

Optimasi Desain Kolam Peredam Energi Bendung Gerak Torpedo dengan Aplikasi Geostudio di Kecamatan Wuluhan, Kabupaten Jember

Design Optimization of Torpedo Weir Energy Absorbing Pond with Geostudio Application in Wuluhan District, Jember Regency

Dwi Dita Wahyuning Tiyas¹⁾, Nanang Saiful Rizal^{2*)}, Arief Alihudien³⁾

¹⁾Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : dwiditawahyuningt@gmail.com¹

²⁾Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember*^{*)}Koresponden Author
Email : nanagsaifulrizal@unmuhjember.ac.id²

³⁾Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email : ariefalihudien@unmuhjember.ac.id³

Abstrak

Bendung gerak merupakan jenis bendung yang elevasi muka airnya dapat dikendalikan sesuai yang dikehendaki dengan membuka dan menutup pintu air. Namun limpahan air yang terus menerus akan mengakibatkan struktur tanah menjadi jenuh, hingga mengakibatkan meningkatnya nilai angka pori dan mempengaruhi stabilitas bendungan termasuk stabilitas bangunan peredam energi bendung. Maka dari itu perlu diketahui bagaimana dimensi efektif bangunan peredam energi sehingga diharapkan dapat tahan terhadap gaya internal dan eksternal yang bekerja seperti penggulingan, pergeseran, rembesan dan penggelembungan yang mungkin terjadi. Adapun analisa yang digunakan yaitu mencari debit banjir rencana menggunakan metode rasional, kemudian menghitung perencanaan dimensi bangunan peredam energi bendung gerak menggunakan tipe MDO. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan panjang lantai dasar bangunan peredam energi tipe MDO senilai 5.67 m, tinggi ambang akhir 1.5 m, dan lebar ambang akhir 2.9 m. Stabilitas bendung terhadap guling $1.8 > 1.5$ (aman), dan terhadap geser $2. > 1.5$ (aman) pada kondisi normal. Analisa faktor keamanan bangunan peredam energi bendung gerak dengan nilai factor keamanan terhadap daya dukung tanah $26.60 < 76.11$ (aman), terhadap rembesan adalah $1.17 > 1$ (aman) dan nilai factor keamanan terhadap penggelembungan adalah $2.13 > 1$ (aman). Kemudian dilakukan pemodelan rembesan pada keadaan tanah jenuh dalam bentuk 2D menggunakan aplikasi *Geostudio Seep-w*.

Kata Kunci : Bendung Gerak, MDO, Faktor Keamanan, *Geostudio Seep-w*

Abstract

A mobile weir is a type of weir whose water level elevation can be controlled as desired by opening and closing the floodgates. However, the continuous overflow of water will cause the soil structure to become saturated, resulting in an increase in the void ratio and affect the stability of the dam, including the stability of the weir energy absorbing structure. Therefore, it is necessary to know how the effective dimensions of energy absorbing buildings are so that they are expected to be able to withstand internal and external forces such as overturning, shifting, seepage and swelling that may occur. The analysis used is to find the planned flood discharge using the rational method, then calculate the planning dimensions of the weir energy damper building using the MDO type. Based on the research results, it was found that the length of the ground floor of the MDO type energy absorbing building was 5.67 m, the final threshold height was 1.5 m, and the final threshold width was 2.9 m. Weir stability against overturning $1.8 > 1.5$ (safe), and against shear $2. > 1.5$ (safe) under normal conditions. The safety factor analysis of energy damping dams with a safety factor value for soil carrying capacity is $26.60 < 76.11$ (safe), for seepage is $1.17 > 1$ (safe) and the safety factor for swelling is $2.13 > 1$ (safe). Then seepage modeling is carried out on saturated soil conditions in 2D using the *Geostudio Seep-w* application.

Keywords: Weir, MDO, Safety Factor, *Geostudio Seep-w*

1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Air sangat penting untuk kelangsungan hidup dan kesehatan umat manusia. Banyak metode telah dikembangkan untuk menyimpan air dari dulu sampai sekarang, dan salah satu metode yang paling penting adalah pembangunan bendungan. Bendungan merupakan bangunan air yang dibangun secara melintang sungai, agar permukaan air sungai di sekitarnya naik sampai ketinggian tertentu, sehingga air sungai dapat dialirkan melalui pintu sadap ke saluran-saluran pembagi kemudian hingga ke lahan-lahan pertanian (Kartasapoetra, 1991).

Selama periode banjir, kenaikan muka air tanah menyebabkan peningkatan kadar air tanah dan penurunan kekuatan geser, dan tekanan air pori di lereng juga berubah secara dinamis dengan naik turunnya muka air.

Istilah rembesan digunakan untuk menggambarkan semua pergerakan air melalui bumi. Simulasi aliran air yang melalui tanah dengan model numerik sangat kompleks. Sejak tahun 1990-an, para peneliti menyadari bahwa permeabilitas memainkan peran penting dalam meningkatkan akurasi metode numerik. Maka digunakanlah aplikasi *Geostudio Seep/w* untuk melakukan analisa rembesan dan pemodelan numerik (GEO-SLOPE International Ltd, 2012).

Maka dari itu Jin Zhu Mao dkk melakukan penelitian tentang pengaruh fluktuasi ketinggian air yang cepat terhadap stabilitas kemiringan waduk tak jenuh. Selanjutnya Brontowiyono dkk melakukan penelitian tentang pengurangan resiko rembesan dengan investigasi ke berbagai panjang dan posisi dinding potong dan drainase Horizontal (studi kasus: bendungan Sattarkhan) menggunakan aplikasi *Geostudio Seep-W*. Shu Zhang dkk juga melakukan penelitian tentang perilaku konduktivitas dan deformasi hidraulik jenuh variabel spasial dari longsor waduk dengan persamaan elemen hingga untuk aliran kondisi tunak yang diatur oleh hukum Darcy dan untuk aliran transien di bawah hipotesis Terzaghi.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka rumusan masalah yang akan dibahas sebagai berikut :

1. Bagaimana dimensi bagian bangunan kolam peredam energi bendung gerak supaya efektif ?
2. Berapa nilai faktor keamanan kolam peredam energi bendung gerak apabila terjadi kerusakan geser dan guling ?
3. Bagaimana keadaan kolam peredam energi bendung gerak apabila terjadi rembesan dan penggelembungan ?

C. Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui dimensi kolam peredam energi bendung gerak secara efektif
2. Menghitung nilai factor keamanan kolam peredam energi bendung gerak akibat guling dan geser, dan daya dukung tanah.
3. Mengetahui rembesan air dan penggelembungan pada tanah yang kemungkinan terjadi.

D. Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk meningkatkan perkembangan bidang keteknisipilan khususnya pada bidang keairan.
2. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dasar perencanaan bangunan air yang sesuai dengan curah hujan setempat.
3. Tahapan pada pengerjaan pemodelan menggunakan software *Geostudio Seep/W* menjadi referensi untuk selanjutnya dapat memaksimalkan penggunaan aplikasi software dalam penelitian pada bidang keairan.

E. Batasan Masalah

Untuk memperjelas analisis penelitian, dilakukan batasan masalah sebagai berikut :

1. Objek penelitian yaitu kolam peredam energi bendung gerak torpedo di Kecamatan Wuluhan, Kabupaten Jember
2. Mencari nilai keamanan bendung gerak akibat guling dan geser
3. Hanya menggunakan *Geostudio seep/w* sebagai aplikasi bantu untuk visualisasi rembesan pada tanah dalam bentuk 2D
4. Analisa yang digunakan pada aplikasi *Geostudio seep/w* yaitu menggunakan analisa *Steady-state*

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Hidrologi

Hidrologi adalah cabang ilmu Geografi yang mempelajari pergerakan, distribusi, dan kualitas air. Proses hidrologi ada 3 macam, yaitu infiltrasi, evaporasi, dan air permukaan. Sedangkan perhitungan hidrologi meliputi perhitungan curah hujan, curah hujan wilayah dan penentuan debit.

B. Dasar Perencanaan Bendung Gerak

Pemilihan jenis bendung dilakukan dengan mempertimbangkan lapisan tanah dibawahnya dan fungsi yang akan digunakan. Bendung gerak mempunyai elemen bangunan pembantu seperti kolam peredam energi. Dalam pemilihan jenis model peredam energi harus memperhatikan nilai debit rencana serta beda tinggi muka air di hulu dan hilir, juga mempertimbangkan kondisi dasar sungai (jenis batuan, endapan material, dan kemungkinan terjadi penggerusan).

C. Tipe MDO

Kolam peredam energi tipe MDO adalah modifikasi kolam peredam energi tipe Vlugter yang dikembangkan di laboratorium Pusat Litbang Sumber Daya Air (Pusair) Indonesia dengan mengacu RSNI T-04-2002. Perbedaan mendasar dalam penggunaan tipe modifikasi ini yaitu penggunaan grafik dalam menentukan panjang dan lebar dimensi peredam energi. Peredam MDO terdiri dari lantai datar, diujung hilir lantai dilengkapi dengan ambang hilir tipe gigi ompong dan dilengkapi dengan rip rap.

D. Analisa Gaya yang Bekerja

Gaya-gaya yang bekerja pada pelimpah perlu dianalisa terlebih dahulu sebelum melakukan control stabilitas terhadap struktur pelimpah. Gaya-gaya tersebut dibedakan menjadi 2 (dua) bagian, gaya vertical dan gaya horizontal.

Untuk gaya vertikal diantaranya :

1. Gaya akibat berat pelimpah

Pada gaya akibat berat bangunan digunakan persamaan :

$$G = Ym \times V$$

Keterangan :

G = gaya akibat berat pelimpah (ton-m)

V = volume konstruksi (m³)

Ym = berat jenis material (ton/ m³)

2. Gaya akibat tekanan ke atas

Untuk mengetahui tekanan ke atas digunakan persamaan :

$$U = Yw \times A$$

Keterangan :

U = Tekanan ke atas (ton-m)

Yw = berat volume air (ton/m³)

A = luas penampang tekanan ke atas (m²)

Sedangkan untuk gaya horizontal diantaranya:

1. Gaya akibat tekanan tanah

Menurut *Rankine* (1859), ada 2 (dua) macam gaya akibat tekanan tanah yaitu :

- Tekanan tanah aktif, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$Ea = 0.5 Ka YH_1^2 - 2 c. H_1 \sqrt{Ka}$$

- Tekanan tanah pasif, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$Ep = 0.5 Kp YH_2^2 - 2 c. H_2 \sqrt{Kp}$$

Keterangan :

Ea = tekanan aktif

Ep = tekanan pasif

Ka = koefisien tegangan aktif

Kp = koefisien tegangan pasif

Y = berat volume tanah

H₁ = tinggi tanah pada tekanan aktif (m)

H₂ = tinggi tanah pada tekanan pasif (m)

C = kohesi tanah

2. Gaya akibat tekanan air

Tekanan akibat tekanan air atau yang dinamakan tekanan hidrostatik merupakan

fungsi kedalaman dibawah permukaan air dan sama dengan persamaan:

$$Ph = \gamma_w \times z$$

Keterangan :

Ph = Tekanan hidrostatis
 γ_w = berat jenis air (t/m^3)
 z = ketinggian air (m)

E. Gaya Lain yang Bekerja

1. Gaya gempa

Nilai parameter gaya gempa didasarkan pada peta gempa Indonesia yang mengalami kerentanan di tiap daerah.

Koefisien gempa dihitung menggunakan persamaan :

$$a_d = n(a_c \times z)^m$$

$$E = \frac{a_d}{g}$$

Keterangan :

a_d = percepatan gempa rencana (cm/dt^2)
 n, m = koefisien untuk jenis tanah
 a_c = percepatan kejut dasar (cm/dt^2)
 E = koefisien gempa
 g = percepatan gravitasi (cm/dt^2)
 z = factor letak geografis gempa pada zona gempa di Indonesia

2. Rembesan dan pengelembungan

Pada lantai hilir tekanan rembesan relative lebih besar, dengan demikian perencanaan kolam peredam harus diperhitungkan supaya tidak terdorong ke atas. Untuk itu perlu diperhatikan kontrol rembesan dengan persamaan :

$$SF \text{ rembesan} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya pendorong}}$$

Keterangan :

Gaya penahan = $\gamma_{tanah} + \gamma_{batu \text{ rip-rap}}$
 Gaya pendorong = $(a+b)/2 \times B$
 Sedangkan untuk cek pengelembungan (*heave / blow up*) menurut Braja M Das (1995) dihitung dengan persamaan:

$$SF = \frac{\gamma'}{i \text{ rata} - \text{rata} \gamma_w}$$

Keterangan :

i = gradient hidrolis
 γ_w = berat jenis air (ton/ m^3)

Dengan ketentuan dikatakan aman apabila nilai keamanan (SF) > 1.

F. Kebutuhan Stabilitas

1. Ketahanan terhadap geser dan gelincir

Bangunan parafet dikatakan aman apabila angka keamanan lebih dari 1.5 (factor keamanan yang diisyaratkan pada modul SDA KP-06 Parameter Bangunan) terhadap pergeseran dan penggulingan.

Stabilitas terhadap guling dalam keadaan normal dapat dicek pada persamaan :

$$SF = \frac{\Sigma MT}{\Sigma MG} > 1.5$$

Stabilitas terhadap geser dalam keadaan normal dapat dicek pada persamaan :

$$SF = \frac{f \cdot \Sigma V + CA}{\Sigma H} > 1.5$$

Keterangan :

ΣMT = momen tahan
 ΣMG = momen guling
 ΣH = gaya horizontal
 ΣV = gaya vertikal
 C = kohesi tanah (kN/m^2)
 f = koefisien gesekan
 A = luas yang dipertimbangkan (m^2)

2. Ketahanan terhadap daya dukung tanah

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk memikul tekanan atau beban maksimum yang diizinkan untuk bekerja. Untuk mendapat tegangan yang dipakai, nilai besarnya beban dibagi dengan faktor keamanan (safety factor).

Nilai daya dukung tanah dapat diketahui menggunakan persamaan *Terzaghi (1922)*:

$$q_{ult} = 1.3 C \cdot N_c + \gamma D \cdot N_q + \gamma B \cdot N_\gamma$$

sedangkan untuk nilai tegangan digunakan persamaan:

$$\bar{\sigma} = \frac{q_{ult}}{SF}$$

Sehingga didapatkan nilai daya dukung tanah yang diizinkan melalui persamaan :

$$qu = \frac{W}{A} \left(1 + \frac{6e}{B} \right)$$

Keterangan :

$\bar{\sigma}$ = tegangan yang diizinkan (t/m²)

σ = tegangan yang timbul (t/m²)

e = angka pori

W = berat gaya horizontal

Kontrol keamanan daya dukung tanah apabila $q_u < \sigma$, maka daya dukung tanah dikatakan aman.

G. Aplikasi software *Geostudio*

Geostudio adalah sebuah aplikasi untuk pemodelan geoteknik dan lingkungan. Software ini melingkupi *Slope/W*, *Seep/W*, *Sigma/W*, *Quake/W*, *Temp/W*, dan *Ctran/W* yang terintegrasi sehingga memungkinkan untuk menggunakan hasil dari satu produk ke dalam produk yang lain.

Pada aplikasi *Geostudio seep/w*, tanah di atas bidang freatik merupakan tanah tak jenuh

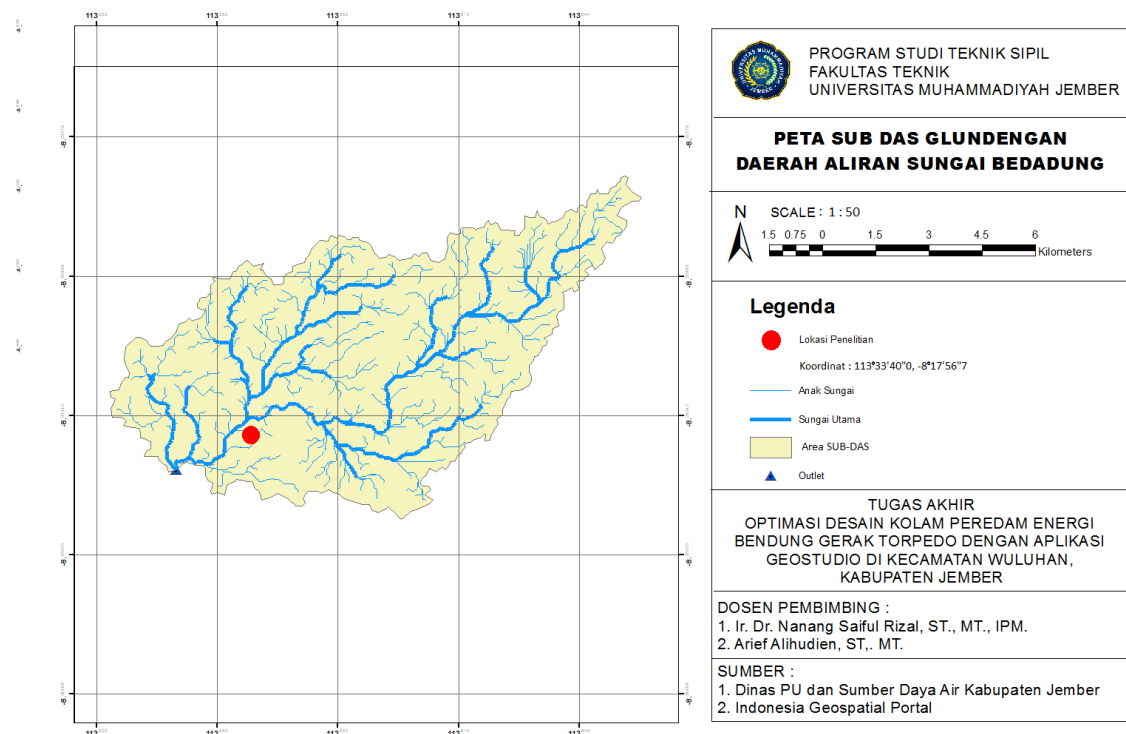
(*unsaturated soil*), sedangkan tanah di bawah permukaan freatik merupakan tanah jenuh (*saturated soil*). Model analisis aliran air dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu analisis transiens dan analisis steady-state.

Rembesan pada sistem pemodelan dapat diatur dengan pemberian garis batasan (*boundary condition*) pada setiap bagian sebagai kontrol pada sistem pemodelan. Garis batas ditentukan oleh tinggi energi (H) dan jumlah aliran yang terjadi.

3. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian dilaksanakan pada bangunan pelimpah air di Desa Glundengan, Kecamatan Wuluhan, Kabupaten Jember. Bendung gerak torpedo dikelola oleh Unit Pelaksana Teknis (UPT) Sumber Daya Air Kecamatan Wuluhan.

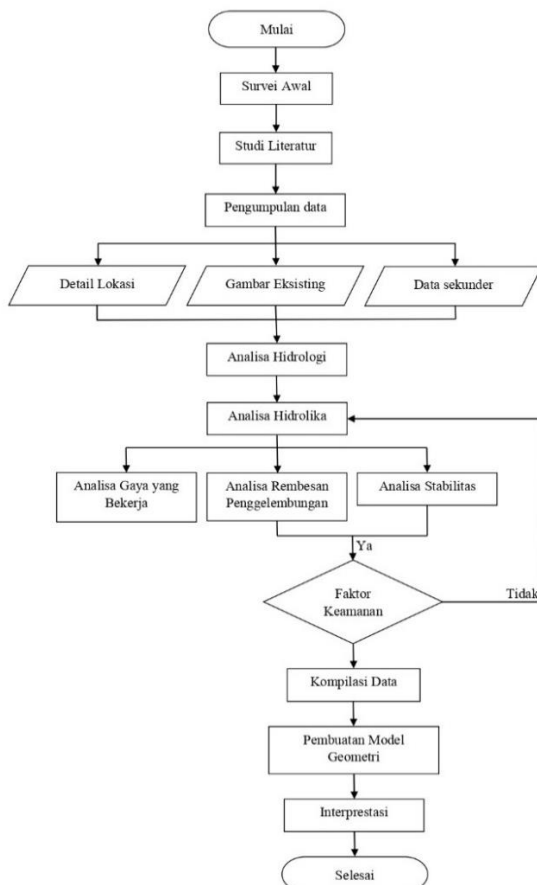


Gambar 1 Lokasi Penelitian
 (Sumber : Penulis, 2023)

Pelaksanaan penelitian dilakukan dalam beberapa tahap yaitu:

1. **Tahap persiapan**, dimaksudkan supaya penelitian yang akan kita laksanakan tersusun secara sistematis, efektif dan efisien.
2. **Pengumpulan data**, yang digunakan pada penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder, data primer meliputi data teknis bendung. Sedangkan data sekunder termasuk peta-peta, dan literatur yang bersumber dari instansi terkait.
3. **Pengolahan data**, pengolahan data meliputi beberapa tahapan yaitu:
 - a. Analisa hidrologi
 - b. Analisa hidrolika
 - c. Perhitungan stabilitas, rembesan dan penggelembungan, serta gaya-gaya yang bekerja
 - d. Pemodelan rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio seep-w*

B. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian.
 (Sumber : Penulis, 2023)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Tinjauan Umum

Perhitungan stabilitas kolam peredam energi bendung bertujuan untuk mengetahui nilai keamanan juga apakah kolam peredam energi tersebut cukup stabil atau tidak saat mendapat gaya pengaruh dari luar.

Tinjauan stabilitas yang diperhitungkan meliputi stabilitas terhadap guling, stabilitas terhadap geser, dan daya dukung tanah. Kemudian menghitung rembesan dan penggelembungan (*heave*) dengan nilai yang telah didapatkan dari aplikasi 2D *Geostudio seep/w* yang memvisualisasikan tanah dengan berbagai kondisi.

B. Analisa Hidrologi

Analisis hidrologi data yang digunakan adalah data curah hujan dari hasil tangkapan yang diperoleh dilapangan.

Tahap pertama perencanaan bangunan air dengan menentukan daerah aliran sungai. Penentuan Daerah Aliran Sungai (DAS) dilakukan dengan memotong DAS Bedadung menjadi sub-DAS Bedadung yang meliputi kawasan stasiun hujan Gumelar Timur, Kemuningsari, dan Tamansari dengan luas 72,60 km² yang dapat dilihat pada gambar 3.

Data hasil uji konsistensi dijabarkan pada tabel dan grafik gambar berikut:

Tabel 1 Konsistensi Data Sta. Kemuningsari

No	Tahun	STASIUN HUJAN KEMUNINGSARI		STASIUN SEKITARNYA	
		R1 (mm)	R1 _{Kom} (mm)	R2 (mm)	R2 _{Kom} (mm)
1	2010	2419.00	2419.00	7094.00	7094.00
2	2011	2101.00	4520.00	4630.00	11724.00
3	2012	1971.00	6491.00	4974.00	16698.00
4	2013	2738.00	9229.00	6434.00	23132.00
5	2014	1958.00	11187.00	5441.00	28573.00
6	2015	1342.00	12529.00	3983.00	32556.00
7	2016	1801.00	14330.00	6047.00	38603.00
8	2017	1452.00	15782.00	4477.00	43080.00
9	2018	1543.00	17325.00	4468.00	47548.00
10	2019	1454.00	18779.00	4200.00	51748.00

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Tabel 2 Konsistensi Data Sta. Gumelar Timur

No	Tahun	STASIUN HUJAN GUMELAR ETAN		STASIUN SEKITARNYA	
		R1 (mm)	R1 _{Kom} (mm)	R2 (mm)	R2 _{Kom} (mm)
1	2010	2554.0	2554.0	7094.00	7094.00
2	2011	1188.0	3742.0	4630.00	11724.00
3	2012	1459.0	5201.0	4974.00	16698.00
4	2013	1780.0	6981.0	6434.00	23132.00
5	2014	1627.0	8608.0	5441.00	28573.00
6	2015	1418.0	10026.0	3983.00	32556.00
7	2016	2075.0	12101.0	6047.00	38603.00

8	2017	1545.0	13646.0	4477.00	43080.00
9	2018	1494.0	15140.0	4468.00	47548.00
10	2019	1442.0	16582.0	4200.00	51748.00

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Tabel 3 Konsistensi Data Sta. Tamansari

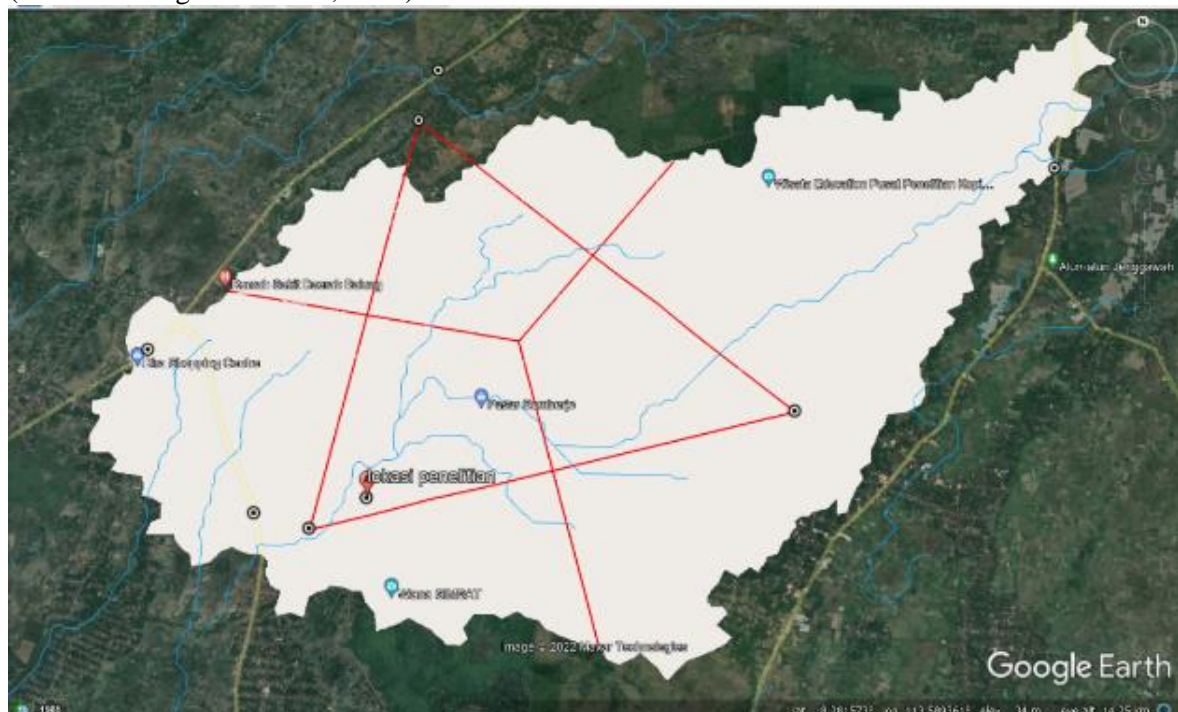
No	Tahun	STASIUN HUJAN TAMANSARI		STASIUN SEKITARNYA	
		R1 (mm)	R1 _{kom} (mm)	R2 (mm)	R2 _{kom} (mm)
1	2010	2121.0	2121.0	7094.00	7094.00
2	2011	1341.0	3462.0	4630.00	11724.00
3	2012	1544.0	5006.0	4974.00	16698.00
4	2013	1916.0	6922.0	6434.00	23132.00
5	2014	1856.0	8778.0	5441.00	28573.00
6	2015	1223.0	10001.0	3983.00	32556.00
7	2016	2171.0	12172.0	6047.00	38603.00
8	2017	1480.0	13652.0	4477.00	43080.00
9	2018	1431.0	15083.0	4468.00	47548.00
10	2019	1304.0	16387.0	4200.00	51748.00

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Tabel 4 Curah Hujan Rata-Rata Daerah

No	Tahun	STASIUN CURAH HUJAN (mm)			CURAH HUJAN RERATA
		STASIUN HUJAN KEMUNING SARI	STASIUN HUJAN GUMELAR ETAN	STASIUN HUJAN TAMANSARI	
		0.54	0.16	0.29	
1	2010	85.0	160.0	72.0	93.3
2	2011	82.0	82.0	89.0	84.1
3	2012	65.0	65.0	78.0	68.8
4	2013	87.0	87.0	92.0	88.5
5	2014	97.0	97.0	108.0	100.2
6	2015	130.0	65.0	56.0	97.7
7	2016	98.0	140.0	102.0	105.9
8	2017	70.0	68.0	55.0	65.3
9	2018	182.0	93.0	75.0	136.1
10	2019	182.0	93.0	75.0	136.1

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)



Gambar 3 Peta Polygon Thiessen

(Sumber : Google Earth, 2023)

C. Analisa frekuensi dan curah hujan rencana

Untuk menentukan debit banjir rencana perlu dilakukan perhitungan probabilitas frekuensi hujan harian maksimum.

1. Pengukuran dispersi

Pengukuran dispersi antara lain nilai standar deviasi (S), koefisien variasi (Cv), koefisien skewness (Cs), dan koefisien kurtosis (Ck), dapat dilihat pada tabel 5.

a. Standar Deviasi (S)

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ln Xi - Ln \bar{x})^2}$$

$$S = 24,04$$

b. Koefisien variasi (Cv)

$$Cv = \frac{S}{Ln \bar{x}}$$

$$Cv = 0.25$$

c. Koefisien skewness (Cs)

$$Cs = \frac{n}{(n-1)(n-2)s^3} \sum_{i=1}^n (Ln Xi - Ln \bar{x})^3$$

$$Cs = 0.54$$

d. Koefisien kurtosis (Ck)

$$Ck = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4} \sum_{i=1}^n (Ln Xi - Ln \bar{x})^4$$

Ck = 3,70

Tabel 5 Pemilihan analisa distribusi

No.	Tahun	R _i	(R _i - R)	(R _i - R) ²	(R _i - R) ³	(R _i - R) ⁴
1	2010	93.25	-4.35	18.89	-82.13	357.02
2	2011	84.06	-13.54	183.29	-2481.37	33593.52
3	2012	68.83	-28.77	827.70	-23812.55	685079.78
4	2013	88.47	-9.13	83.32	-760.50	6941.75
5	2014	100.24	2.64	6.97	18.42	48.63
6	2015	97.71	0.11	0.01	0.00	0.00
7	2016	105.95	8.35	69.66	581.35	4851.93
8	2017	65.26	-32.35	1046.23	-33840.73	1094593.93
9	2018	136.12	38.52	1483.44	57135.25	2200588.65
10	2019	136.12	38.52	1483.44	57135.25	2200588.65
	Jumlah	976.02		5202.94	53892.98	6226643.85
	Rerata	97.602		520.294	5389.298	622664.385
	STD. DEV	24.04				
	Cs	0.54				
	Ck	3.70				
	Cv	0.25				

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

2. Pemilihan jenis distribusi

Jenis distribusi frekuensi yang akan digunakan dipilih dari parameter statistik dengan membandingkan persyaratan dengan hasil perhitungan.

Tabel 6 Pemilihan jenis distribusi frekuensi

Jenis Distribusi Frekuensi	Syarat Distribusi	Hasil	Keterangan
Distribusi Normal	Cs = 0	0.54	Tidak Memenuhi
	Ck = 3	3.70	
Distribusi Log Normal	Cs=Cv ² +3Cv	0.75	Tidak Memenuhi
	Ck = Cv ⁸ + 6Cv ⁶ +15Cv ⁴ +16Cv ² +3	4.39	
Distribusi Gumbel	Cs = 1,139	0.54	Tidak Memenuhi
	Ck = 5,402	3.70	
Distribusi Log-Person III	Selain nilai di atas		Memenuhi

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Berdasarkan hasil perhitungan, metode distribusi yang digunakan adalah metode Pearson Log Type III.

D. Curah hujan rencana metode Log Pearson III

Langkah penyelesaian distribusi Log Pearson III dengan tahapan :

1. Ubah data curah hujan maksimum menjadi logaritma, dan hitung nilai tengahnya

Tabel 7 Logaritma Curah Hujan Maksimum

No	Tahun	R _i (mm)	log R	log R - log R _r	(log R - log R _r) ²	(log R - log R _r) ³
1	2010	93.25	1.970	-0.008	0.000	0.0000
2	2011	84.06	1.925	-0.053	0.003	-0.0002
3	2012	68.83	1.838	-0.140	0.020	-0.0027
4	2013	88.47	1.947	-0.031	0.001	0.0000
5	2014	100.24	2.001	0.023	0.001	0.0000
6	2015	97.71	1.990	0.012	0.000	0.0000
7	2016	105.95	2.025	0.047	0.002	0.0001
8	2017	65.26	1.815	-0.163	0.027	-0.0043
9	2018	136.12	2.134	0.156	0.024	0.0038
10	2019	136.12	2.134	0.156	0.024	0.0038
n =	10	976.02				
jumlah			19.777	0.000	0.102	0.000
Rata-rata	Log R _r	1.978				

(Sumber : hasil perhitungan)

2. Menghitung harga simpangan standar (Sx), dan koefisien Asimetri (Cs)

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum(\log R_1 - \log R)^2}{n-1}}$$

$$Sx = 0.1063$$

$$Cs = \frac{n \sum(\log R_1 - \log R)^3}{(n-1)(n-2)Sx^3}$$

$$Cs = 0.0551$$

3. Menghitung nilai logaritma hujan rencana dengan kala ulang yang dipilih

$$\log R_t = \log R + K Sx$$

$$\log R_t = 1.978 + K 0,1063$$

Keterangan :

R = curah hujan rata-rata daerah

Cs = koefisien simpangan

Sx = standar deviasi

K = factor kekerapan log pearson III

4. Menentukan nilai K, nilai persamaan distribusi diambil dari tabel factor frekuensi dengan kala ulang tertentu seperti pada tabel 8.

5. Didapat nilai hujan rencana dengan kala ulang tertentu, pada tabel 9.

Tabel 8 Hasil perhitungan nilai K

Kala Ulang	G	Dari Tabel %Peluang	K
2	0.0551	50	0.0000
5		20	0.8420
10		10	1.2820
25		4	1.7510
50		2	2.0540
100		1	2.3290

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Tabel 9 CH Rancangan Log Pearson III

Tr tahun	Pr (%)	K	K.Sy	Log Rt	Rt (mm)
2	50	0.0000	0.000	1.978	95.004
5	20	0.8420	0.090	2.067	116.754
10	10	1.282	0.136	2.114	130.034
25	4	1.7510	0.186	2.164	145.856
50	2	2.0540	0.218	2.196	157.088
100	1	2.3290	0.248	2.225	168.028

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

E. Uji kesesuaian distribusi

Keselarasan distribusi diuji secara analitik menggunakan metode *Chi-Square* dan *Smirnov-Kolmogorov*.

1. Metode Chi-Square

a. Urutan data curah hujan maksimum tahunan dari terendah ke tertinggi.

Tabel 10 Data Yang Diurutkan

Data Curah Hujan Maksimum min-max
65.256
68.832
84.063
88.474
93.255
97.712
100.242
105.948
136.117
136.117

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

b. Mengetahui jumlah data (n), jumlah kelas (G), nilai teoritis (Ei) untuk mencari nilai derajat kebebasan (DK)

Diketahui :

Jumlah data (n) = 10 (curah hujan 10 thn)

Jumlah kelas (G) = $1+3.322 \times \log 10$
 = 4,322

Jumlah nilai teoritis (Ei) = $\frac{10}{4,332} = 2.313$

$$DK = G - (p+1)$$

Keterangan :

Dk = Derajat Kebebasan

G = Jumlah kelas distribusi

P = Persamaan P=2 untuk distribusi normal binomial, dan P=1 untuk distribusi poisson Maka, $DK = 4,322 - (1+1) = 2$

c. Didapatkan nilai DK = 2, sehingga untuk nilai X^2 chi kuadrat dengan jumlah data n = 10, a = 5% dan Dk = 2 adalah 5.991 yang bisa dilihat pada tabel.

d. Mengetahui interval kelas distribusi dengan frekuensi ekspetasi $1/5 \times 100\% = 20\%$.. Maka untuk interval distribusi adalah 20%, 40%, 60%, dan 80%.

e. Mencari nilai probabilitas di tiap interval distribusi.

f. Untuk interval distribusi digunakan 20%, 40%, 60%, dan 80%.

- Probabilitas 20%

$P_x = 25\%$ di dapat periode ulang

(T) = $1/P(x) = 1/0,2 = 5$ tahun

- Probabilitas 40%

$P_x = 50\%$ di dapat periode ulang

(T) = $1/P(x) = 1/0,4 = 2.5$ tahun

- Probabilitas 60%

$P_x = 75\%$ di dapat periode ulang

(T) = $1/P(x) = 1/0,6 = 1.67$ tahun

- Probabilitas 80%

$P_x = 100\%$ di dapat periode ulang

(T) = $1/P(x) = 1/0,8 = 1.25$ tahun

g. Didapatkan range nilai batas dengan 5 (lima) kelompok dengan nilai X^2 hitung pada tabel 11.

h. Diperoleh nilai Chi kuadrat (X^2) hitung = 1.93. batas kritis nilai Chi kuadrat untuk derajat kebebasan (DK) = 2 dengan a = 5%. Dari tabel Chi kuadrat (X^2) didapat nilai kritis

= 9.210. Nilai X^2 hitung (1.93) < nilai X^2 kritis (9.210) maka perhitungan log pearson III dapat diterima

Tabel 11 Perhitungan X^2

Probabilitas (%)	Ei	Oi	(Oi - Ei) ²	(Oi - Ei)/ Ei
> 116.6595	2	2	1	0.4
116.6595 - 105.2764	2	1	1	0.5
105.2764 - 101.7478	2	1	1	0.5
101.7478 - 100.0084	2	1	1	0.5
< 100.0084	2	6	16	8.0
	10	11	20	1.93

(Sumber : hasil perhitungan)

2. Uji kesesuaian distribusi metode Smirnov Kolmogorov

Tabel 12 Tabel Uji Distribusi Probabilitas Smirnov Kolmogorov

Thn	i	Xi	(Xi) Max-min	log Xi	P(t)	F(t)	P' (Xi)	ΔP
2017	1	65.26	136.12	2.13	0.25	0.58	0.033	0.22
2018	2	136.12	136.12	2.13	0.50	0.58	0.033	0.47
2019	3	136.12	65.26	1.81	0.75	-1.15	-0.047	0.80
Jumlah					337.49	6.08		
Mean					112.50	2.03		
SDv					40.91	0.18		
Cs					-1.73	-1.73		
Max					0.80			

(Sumber : hasil perhitungan)

a. Menentukan standart deviasi (SDv)

$$SDv = \sqrt{\frac{\sum(\log R_1 - \overline{\log R})^2}{n-1}} = 0.18$$

b. Menentukan nilai koefisien skewness (Cs), diperoleh nilai interpolasi pada kala ulang tertentu dengan hasil pada tabel 13

Tabel 13 Nilai Koefisien Skewness (Cs)

Cs	2	5	10	25	50	100	200
0.1	-0.017	0.836	1.292	1.785	2.107	2.4	2.67
0	0	0.842	1.282	1.751	2.054	2.326	2.576
-1.73	0.294	0.946	1.109	1.162	1.136	1.044	0.948

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

$$Cs = \frac{n \sum(\log R_1 - \overline{\log R})^3}{(n-1)(n-2)Sx^3} = -1.73$$

c. Diketahui dari perhitungan ΔP pada tabel nilai koefisien skewness nilai $D_{max} = 0.80$. Diperoleh nilai D_{cr} dengan $n = 3$ dan $\alpha = 1\%$ pada tabel kelayakan Smirnov Kolmogorov adalah 0.82. Nilai $D_{max} (0.80) < D_{cr} 1\% (0.82)$, maka perhitungan log pearson III dapat diterima.

F. Analisa intensitas hujan

Perhitungan distribusi frekuensi digunakan persamaan *Kiprich (1940)* untuk mengetahui nilai waktu tiba hujan (T_c). Kemudian nilai T_c digunakan dalam perhitungan Intensitas hujan (I) dengan persamaan *Mononobe* yaitu:

$$T_c = \left(\frac{0.87 L^2}{1000 S}\right)^{0.385} \text{ (persamaan Kiprich)}$$

$$I = \frac{R}{24} \times \left(\frac{24}{T_c}\right)^{2/3} \text{ (persamaan Mononobe)}$$

Keterangan :

T_c = waktu konsentrasi (jam)

L = panjang sungai (km)

S = kemiringan sungai

I = Intensitas Hujan (mm/jam)

R = curah hujan rata-rata (mm)

Maka:

$$T_c = \left(\frac{0.87 \cdot 16.90^2}{1000 \cdot 3.3}\right)^{0.385} = 0.370 \text{ jam}$$

Tabel 14 Perhitungan intensitas hujan

Tr (tahun)	Rt (mm)	Tc (jam)	i (mm/jam)
2	95.004	0.37	63.91
5	116.756		78.54
10	130.034		87.47
25	145.856		98.11
50	157.088		105.67
100	168.028		113.03

(Sumber : hasil perhitungan)

G. Analisis debit banjir rencana

Perhitungan debit banjir rencana dengan metode rasional menggunakan persamaan :

$$Q_t = 0.278 C I A$$

Keterangan :

Q_t = debit banjir (m^3/det)

C = koefisien pengaliran
 I = intensitas hujan (mm/jam)
 A = luas daerah aliran (km²)

Tabel 15 Nilai Koefisien Limpasan

No.	Penggunaan Lahan	Luas (Km ²)	Koef C
1	Perbukitan	6.5	0.2
2	Pemukiman	21.1	0.4
3	Perkebunan	8.7	0.2
4	Persawahan	23.2	0.7
5	Tanah Terbuka	2.9	0.5
6	Pertanian Lahan Kering	8.7	0.6
7	Sungai	1.5	0.6
Total		72.6	

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

Tabel 16 Perhitungan debit banjir

Tr (tahun)	C	i (mm/jam)	A (km ²)	Q (m ³ /det)
2	0.49	63.91	72.6	626.84
5		78.54		770.34
10		87.47		857.96
25		98.11		962.36
50		105.67		1036.46
100		113.03		1108.65

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

H. Analisa perencanaan dimensi bendung

Adapun data teknis yang diperlukan dalam perencanaan bendung dan bangunan pelengkap lainnya adalah sebagai berikut:

- Lebar rata-rata sungai (b) = 8.5 m
- Kemiringan dasar sungai (l) = 3.3 m
- Elevasi sawah tertinggi = 20 m
- Luas daerah yang dialiri = 1440 Ha
- Elevasi dasar sungai = 18 m
- Elevasi dibawah ambang bendung = 18 m (pintu sorong tidak menggunakan ambang)

I. Perencanaan lebar bendung

Lebar bendung (Bt) merupakan jarak antara tembok pangkal sisi bendung kanan dengan tembok pangkal bendung sisi kiri. Lebar bendung (Bt) direncanakan 1.2 kali lebar sungai rata-rata.

$$\begin{aligned} \text{Lebar rata-rata sungai (b)} &= 8.5 \text{ m} \\ \text{Lebar bendung rencana (Bt)} &= 1.2 \times 8.5 \text{ m} \\ &= 10.20 \text{ m} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk lebar efektif bendung (Be) sama dengan selisih antara lebar bendung direncanakan dengan lebar total pilar.

$$\text{Lebar total pilar (Bp)} = 2 \times 0.80 = 1.60 \text{ m}$$

$$\text{Lebar efektif bendung (Be)} = Bt - Bp = 8.60 \text{ m}$$

1. Perencanaan lebar pilar pembilas

Lebar bangunan pembilas diambil satu per sepuluh kali lebar sungai rata-rata. Untuk lebar bangunan pembilas direncanakan 0.8 m dengan jumlah 1 buah pembilas.

2. Perencanaan pintu air

Pintu air memiliki cara kerja dengan membendung air sungai untuk mengatur elevasi muka air sungai. Pintu sorong mempunyai banyak jenis, namun untuk perencanaan ini digunakan pintu khusus yaitu pintu sorong (*Roller Gate*).

3. Perhitungan muka air sebelum dibendung

Nilai elevasi muka air digunakan untuk perhitungan tinggi energi dalam perencanaan bendung gerak.

4. Nilai tinggi muka air

Didapat nilai tinggi muka air (h) dari tiap saluran berdasarkan debit banjir rencana Q = 2 tahun dengan dengan keterangan :

A = luas wilayah (Ha)

V = kecepatan (m/det)

b = lebar saluran (m)

i = kemiringan (m)

m = kemiringan talud, dan

K = koefiseien manning

Elevasi muka air intake = 20 m

Elevasi muka air hulu = 23 m

5. Perhitungan tinggi energi

Tinggi energi merupakan selisih antara elevasi muka air dalam keadaan banjir dengan elevasi muka air dalam keadaan normal. Untuk tinggi energi pada hulu bendung disimbolkan dengan H1 sedangkan tinggi energy pada hilir bendung disimbolkan dengan H2.

Dengan persamaan :

$$H1 = h1 + v1^2 / 2g$$

h1 = tinggi muka air udik

v1² = kecepatan air di hulu

g = percepatan gravitasi (9.8 m/s²)

Maka didapatkan nilai H1 =

$$\begin{aligned} H1 &= h1 + v1^2 / 2g \\ &= 0 + 0.435^2 / 0 = 0.2 \text{ m} \end{aligned}$$

Untuk nilai H_2 = elevasi muka air hilir –
 elevasi muka air ambang
 = $18.78 - 18 = 0.78$ m

6. Tinggi bukaan pintu

Secara teknis cara kerja bendung gerak adalah dengan membuka pintu sorong ketika dalam keadaan normal untuk menaikkan elevasi muka air dan menutup pintu sorong ketika dalam keadaan banjir.

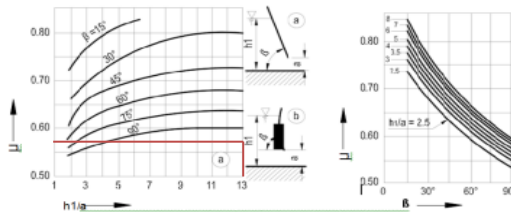
Perencanaan bukaan pintu digunakan coba-coba (a) diasumsikan nilai 1.5 m, maka :

$$h_1/a = 23 / 1.5$$

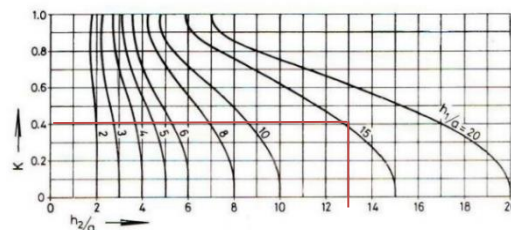
$$= 15.33 \text{ m}$$

$$h_2/a = 18.78 / 1.5$$

$$= 12.52 \text{ m}$$



Gambar 4. Koefisien debit μ masuk permukaan pintu datar atau lengkung (Sumber : Penggambaran Peneliti)



Gambar 5 Koef. debit tenggelam (*schmid*) (Sumber : Penggambaran Peneliti)

Sedangkan bukaan pintu rencana (b) =

$$b = \frac{Q}{K \mu a b \sqrt{2g h_1}}$$

Dengan persamaan :

$$\beta = 90$$

$\mu = 0.6$ (koefisien debit μ masuk permukaan pintu datar atau lengkung)

$K = 0.42$ (koefisien K untuk debit tenggelam schmid)

Maka :

$$b = \frac{Q}{K \mu a b} = \frac{627}{535.50}$$

$$= 1.17 \text{ m}$$

direncanakan tinggi bukaan = 1.17 m
 $m < b$ minimum (0.50 m)

Lebar standar untuk pintu pembilas bawah (undersluice) adalah 0.50 m; 0.75 m; 100 m digunakan satu besi stang pengangkat, sedangkan untuk 1.25 m dan 1.50 m digunakan 2 stang pengangkat.

Lebar pintu dibulatkan adalah 1.25 m. Karena nilai b dibulatkan = 1.25 m, maka pintu memerlukan 2 stang ulir pengangkat.

7. Kontrol fraude

Bilangan Froude digunakan sebagai parameter dalam pembuatan tipe kolam peredam sebuah bendung yang bergantung pada energi air yang masuk.

Untuk mencari nilai fraude digunakan persamaan :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g h_2}} = 0.7$$

Keterangan :

V = kecepatan

Q1 = debit

b = nilai bukaan pintu

A = luas

h_2 = tinggi muka air normal hilir

Maka :

$$V = \frac{Q_1}{(b \times h_2)} = 28.5 \text{ (m/det)}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g h_2}} = \frac{28.5}{42.46} = 0.7$$

Berdasarkan bilangan fraude dibuat pengelompokan dalam perencanaan kolam. Untuk nilai $Fr = 0.7$ kolam olak dapat digunakan secara sederhana, bagian hilir harus terhindar dari erosi.

J. Perencanaan kolam peredam energi

1. Pemilihan tipe yang digunakan

Tipe kolam olak yang akan direncanakan disebelah hilir bangunan tergantung pada energi masuk yang dinyatakan dengan bilangan froude, jenis tanah, dan sedimen. Untuk tipe yang digunakan lebih cocok menggunakan kolam olak tipe MDO, sebab bendung dibangun pada daerah dengan jenis tanah alluvial, angkutan sedimen fraksi pasir atau kerikil.

2. Perhitungan desain dimensi bangunan peredam energi.

Beberapa persamaan yang ada dalam perhitungan desain dimensi peredam energi diantaranya:

- e = parameter energi
- q = debit per satuan lebar pelimpah bendung (m³/dt/m²)
- z = selisih tinggi muka air hulu – hilir + elev mercu rencana mula-mula (m)
- g = percepatan gravitasi (m/dt²)
- Ds = kedalaman peredam energi (m)
- D2 = kedalaman air di hilir (m)
- a = tinggi ambang akhir (m)
- b = lebar ambang akhir (m)
- Kedalaman air di hilir (D2), diketahui :
 D2 = elevasi apron – tinggi bendung dari lantai udik ke hilir
 = 18 – 3.5 = 14.50 m
- L = 8.5 m (lebar dasar sungai)
- C = 1.7 (nilai koefisien)
- Q = 626.84 m³/det
- Parameter energi (E), diketahui :
 Muka air banjir hilir = 19.56 m
 Degradasi = 1.00

$$q = \frac{Q}{Be} = \frac{626.84}{8.60} = 72.88 \text{ m}^3/\text{dt}/\text{m}^2$$

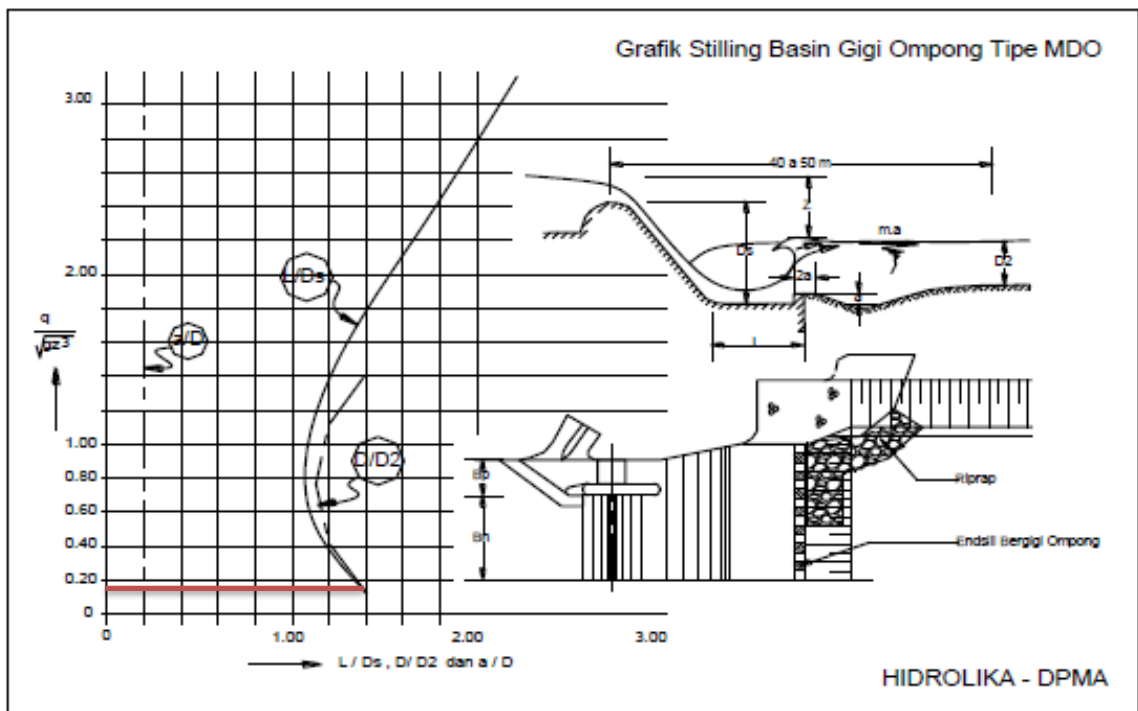
$$z = 21.50 + (23 - 18.78) = 26.13 \text{ m}$$

Maka nilai parameter energi (E) :

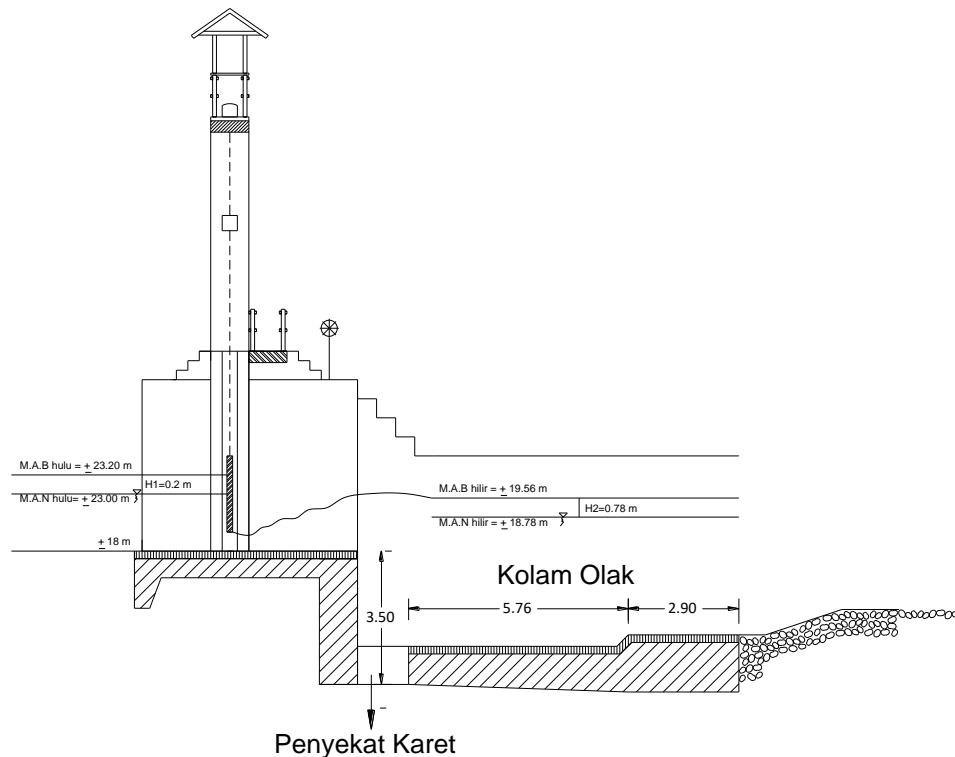
$$E = \frac{q}{\sqrt{g} \times z^3} = 0.17$$

Panjang lantai dan kedalaman lantai peredam energi, diketahui persamaan melalui grafik stilling basin tipe MDO:

- Grafik D/D2 = 1
 D2 = 14.50 m
 D = 14.50 m
 Elevasi minimum dasar kolam = 14.50 m
- Grafik L/Ds = 1.50
 L = 8.50 m
 Ds = 5.67 m
 Panjang lantai peredam energi = 5.67 m
- Tinggi ambang akhir (a) = (0.2-0.3) x D2
 = 1.5 m
- Lebar ambang akhir (b) = 2 x a
 = 2.9 m



Gambar 6 Grafik Stilling Basin Tipe MDO
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)



Gambar 7 Gambar rencana dimensi kolam peredam energi.
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

K. Perhitungan stabilitas dan gaya-gaya yang bekerja

Diketahui :

γ beton = 2.4 t/m³

γ air = 1 t/m³

γ tanah = 1 t/m³

γ sat = 1.9 t/m³

$f = 0.3$ (koefisien geser)

$C = 5$ (jenis tanah lanau)

$\phi = 25^\circ$ (sudut geser dalam)

SF = 3 (factor keamanan)

$B = 1.5$ m (diameter struktur)

$D = 0.375$ m (diameter struktur tertanam, untuk pondasi dangkal, syarat $D < B$)

1. Perhitungan gaya horizontal dan vertical

a. Tekanan tanah

Gaya terhadap tekanan tanah dibedakan menjadi 2, yaitu gaya akibat tekanan tanah aktif dan gaya akibat tekanan tanah pasif.

Diketahui :

$D1 = (\text{muka air normal} - \text{elevasi lantai dasar}) + \text{tinggi bendung}$

$= (23-18) + 3.5 = 8.5$ m

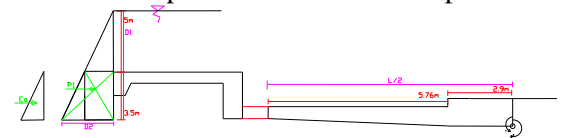
$D2 = 3$ m

Tekanan tanah aktif dengan rumus :

$$Pa = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Ka$$

Tekanan tanah pasif dengan rumus :

$$Pp = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Kp$$



Gambar 8 Pengaruh tekanan tanah
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

Maka :

• Tekanan tanah aktif

$$Pa = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Ka$$

$$Ka = \tan^2 (45 - \phi/2) = 3.571$$

$$Pa = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Ka$$

$$= 10.5 \times 1 \times 3^2 \times 3.571 = 16.069 \text{ ton}$$

Perhitungan momen :

$$Mp1 = Pa \times \text{panjang lengan}$$

$$= 16.069 \times 7.22 = 116.020 \text{ t/m}$$

• Tekanan tanah pasif

$$Pp = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Kp$$

$$Kp = \tan^2 (45 + \phi/2) = 1.97$$

$$Pp = 10.5 \times Yw \cdot D2^2 \cdot Kp$$

$$= 10.5 \times 1 \times 3^2 \times 1.97 = 8.849 \text{ ton}$$

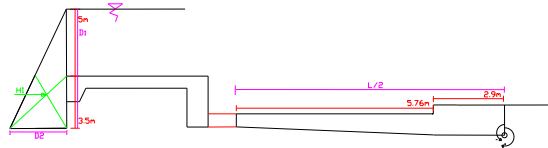
Perhitungan momen :

$$Mp2 = Pp \times \text{panjang lengan} \\ = 8.849 \times 7.22 = 63.892 \text{ t-m}$$

b. Tekanan hidrostatis

Perhitungan gaya :

$$H1 = A \times Yw \\ = (0.5 \times 8.5 \times 3) \times 1 \\ = 12.750 \text{ ton}$$

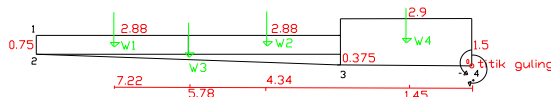


Gambar 9 Tekanan Hidrotatis
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

Perhitungan momen :

$$MH1 = H1 \times \text{panjang lengan} \\ = 12.750 \times 7.22 \\ = 92.055 \text{ ton-m}$$

c. Tekanan berat kolam peredam energi



Gambar 10 Tekanan berat pada kolam peredam energi
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

Perhitungan gaya :

$$W1 = A \times Y_{\text{beton}} \\ = (2.88 \times 0.75) \times 2.4 \\ = 5.184 \text{ ton}$$

$$W2 = A \times Y_{\text{beton}} \\ = (2.88 \times 0.75) \times 2.4 \\ = 5.184 \text{ ton}$$

$$W3 = A \times Y_{\text{beton}} \\ = (0.5 \times 5.6 \times 0.375) \times 2.4 \\ = 2.520 \text{ ton}$$

$$W4 = A \times Y_{\text{beton}} \\ = (2.9 \times 1.5) \times 2.4 \\ = 10.440 \text{ ton}$$

Perhitungan momen :

$$MW1 = W1 \times \text{panjang lengan} \\ = 5.184 \times 7.22 \\ = 37.424 \text{ ton-m}$$

$$MW2 = W2 \times \text{panjang lengan} \\ = 5.184 \times 4.34 \\ = 22.499 \text{ ton-m}$$

$$MW3 = W3 \times \text{panjang lengan} \\ = 2.520 \times 5.70 \\ = 14.364 \text{ ton-m}$$

$$= 14.364 \text{ ton-m}$$

$$MW4 = W4 \times \text{panjang lengan} \\ = 10.440 \times 1.45 \\ = 15.138 \text{ ton-m}$$

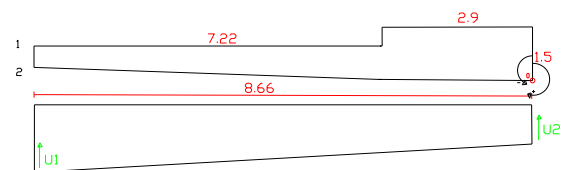
d. Tekanan ke atas/ uplift

Didapatkan nilai *water total head* dari aplikasi Geostudio, ditinjau dari 2 titik:

Tabel 17 Nilai *Water Total Head*

Keterangan	Water total head (m)
Pangkal	20.915
Ujung	19.197

(Sumber : analisa Geostudio Seep/w)



Gambar 11 Tekanan ke atas/ uplift
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

Diketahui :

$$a = 20.915 \text{ m}$$

$$b = 19.197 \text{ m}$$

Perhitungan gaya :

$$U1 = (a+b)/2 \times B \times Yw \\ = (20.915+19.197)/2 \times 8.66 \times 1 \\ = 173.685 \text{ ton}$$

Perhitungan momen :

$$MU1 = U1 \times \text{panjang lengan} \\ = 173.685 \times 1.45 \\ = 251.845 \text{ ton-m}$$

2. Gaya gempa

Gaya gempa ditentukan oleh konstruksi parafet dan oleh koefisien daerah gempa Kabupaten Jember. Pada KP-06 Parameter Bangunan digunakan persamaan :

$$ad = n (ac. z)^m$$

$$E = \frac{ad}{g}$$

$n = 1.560$ (sungai dialiri air dan terjadi endapan lanau, lempung, kerikil)

$m = 0.890$ (tabel 4.20 Koefisien jenis tanah)

$z = 1$ (tabel koefisien zona gempa, KP-06 Parameter Bangunan)

$$g = 981.0 \text{ cm/det}^2$$

$ac = 160 \text{ cm/det}^2$ (tabel 17 percepatan gempa tiap periode tahun)

Maka :

$$ad = n (ac. z)^m$$

$$= 1.560 (160 \cdot 1) ^{0.890}$$

$$= 142.82 \text{ cm/det}^2$$

$$E = ad/g$$

$$= 142.82/981.0 = 0.146$$

Mencari titik pusat gempa persamaan :

$$\Sigma X = \frac{(X1 \times A1 + X2 \times A2 + X3 \times A3 + X4 \times A4)}{\Sigma A}$$

$$= \frac{37.520}{9.750} = 3.848 \text{ m}$$

$$\Sigma Y = \frac{(Y1 \times A1 + Y2 \times A2 + Y3 \times A3 + Y4 \times A4)}{\Sigma A}$$

$$= \frac{7.313}{9.750} = 0.75 \text{ m}$$

Perhitungan gaya :

$$G1 = A \times 1 \times Y_{\text{beton}} \times E$$

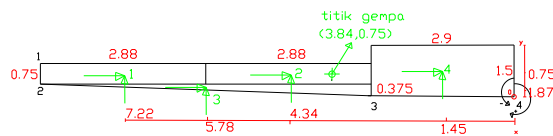
$$= 9.75 \times 1 \times 2.4 \times 0.146 = 2.555 \text{ ton}$$

Perhitungan momen :

$$MG1 = G1 \times \text{panjang lengan}$$

$$= 2.555 \times 3.71$$

$$= 9.476 \text{ ton-m}$$



Gambar 12 Tekanan gempa
 (Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

Tabel 18 Rekapitulasi gaya yang bekerja

No	Gaya yang Bekerja	Ket	Gaya		Momen	
			Vt	Hz	+	-
1	Berat sendiri	W1	5.18			37.4
		W2	5.18			22.4
		W3	2.52			14.3
		W4	10.4			15.1
2	Tekanan hidrostatik	H1		12.75	110.4	
3	Tekanan tanah aktif	P1		16.07		139.1
		P2		8.85		76.63
5	Tekanan Uplift	U1	35.0		50.8	
6	Gempa	G1		2.55	9.47	
	Jumlah		58.4	40.2	171.1	305.2

(Sumber : Pengolahan Data, 2023)

L. Rembesan dan pengelembungan (heave / blow up)

Data rembesan diperoleh dari hasil analisa pemodelan aplikasi *Geostudio Seep-w* dapat dilihat pada tabel 19.

Tabel 19 Hasil analisa dari aplikasi Geostudio Seep-W

Time (d)	Water Flux (m ³ /sec/m ²)	keterangan
0	0.00015	pangkal (a)
0	4.379	ujung (c)

(Sumber : aplikasi Geostudio Seep-W)

Untuk nilai rembesan dapat diketahui pada persamaan berikut:

$$SF \text{ rembesan} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya pendorong}}$$

Diketahui :

$$\text{Gaya penahan} = Y_{\text{tanah}} + Y_{\text{batu rip-rap}}$$

$$Y_{\text{tanah}} = 1.9 \text{ t/m}$$

$$Y_{\text{batu rip-rap}} = 2.6 \text{ t/m}$$

$$\text{Gaya pendorong} = \frac{(a+b)}{2} \times B$$

$$a = 0.00015 \text{ m}^2/\text{det}$$

$$b = 4.379 \text{ m}^2/\text{det}$$

Maka :

$$SF \text{ rembesan} = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya pendorong}}$$

$$SF = \frac{4.5}{3.83} = 1.17$$

Untuk nilai keamanan yang diisyaratkan $FS > 1$, dan perhitungan telah memenuhi maka dinyatakan AMAN.

Bendung dibangun pada tanah dengan keadaan lempung sedang, maka harus ada tinjauan terhadap resiko pengelembungan (heave / blow out).

Tinjauan terhadap pengelembungan dapat dihitung dengan persamaan :

$$FS = \frac{Y'}{i \text{ rata-rata } Y_w}$$

Diketahui :

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{3.12}{3.5} = 0.89$$

$$Y = Y_{\text{sat}} - Y_w = 2.9 - 1 = 1.9$$

Keterangan :
 ΔH = tinggi kehilangan energi
 i = gradient hidrolis
 L = panjang aliran

Maka :

$$FS = \frac{\gamma'}{i \text{ rata} - \text{rata} \gamma_w}$$

$$= \frac{0.9}{0.89} = 2.131$$

Untuk nilai keamanan yang diisyaratkan $FS > 1$, dan perhitungan telah memenuhi maka dinyatakan AMAN.

M. Daya dukung tanah

Dari tabel daya dukung tanah Terzaghi (1922), dengan $\theta = 25^\circ$ didapat nilai :

$$N_c = 25.1$$

$$N_q = 12.7$$

$$N_y = 19.7$$

Diketahui :

$$q_{ult} = 1.3 C N_c + \gamma D N_q + \gamma B N_y$$

$$\sigma = \frac{q_{ult}}{SF}$$

Keterangan :

SF = factor keamanan

q_{ult} = daya dukung ultimate

σ = tegangan efektif

Maka :

$$q_{ult} = 1.3 C N_c + \gamma D N_q + \gamma B N_y$$

$$= (1.3 \times 5 \times 25.1) + (1 \times 0.375 \times 12.7) + (1 \times 1.5 \times 19.7)$$

$$= 228.344 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma = \frac{q_{ult}}{SF} = 76.11 \text{ t/m}^2$$

Daya dukung yang diizinkan :

$$qu = \frac{W}{A} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

$$e = \frac{M}{W} (0.5 L)$$

$$W = \frac{1}{6} b h^3$$

Keterangan :

e = angka pori

W = berat gaya horizontal

M = momen –

A = luas penampang

B = lebar sungai

b = lebar ambang

Maka :

$$qu = \frac{W}{A} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

$$= \frac{37.67}{8.57} \left(1 + \frac{6 \times 19.12}{8.5} \right) = 63.72 \text{ t/m}^2$$

Kontrol keamanan daya dukung tanah :

$$qu = 63.72 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma = 65.82 \text{ t/m}^2$$

Apabila $qu < \sigma$. Maka daya dukung tanah dikatakan AMAN

N. Stabilitas terhadap geser dan guling

Bangunan parafet dikatakan aman apabila angka keamanan lebih dari 1.5 (factor keamanan yang diisyaratkan) terhadap pergeseran dan penggulingan.

Pada kontrol stabilitas guling bangunan dipengaruhi oleh nilai momen penahan yang berbanding dengan momen penggerak, sedangkan pada stabilitas geser bangunan dipengaruhi oleh gaya vertikal dan gaya horizontal.

Stabilitas terhadap guling dalam keadaan normal dapat dicek pada persamaan :

$$SF = \frac{\Sigma MT}{\Sigma MG} > 1.5$$

$$\Sigma MT = 305.2 \text{ tm}$$

$$\Sigma MG = 171.1 \text{ tm}$$

$$SF = \frac{305.2}{171.1} = 1.8$$

Apabila SF guling = 1.8 > 1.5, Maka dapat dikatakan AMAN.

Stabilitas terhadap geser dalam keadaan normal dapat dicek pada persamaan :

$$SF = \frac{f \Sigma V + CA}{\Sigma H} > 1.5$$

$$\Sigma V = 58.43 \text{ tm}$$

$$\Sigma H = 40.22 \text{ tm}$$

$$C = 5$$

$$f = 0.3$$

$$A = 8.6 \text{ m}$$

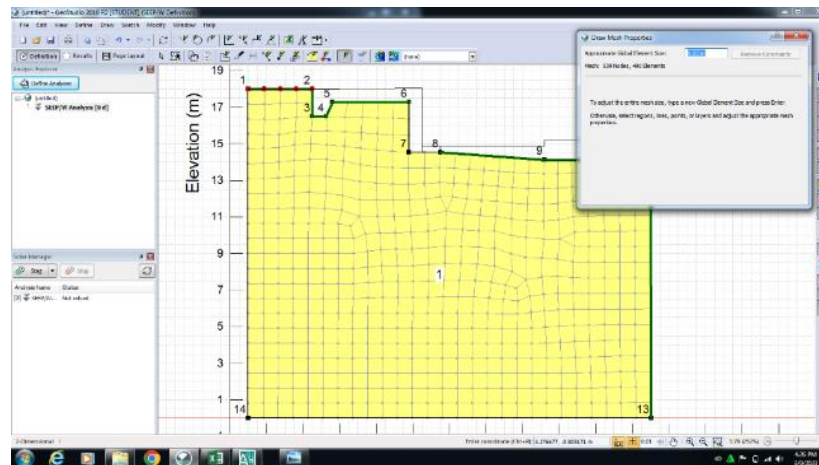
$$SF = \frac{0.3 \times 58.43 + 5 \times 8.6}{40.22} = 2$$

Apabila SF geser = 2 > 1.5, Maka dapat dikatakan AMAN.

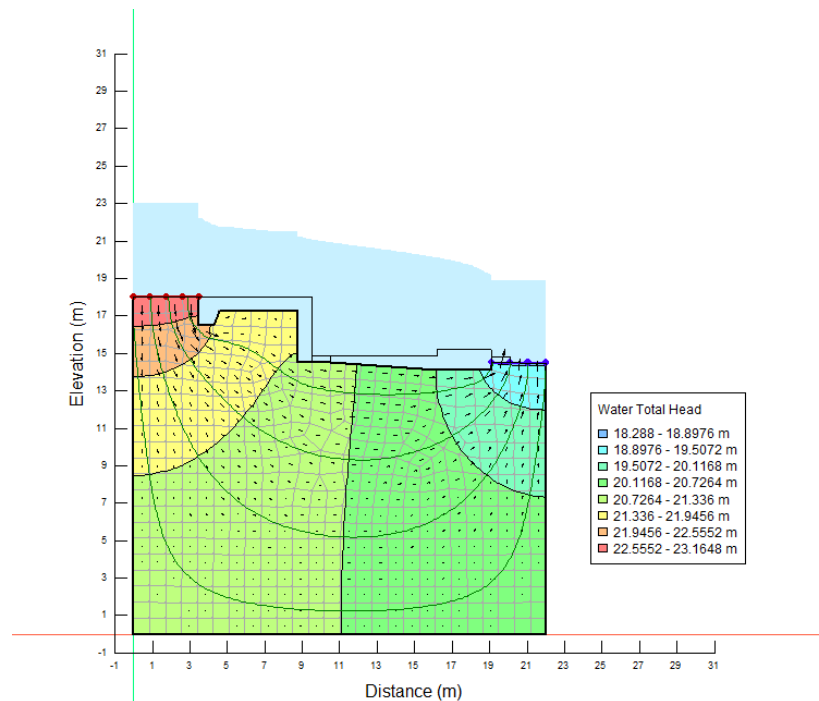
O. Pemodelan rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W*

Pemodelan rembesan menggunakan aplikasi *Geostudio Seep/W* merupakan pemodelan penampang 2D terhadap bidang yang akan dianalisis sesuai elevasi yang ada di lapangan.

Pemodelan menggunakan boundary condition type untuk upstream dengan ketinggian muka air 4.36 m, dan untuk downstream 5m. Jarak mesh analisis dibuat dengan ukuran akurasi 0.83 m. Hasil pemodelan didapatkan nilai rembesan pada tanah dengan titik yang ditinjau pada kolam peredam energi.



Gambar 13 Sub Menu Draw Mesh
(Sumber : Hasil Gambar Peneliti)



Gambar 14 Lembar Kerja
(Sumber : Hasil Gambar Peneliti)

5. Penutup

A. Kesimpulan

Dari hasil yang diperoleh melalui analisa perencanaan dan perhitungan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil perhitungan perencanaan dimensi kolam peredam energi didapatkan nilai kontrol fraude = 0.7, maka jenis kolam peredam energi yang digunakan adalah tipe MDO. Untuk dimensi kolam peredam dengan nilai parameter energi (E) = 0.17 didapatkan elevasi minimum dasar kolam = 14.50 m, panjang lantai peredam energi = 5.67 m, tinggi ambang akhir (a) = 1.5 m, dan lebar ambang akhir (b) = 2.9 m.
2. Nilai faktor keamanan konstruksi bendung gerak ditinjau dari keadaan stabilitas terhadap gaya guling, gaya geser, dan daya dukung tanah. Untuk stabilitas terhadap gaya guling pada keadaan normal didapatkan nilai $FK = 1.8 > 1.5$ (aman), dan stabilitas terhadap gaya geser pada keadaan normal didapatkan nilai $FK = 2 > 1.5$ (aman). Sedangkan stabilitas terhadap daya dukung tanah didapat nilai $q_u = 26.60 \text{ t/m}^2$, dan $\bar{\sigma} = 76.11 \text{ t/m}^2$. Apabila $q_u < \bar{\sigma}$, maka $26.60 < 76.11$. Maka daya dukung tanah dikatakan AMAN.
3. Didapatkan nilai SF rembesan dari perbandingan total gaya penahan dan gaya pendorong yaitu $SF = 1.17$ (aman), dan stabilitas terhadap penggelembungan (*heave/blow up*) didapatkan nilai $SF = 2.131$ (aman). Maka kolam peredam energi bendung gerak tidak terjadi rembesan dan penggelembungan.

B. Saran

1. Untuk pembuatan desain bendung sebaiknya menggunakan penyekat karet diantara tubuh bendung dengan kolam peredam energi agar ketika terjadi kegagalan struktur pada tubuh bendung tidak berimbas pada kolam peredam energi yang ada.
2. Material yang digunakan pada bangunan kolam peredam energi sebaiknya dibuat dengan cor beton, sebab material beton bersifat masif lebih tahan terhadap tekanan dan tarikan.
3. Sebaiknya pangkal ambang kolam olak dan sayap pada bagian hilir peredam energi diberi rip-rap batuan lepas agar air yang

mengalir dengan debit fluktuatif tidak dapat merusak bangunan yang telah direncanakan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Air, D. (2013). *Standar Perencanaan Irigasi, KP 06 Parameter Bangunan*. Jakarta.
- Brontowiyono. (2022). Pengurangan Risiko Rembesan dengan Investigasi ke Berbagai Panjang dan Posisi Dinding Potong dan Drainase Horizontal (Studi Kasus: Bendungan Sattarkhan). *Hindawi*.
- Cavaslu, M. (2023). Evaluasi Hubungan antara Perubahan Level Reservoir dan Respons Kerusakan Gempa Bendungan Lengkung Tinggi: Studi Numerik 3D Ermenek Arch Dam (220m) di turki. *Hindawi*.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah I (prinsip-prinsip geoteknis)*. Ltd, G.-s. I. (2012). *Seepage Modelling with Seep/w*. Geo-slope International Ltd.
- Mao, J.-Z. (2020). Pengaruh Fluktuasi Ketinggian Air yang Cepat terhadap Stabilitas Kemiringan Tepian Waduk Tak Jenuh. *Hindawi*.
- Pingjiang, Y. (2022). Karakteristik Deformasi dan Evaluasi Keamanan Lemparan Tanah Lanau Cofferdam Dalam Kondisi Banjir. *Hindawi*.
- Rizal, N. S. (2020). *Aplikasi Perencanaan Irigasi dan Bangunan Air*. Jember: LPPM Unmuh Jember.
- SNI 8063 : 2015 *Tata Desain Hidraulik Tubuh Bendung Tetap dengan Peredam Energi tipe MDO dan tipe MDS*. (2015). Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Younjunji, L. (2014). Solusi Anti Seepage untuk Sungai Mengxi Berdasarkan Simulasi Numerik Rembesan Tak Jenuh. *Hindawi*.
- Zang, T. S. (2018). Kajian Perilaku Konduktivitas dan Deformasi Hidraulik Jenuh Variabel Spasial dari Longsor Waduk Akumulasi Berdasarkan Survei Resonansi Magnetik Nuklir Permukaan. *Hindawi*.