungan

D. Kapasitas Mati (Dead Storage)

Untuk mengetahui jumlah sedimen yang terjadi dapat menggunakan tabel 1 dengan karakteristik topografi lokasi embung. Karakteristik topografi lokasi embung sebagai berikut :

1. Merupakan dataran rendah yang stabil
2. Intensitas erosinya kecil walau dalam keadaan banjir
3. Keiringan dasar sungai $\pm 1/1000$
4. Termasuk zona C dimana tidak terdapat gunung berapi

Dari tabel 1 menunjukkan bahwa angka sedimen yang sesuai dengan karakteristik topografi embung kurang dari 50 m³/km²/tahun, sehingga volume sedimen direncanakan sebesar 30 m³/km²/tahun.

Volume sedimen pada umur rencana selama 25 tahun dan luas 1,28 km² :

$$\begin{aligned} \text{Volume total} &= P_s \times A \times n \\ &= 30 \times 1,28 \times 25 \\ &= 960 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Volume sedimen total kemudian di plotkan dengan lengkung waduk dan didapatkan elevasi sedimen total pada elevasi + 342 m.

E. Kapasitas Efektif

Kapasitas efektif untuk mengetahui perubahan volume waduk akibat debit *inflow* dan *outflow* pada waduk. Debit *inflow* didapatkan dari perhitungan Fj Mock, sedangkan debit *outflow* didapatkan dari perhitungan kebutuhan air baku dan evaporasi. Dalam hal ini kebutuhan air baku di asumsikan untuk kebutuhan air Dusun Sidodadi dan Welulang Lor, dengan proyeksi 20 tahun dan sektor yang ditinjau adalah masjid, mushola,

peternakan, dan rumah. Kebutuhan air setiap penduduk diasumsikan 131 liter/hari. Sehingga dapat dilihat pada tabel dibawah :

Tabel 8 Tabel total kebutuhan air

Desa Welulang	Q	Q	Q	Q
	m ³ /dt	m ³ /hari	m ³ /bulan	m ³ /tahun
Dsn. Sidodadi dan Dsn. Welulang Lor	0,002	174,753	5242,579	62910,950

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 9 Perhitungan kapasitas efektif

No	Bulan	Hari	Inflow	Kebutuhan Air				S	Kapasitas Efektif
			Kumulatif m ³ /dt	Air Baku m ³ /dt	Evaporasi m ³ /dt	Jumlah m ³ /dt	Kumulatif m ³ /dt		
1	Januari	31	0,04	0,002	0,00018	0,020	0,020	0,022	0,438
2	Februari	28	0,18	0,002	0,00019	0,020	0,040	0,137	
3	Maret	31	0,25	0,002	0,00018	0,020	0,061	0,188	
4	April	30	0,31	0,002	0,00018	0,020	0,081	0,232	
5	Mei	31	0,35	0,002	0,00016	0,020	0,101	0,253	
6	Juni	30	0,39	0,002	0,00015	0,020	0,121	0,268	
7	Juli	31	0,43	0,002	0,00016	0,020	0,141	0,287	
8	Agustus	31	0,45	0,002	0,00017	0,020	0,161	0,291	
9	September	30	0,48	0,002	0,00020	0,020	0,182	0,302	
10	Oktober	31	0,51	0,002	0,00020	0,020	0,202	0,307	
11	November	30	0,57	0,002	0,00018	0,020	0,222	0,352	
12	Desember	31	0,70	0,002	0,00017	0,020	0,242	0,461	

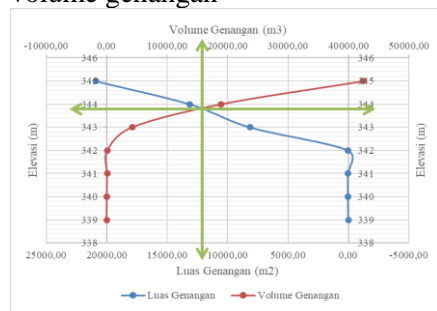
Sumber : Hasil Perhitungan

Analisa kapasitas efektif diperoleh dari :
 = Storage maksimum – storage minimum
 = 0,458 – 0,022
 = 0,436 m³/detik = 1569,506 m³

F. Lengkung Kapasitas

Lengkung kapasitas waduk adalah grafik hubungan antara elevasi, luas, dan volume tampungan. Perhitungan ini di dasarkan pada peta kontur dengan beda tinggi masing – masing 1 meter. Dari perhitungan lengkung kapasitas waduk di dapatkan muka air normal pada elevasi 343,8 m dengan volume sebesar 15947,22 m³. Sehingga jika di sesuaikan dengan perhitungan kapasitas efektif, waduk mampu menampung dan mencukupi kebutuhan air.

Grafik 1 Hubungan antara elevasi, luas dan volume genangan



Sumber : Hasil Perhitungan

G. Penelusuran Banjir

Untuk menghitung banjir yang terjadi di waduk (reservoir Routing) menggunakan metode tahap demi tahap (step by step). Sebelum melakukan perhitungan tersebut maka harus mengetahui hubungan antar elevasi, tampungan dan debit outflow yang terjadi agar mempermudah perhitungan banjir

Tabel 10 Perhitungan hubungan antar elevasi, tampungan dan debit outflow

Elevasi	H	C	Q	Q2	Volume	Storage	S - (dt.Q2)	S + (dt.Q2)
			m ³ /dt	m ³ /dt	m ³	m ³	m ³	m ³
+	343,80	0,00	2,000	0,000	0,000	15947,22	0,00	0,000
+	343,85	0,05	1,998	0,224	0,112	16681,47	734,25	331,754
+	343,95	0,10	1,997	0,632	0,316	18149,96	1468,49	330,072
+	344,10	0,15	1,995	1,162	0,581	21241,63	3091,67	1000,260
+	344,30	0,20	1,993	1,789	0,894	25956,48	4714,85	1494,911
+	344,55	0,25	1,991	2,500	1,250	31850,04	5893,56	1393,561
+	344,85	0,30	1,990	3,286	1,643	38922,32	7072,27	1156,870
								12987,677

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 11 Reservoir routing Q rencana 25 tahun

t Jam	Inflow m ³ /dt	I rata2 m ³ /dt	I.dt (10 ³) m ³ /dt	S - (dt.Q/2) m ³	S + (dt.Q/2) m ³	Elevasi m	Q m ³ /dt
0,00	0,00	11,927	42,937	0,000	42,937	343,800	0,000
1	23,85	16,503	59,412	18903,545	18962,957	345,496	4,979
2	9,15	5,592	20,131	7304,932	7325,063	344,256	1,650
3	2,03	1,268	4,564	1460,389	1464,953	343,872	0,315
4	0,50	0,331	1,193	330,600	331,793	343,815	0,065
5	0,16	0,132	0,474	235,257	235,731	343,810	0,046
6	0,10	0,086	0,308	155,468	155,776	343,807	0,031
7	0,07	0,053	0,191	98,571	98,763	343,804	0,019
8	0,04	0,031	0,111	59,265	59,376	343,803	0,012
9	0,02	0,015	0,055	32,151	32,207	343,801	0,006
10	0,01	0,006	0,020	13,432	13,452	343,801	0,003
11	0,00	0,001	0,005	3,335	3,340	343,800	0,001
12	0,00	0,000	0,001	0,828	0,829	343,800	0,000
13	0,00	0,000	0,000	0,206	0,206	343,800	0,000
14	0,00	0,000	0,000	0,051	0,051	343,800	0,000
15	0,00	0,000	0,000	0,013	0,013	343,800	0,000
16	0,00	0,000	0,000	0,003	0,003	343,800	0,000
17	0,00	0,000	0,000	0,001	0,001	343,800	0,000
18	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
19	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
20	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
21	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
22	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
23	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000
24	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	343,800	0,000

Sumber : Hasil Perhitungan

H. Perencanaan Tubuh Embung

- Penentuan tinggi jagaan
 - Penentuan tinggi kenaikan akibat banjir abnormal (Δh)
 $\Delta h = 0,303 \text{ m}$
 - Perhitungan ombak yang di sebabkan oleh angin (h_w)
 $h_w = 0,3 \text{ m}$
 - Perhitungan tinggi ombak yang disebabkan oleh gempa (h_e)
 $h_e = 0,5109 \text{ m}$
 Tinggi puncak gelombang :
 $h_e/2 = 0,255$
 - Perhitungan tinggi kenaikan permukaan air waduk di sebabkan ketidaknormalan pintu – pintu banyunan pelimpah (h_a)
 Karena perhitungan ketidak-normalan yang disebabkan pintu – pintu bangunan pelimpah sukar untuk dihitung, maka menurut standar pertimbangan – pertimbangan ha diambil 0,5 m.
 - Perhitungan tinggi jagaan
 $H_f = \Delta h + h_w + h_a + h_i$
 $= 0,303 + 0,3 + 0,5 + 1$
 $= 2,1026 \text{ m}$
 sehingga digunakan tinggi jagaan 2 m
- Perhitungan tinggi embung
 - Muka air banjir = 345,57
 - Elv dasar sungai = 339,00
 - Tinggi jagaan = 2,000
 - Tinggi embung = elv. MAB – elv.dasar sungai
 $= 345,57 - 339,00$
 $= 8,57 \sim 8 \text{ m}$
 - Elv puncak embung = elv. dasar sungai + tinggi embung
 $= 339,00 + 8,00$
 $= 347,00 \text{ m}$

I. Data Tanah

Analisa stabilitas menggunakan bantuan aplikasi software Plaxis 2D versi 20 dibutuhkan data parameter tanah yang didapatkan dari pengujian SPT (Standart Penetration Test) dan hasil data laboratorium seperti γ_d, ϕ, c . Untuk mencari nilai parameter tanah yang tidak didapatkan dari hasil laboratorium dapat menggunakan rumus empiris ataupun tabel korelasi.

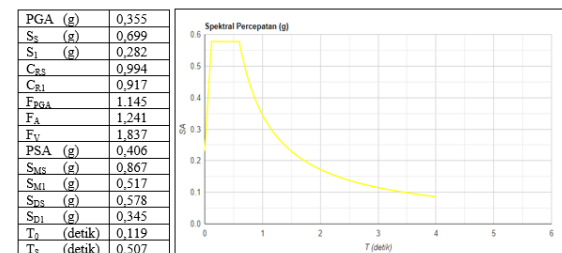
Tabel 12 Data parameter tanah input plaxis

Depth m	Jenis Tanah	γ_{unsat} gr/cm ³	γ_{sat} kN/m ³	γ_{sat} gr/cm ³	γ_{sat} kN/m ³	permeabilitas m/hari	c kg/cm ²	c kN/m ²	ϕ kN/m ²	E kN/m ²	v
1-2	Lanasu Kelempungan sedikit pasir	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,38	37,27	8	2550	0,30
3-4	Lempung Kelempuan	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,40	39,23	6	3300	0,35
5-6	Lempung Kelempuan gravel	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,30	29,42	14	10800	0,35
7-8	Batu border	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,32	31,38	11	2850	0,40
9-10	Lanasu Kelempungan sedikit pasir	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,34	33,34	10	3000	0,30
11-12	Lanasu Kelempungan sedikit pasir	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,36	35,30	9	4050	0,30
13-14	Lanasu Kelempungan sedikit pasir	1,21	11,88	1,76	17,25	0,34	0,31	30,40	12	6000	0,30

Sumber : Hasil Perhitungan

J. Analisa Parameter Gempa

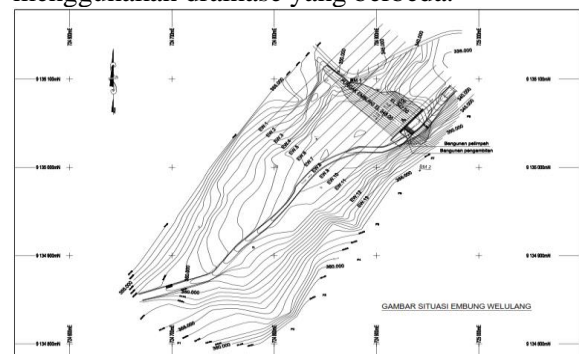
Dalam tugas akhir ini parameter gempa diambil menurut SNI 1726:2010 dengan perhitungan Desain Spectra Indonesia dari Dinas Pekerjaan Umum. Hasil dari parameter gempa kemudian di gunakan sebagai data input plaxis. Diasumsikan kelas situs pada tanah sedang (SD), sehingga didapatkan data sebagai berikut :



Gambar 1 Nilai Spektral Percepatan di permukaan
 Sumber : Hasil Perhitungan (pu.go.id) [diakses pada 10 Agustus 2021]

K. Analisa Stabilitas

Pada studi kasus ini, ada tiga model tipe embung yang akan di analisa saat baru dibangun, saat muka air normal, saat muka air banjir dan gempa, dan kondisi surut cepat (*Rapid Drawdown*). Sehingga di ketahui angka keamanan pada masing – masing model embung menggunakan drainase yang berbeda.



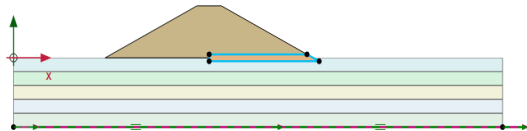
Gambar 2 Layout Embung Welulang

Sumber : Data Perencanaan

1. Geometri tanah

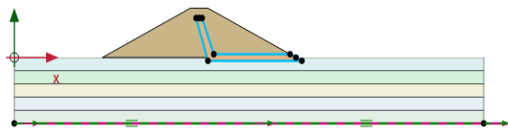
Tahapan pada plaxis adalah geometri tanah, input material sesuai data, kemudian dilakukan pemodelan. Pada tubuh embung digunakan material urugan, pada bagian drainase di gunakan pasir, dan pada lapisan kedap air digunakan tanah lempung.

- a. Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal



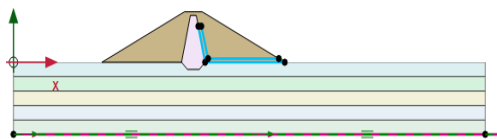
Gambar 3 Geometri embung dengan saluran drainase horizontal
 Sumber : Hasil Analisa

- b. Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak



Gambar 4 Geometri embung dengan saluran drainase tegak
 Sumber : Hasil Analisa

- c. Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti

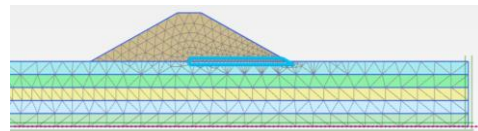


Gambar 5 Geometri embung dengan lapisan kedap air dan dipasang saluran drainase di depan
 Sumber: Hasil Analisa

2. Generate Mesh

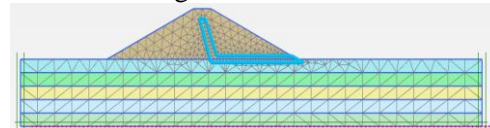
Pada tahap generate mesh akan diketahui model jaringan analisa pada desain tubuh embung. Berdasarkan analisa generate mesh model jaringan pada pemodelan adalah triangle.

- a. Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal



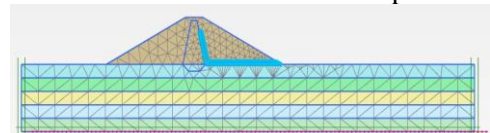
Gambar 6 Generate mesh embung dengan saluran drainase horizontal
 Sumber : Hasil Analisa

- b. Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak



Gambar 7 Generate mesh embung dengan saluran drainase tegak
 Sumber : Hasil Analisa

- c. Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti



Gambar 8 Generate mesh embung dengan lapisan kedap air dan dipasang saluran drainase di depan
 Sumber: Hasil Analisa

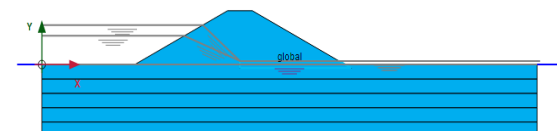
3. Output Plaxis 2D Versi 20

Tahap selanjutnya pada plaxis adalah *flow conditions* yaitu penentuan muka air yang akan dianalisa dengan memasukkan data muka air banjir, muka air normal dan asumsi pada saat terjadi rapid. Setelah muka air sudah di input, kemudian pada tahap *staged construction* tentukan titik untuk dilakukan analisa stabilitas pada embung. Lalu mulai analisa dengan *calculate*. Berikut adalah geometri muka air yang akan dianalisa.

- a) Kondisi muka air baru dibangun

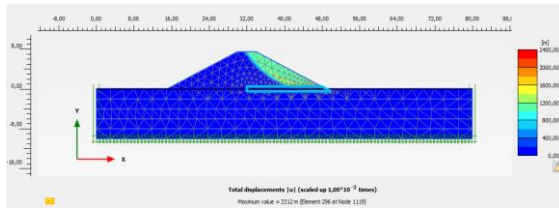
Kondisi dimana muka air sama dengan muka air tanah

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal



Gambar 9 Geometri muka air embung saat konstruksi baru dibangun

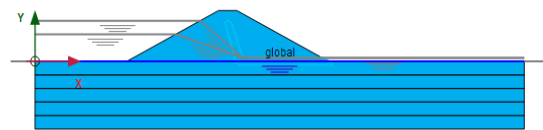
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 10 Model bidang longsor embung saat konstruksi baru dibangun SF = 2,014

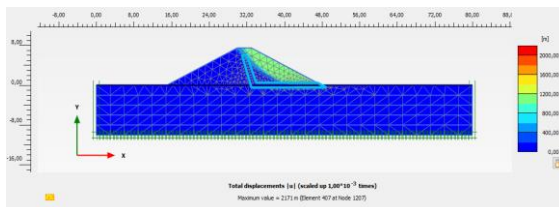
Sumber: Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak



Gambar 11 Geometri muka air embung saat konstruksi baru dibangun

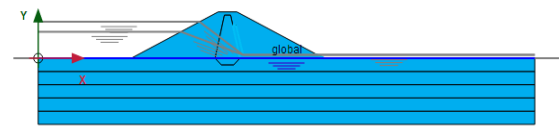
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 12 Model bidang longsor embung saat konstruksi baru dibangun SF = 2,018

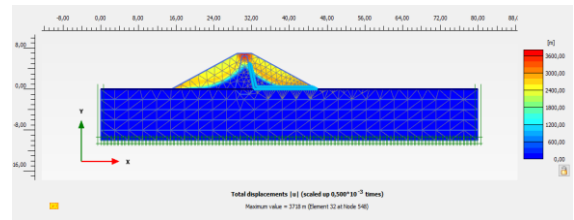
Sumber: Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti



Gambar 13 Geometri muka air embung saat konstruksi baru dibangun

Sumber : Hasil Analisa



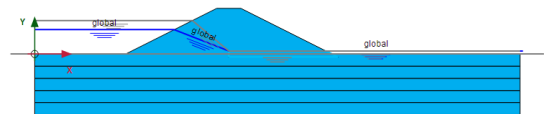
Gambar 14 Model bidang longsor embung saat konstruksi baru dibangun SF = 2,201

Sumber: Hasil Analisa

- b) Kondisi muka air normal

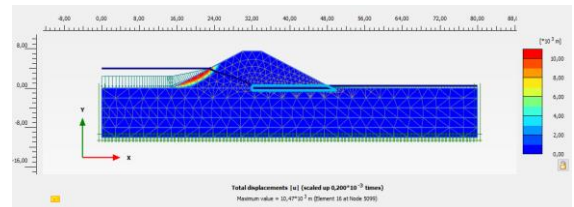
Kondisi dimana pada tumpukan embung sudah terisi dengan air sampai puncak mercu

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal



Gambar 15 Geometri muka air embung saat muka air normal

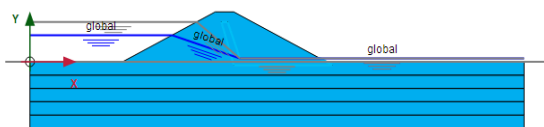
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 16 Model bidang longsor embung saat muka air normal SF = 1,816

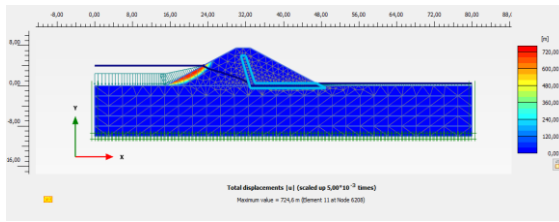
Sumber : Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak



Gambar 17 Geometri muka air embung saat muka air normal

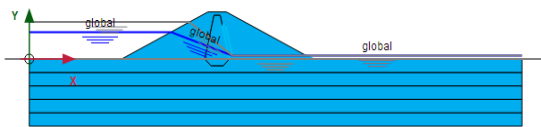
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 18 Model bidang longsor embung saat muka air normal SF = 1,806

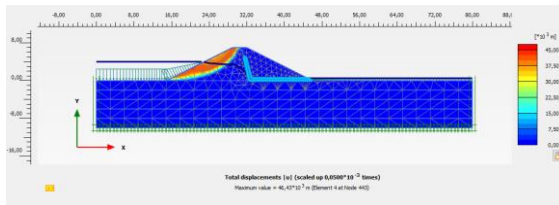
Sumber : Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti



Gambar 19 Geometri muka air embung saat muka air normal

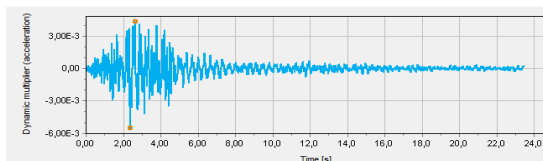
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 20 Model bidang longsor embung saat muka air normal SF = 1,671

Sumber : Hasil Analisa

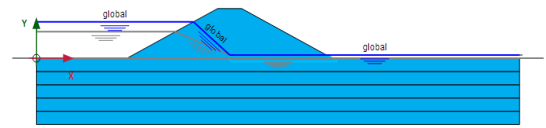
- c) Kondisi muka air banjir dan gempa
- Kondisi dimana air pada tampungan melimpah diatas mercu embung dengan disertai beban percepatan gempa. Tugas akhir in menggunakan *time histories* dengan gempa $a = 0.355g$ seperti disajikan dalam gambar 21.



Gambar 21 Time histories ekuivalen dengan $a = 0,355g$

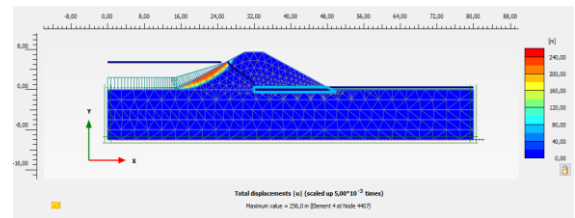
Sumber : Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal



Gambar 22 Geometri muka air embung saat muka air banjir dan gempa

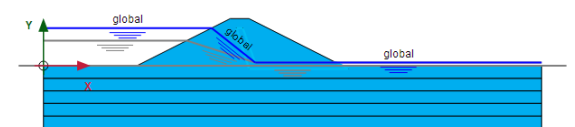
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 23 Model bidang longsor embung saat muka air banjir dan gempa SF = 1,762

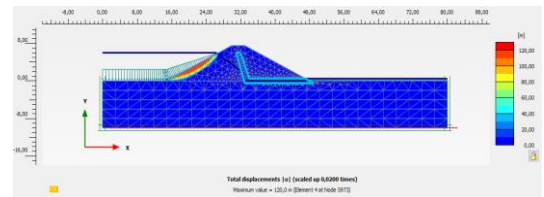
Sumber: Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak



Gambar 24 Geometri muka air embung saat muka air banjir dan gempa

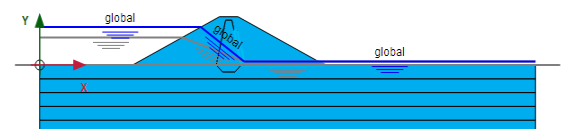
Sumber : Hasil Analisa



Gambar 25 Model bidang longsor embung saat muka air banjir dan gempa SF = 1,776

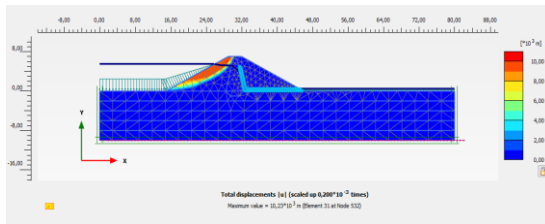
Sumber: Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti



Gambar 26 Geometri muka air embung saat muka air banjir dan gempa

Sumber : Hasil Analisa

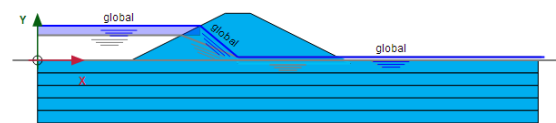


Gambar 27 Model bidang longsor embung saat muka air banjir dan gempa SF = 1,570
 Sumber: Hasil Analisa

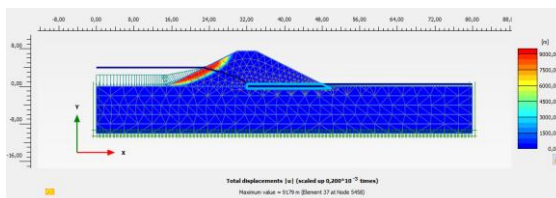
d) Kondisi *Rapid Drawdown*

Kondisi dimana muka air berada di muka air banjir dan tiba – tiba surut dengan cepat ke muka air normal.

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase horizontal

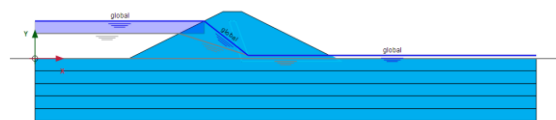


Gambar 28 Geometri muka air embung saat *Rapid Drawdown*
 Sumber : Hasil Analisa

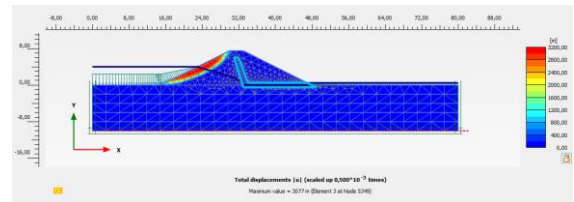


Gambar 29 Model bidang longsor embung saat *Rapid Drawdown* SF = 1,596
 Sumber : Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan saluran drainase tegak

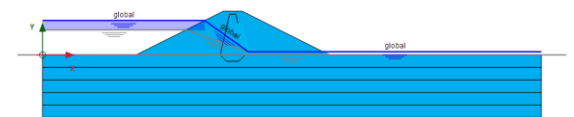


Gambar 30 Geometri muka air embung saat *Rapid Drawdown*
 Sumber : Hasil Analisa

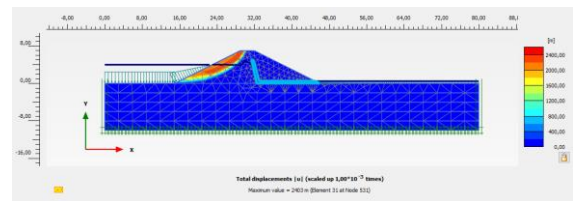


Gambar 31 Model bidang longsor embung saat *Rapid Drawdown* SF = 1,576
 Sumber : Hasil Analisa

- Embung urugan tanah dengan lapisan kedap air dan saluran drainase di depan inti



Gambar 32 Geometri muka air embung saat *Rapid Drawdown*
 Sumber : Hasil Analisa



Gambar 33 Model bidang longsor embung saat *Rapid Drawdown* SF = 1,385
 Sumber : Hasil Analisa

5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Dari perhitungan analisa debit banjir rencana menggu nakan metode Hidrograf Nakayasu dengan data curah hujan 10 tahun pada debit periode ulang 25 tahun sebesar 25,842 m³/detik,
2. Berdasarkan perhitungan kapasitas efektif dengan kebutuhan air baku, dan evaporasi di daperoleh kapasitas efektif sebesar 1569,506 m³. Sedangkan jumlah total air yang dapat ditampung oleh embung adalah 15947,22 m³ pada elevasi +343,8, sehingga semua air yang ada bisa dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat sekitar.
3. Setelah melakukan perhitungan dimensi bendung, maka didapatkan :
 - Dimensi Tubuh Embung :
 - Tipe Embung = tipe urugan
 - Lebar puncak mercu = 4 meter

- Tinggi Embung = 8 meter
- Tinggi Jagaan = 2 meter
- Elevasi dasar = +339,00
- Elevasi MAN = +343,80
- Elevasi MAB = +345,57
- Elevasi mercu = +347,00
- Kemiringan lereng = 1:2

4. Berdasarkan hasil analisa program software plaxis 2D versi 20, angka kemanan dari tiga model bendungan urugan tanah dengan pada kondisi baru dibangun, saat muka air normal, saat muka air banjir dan gempa dan kondisi surut cepat sebesar :

No	Tinjauan Analisa	Angka Keamnan
A. Kosntruksi baru dibangun		
	Embung drainase horizontal	2,014
	Embung drainase tegak	2,018
	Embung kedap air dan dipasang drainase di depan inti	2,201
B. Muka air normal		
	Embung drainase horizontal	1,816
	Embung drainase tegak	1,806
	Embung kedap air dan dipasang drainase di depan inti	1,671
C. Muka air banjir dan gempa		
	Embung drainase horizontal	1,762
	Embung drainase tegak	1,776
	Embung kedap air dan dipasang drainase di depan inti	1,570
D. Rapid drawdown		
	Embung drainase horizontal	1,596
	Embung drainase tegak	1,576

Embung kedap air dan dipasang drainase di depan inti	1,385
--	-------

B. Saran

Saran setelah dilakukan perhitungan dan analisa stabilitas embung tipe urugan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisa rembesan atau erosi bawah tanah yang juga berpengaruh terhadap stabilitas.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai kekuatan atau perbaikan tanah dibawah embung.
3. Analisa stabilitas dapat dilakukan menggunakan aplikasi selain plaxis 2D versi 20 sebagai perbandingan.

DAFTAR PUSTKA

- Badan Pengenbangan Sumber Daya Manusia. (2017). *Modul 13 Analisa stabilitas bendungan : Perhitungan stabilitas lereng*. Jakarta: Pusdiklat SDA dan Konstruksi.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2007). *Pembangunan Bendungan Urugan Pada Pondasi Tanah Lunak*. Jakarta: Direktorat Jendral Sumber Daya Air.
- Fatmawati, L. E. (2019). Rekayasa dan Manajemen Konstruksi. *Analisis Stabilitas Bendung Embung Made, Desa Made, Kecamatan Kudu, Kabupaten Jombang*, 241-248.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Marga, P. B. (2019). *Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi*. Jakarta.
- Putra, D. N. (2018). Jurnal Online Institut Teknologi Nasional. *Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Raknamo*, 95-104.

Rizal, N. S. (2017). *Aplikasi Perencanaan Irigasi dan Bangunan Air*. Jember: LPPM Unmuh Jember.

SDA, P. (2013). *KP - 02 Bagian Bangunan Utama*. Jakarta.

Soedibyso. (2003). *Teknik Bendungan*. Jakarta: PT. Pradinya Paramita.

Sosrodarsono, S. (2002). *Bendungan Type Urugan*. Jakarta: PT. Pradinya Paramita.