

Kajian Stabilitas dan Piping pada Bendung Boreng di Kabupaten Lumajang *Stability and Piping Study on the Boreng Dam in Lumajang Regency*

Mariska Amalia Faisandra¹⁾, Nanang Saiful Rizal²⁾, Arief Alihudien³⁾

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: amaliamariska6@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: nanangsaifulrizal@unmuhjember.ac.id

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: ariefalihudien@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Bendung merupakan infrastruktur penting dalam pengelolaan sumber daya air, khususnya untuk irigasi. Stabilitas struktur menjadi aspek krusial pada tahap perencanaan dan evaluasi, karena terkait keselamatan konstruksi dan keberlanjutan fungsi. Bendung Boreng di Kabupaten Lumajang memerlukan evaluasi stabilitas akibat perubahan dimensi konstruksi yang terjadi karena keterbatasan anggaran. Penelitian ini bertujuan mengkaji keamanan struktur melalui metode eksperimen dan survei dengan analisis kualitatif serta kuantitatif. Pemeriksaan dilakukan terhadap stabilitas guling, geser, daya dukung tanah, dan risiko erosi bawah tanah (piping) menggunakan perhitungan manual, metode Bligh, dan metode Lane. Hasil perhitungan menunjukkan faktor keamanan guling sebesar 5,817 (normal gempa) dan 3,438 (banjir gempa); geser 1,793 dan 1,181; daya dukung tanah 9,270 dan 9,110. Analisis piping metode Bligh menghasilkan panjang rayapan 59,540, metode Lane memberikan creep lane 5,757 (air normal) dan 8,793 (air banjir). Hasil solusi analisis piping metode bligh diperoleh panjang rayapan 63,540, metode lane diperoleh creep lane 6,008 (air normal) dan 9,117 (air banjir). Bendung dinyatakan aman terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah, namun belum sepenuhnya aman terhadap piping. Solusi yang direkomendasikan adalah penambahan apron 4 meter di sisi hulu untuk memperpanjang lintasan rembesan dan meningkatkan keamanan piping.

Kata Kunci: Bendung Boreng; Lumajang; Piping; Stabilitas Struktur.

Abstract

Dams are important infrastructure in water resource management, particularly for irrigation. Structural stability is a crucial aspect in the planning and evaluation stages, as it relates to construction safety and functional sustainability. The Boreng Dam in Lumajang Regency requires a stability evaluation due to changes in construction dimensions that occur due to budget constraints. This study aims to assess structural safety through experimental and survey methods with qualitative and quantitative analysis. Examination was conducted on overturning stability, shear, soil bearing capacity, and underground erosion risk (piping) using manual calculations, the Bligh method, and the Lane method. The calculation results show a safety factor of overturning of 5.817 (normal earthquake) and 3.438 (earthquake flood); shear of 1.793 and 1.181; soil bearing capacity of 9.270 and 9.110. The piping analysis of the Bligh method produces a creep length of 59.540, while the Lane method gives a creep lane of 5.757 (normal water) and 8.793 (flood water). The piping analysis solution using the Bligh method obtained a creep length of 63.540 m, while the lane method obtained a creep lane of 6.008 m (normal water) and 9.117 m (flood water). The dam was declared safe against overturning, sliding, and soil bearing capacity, but not yet completely safe against piping. The recommended solution is to add a 4-meter apron on the upstream side to extend the seepage path and improve piping safety.

Keywords: Boreng Dam; Lumajang; Piping; Structural Stability.

1. PENDAHULUAN

Bendung berperan sebagai salah satu struktur penting pada sistem pengelolaan sumber daya air, khususnya untuk mendukung kebutuhan irigasi pertanian (Laputty et al., 2025). Keberadaan bendung berperan dalam mengatur debit dan tinggi muka air sungai sehingga dapat dialirkan secara efisien ke jaringan irigasi (Udin et al., 2021). Oleh karena itu, aspek stabilitas struktur bendung menjadi aspek yang sangat krusial untuk diperhatikan dalam tahap perencanaan maupun eksisting, terutama terhadap berbagai gaya yang bekerja (Iskandar, 2023).

Aspek stabilitas yang dikaji meliputi kestabilan terhadap geser, guling, daya dukung tanah, serta potensi terjadinya erosi bawah tanah (piping). Stabilitas geser dianalisis dengan membandingkan gaya tahan geser fondasi terhadap gaya geser akibat berat struktur dan tekanan hidrostatik, untuk memastikan bendung tidak bergeser (Simanjuntak et al., 2025). Stabilitas guling mengevaluasi momen penahan dari berat dan geometri bendung terhadap momen pembalik akibat tekanan air, agar pusat tekanan tetap di dalam fondasi (Firmansyah & Purwahono, 2023).

Daya dukung tanah menentukan apakah tekanan vertikal akibat beban struktur melebihi kapasitas fondasi (Ramadan et al., 2024). Erosi bawah tanah (piping) terjadi ketika aliran rembesan mengangkut partikel tanah dan membentuk saluran internal yang berpotensi meruntuhkan tubuh atau fondasi bendung (Ma et al., 2022).

Salah satu bendung yang dibangun untuk keperluan irigasi adalah Bendung Boreng yang terletak di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. Pada proses pembangunannya, terjadi perubahan dimensi struktur akibat keterbatasan anggaran. Perubahan tersebut menimbulkan kebutuhan untuk mengevaluasi ulang tingkat stabilitas struktur terhadap kondisi eksisting di lapangan. Rumusan masalah pada penelitian ini mencakup tiga pokok utama. Pertama, bagaimana stabilitas struktur Bendung Boreng yang telah terbangun. Kedua, bagaimana tingkat keamanan Bendung Boreng terhadap bahaya piping. Ketiga, bagaimana solusi yang

dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan stabilitas dan piping pada Bendung Boreng.

Penelitian ini bertujuan mengkaji keamanan struktur melalui metode eksperimen dan survei dengan analisis kualitatif serta kuantitatif. Pemeriksaan dilakukan terhadap stabilitas guling, geser, daya dukung tanah, dan risiko erosi bawah tanah (piping) menggunakan perhitungan manual, metode Bligh, dan metode Lane.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Bendung

Bendung adalah bangunan air yang dibangun melintang pada suatu sungai dengan tujuan utama untuk mengatur dan meninggikan muka air guna mengalirkan air secara gravitasi ke jaringan irigasi (Jamir et al., 2023). Fungsi utama bendung adalah memenuhi kebutuhan irigasi guna mendukung produktivitas pertanian dan ketahanan pangan, sekaligus dimanfaatkan untuk air baku, PLTA skala kecil, konservasi air, pengendalian banjir, dan menjaga ekosistem. Berdasarkan tipenya, bendung diklasifikasikan menjadi bendung tetap dan bendung gerak (Pinandito & Harsanto, 2021). Agar optimal, bendung harus mampu menahan tekanan banjir, sesuai daya dukung tanah, tahan rembesan, memiliki tinggi ambang memadai, dan desain peluap yang dapat melewati material sungai tanpa merusak struktur (Suherlan, 2021).

B. Analisis Stabilitas

Stabilitas merupakan syarat utama dalam pembangunan bendung untuk menjamin keamanan dan fungsi struktur. Kegagalan stabilitas dapat menyebabkan penurunan, kebocoran, rembesan, longsor, erosi, hingga retakan (Nainggolan, 2023). Faktor yang mempengaruhi stabilitas antara lain material bendung, zona konstruksi, kemiringan, serta beban luar seperti gelombang dan gempa. Adapun syarat stabilitas meliputi: tidak terjadi tegangan tarik pada konstruksi batu kali berlapis beton, momen penahan harus melebihi momen guling, struktur harus tetap stabil tanpa pergeseran, tegangan tanah tidak boleh melampaui batas yang diizinkan, dan seluruh

konstruksi harus tetap berada pada posisinya tanpa terangkat oleh gaya ke atas. Sehingga bendung dapat berfungsi secara aman (Darojad, 2024).

C. Gaya-Gaya Yang Bekerja pada Bangunan

Perencanaan dan konstruksi bendung harus memperhatikan gaya-gaya yang memengaruhi stabilitas dan keselamatan struktur (Iskandar, 2023). Tanpa analisis yang tepat, gaya dari berat bangunan, gempa, lumpur, air, tanah, dan tekanan ke atas dapat memicu kegagalan struktur melalui geser, guling, kegagalan daya dukung tanah, serta erosi bawah tanah (piping) (Pinandito & Harsanto, 2021). Oleh karena itu, identifikasi dan perhitungan gaya-gaya tersebut menjadi langkah penting dalam memastikan bendung berfungsi aman sepanjang umur layanannya.

D. Gaya Akibat Berat Bangunan

Gaya berat bangunan bekerja vertikal melalui titik berat konstruksi dan membantu menahan tekanan air serta gempa. Perhitungannya dilakukan dengan membagi bendung menjadi segmen (pias) sederhana seperti persegi panjang, segitiga, atau trapesium, untuk menjumlahkan berat dan menentukan titik berat total (Iskandar, 2023). Gaya berat diperoleh dengan mengalikan volume segmen bendung dengan berat jenis bahan penyusunnya, sementara momen berat diperoleh dari hasil perkalian antara gaya berat dan lengan momen. Distribusi dan besarnya gaya berat sangat memengaruhi stabilitas struktur, terutama terhadap risiko guling dan geser (Pinandito & Harsanto, 2021). Perhitungan berat bendung dengan rumus:

$$G = F \times \gamma \quad (1)$$

keterangan:

G = berat tubuh bendung (ton)

F = luas bidang (m²)

γ = berat jenis material (ton/m³)

E. Gaya Akibat Gempa

Perhitungan gaya gempa dilakukan untuk memastikan bendung tetap aman saat terjadi gempa, dengan mempertimbangkan faktor lokasi geografis, kondisi tanah, dan desain

struktur. Proses ini mengacu pada peta zonasi gempa Indonesia yang menggambarkan tingkat risiko gempa di setiap wilayah (Kementerian PU, 2013). Gaya gempa dihitung horizontal melalui titik berat konstruksi, diperoleh dari hasil perkalian koefisien gempa dengan berat bendung, lalu digunakan untuk menghitung momen gempa (Pinandito & Harsanto, 2021). Untuk mendukung perhitungan dan desain struktur terhadap gempa, beberapa standar teknis yang digunakan antara lain SNI 03-1726-2002 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk bangunan gedung, serta standar terkait bendung urugan seperti RSNI M-02-2002, RSNI M-03-2002, dan RSNI T-01-2002.

Koefisien gempa dihitung berdasarkan parameter percepatan gempa rencana dengan rumus:

$$a_d = n (a_c \times z) m \quad (2)$$

$$E = \frac{a_d}{g} \quad (3)$$

keterangan:

a_d = percepatan gempa rencana (m/s²)

n, m = koefisien untuk jenis tanah (Tabel 1)

a_c = percepatan kejut dasar (m/s²) (Tabel 2)

E = koefisien gempa

g = percepatan gravitasi (m/s²)

z = faktor yang bergantung kepada letak geografis (Peta gempa Indonesia)

Tabel 1. Koefisien Zona Gempa

Zona	Koefisien Zona Z
A	0,10 - 0,30
B	0,30 - 0,60
C	0,60 - 0,90
D	0,90 - 1,20
E	1,20 - 1,40
F	1,40 - 1,60

[Sumber : SDA KP-02 Bangunan Utama, 2013]

Tabel 2. Periode Ulang dan Percepatan Dasar Gempa (a_c)

Periode Ulang (Tahun)	a_c (gal = cm/s ²)
10	90
20	120
50	
100	190
200	220
500	250
1000	280
5000	330

[Sumber : SDA KP-02 Bangunan Utama, 2013]

F. Gaya Akibat Tekanan Lumpur

Gaya tekan lumpur muncul dari endapan lumpur hasil erosi sungai atau sedimen dari hulu seperti lereng gunung (Pinandito & Harsanto, 2021). Endapan lumpur di hulu bendung menimbulkan tekanan horizontal dan vertikal yang berpotensi mendorong atau menggeser tubuh bendung (Suherlan, 2021). Perhitungan teknis, tinggi lumpur diasumsikan setinggi mercu bendung untuk memastikan perhitungan berada dalam kondisi paling kritis (Rizal, 2019). Tekanan lumpur dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Sh = 1/2 \cdot Ka \cdot \gamma' \cdot h^2 \quad (4)$$

$$Sv = 1/2 \cdot \gamma' \cdot h \cdot b \quad (5)$$

$$Ka = \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right) \quad (6)$$

keterangan:

Sh = gaya tekanan lumpur horizontal (ton/m²)

Sv = gaya tekanan lumpur vertikal (ton/m²)

Ka = koefisien tekanan tanah aktif

γ' = berat volume tanah efektif (ton/m³)

h = tinggi lumpur (m)

b = lebar permukaan lumpur (m)

G. Gaya Akibat Tekanan Air

Gaya tekan air terbagi menjadi dua jenis, yaitu gaya hidrostatik dan gaya hidrodinamik (Mariano Jinotra et al., 2021). Kedua jenis tekanan ini harus dianalisis untuk dua kondisi yang berbeda, yakni saat debit air normal dan saat terjadi banjir, karena karakteristik dan besar tekanannya akan berbeda pada setiap kondisi tersebut (Rizal, 2019).

- Tekanan air statis digunakan persamaan berikut :

$$P_{wh} = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot h^2 \quad (7)$$

$$P_{wv} = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot h \cdot b \quad (8)$$

keterangan:

P_{wh} = gaya tekanan air horizontal (ton)

P_{wv} = gaya tekanan air vertikal (ton)

γ_w = berat jenis air (ton/m³)

h = tinggi air (m)

b = lebar permukaan air (m)

- Persamaan tekanan air dinamis sebagai berikut :

$$Pd = 7/12 \cdot \gamma_w \cdot K_h \cdot H^2 \cdot (1 - Z^{1.5}) \quad (9)$$

keterangan :

Pd = gaya tekanan air dinamis (ton)

γ_w = berat jenis air (ton/m³)

H = tinggi air di atas crest (m)

K_h = Koefisien gempa

Z = H_d / H

H. Gaya Akibat Tekanan Tanah

Gaya yang ditimbulkan oleh tekanan tanah meliputi tekanan aktif ketika tanah bergerak menjauhi struktur dan tekanan pasif saat tanah terdorong ke arah struktur. (Firmansyah & Purwahono, 2023). Besarnya gaya akibat tekanan tanah:

$$Pa = 1/2 \cdot Ka \cdot \gamma' \cdot h^2 \quad (10)$$

$$Pp = -1/2 \cdot Kp \cdot \gamma' \cdot h^2 \quad (11)$$

$$Ka = \tan^2(45 - \phi/2) \quad (12)$$

$$Kp = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (13)$$

keterangan:

Pa = tekanan tanah aktif (ton)

Pp = tekanan tanah pasif (ton)

Ka = koefisien tekanan tanah aktif

Kp = koefisien tekanan tanah pasif

h = tinggi tanah yang menekan pondasi (m)

ϕ = sudut geser dalam (°)

I. Gaya Akibat Tekanan ke Atas

Gaya tekanan ke atas bekerja di bawah bendung akibat rembesan air yang berusaha mengangkat konstruksi dari fondasinya (Sitinjak, 2023). Gaya angkat pada suatu titik di sepanjang dasar bendung dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

$$P_x = H_x - (L_x/L) \cdot \Delta H \quad (14)$$

keterangan:

P_x = gaya angkat pada x (ton/m²)

L = panjang total bidang kontak (m)

L_x = jarak bidang kontak dari hulu ke x (m)

ΔH = beda tinggi energi (m)

H_x = tinggi energi di hulu bendung (m)

J. Stabilitas Terhadap Guling

Stabilitas guling tercapai bila resultan seluruh gaya pada bidang horizontal, termasuk gaya angkat, harus memotong area teras tanpa menimbulkan gaya tarik pada bidang irisan manapun (Alviano et al., 2024). Tegangan yang terjadi pada struktur bangunan maupun pondasi harus dijaga agar tidak melebihi batas maksimum yang direkomendasikan. Dalam analisis stabilitas, setiap bagian struktur diasumsikan bekerja secara independen, sehingga distribusi gaya melalui momen lentur

(bending moment) tidak diperhitungkan (Iskandar, 2023).

K. Stabilitas Terhadap Geser

Sudut antara garis vertikal dan resultan total gaya, termasuk gaya angkat pada bendung di seluruh bidang horizontal, harus lebih kecil dari koefisien gesekan maksimum yang diperbolehkan pada bidang tersebut (Nisa et al., 2023).

Tabel 3. Harga-Harga Perkiraan untuk Koefisien Gesekan

Bahan	f
Pasangan batu pada pasangan batu	0,60 – 0,75
Batu keras berkualitas baik	0,75
Kerikil	0,5
Pasir	0,4
Lempung	0,3

[Sumber : SDA KP-02 Bangunan Utama, 2013]

L. Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

Besarnya daya dukung tanah yang diijinkan dihitung dengan rumus Terzaghi (Supriyanto, 2022):

$$q_u = \alpha \times C \times N_c + \gamma \text{ tanah} \times D \times N_q + \gamma \text{ tanah} \times \beta \times B \times N_\gamma \quad (15)$$

keterangan:

q_u = daya dukung tanah (ton/m²)

C = kohesi tanah (ton/m²)

D = dalamnya pondasi (m)

B = lebar dasar pondasi (m)

N_c, N_q, N_γ = faktor bentuk tergantung dari ϕ

γ_{sub} = berat volume tanah efektif (ton/m³)

M. Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Tanah (Piping)

Bendung perlu diperiksa kestabilannya terhadap erosi bawah tanah (piping) dan kemungkinan keruntuhan akibat naiknya dasar galian (heave) atau munculnya rekahan pada pangkal hilir bangunan (Simanjuntak et al., 2025). Risiko piping dapat menyebabkan aliran rembesan membawa partikel tanah dari bawah struktur, sehingga menimbulkan rongga dan melemahkan fondasi (Rachmanto et al., 2024). Potensi rembesan dideteksi melalui analisis *flownet* maupun metode empiris Metode Bligh dan Metode Lane. Metode Bligh atau teori

rayapan, digunakan dalam perencanaan bangunan hidrolik di atas tanah berpermeabilitas tinggi untuk mencegah kegagalan akibat piping. Teori ini menjelaskan bahwa besarnya perbedaan tekanan air berbanding lurus dengan panjang lintasan rembesan (*creep line*).

$$L = \Delta h \cdot C \quad (16)$$

keterangan:

Δh = perbedaan tekanan (m)

L = panjang creep line (m)

C = creep ratio

Metode Lane merupakan pengembangan dari Teori Bligh yang digunakan untuk mengevaluasi risiko piping pada bangunan hidrolik di atas tanah berpermeabilitas. Berbeda dengan Bligh, Lane mengasumsikan lintasan vertikal tiga kali lebih efektif daripada lintasan horizontal dalam mengurangi tekanan rembesan (rasio 3:1) (Waluyo, 2025). Metode Lane dikenal sebagai metode angka rembesan Lane merupakan pendekatan yang dianjurkan untuk memeriksa bangunan guna mendeteksi piping (Kementerian PU, 2013).

$$CL = \frac{\sum L_v + 1/3 \sum L_h}{H} \quad (17)$$

keterangan:

CL = angka rembesan Lane

$\sum L_v$ = jumlah panjang vertikal (m)

$\sum L_h$ = jumlah panjang horizontal (m)

H = beda tinggi muka air (m)

3. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Jl. Juanda, Kelurahan Rogotrunan, Kecamatan Lumajang, Kabupaten Lumajang, tepatnya di Bendung Boreng.

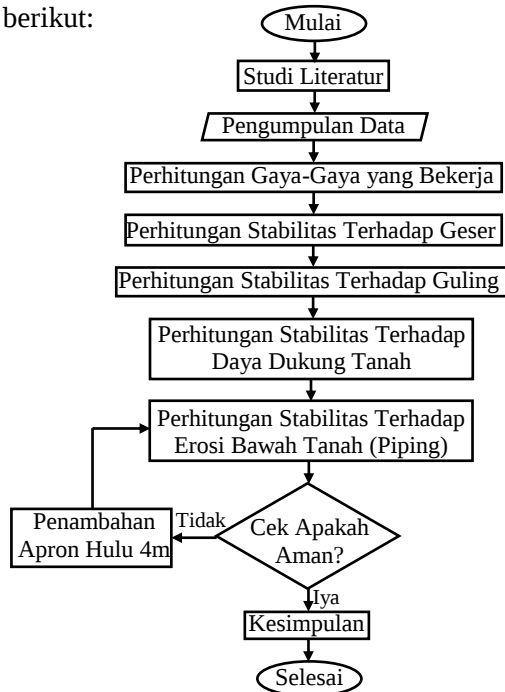


Gambar 1. Lokasi Penelitian.

[Sumber: Google Earth Pro, 2025]

B. Flow Chart

Alur penelitian yang akan dilakukan dari awal hingga akhir secara garis besar sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian
[Sumber: Hasil Penelitian, 2025]

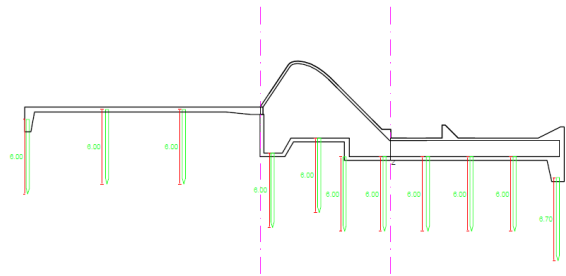
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Gaya-Gaya yang Bekerja pada Bendung

Peninjauan stabilitas bendung difokuskan pada bagian tubuh bendung yang dianggap paling kritis atau terlemah terhadap gaya yang bekerja, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Bagian tersebut menjadi fokus utama evaluasi untuk memastikan bahwa struktur bendung memiliki kapasitas yang cukup dalam menahan beban baik dari air, tanah, maupun beban dinamis lainnya. Penyederhanaan perhitungan melalui asumsi berikut:

- Peninjauan potongan vertikal dilakukan pada bagian yang paling lemah, dalam perencanaan bendung ini berada di titik A-A.
- Titik guling yang dianalisis pada potongan vertikal adalah titik Z.
- Bagian depan bendung diasumsikan terisi penuh lumpur setinggi mercu.

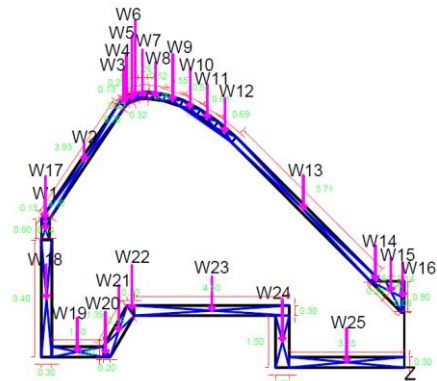
- Perhitungan harus mempertimbangkan setidaknya dua kondisi.



Gambar 3. Potongan Bendung yang Terlemah.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

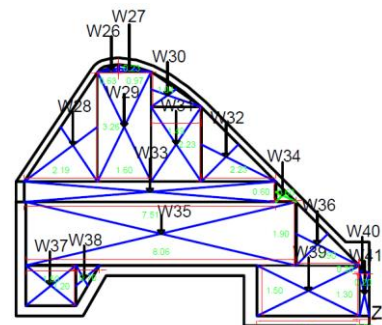
B. Gaya Akibat Berat Bangunan dan Gaya Akibat Gempa

Gambar 4 memperlihatkan gaya yang dihasilkan dari berat sendiri material beton bertulang mutu K300, yang memiliki berat jenis sebesar 2,4 ton/m³.



Gambar 4. Gaya Akibat Berat Sendiri Material Beton K300.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Gambar 5 menampilkan gaya akibat berat sendiri material beton siklop dengan berat jenis 2,2 ton/m³.



Gambar 5. Gaya Akibat Berat Sendiri Material Pasangan Batu.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Berdasarkan perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 4, momen total akibat berat sendiri struktur tercatat sebesar 693,505 ton.m. Selain itu, dari tabel yang sama diperoleh nilai momen akibat beban gempa sebesar 44,619 ton.m. Informasi ini menjadi acuan penting dalam analisis stabilitas, mengingat gaya-gaya tersebut berperan langsung terhadap keseimbangan dan keamanan struktur bendung.

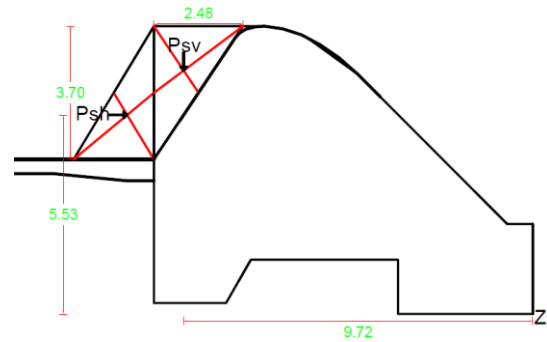
Tabel 4. Hasil Perhitungan Momen Berat Sendiri dan Momen Gempa

Bagian	Berat bagian (ton)	Jarak titik berat terhadap potongan (m)		Momen Berat Sendiri (ton.m)		Koefisien gempa	Momen Gempa (ton.m)
	(L x y)	Z (X)	Z (Y)	Mx = G . X	Mh = G . Y		Mk = w . Y
W1	0,031	10,43	4,34	0,325	0,135	0,109	0,015
W2	1,886	9,29	5,99	17,525	11,300	0,109	1,232
W3	0,144	8,15	7,67	1,174	1,104	0,109	0,120
W4	0,060	8,07	7,78	0,484	0,467	0,109	0,051
W5	0,084	7,91	7,78	0,668	0,657	0,109	0,072
W6	0,062	7,81	7,88	0,487	0,492	0,109	0,054
W7	0,125	7,60	7,89	0,948	0,985	0,109	0,107
W8	0,250	7,22	7,86	1,802	1,962	0,109	0,214
W9	0,264	6,72	7,75	1,774	2,046	0,109	0,223
W10	0,278	6,22	7,53	1,732	2,096	0,109	0,229
W11	0,302	5,72	7,23	1,730	2,186	0,109	0,238
W12	0,331	5,21	6,83	1,726	2,262	0,109	0,247
W13	2,741	2,93	4,59	8,031	12,580	0,109	1,371
W14	0,047	0,84	2,55	0,040	0,120	0,109	0,013
W15	0,975	0,39	2,20	0,380	2,146	0,109	0,234
W16	0,173	0,04	2,05	0,007	0,354	0,109	0,039
W17	0,346	10,42	4,00	3,601	1,382	0,109	0,151
W18	2,448	10,39	2,00	25,435	4,896	0,109	0,534
W19	1,080	9,49	0,45	10,249	0,486	0,109	0,053
W20	0,072	8,67	0,40	0,624	0,029	0,109	0,003
W21	1,201	8,29	1,05	9,956	1,261	0,109	0,137
W22	0,072	7,91	1,70	0,570	0,122	0,109	0,013
W23	3,240	5,59	1,65	18,112	5,346	0,109	0,583
W24	1,404	3,54	0,75	4,970	1,053	0,109	0,115
W25	2,412	1,67	0,15	4,028	0,362	0,109	0,039
W26	0,159	7,69	7,64	1,226	1,218	0,109	0,133
W27	0,245	7,16	7,65	1,757	1,877	0,109	0,205
W28	7,853	8,84	5,39	69,424	42,330	0,109	4,614
W29	11,475	7,31	5,94	83,884	68,163	0,109	7,430
W30	1,705	6,01	6,88	10,244	11,727	0,109	1,278
W31	7,310	5,76	5,42	42,105	39,620	0,109	4,319
W32	5,470	4,27	5,04	23,358	27,570	0,109	3,005
W33	9,913	6,54	4,00	64,832	39,653	0,109	4,322
W34	0,396	2,58	3,90	1,022	1,544	0,109	0,168
W35	33,691	6,21	2,75	209,220	92,650	0,109	10,099
W36	3,971	1,55	2,43	6,155	9,650	0,109	1,052
W37	3,960	9,49	1,20	37,580	4,752	0,109	0,518
W38	0,924	8,51	1,40	7,863	1,294	0,109	0,141
W39	10,131	1,81	1,05	18,337	10,638	0,109	1,159
W40	0,044	0,21	1,67	0,009	0,073	0,109	0,008
W41	0,801	0,14	0,95	0,112	0,761	0,109	0,083
	118,078	-	-	693,505	409,348		44,619

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

C. Gaya Akibat Tekanan Lumpur

Gambar 6 memperlihatkan tekanan lumpur yang diperhitungkan setinggi mercu.



Gambar 6. Gaya Akibat Tekanan Lumpur.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Pada Tabel 5 menunjukkan momen akibat tekanan lumpur horizontal (Psh) sebesar 12,614 ton.m dan vertikal (Psv) sebesar 44,595 ton.m.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Tekanan Lumpur

Gaya	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Moment (ton.m)
Psh	$= \frac{\gamma_{\text{lumpur}} \cdot h^2}{2} \left(\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right)$ $= \frac{1 \cdot 3,7^2}{2} \left(\frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30} \right)$ $= 2,281$	5,53	12,614
Psv	$= \frac{1}{2} \times \gamma_{\text{lumpur}} \times h \times b$ $= \frac{1}{2} \times 1 \times 3,7 \times 2,48$ $= 4,588$	9,72	44,595

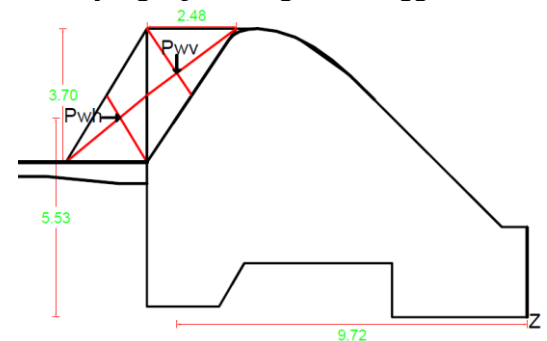
[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

D. Gaya Akibat Tekanan Air

Gaya yang timbul akibat tekanan air dihitung untuk dua kondisi, yaitu saat air normal dan saat banjir.

- Keadaan air normal

Gambar 7 menunjukkan tekanan air normal yang diperhitungkan setinggi mercu.



Gambar 7. Gaya Akibat Tekanan Air Kondisi Air Normal.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Pada Tabel 6 menunjukkan momen akibat tekanan air normal horizontal (Pwh) sebesar 37,853 ton.m, sedangkan momen vertikal (Pwv) sebesar 44,595 ton.m.

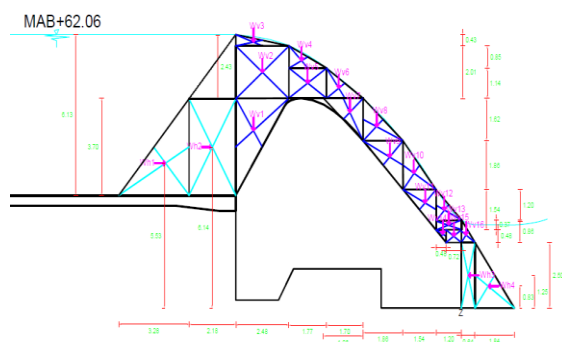
Tabel 6. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Tekanan Air Kondisi Air Normal

Gaya	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Pwh	$= \frac{1}{2} \times yw \times h^2$ $= \frac{1}{2} \times 1 \times 3,7^2$ $= 6,845$	5,53	37,853
Pwv	$= \frac{1}{2} \times yw \times h \times b$ $= \frac{1}{2} \times 1 \times 3,7 \times 2,48$ $= 4,588$	9,72	44,595

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

- Keadaan air banjir

Gambar 8 memperlihatkan distribusi tekanan air banjir pada elevasi muka air 62,06 m.



Gambar 8. Gaya Akibat Tekanan Air Kondisi Air Banjir.

[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Pada Tabel 7, momen horizontal akibat tekanan air banjir mencapai 79,172 ton.m, yang menunjukkan besarnya pengaruh gaya dorong horizontal terhadap kestabilan bendung dan kemampuan struktur menahan beban tersebut.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Tekanan Air Kondisi Air Banjir Secara Horizontal

Gaya	Besar gaya (γ air x b x h)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Wh1	$1 \times 0,5 \times 3,28 \times 3,7 = 6,068$	5,53	33,556
Wh2	$1 \times 2,18 \times 3,7 = 8,066$	6,14	49,525
Wh3	$1 \times -0,64 \times 2,5 = -1,600$	1,25	-2,000
Wh4	$1 \times -0,5 \times 1,84 \times 2,5 = -2,300$	0,83	-1,909
$\Sigma Wh = 10,234$			$\Sigma MWh = 79,172$

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Pada Tabel 8, momen vertikal akibat tekanan air banjir mencapai 147,881 ton.m, yang menunjukkan besarnya pengaruh gaya dorong vertikal terhadap kestabilan bendung dan kemampuan struktur menahan beban tersebut.

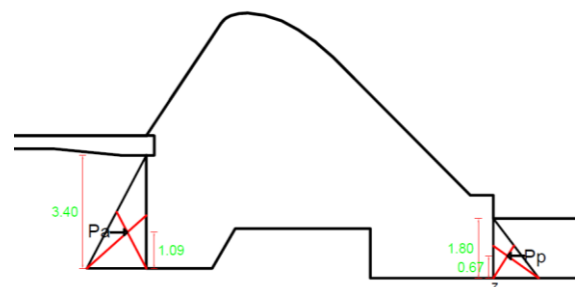
Tabel 8. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Tekanan Air Kondisi Air Banjir Secara Vertikal

Gaya	Besar gaya (γ air x b x h)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Wv1	$1 \times 0,5 \times 2,48 \times 3,7 = 4,588$	9,75	44,733
Wv2	$1 \times 2,48 \times 2,01 = 4,985$	9,30	46,359
Wv3	$1 \times 0,5 \times 2,48 \times 0,43 = 0,533$	9,72	5,183
Wv4	$1 \times 0,5 \times 1,77 \times 0,85 = 0,752$	7,47	5,619
Wv5	$1 \times 1,77 \times 1,14 = 2,018$	7,18	14,488
Wv6	$1 \times 0,5 \times 1,7 \times 1,14 = 0,969$	5,74	5,562
Wv7	$1 \times 0,5 \times 1,86 \times 1,62 = 1,507$	5,23	7,880
Wv8	$1 \times 0,5 \times 1,86 \times 1,62 = 1,507$	3,99	6,011
Wv9	$1 \times 0,5 \times 1,86 \times 1,86 = 1,730$	3,36	5,812
Wv10	$1 \times 0,5 \times 1,54 \times 1,86 = 1,432$	2,23	3,194
Wv11	$1 \times 0,5 \times 1,54 \times 1,54 = 1,186$	1,71	2,028
Wv12	$1 \times 0,5 \times 1,2 \times 1,2 = 0,720$	0,81	0,583
Wv13	$1 \times 1,2 \times 0,37 = 0,444$	0,6	0,266
Wv14	$1 \times 0,5 \times 0,48 \times 0,48 = 0,115$	0,87	0,100
Wv15	$1 \times 0,72 \times 0,48 = 0,346$	0,35	0,121
Wv16	$1 \times 0,5 \times 0,64 \times 0,86 = 0,275$	-0,21	-0,058
$\Sigma Wv = 23,106$			$\Sigma MWv = 147,881$

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

E. Gaya Akibat Tekanan Tanah

Gambar 9 memperlihatkan tekanan tanah pasif (Pa) dan tekanan tanah pasif (Pp).



Gambar 9. Gaya Akibat Tekanan Tanah.

[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Data:

Sudut geser dalam = 30° (Pasir lepas)

h1 = 3,4 m (dari Gambar 9)

h2 = 1,8 m (dari Gambar 9)

$\gamma_w = 1 \text{ ton/m}^3$

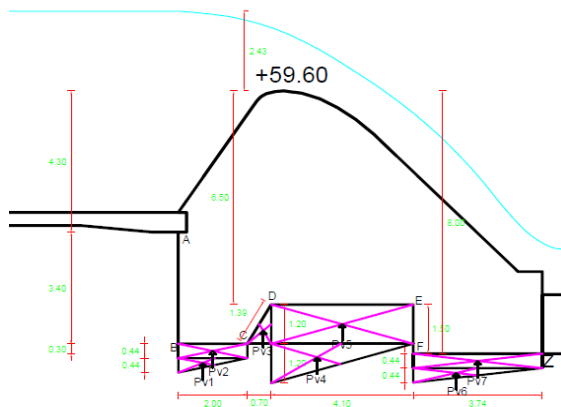
$\gamma_{dry} = 1,725 \text{ ton/m}^3$

$\gamma_{sat} = 1,825 \text{ ton/m}^3$

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{sub}} &= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \\ &= 1,825 - 1 = 0,825 \text{ ton/m}^3 \\ K_a &= \tan^2(45 - \phi/2) \\ &= \tan^2(45 - 30/2) = 0,3 \\ K_p &= \tan^2(45 + \phi/2) \\ &= \tan^2(45 + 30/2) = 3 \\ P_a &= \frac{1}{2} \times K_a \times \gamma_{\text{sub}} \times h_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0,3 \times 0,825 \times 3,4^2 = 1,430 \text{ ton} \\ P_p &= -\frac{1}{2} \times K_p \times \gamma_{\text{sub}} \times h_2^2 \\ &= -\frac{1}{2} \times 3 \times 0,825 \times 1,8^2 = -4,009 \text{ ton} \end{aligned}$$

F. Gaya Akibat Tekanan ke Atas

Gambar 10 memperlihatkan gaya angkat (uplift pressure) pada bendung saat kondisi air banjir, sedangkan untuk kondisi air normal diperhitungkan setinggi mercu.



Gambar 10. Gaya Akibat Tekanan ke Atas.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

• Kondisi Air Normal

Tabel 9 menyajikan perhitungan tekanan uplift tiap titik pada kondisi air normal.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Besar Tekanan Tiap Titik Kondisi Air Normal

Titik	Tinggi titik (Hx) (m)	Panjang bidang kontak (Lx) (m)	Panjang total bidang kontak (ΣL) (m)	Perbedaan tekanan (ΔH) (m)	Uplift pressure (Px) (ton)
A	4,3	0			4,300
B	7,7	3,4			6,583
C	7,7	5,4			5,926
D	6,5	6,79	16,13	5,3	4,269
E	6,5	10,89			2,922
F	8	12,39			3,929
Z	8	16,13			2,700

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Pada Tabel 10 diperoleh hasil momen uplift pada kondisi air normal sebesar -236,138 ton.m. Hasil ini menunjukkan

besarnya pengaruh uplift pressure terhadap kestabilan bendung pada kondisi tersebut.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Uplift Pressure Kondisi Air Normal

Gaya	Besar gaya Px = F.γ air (ton)	Jarak (Y) (m)	Momen (ton.m)
Pv1	-0,5 x 0,657 x 2 x 1 = -0,657	9,82	-6,453
Pv2	-5,926 x 2 x 1 = -11,851	9,54	-113,062
Pv3	-0,5 x 1,657 x 0,7 x 1 = -0,580	8,07	-4,679
Pv4	-0,5 x 1,347 x 4,1 x 1 = -2,762	6,51	-17,979
Pv5	-2,922 x 4,1 x 1 = -11,979	5,79	-69,360
Pv6	-0,5 x 1,229 x 3,74 x 1 = -2,298	2,49	-5,722
Pv7	-2,700 x 3,7 x 1 = -10,098	1,87	-18,883
ΣPv = -40,225		ΣMv = -236,138	

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

• Kondisi Air Banjir

Tabel 11 menampilkan perhitungan tekanan uplift tiap titik pada kondisi air banjir.

Tabel 11. Hasil Perhitungan Besar Tekanan Tiap Titik Kondisi Air Banjir

Titik	Tinggi titik (Hx) (m)	Panjang bidang kontak (Lx) (m)	Panjang total bidang kontak (ΣL) (m)	Perbedaan tekanan (ΔH) (m)	Uplift pressure (Px) (ton)
A	6,73	0			6,730
B	10,13	3,4			9,399
C	10,13	5,4			8,968
D	8,93	6,79	16,13	3,47	7,469
E	8,93	10,89			6,587
F	10,43	12,39			7,765
Z	10,43	16,13			6,960

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Pada Tabel 12 diperoleh hasil momen uplift pada kondisi air banjir sebesar -400,144 ton.m. Hasil ini menunjukkan besarnya pengaruh uplift pressure terhadap kestabilan bendung pada kondisi tersebut.

Tabel 12. Hasil Perhitungan Gaya Akibat Uplift Pressure Kondisi Air Banjir

Gaya	Besar gaya Px = F.γ air (ton)	Jarak (Y) (m)	Momen (ton.m)
Pv1	-0,5 x 0,430 x 2 x 1 = -0,430	9,82	-4,225
Pv2	-8,968 x 2 x 1 = -17,937	9,54	-171,115
Pv3	-0,5 x 1,499 x 0,7 x 1 = -0,525	8,07	-4,234
Pv4	-0,5 x 0,882 x 4,1 x 1 = -1,808	6,51	-11,771
Pv5	-6,587 x 4,1 x 1 = -27,008	5,79	-156,375
Pv6	-0,5 x 0,805 x 3,74 x 1 = -1,505	2,49	-3,746
Pv7	-6,960 x 3,7 x 1 = -26,030	1,87	-48,677
ΣPv = -75,242		ΣMv = -400,144	

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

G. Rekapitulasi Gaya-Gaya yang Bekerja

Pada Tabel 13 menunjukkan jumlah total gaya horizontal yang bekerja saat kondisi air normal (ΣH) tercatat 19,418 ton dengan momen guling (ΣM_g) 93,959 ton.m.

Tabel 13. Rekapitulasi Gaya-Gaya Horizontal Kondisi Air Normal

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Gempa	12,871	3,467	44,619
Lumpur (Psh)	2,281	5,530	12,614
Air (Pwh)	6,845	5,530	37,853
Tanah Aktif	1,430	1,090	1,559
Tanah Pasif	-4,009	0,670	-2,686
Jumlah	19,418	-	93,959

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Tabel 14 menunjukkan total gaya vertikal yang bekerja pada kondisi air normal (ΣV) 87,029 ton dan momen tahan (ΣM_t) 546,557 ton.m.

Tabel 14. Rekapitulasi Gaya-Gaya Vertikal Kondisi Air Normal

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Berat Bendung	118,078	5,873	693,505
Lumpur (Psv)	4,588	9,720	44,595
Air (Pwv)	4,588	9,720	44,595
Uplift	-40,225	5,870	-236,138
Jumlah	87,029	-	546,557

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Pada Tabel 15 menunjukkan total gaya horizontal yang bekerja pada kondisi air banjir (ΣH) sebesar 23,898 ton dan momen guling (ΣM_g) 141,313 ton.m.

Tabel 15. Rekapitulasi Gaya-Gaya Horizontal Kondisi Air Banjir

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Gempa	12,871	3,467	44,619
Lumpur (Psh)	2,281	5,530	12,614
Air (Wh)	10,234	7,736	79,172
Air Dinamis (Pd)	1,091	5,530	6,035
Tanah Aktif	1,430	1,090	1,559
Tanah Pasif	-4,009	0,670	-2,686
Jumlah	23,898	-	141,313

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Tabel 16 menunjukkan total gaya vertikal yang bekerja pada kondisi air banjir (ΣV) 70,530 ton dan momen tahan (ΣM_t) 485,838 ton.m.

Tabel 16. Rekapitulasi Gaya-Gaya Vertikal Keadaan Air Banjir

Gaya yang bekerja	Besar gaya (ton)	Jarak (m)	Momen (ton.m)
Berat Bendung	118,078	5,873	693,505
Lumpur (Psv)	4,588	9,720	44,595
Air (Wv)	23,106	6,400	147,881
Uplift	-75,242	5,318	-400,1438
Jumlah	70,530	-	485,838

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

H. Stabilitas Terhadap Guling

Berdasarkan analisis stabilitas terhadap guling pada Tabel 17, bendung dinyatakan aman baik pada kondisi air normal saat gempa maupun air banjir saat gempa. Keamanan ini dibuktikan dengan nilai faktor keamanan yang melebihi batas minimum yang disyaratkan, sehingga struktur memenuhi kriteria stabilitas yang berlaku.

Tabel 17. Hasil Analisa Stabilitas Terhadap Guling

Kondisi Analisa	ΣM_t (ton)	ΣM_g (ton)	SF Analisa	SF Syarat	Keterangan
Normal Gempa	546,557	93,959	5,817	1,3	Aman
Banjir Gempa	485,838	141,313	3,438	1,1	Aman

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

I. Stabilitas Terhadap Geser

Berdasarkan analisis stabilitas terhadap geser pada Tabel 18, bendung dinyatakan aman baik pada kondisi air normal saat gempa maupun air banjir saat gempa. Keamanan ini dibuktikan oleh nilai faktor keamanan yang melebihi batas minimum yang disyaratkan, sehingga struktur memenuhi kriteria stabilitas yang berlaku.

Koefisien gesekan = 0,4 (Pasir)

Tabel 18. Hasil Analisa Stabilitas Terhadap Geser

Kondisi Analisa	ΣV (ton)	ΣH (ton)	f	SF Analisa	SF Syarat	Keterangan
Normal Gempa	87,029	19,418	0,4	1,793	1,3	Aman
Banjir Gempa	70,530	23,898	0,4	1,181	1,1	Aman

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

J. Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

$$q_u = \alpha \times C \times N_c + \gamma \text{ tanah} \times D \times N_q + \gamma \text{ tanah} \times \beta \times B \times N_\gamma$$

Data:

C = 0 ton/m² (Pasir lepas)

D = 4,3 m

B = 10,54 m

L = 51,03 m

Ø = 30° (Pasir Lepas)

Faktor bentuk tergantung dari Ø

N_c = 37,2

N_q = 22,5

N_γ = 18,7

γ tanah = 1 ton/m³

α = 1 + (0,3 x B / L)

= 1 + (0,3 x 10,54 / 51,03) = 1,062

β = 0,5 - 0,1 x B / L

= 0,5 - 0,1 x 10,54 / 51,03 = 0,48

qu = α x C x N_c + γ tanah x D x N_q + γ tanah x β x B x N_γ

= (1,062 x 0 x 37,2) + (1 x 4,3 x 22,5) + (1 x 0,48 x 10,54 x 18,7)

= 191,357 ton/m²

Faktor keamanan (Fs) = 3 (pondasi dangkal pada SNI 8460:2017)

σ_t = qu / fs

= 191,357 / 3

= 63,785 ton/m²

Tegangan yang diijinkan σ_t adalah 63,785 t/m². Berdasarkan analisis stabilitas daya dukung tanah pada Tabel 19, bendung dinyatakan aman baik pada kondisi air normal maupun banjir saat gempa. Hal ini dibuktikan dengan tegangan tanah fondasi yang berada di bawah tegangan izin, sehingga beban tetap dalam batas kemampuan daya dukung tanpa risiko keruntuhan atau penurunan berlebihan. Dengan demikian, bendung memenuhi kriteria stabilitas dan dapat beroperasi aman pada berbagai kondisi pembebanan.

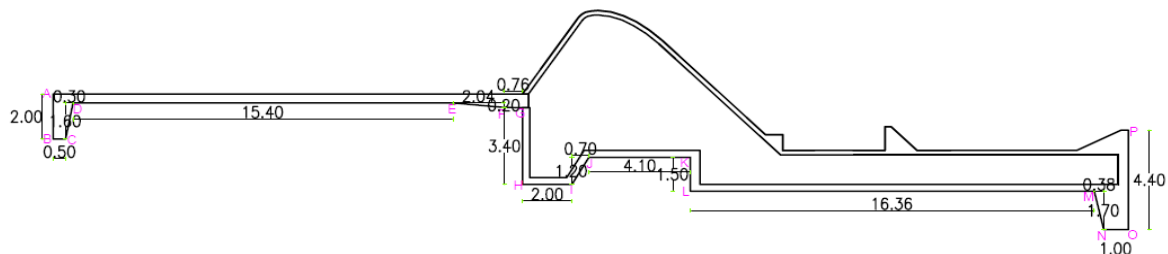
Tabel 19. Hasil Analisa Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

Kondisi Analisa	e	$\frac{1}{6} B$	Keterangan	σ	σ ijin	Keterangan
Normal Gempa	0,050	1,756	Aman	9,270	63,785	Aman
Banjir Gempa	-0,390	1,756	Aman	9,110	63,785	Aman

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

K. Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Tanah (Piping)

Gambar 11 menampilkan pola aliran rayapan pada tubuh dan fondasi bendung yang digunakan untuk menghitung panjang lintasan rayapan pada kondisi eksisting.



Gambar 11. Aliran Rayapan.

[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Data:

Δh = 5,3 m

C Bligh = 13,5 (Pasir sedang)

C Lane = 6 (Pasir sedang)

Pada Tabel 20 menunjukkan panjang rayapan vertikal (Lv) sebesar 16 meter, panjang rayapan horizontal (Lh) sebesar 43,54 meter, serta nilai sepertiga panjang rayapan horizontal (1/3Lh) sebesar 14,513 meter. Parameter ini digunakan sebagai input utama pada perhitungan panjang lintasan rembesan baik dengan metode Bligh maupun metode Lane.

Tabel 20. Hasil Perhitungan Panjang Rayapan yang Terjadi

Titik	Garis	Panjang Rayapan		
		Lv (m)	Lh (m)	1/3 Lh (m)
A	A - B	2		
B	B - C		0,5	0,167
C	C - D	1,6	0,3	0,1
D	D - E		15,4	5,133
E	E - F	0,2	2,04	0,68
F	F - G		0,76	0,253
G	G - H	3,4		
H	H - I		2	0,667
I	I - J	1,2	0,7	0,233
J	J - K		4,1	1,367
K	K - L	1,5		
L	L - M		16,36	5,453
M	M - N	1,7	0,38	0,127
N	N - O		1	0,333
O	O - P	4,4		
Jumlah		16	43,54	14,513

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Hasil evaluasi pada Tabel 21 dengan Metode Bligh dan Metode Lane menunjukkan bahwa pada kondisi air normal, desain eksisting tidak aman terhadap piping, sedangkan pada kondisi banjir dinyatakan aman. Sehingga diperlukan perbaikan desain pada bendung supaya aman.

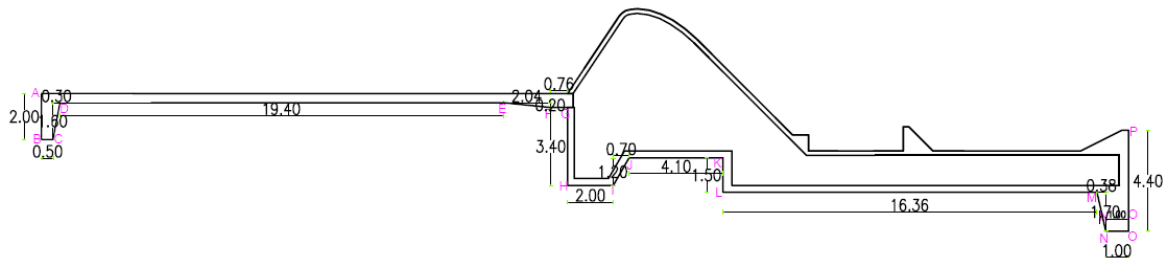
Tabel 21. Hasil Analisa Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Tanah (Piping)

Kondisi Analisa	Teori Bligh		Keterangan	Teori Lane		Keterangan
	ΣL (m)	$\Delta h \times C$ (m)		CL Analisa	CL Syarat	
Air Normal	59,540	71,550	Tidak Aman	5,757	6	Tidak Aman
Air Banjir	59,540	46,845	Aman	8,793	6	Aman

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

L. Solusi Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Tanah (Piping)

Gambar 12 memperlihatkan pola aliran rayapan pada tubuh dan pondasi bendung sebagai dasar perhitungan panjang lintasan rayapan dalam desain solusi stabilitas terhadap erosi bawah tanah (piping).



Gambar 12. Aliran Rayapan.

[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

Data:

Δh = 5,3 m

C Bligh = 13,5 (Pasir sedang)

C Lane = 6 (Pasir sedang)

Pada Tabel 21 menunjukkan L_v sebesar 16 meter, L_h sebesar 47,54 meter, serta nilai $\frac{1}{3}L_h$ sebesar 15,847 meter. Parameter ini digunakan sebagai input utama pada perhitungan panjang lintasan rembesan baik dengan metode Bligh maupun metode Lane.

Tabel 20. Hasil Perhitungan Panjang Rayapan yang Terjadi

Titik	Garis	Panjang Rayapan		
		L_v (m)	L_h (m)	$\frac{1}{3} L_h$ (m)
A	A – B	2		
B	B – C		0,5	0,167
C	C – D	1,6	0,3	0,1
D	D – E		19,4	6,467
E	E – F	0,2	2,04	0,68
F	F – G		0,76	0,253
G	G – H	3,4		
H	H – I		2	0,667
I	I – J	1,2	0,7	0,233
J	J – K		4,1	1,367
K	K – L	1,5		
L	L – M		16,36	5,453
M	M – N	1,7	0,38	0,127
N	N – O		1	0,333
O	O – P	4,4		
Jumlah		16	47,54	15,847

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

Evaluasi Metode Bligh menunjukkan desain solusi tidak aman pada kondisi air normal, namun aman pada kondisi banjir, sedangkan Metode Lane menilai desain aman pada kedua kondisi. Mengacu pada KP.02 Bangunan Utama yang merekomendasikan teori Lane, dapat disimpulkan bahwa penambahan apron hulu sepanjang 4 meter membuat bendung aman terhadap risiko piping.

Tabel 22. Hasil Solusi Stabilitas Terhadap Erosi Bawah Tanah (Piping)

Kondisi Analisa	Teori Bligh		Keterangan	Teori Lane		Keterangan
	ΣL (m)	$\Delta h \times C$ (m)		CL Analisa	CL Syarat	
Air Normal	63,540	71,550	Tidak Aman	6,008	6	Aman
Air Banjir	63,540	46,845	Aman	9,117	6	Aman

[Sumber: Hasil Perhitungan, 2025]

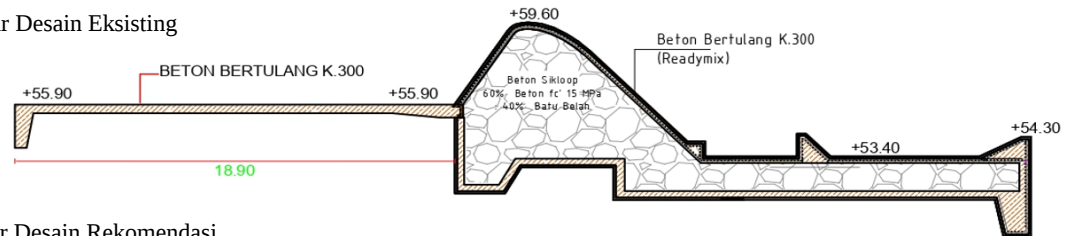
M. Desain Akhir Rekomendasi

Gambar 13 menunjukkan perbedaan signifikan panjang apron hulu bendung antara kondisi eksisting dan desain akhir yang direkomendasikan. Apron hulu eksisting relatif pendek, sehingga perhitungan manual menyatakan struktur belum memenuhi kriteria keamanan terhadap erosi bawah tanah (piping),

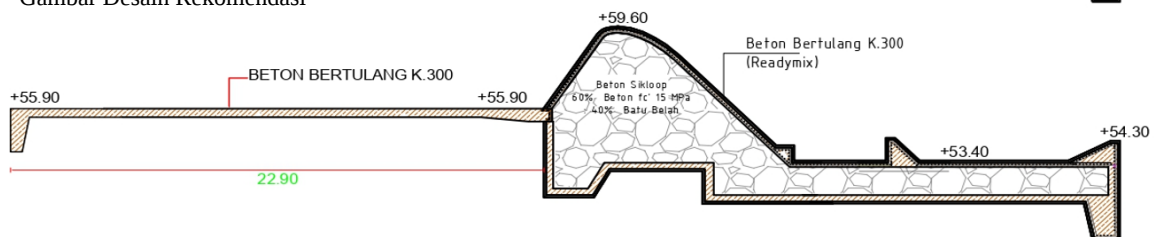
yang berisiko melemahkan pondasi dan mengancam stabilitas bendung. Pada desain akhir, panjang apron hulu ditambah 4 meter, memperpanjang lintasan rembesan dan

mengurangi risiko terbentuknya jalur erosi bawah tanah. Dengan demikian, desain akhir memenuhi kriteria keamanan dan menjaga stabilitas bendung pada berbagai kondisi aliran.

Gambar Desain Eksisting



Gambar Desain Rekomendasi



Gambar 13. Perbandingan Desain Eksisting dan Hasil Desain Rekomendasi.
[Sumber: Hasil Analisis, 2025]

5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan menunjukkan faktor keamanan guling sebesar 5,817 pada kondisi normal gempa dan 3,438 pada kondisi banjir gempa. Faktor keamanan geser masing-masing sebesar 1,793 dan 1,181, sedangkan faktor keamanan daya dukung tanah sebesar 9,270 dan 9,110. Nilai tersebut berada di atas standar minimum yang dipersyaratkan, sehingga Bendung Boreng dinyatakan aman terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah pada seluruh kondisi pembebanan yang dianalisis.
2. Berdasarkan metode Bligh, panjang lintasan rayapan (creep length) diperoleh 59,540, sedangkan metode Lane memberikan nilai 5,757 untuk kondisi air normal dan 8,793 untuk kondisi air banjir. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur eksisting masih memiliki potensi risiko piping, khususnya pada kondisi air normal.

3. Perhitungan dengan penambahan apron menghasilkan panjang rayapan 63,540 pada metode Bligh, serta creep length 6,008 kondisi air normal dan 9,117 kondisi air banjir pada metode Lane. Meskipun ada peningkatan, kondisi eksisting tetap dinyatakan belum sepenuhnya aman terhadap piping. Oleh karena itu, direkomendasikan penambahan apron sepanjang 4 meter di sisi hulu bendung untuk memperpanjang lintasan rembesan dan meningkatkan keamanan struktur.

B. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan penelitian yang telah dilakukan terdapat beberapa saran, diantaranya:

1. Potensi piping saat kondisi normal dapat diatasi dengan menambah apron 4 meter di sisi hulu.
2. Untuk perencanaan ke depan, sebaiknya dilakukan analisis stabilitas dengan bantuan perangkat lunak geoteknik atau numerik agar hasil yang diperoleh lebih akurat dan mempertimbangkan kondisi tanah secara tiga dimensi.
3. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk menguji efektivitas berbagai alternatif perkuatan terhadap potensi

pipings, sehingga dapat memberikan solusi yang lebih optimal dan ekonomis.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Alviano, H. G., Asmaranto, R., & Hendrawan, A. P. (2024). *Analisa Stabilitas Bendung Penggung Kecamatan Wonosegoro* *Stability Analysis of Penggung Weir Wonosegoro District Boyolali Regency*. 04(01), 1129–1139.
- Darojad, H. M. (2024). *Analisis stabilitas tubuh bendung pada pembangkit listrik tenaga mini hidro sumber jaya lampung barat*.
- Firmansyah, M. Y., & Purwahono, F. P. (2023). Analisa Stabilitas Bendung (Studi Kasus: Bendungan Pacal Kabupaten Bojonegoro). *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 2(1), 109–123.
<https://doi.org/10.58169/saintek.v2i1.140>
- Iskandar, R. (2023). *Analisis Stabilitas Bendung Serdang Menggunakan Sap2000*. UNIVERSITAS MEDAN AREA.
- Jamir, M., Hidayat, T. Al, Mahmuddin, M., & ... (2023). Evaluasi kinerja Bendung Bettu Kabupaten Bulukumba. *Jurnal Teknik Sipil* ..., 30–36.
<https://jurnal.ft.umi.ac.id/index.php/jtسم/article/view/676>
- Kementerian PU. (2013). *KP02-BangunanUtama*.
- Laputty, A., Nara, O. D., & Titaley, H. D. (2025). Analisa Kinerja Bendung Wae Leman Desa Wae Tina Kecamatan Wae Lata Kabupaten Buru. *Multidisiplin Ilmu Akademik*, 2(1), 719–726.
- Ma, W., Zhang, G., Yang, Y., Wang, P., Zhao, Y., & Lin, Q. (2022). The Piping Failure Mechanism of a Loess Dam: The 2021 Dam Break of the Yang Village Reservoir in China. *Frontiers in Earth Science*, 10(June), 1–10.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.892179>
- Mariano Jinotra, B., Mundra, I. W., & Aziz, S. (2021). Desain Ulang Bendung Untuk Peningkatan Debit Air Irigasi Desa Nangka Kecamatan Satarmese Kabupaten Manggarai. *Sondir*, 5(2), 31–39.
<https://doi.org/10.36040/sondir.v5i2.4198>
- Nainggolan, U. S. O. (2023). *STUDI PERBANDINGAN STABILITAS TUBUH BENDUNG DENGAN MATERIAL INTI GEOMEMBRANE MENGGUNAKAN APLIKASI GEOSTUDIO*.
- Nisa, A. R., Asmaranto, R., & Prasetyorini, L. (2023). Studi Evaluasi Stabilitas Bendung dan Perencanaan Rehabilitasi Bendung Margopadang di Kabupaten Magetan Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(1), 503–515.
<https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2023.03.01.43>
- Pinandito, G., & Harsanto, P. (2021). *Analisis Stabilitas Bendung Kamijoro*. 1(1), 33–42.
- Rachmanto, D. H., Robbi, R., Alam, R., & Indriyani, D. (2024). Analisis Spasial Risiko Banjir Bandang dengan Simulasi Keruntuhan Bendungan (Dam Break) pada Bendungan Randugunting. *Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 30–44.
- Ramadan, M., Jia, J., Zhao, L., Li, X., & Wu, Y. (2024). Comprehensive Safety Analysis of Ultimate Bearing Capacity Considering Hydraulic Fracture for Guxian High RCC Gravity Dam. *Water (Switzerland)*, 16(13).
<https://doi.org/10.3390/w16131912>
- Rizal, N. S. (2019). *Irigasi & Bangunan Air* (Issue December 2020).
- Simanjuntak, J. O., Zai, E. O., & Zega, T. (2025). *BENDUNG PLTM PARMONANGAN I*. 4(2), 37–52.
- Sitinjak, R. R. (2023). *ANALISIS STABILITAS BENDUNG SAAT KONDISI NORMAL DAN BANJIR PADA PROYEK PEMBANGUNAN BENDUNG SEI PADANG D.I. BAJAYU TEBING TINGGI SUMATERA UTARA*.
- Suherlan, H. (2021). Kajian Kerusakan Dan Keruntuhan Tubuh Bendung Akibat Pengaruh Banjir (Studi Kasus : Bendung Cipamingkis Kab. Bogor). *Techno-Socio Ekonomika*, 14(2), 113–125.
<https://doi.org/10.32897/techno.2021.14.2.760>
- Supriyanto, S. (2022). *ANALISA DAYA DUKUNG TANAH BERDASAR DATA : SONDIR, NSPT dan LABORATORIUM (Studi Kasus di BTN Hamzy Makassar)*. *Jurnal KaLIBRASI: Karya Lintas Ilmu*

- Bidang Rekayasa Arsitektur, Sipil, Industri*, 5(1), 105–114.
<https://doi.org/10.37721/kalibrasi.v5i1.975>
- Udin, U., Khamid, A., Taufiq, M., Denny Apriliano, D., & Imron. (2021). Optimasi Debit Air Saluran Irigasi pada Bendung Sungapan Kecamatan Pemalang Studi Kasus Saluran Induk Simangu 844,74 Ha. *Infratech Building Journal (IJB)*, 2(1), 42–48.
- Waluyo, T. C. (2025). *Perancangan Ulang Bendung Badran di Kabupaten Temanggung Provinsi Jawa Tengah*.